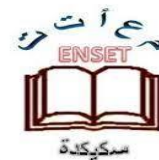




République algérienne démocratique et populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la
Recherche Scientifique
Ecole Normale Supérieure de l'Enseignement
Technologique-Skikda



Département de Technologie

Filière : Génie Mécanique

Mémoire

**Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de
Prof d'Enseignement Secondaire**

Thème :

ETANCHEITE

Calcul et choix d'une garniture mécanique pour une pompe

Présenté par :

BOUFAROU Mohamed Akram

BENHALIMA Aymen

BASSOU Ahmed

Encadrant :

KHERIEF Nacereddine Mohamed

Jury de Soutenance:

Nom et prénom	Grade	Université	Rôle
M. BENSACI	MCB	ENSET Skikda	Président
N.M. KHERIRF	MCA	ENSET Skikda	Encadrant
B. ISSASFA	MCA	ENSET Skikda	Examineur

Année Universitaire : 2024/2025

REMERCIEMENTS

Louange à **Allah**, Maître des mondes, que nous remercions et louons pour le soutien, la persévérance et la réussite qu'Il nous a accordés tout au long de notre parcours éducatif, et sans lesquels l'accomplissement de ce travail n'aurait pas été possible.

Nous exprimons notre profonde gratitude à Monsieur **BOUDJAADAR Djamel**, Directeur de l'École Normale Supérieure de l'Enseignement Technologique, pour les moyens pédagogiques et logistiques mis à notre disposition, ainsi que pour les conditions favorables qu'il a su instaurer afin d'assurer le bon déroulement de notre formation académique.

Nous adressons également nos remerciements les plus sincères à Monsieur **RAHMOUNI Salih**, Chef du Département de Technologie, pour la qualité de son accompagnement tout au long des cinq années de formation. Sa bienveillance, son engagement constant, et son attitude toujours respectueuse ont profondément marqué notre parcours. Bien au-delà du cadre formel liant l'enseignant à l'étudiant, il a su incarner l'image d'un père attentionné et dévoué.

Nos remerciements les plus chaleureux vont aussi à notre encadrant, Monsieur **KHERIEF Nasreddine Mohamed**, pour son suivi rigoureux, ses conseils éclairés et son accompagnement constant tout au long de la réalisation de ce mémoire. Son encadrement a été d'une grande valeur pour l'aboutissement de ce travail.

Nous adressons aussi nos remerciements à l'ensemble des enseignants du Département de Technologie, en particulier à ceux de la spécialité Génie Mécanique, pour leur implication, leur disponibilité et leur générosité dans le partage de leurs connaissances. Leurs efforts ont largement contribué à notre formation académique et professionnelle.

Enfin, nous tenons à remercier toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail.

Dédicaces

À ceux qui ont été un véritable soutien à chaque étape de ce parcours...

À mes chers parents, qui n'ont ménagé ni efforts ni sacrifices pour que j'atteigne ce stade de ma vie.

Je leur exprime toute ma gratitude et ma reconnaissance.

À mes frères et sœurs bien-aimés, en particulier mon frère Aymen, qui fut mon premier soutien.

Qu'Allah le récompense généreusement et lui accorde de Ses bienfaits immenses.

Je dédie également ce travail à mes binômes dans ce mémoire, Aymen et Ahmed, ainsi qu'à leurs familles respectives, en témoignage de reconnaissance pour les efforts fournis et le soutien constant.

Je l'offre aussi à toute la promotion PEST 2020-2025, et plus spécialement à mes camarades de la classe Génie Mécanique, compagnons de route durant ces cinq années riches en défis et en accomplissements.

Je vous souhaite à tous une carrière professionnelle brillante et une vie pleine de réussite.

Mohamed Akram. B

À tous ceux qui ont été présents et bienveillants tout au long de ce parcours...

À mes parents, piliers de ma vie, pour leurs sacrifices et leur amour inconditionnel. Je leur adresse ma plus sincère reconnaissance.

À mes frères et sœurs, premiers à me soutenir. Qu'Allah les récompense et les comble de Ses bienfaits.

Je dédie également ce mémoire à mes collègues Mohamed Akram et Ahmed, pour leur implication et leur esprit d'équipe, ainsi qu'à leurs familles pour leur soutien.

Enfin, à tous mes camarades de la promotion PEST 2020-2025, et particulièrement à ceux de la filière Génie Mécanique, avec qui j'ai partagé cinq années d'efforts, de défis et de réussites. Je vous souhaite à tous un avenir brillant et riche en accomplissements.

Aymen. B

À mes chers parents, sources de lumière et de sérénité ; qu'Allah les récompense et leur accorde le Paradis éternel.

À mes frères et sœurs, piliers de mon cœur et compagnons de mon parcours ; qu'Allah les comble de Ses bienfaits et de Sa miséricorde.

À mes compagnons de mémoire, Mohamed Akram et Aymen, pour leur engagement sincère et leur précieuse collaboration.

À leurs familles, pour leur soutien constant et leur présence réconfortante.

À mes fidèles amis : K. Tayeb, A. Mohamed et G. Abed, véritables soutiens dans les moments d'épreuve.

À mes camarades de la promotion PEST 2020-2025, notamment ceux du Génie Mécanique, compagnons d'efforts et de défis.

À vous tous, ma profonde gratitude et mes vœux sincères de réussite, de bonheur et de prospérité.

Ahmed. B

ملخص:

تتناول هذه المذكرة موضوع الختم الميكانيكي باعتباره عنصراً أساسياً في الأنظمة الصناعية، وخاصة في المضخات، حيث بدأنا بدراسة الاحكام الميكانيكي وأنواعه المختلفة، ثم تطرقنا إلى تطبيقاتها في الأجهزة الصناعية ومكوناتها المتنوعة. وقد شكل الختم الميكانيكي محور الدراسة، حيث تم تحليل مكوناته، أنواعه، وطريقة تركيبه، مع إبراز أهميته في منع التسرب داخل المضخات وضمان كفاءتها. وفي الجزء التطبيقي، قمنا بإجراء الحسابات اللازمة لتصميم ختم ميكانيكي مناسب لمضخة محورية عمودية، ثم نمذجناه باستخدام أدوات التصميم الهندسي لتوضيح أبعاده وشكله النهائي بدقة.

Résumé:

Ce mémoire traite de la garniture mécanique en tant qu'élément essentiel dans les systèmes industriels, en particulier dans les pompes. Nous avons commencé par l'étude de l'étanchéité mécanique et de ses différents types, avant d'aborder ses applications dans les dispositifs industriels et leurs divers composants. La garniture mécanique a constitué l'axe principal de notre étude, où nous avons analysé ses composants, ses types et son mode d'installation, tout en soulignant son importance dans la prévention des fuites et le maintien de l'efficacité des pompes. Dans la partie pratique, nous avons effectué les calculs nécessaires pour concevoir une garniture mécanique adaptée à une pompe axiale verticale, puis nous l'avons modélisée à l'aide d'outils de conception assistée par ordinateur afin d'en représenter précisément les dimensions et la forme finale.

Abstract:

This thesis focuses on the mechanical seal as a key component in industrial systems, particularly in pumps. We began by studying mechanical sealing and its various types, then explored its applications in industrial equipment and its different components. The mechanical seal formed the core of our study, where we analyzed its components, types, and assembly methods, highlighting its importance in preventing leakage and maintaining pump efficiency. In the practical section, we carried out the necessary calculations to design a mechanical seal suitable for a vertical axial pump, and then modeled it using computer-aided design tools to accurately represent its dimensions and final form.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I : Généralités sur l'étanchéité	3
I.1 Définition	4
I.2 Types d'étanchéités	4
I.2.1 Étanchéité statique :	4
I.2.1.1 Etanchéité statique directe :	5
I.2.1.2 Etanchéité statique indirecte :	5
I.2.2 Étanchéité dynamique :	6
I.2.2.1 Principes :	6
I.2.2.2 Types d'étanchéité dynamique :	6
I.3 Conclusion :	10
CHAPITRE II : Les processus d'étanchéité dans les systèmes industriels	11
II.1 Introduction	12
II.2 Classification des systèmes d'étanchéité selon la nature du fluide	12
II.2.1 Étanchéité pour les fluides liquides :	12
II.2.2 Étanchéité pour les fluides gazeux :	13
II.2.3 Etanchéité pour fluide toxique :	13
II.3 Processus d'étanchéité dans les applications industrielles	13
II.3.1 Étanchéité dans les turbines	13
II.3.1.1 Les systèmes d'étanchéité utilisés dans les turbines	15
II.3.2 Étanchéité dans les compresseurs	18
II.3.3 Contraintes liées aux hautes pressions et températures élevées	20
II.3.3.1 Les systèmes d'étanchéité utilisés dans les compresseurs	20
II.3.4 Étanchéité dans les vérins hydrauliques	21
II.3.4.1 Importance de l'étanchéité dans les systèmes hydrauliques	21
II.3.4.2 Les systèmes d'étanchéité utilisés dans les vérins hydrauliques	21
II.3.5 Étanchéité dans les tuyauteries	22
II.3.5.1 Nécessité d'une bonne étanchéité pour le transport des fluides et des gaz	22
II.3.5.2 Les systèmes d'étanchéité utilisés dans les tuyauteries	23
II.3.6 Étanchéité dans les pompes	23
II.3.6.1 Classification des pompes	24
II.3.6.2 Importance de l'étanchéité dans les pompes	27

II.3.6.3	Systèmes d'étanchéité utilisés dans les pompes.....	27
II.4	Conclusion.....	27
CHAPITRE III : Étude de la garniture mécanique.....		29
III.1	Historique.....	29
III.2	Les garnitures mécaniques	30
III.2.1	Définition :	30
III.2.2	Principe de fonctionnement des garnitures mécaniques :	31
III.2.3	Différents types de garnitures:	32
III.2.3.1	Sélection du type de garnitures :	32
III.2.3.2	Paramètres influents :	32
III.2.3.3	Variantes de conception :	36
III.2.4	Sélection du type de montage :	36
III.2.4.1	Montage simple :.....	36
III.2.4.2	Montage tandem :.....	37
III.2.4.3	Montage double:.....	38
III.2.5	Caractéristiques des garnitures mécaniques :.....	38
III.2.5.1	Garniture mécanique stable :.....	38
III.2.5.2	Garniture mécanique instable :.....	39
III.2.6	Systèmes de rinçage des garnitures mécaniques :.....	39
III.2.7	Systèmes de QUENCH :	40
III.3	La norme API 682	41
III.3.1	Historique :	41
III.3.2	Généralité :	42
III.3.2.1	Dimension :	42
III.3.2.2	Catégories de joint:.....	42
III.3.2.3	Types de joint:.....	44
III.4	Conclusion.....	48
CHAPITRE IV : Calcul et conception de la garniture mécanique.....		50
IV.1	Introduction	50
IV.2	Etude de cas :	50
IV.2.1	Schéma et caractéristiques de la pompe :.....	50
IV.2.2	Rôle de la pompe « booster » dans le process :.....	51
IV.3	Système d'étanchéité actuelle de la pompe booster :.....	51
IV.3.1	Présentation du système « garniture à tresses » ou presse-étoupe :	51
IV.3.2	Types de tresses d'étanchéité.....	52

IV.3.3	Failles de l'étanchéité à tresses	53
IV.4	Solution proposée.....	54
IV.4.1	Critères de choix du type de garniture	55
IV.5	Précision du type de garniture mécanique.....	56
IV.5.1	Présentation de la garniture mécanique simple mono-ressort compensée	56
IV.5.2	Eléments composants :	56
IV.5.3	Matériaux utilisée:.....	57
IV.5.4	Principe de fonctionnement :.....	57
IV.5.5	Justification du choix:	58
IV.5.5.1	Garniture simple:.....	58
IV.5.5.2	Garniture à ressort:	58
IV.5.5.3	Garniture mono-ressort:	59
IV.5.5.4	Garniture compensée:.....	59
IV.5.6	Dimension de la garniture:	59
IV.6	Le Plan API 13	60
IV.6.1	Définition du plan 13:	60
IV.6.2	Conditions d'utilisation d'un plan 13 :.....	61
IV.6.3	Considérations prises lors de l'installation d'un plan 13 :	61
IV.7	Dimensionnement du plan 13.....	62
IV.7.1	Calcul du débit:	62
IV.7.2	Calcul du diamètre de l'orifice :	64
IV.8	Démontage d'une garniture tresse.....	64
IV.8.1	Outillage nécessaire:	64
IV.8.2	Procédure de démontage d'une garniture à tresse :	64
IV.8.3	Procédure de montage d'une garniture mécanique :	64
IV.9	Maintenance	65
IV.10	La durée de vie	66
IV.11	Comparaison entre 2 modèles	66
IV.11.1	Garniture à ressort « Flowserve UC » :.....	66
IV.11.2	John crane TYPE 5610Q-1/5620P-1/5620D-1:	68
IV.11.3	Comparaison entre les 2 modèles :.....	69
IV.12	Conception du dispositif	69
IV.12.1	Objectif:.....	69
IV.12.2	Conception CAO:.....	70
IV.12.2.1	Apport de SolidWorks :.....	71

IV.12.2.2	Fonctionnalités principales utilisées:	71
IV.12.2.3	Avantages du logiciel :	73
IV.12.3	Choix des matériaux:	74
IV.12.4	Modélisation géométrique du dispositif:	74
IV.12.4.1	Partie mobile de la garniture :	75
IV.12.4.2	Partir fixe de la garniture :	76
IV.12.4.3	Modèle en perspective démonté de la garniture mécanique :	77
IV.12.4.4	Assemblage de garniture:	77
IV.12.5	Choix des joints toriques:	77
IV.12.6	Localisation des joints toriques:	78
IV.12.7	Choix du matériaux:	78
IV.13	Fabrication du dispositif.....	79
IV.13.1	Matériels utilisés	79
IV.14	Feuille d'analyse de fabrication	80
IV.14.1	Exemple pour bague N°1	80
	Dessins de définition de chaque composant de la garniture mécanique	92
	CONCLUSION ET PERSPECTIVES	99
	Référence bibliographique	102
	ANNEXES	104

LISTE DES FIGURES

Chapitre I

Figure I.1: Différents types d'étanchéité4
Figure I.2: Bride DILO : (a) ensemble ; (b) détail du joint.....5
Figure I.3: Joint d'étanchéité6
Figure I.4: Mouvement parallèle au gradient de pression.....6
Figure I.5: Mouvement perpendiculaire au gradient de pression7
Figure I.6: Dispositifs d'étanchéités (a) radiale (b) & (c) axiales $p_1 > p_2$ 7
Figure I.7: Labyrinthes graissés (radial & axial)8
Figure I.8: Exemple sur une broche de tour (25 KW pour 2400 tours/minute).....8
Figure I.9: Distribution des températures autour d'un joint à lèvres.....8
Figure I.10: Joint annulaire / Joint labyrinthe9
Figure I.11: Joint à lèvres / Garniture mécanique9

Chapitre II

Figure II.1: Turbine à gaz14
Figure II.2: Turbine à vapeur14
Figure II.3: Joints de pales15
Figure II.4: Étanchéité par film d'huile15
Figure II.5: Joints labyrinthes16
Figure II.6: Joints mécaniques17
Figure II.7: Joints mécaniques17
Figure II.8: Contre-pression ou soufflage18
Figure II.9: Compresseurs volumétriques alternatifs (à piston)19
Figure II.10: Compresseurs volumétriques Rotatifs (à vis, à palettes)19
Figure II.11 : Compresseurs dynamiques axiaux19
Figure II.12: Compresseurs dynamiques centrifuges20
Figure II.13: Les joints de piston21
Figure II.14: Les joints de tige22
Figure II.15: Joints industriels23
Figure II.16: Les pompes volumétriques alternatives24
Figure II.17: Les pompes volumétriques rotatives24
Figure II.18: Les pompes hydrauliques non volumétriques (roto-dynamique)25
Figure II.19: Les pompes centrifuges (à écoulement radial)25
Figure II.20: Pompes hélico-centrifuges26
Figure II.21: Pompes hélices26

Chapitre III

Figure III.1: a) garniture mécanique simple b) bague d'étanchéité élastique à effet axial.29
Figure III.2: Constitution d'une garniture mécanique30
Figure III.3: Description sommaire d'une garniture mécanique31

Figure III.4: Types de garnitures	32
Figure III.5: Garnitures à joint semi-dynamique (à ressort).....	34
Figure III.6: Garnitures à soufflet ou membrane.....	35
Figure III.7: Différents types de rainures	36
Figure III.8: Montage simple.....	37
Figure III.9: Montage tandem.....	37
Figure III.10: Montage double	38
Figure III.11: Systèmes de rinçage des garnitures mécaniques.....	39
Figure III.12: API Plan 62	41
Figure III.13: Un joint du type A.....	45
Figure III.14: Un joint du type B.....	45
Figure III.15: Un joint du type C.....	46

Chapitre IV

Figure IV.1: Pompe Byron Jackson avec coupe verticale	50
Figure IV.2: Schéma simplifié de la garniture à tresse	52
Figure IV.3: Tresses à section carrée	52
Figure IV.4: Tresses à section trapézoïdale	53
Figure IV.5: Eléments composants	56
Figure IV.6: Principe de fonctionnement.....	57
Figure IV.7: Différents paramètres de dimensions d'une garniture.	60
Figure IV.8: Plan 13.....	61
Figure IV.9: Schéma du plan 13	63
Figure IV.10: Garniture Flowserve UC	66
Figure IV.11: Garniture John Crane Type 5610Q-1	68
Figure IV.12: Le logiciel SolidWorks	70
Figure IV.13: Interface de démarrage SolidWorks.....	71
Figure IV.14: Interface de modularisation d'une pièce dans SolidWorks	72
Figure IV. 15: Interface d'assemblage dans SolidWorks	73
Figure IV. 16: Interface de mise en plan dans SolidWorks	73
Figure IV.18: Bague 2.....	75
Figure IV.19: Rosort.....	75
Figure IV.20: Bague 1.....	75
Figure IV.21: Joint torique Ø116.....	76
Figure IV.22: Bague 3.....	76
Figure IV.23: Joint torique Ø187.....	76
Figure IV.17: Vue tri-métrique de la garniture mécanique.....	77
Figure IV.24: Assemblage de garniture	77
Figure IV.25: Localisation des joints toriques	78
Figure IV.26: Scie mécanique.....	79
Figure IV.27: Tour universel	79
Figure IV.28: Fraiseuse verticale.....	79
Figure IV.29: Coupe A-A de bague 1	80

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre III

Tableau III.1: Types de fluides de quench	40
Tableau III.2: Comparaison des caractéristiques techniques des garnitures mécaniques selon les catégories API 682	43
Tableau III.3: Résumé des plans API 682 appliqués aux garnitures mécaniques.....	46

Chapitre IV

Tableau IV.1: Données techniques et caractéristiques de la pompe.....	51
Tableau IV.2: Condition de service de la pompe	55
Tableau IV.3: Propriétés du fluide à étancher	55
Tableau IV.4: Principales causes de défaillance.....	65

LISTE DES SCHEMAS

Chapitre IV

Schéma IV.1: le chemin suivi sur l'algorithme général pour le choix de systèmes auxiliaires	62
----------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

ABREVIATIONS

AISI	American Iron & Steel Institute
API	American Petroleum Institute
API 610	Norme pour les pompes centrifuges
API 622	Norme d'essai des émissions fugitives des tiges de vannes
API 682	Norme pour les garnitures mécaniques des pompes
FKM	Fluoroélastomère
ISO	International Organization Standardization
ISO 3069	Norme sur les dimensions des enveloppes
ISO 9001	Norme pour les systèmes de management de la qualité
ISO 13709	Norme pour les pompes centrifuges
ISO 15848	Norme sur les émissions de gaz des composants
ISO 21049	Norme pour les garnitures mécaniques des pompes
OIN	Organisation Internationale de Normalisation
PTFE	Polytétrafluoroéthylène (Téflon)
TVR	Tension de vapeur
316 AISI	Acier inoxydable

NOTATIONS

D	Diamètre du cylindre (mm)
g	Gravité
G	Paramètre de service
h	Épaisseur de film (mm)
N	Vitesse de rotation (rad/s ou tour/min)
p_a	Pression atmosphérique (Pa)
p	Pression du fluide dans le film (Pa)
Q	Le débit de fuite (m^3/s ou l/h)
r, θ , z	Coordonnées cylindriques (m, rad, m)
S	Aire où s'applique la pression extérieure (m^2)
t	Le temps (sec)
T	Température (K ou °C)
V	Volume (m^3)
μ	Viscosité dynamique
λ	Le coefficient de conductibilité calorifique
ω	Vitesse de rotation (rad/sec)
ρ	Masse volumétrique

Introduction générale

INTRODUCTION GENERALE

Les pompes jouent un rôle fondamental dans les systèmes industriels modernes, constituant des équipements indispensables pour le transport des fluides dans divers secteurs tels que l'énergie, l'industrie chimique, et la production manufacturière. Leur importance réside dans leur capacité à garantir la continuité des processus opérationnels et à répondre aux exigences de performances élevées. Toutefois, la fiabilité des pompes repose non seulement sur leur conception mécanique, mais également sur l'efficacité de leurs composants internes.

Parmi ces composants, le système d'étanchéité occupe une place centrale. En effet, les pompes, lorsqu'elles sont en fonctionnement, doivent prévenir tout risque de fuite des fluides transportés, que ce soit pour préserver leur efficacité, éviter des pertes économiques, ou garantir la sécurité des installations. Les problèmes d'étanchéité, tels que les fuites, peuvent entraîner des conséquences graves, notamment la contamination des environnements de travail, une usure accélérée des équipements, et des interruptions coûteuses des opérations.

Les garnitures mécaniques, en tant qu'éléments clés du système d'étanchéité, sont conçues pour répondre à ces défis. Ces dispositifs visent à minimiser les pertes de fluides tout en assurant une résistance mécanique élevée face à des conditions d'exploitation souvent sévères. Cependant, malgré leur importance cruciale, les garnitures mécaniques sont fréquemment sujettes à des problèmes d'usure, de défaillance et d'incompatibilité avec certaines conditions de service, ce qui réduit leur efficacité et augmente les coûts de maintenance.

Cela soulève une question fondamentale : Comment optimiser le choix et l'utilisation des garnitures mécaniques pour garantir une étanchéité fiable, réduire les problèmes de défaillance, et améliorer la performance globale des pompes industrielles ?

Pour répondre à cette problématique, cette étude vise à analyser et à optimiser les critères de choix des garnitures mécaniques, en mettant en avant leur rôle essentiel dans l'étanchéité des pompes industrielles. Les objectifs spécifiques de cette recherche sont les suivants :

- Étudier les mécanismes de défaillance des systèmes d'étanchéité et leur impact sur les performances des pompes.
- Identifier les paramètres techniques et opérationnels influençant le choix des garnitures mécaniques, en tenant compte des contraintes telles que la pression, la température et la nature des fluides transportés.
- Proposer une classification des garnitures mécaniques en fonction de leurs performances, leur durabilité et leur compatibilité avec différents environnements industriels.
- Développer des recommandations pratiques pour l'amélioration des systèmes d'étanchéité et la réduction des coûts associés aux opérations de maintenance.

En intégrant ces éléments, cette étude ambitionne de fournir des solutions concrètes et applicables pour améliorer la fiabilité des pompes industrielles, réduire les pertes opérationnelles et garantir une meilleure durabilité des équipements.

Chapitre I

Généralités sur l'étanchéité

I.1 Définition

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. [1]

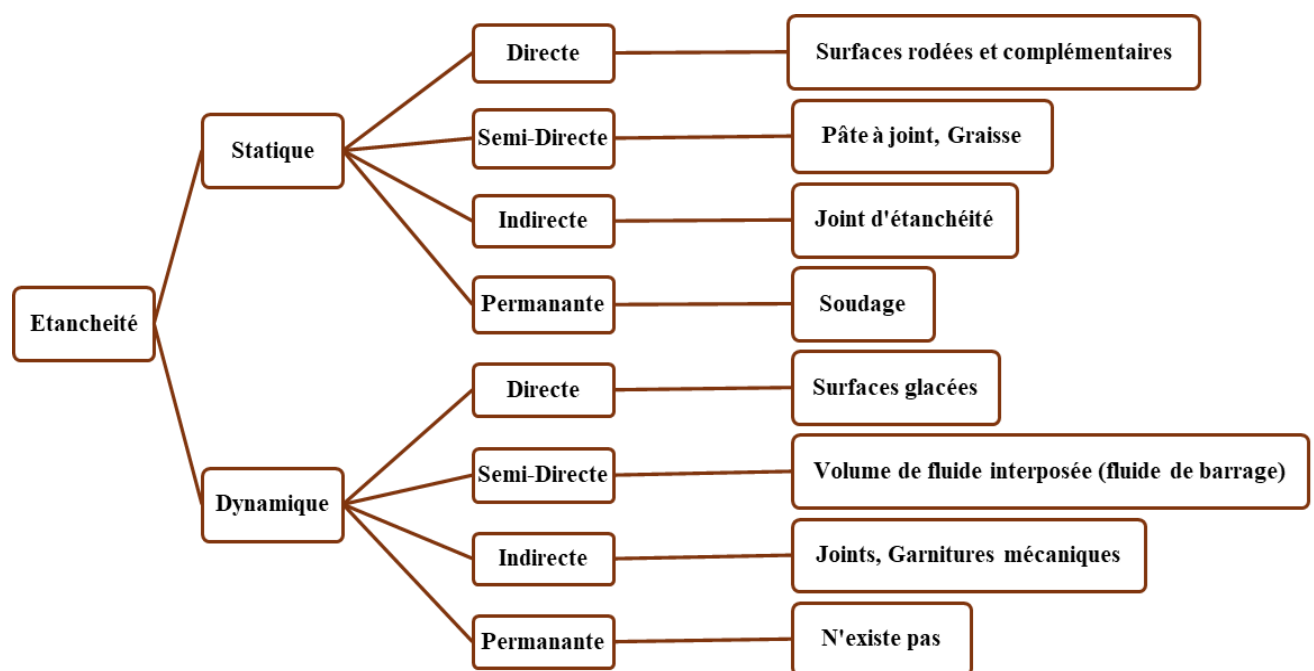


Figure I.1: Différents types d'étanchéité

I.2 Types d'étanchéités

I.2.1 Étanchéité statique :

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. [2]

L'étanchéité statique se fait généralement de deux manières :

I.2.1.1 Etanchéité statique directe :

En pressant fortement deux surfaces métalliques l'une contre l'autre (figure I.2.a), 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 (figure I.2.b) permettent le maintien de cette étanchéité jusqu'à des pressions élevées.

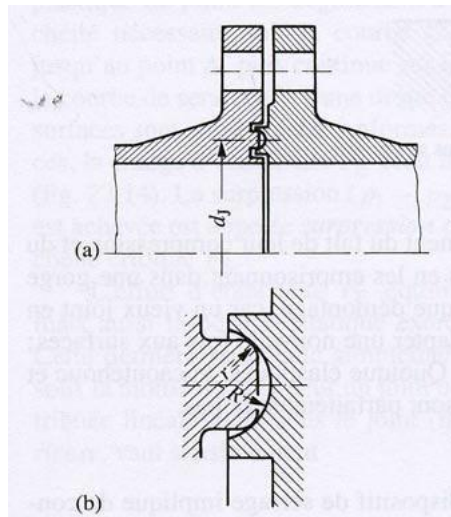


Figure I.2: Bride DILO : (a) ensemble ; (b) détail du joint

I.2.1.2 Etanchéité statique indirecte :

Elle se fait par le biais d'un joint interposé entre les deux pièces, ce joint 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.

Et pour obtenir une étanchéité correcte, il faut que :

- Le matériau du joint présente un comportement plastique (figure I.3).
- 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.

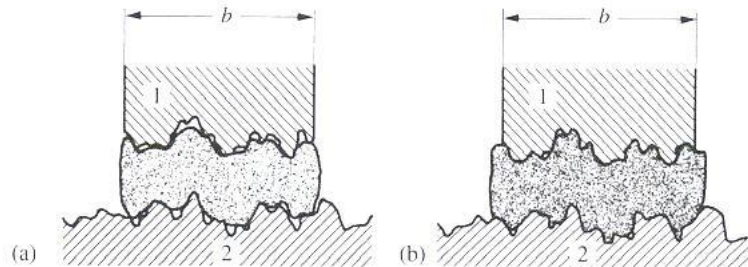


Figure I.3: Joint d'étanchéité

I.2.2 Étanchéité dynamique :

I.2.2.1 Principes :

Une étanchéité est dite dynamique lorsque les surfaces d'étanchéité sont mobiles. On distingue principalement deux cas suivant le type de mouvement entre les pièces (translation ou rotation). [2]

I.2.2.2 Types d'étanchéité dynamique :

Translation :

Une Le mouvement est parallèle au gradient de pression (figure I.4) : 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.

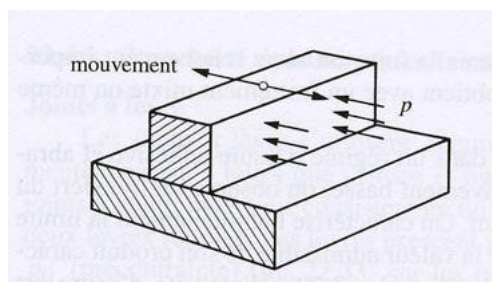


Figure I.4: Mouvement parallèle au gradient de pression

Rotation :

En général le mouvement est perpendiculaire au gradient de pression (figure I.5) :

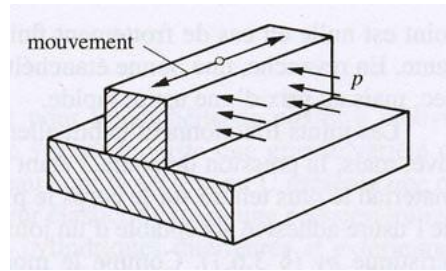


Figure I.5: Mouvement perpendiculaire au gradient de pression

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 I.6).

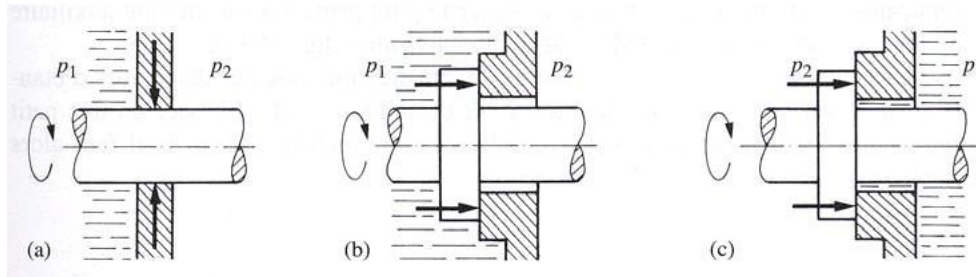


Figure I.6: Dispositifs d'étanchéités (a) radiale (b) & (c) axiales $p_1 > p_2$

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).

• **Etanchéité dynamique directe :**

Les pièces sont en contact par deux surfaces compatibles (cylindre ou plan). Il a été indiqué précédemment, 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.

• **Etanchéité 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. (Figure I.7 et figure I.8) montrent deux solutions (l'une avec de la graisse, l'autre avec un fluide de barrage).

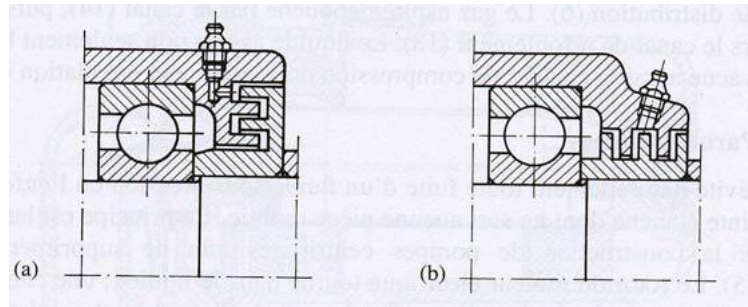


Figure I.7:Labyrinthes graissés (radial & axial)

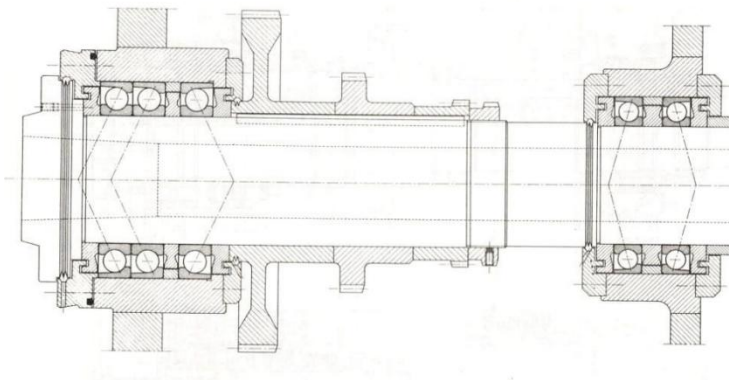


Figure I.8:Exemple sur une broche de tour (25 KW pour 2400 tours/minute)

• **Etanchéité 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 (figure I.9).
- 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...

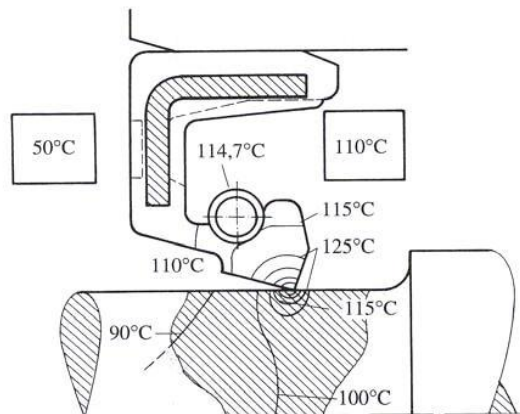


Figure I.9:Distribution des températures autour d'un joint à lèvres

- **Etanchéité d'arbres tournants :**

Des solutions technologiques spécifiques sont retenues, selon que les surfaces d'un mécanisme sont en contact permanent ou non ; leur choix dépend de l'application (encombrement, géométrie des pièces, coût), des fluides en présence (pression, température) et des performances recherchées (débit de fuite, durée de vie, fiabilité). Quelques-unes des plus couramment rencontrées sont présentées sur (la figure I.10) Dans un joint annulaire, l'écoulement autour de l'arbre est causé par la différence de pression entre ses deux extrémités. La résistance à l'écoulement dépend de la longueur de la portée et du jeu radial. Un joint labyrinthe présente une série de « chicanes » sur le parcours du fluide. Les pertes de charge occasionnées font fortement chuter le débit. Ces deux types d'étanchéités fonctionnent sans contact, avec un jeu fixe. L'écoulement s'effectue dans la direction axiale.

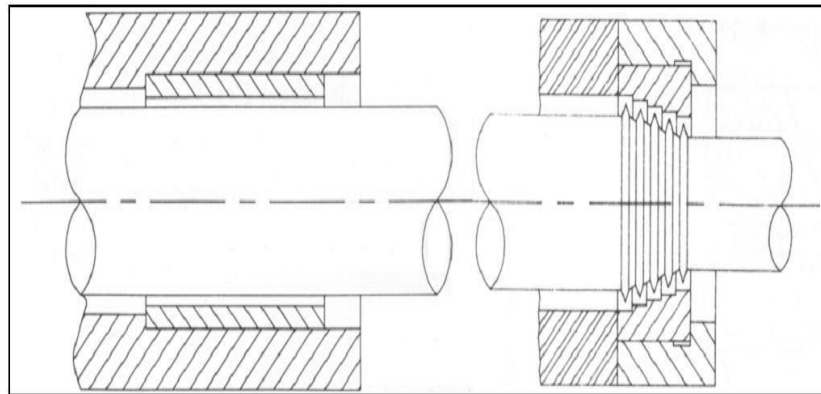


Figure I.10:Joint annulaire / Joint labyrinthe

Les joints à lèvre peuvent assurer une étanchéité radiale ou axiale. Ils sont généralement en élastomère. Il y a contact entre l'arbre et la surface intérieure du joint, mais sur une aire très réduite. A l'inverse, cette aire peut être très étendue sur une garniture mécanique. Ces deux dispositifs d'étanchéité présentés dans (la figure I.11) fonctionnent en conditions de lubrification hydrodynamique ou mixte. [3]

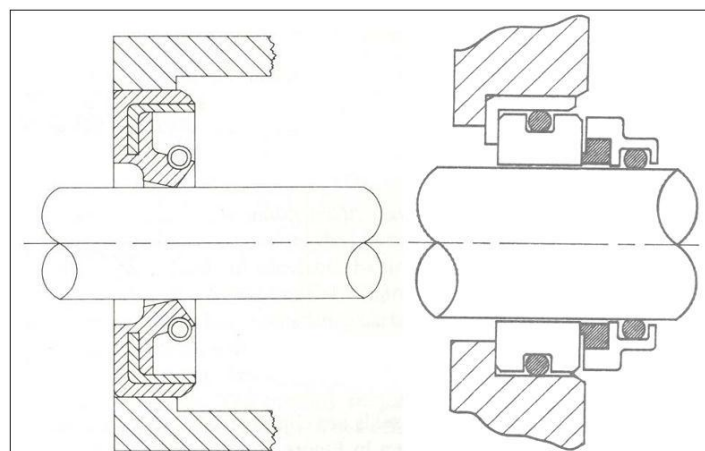


Figure I.11:Joint à lèvre / Garniture mécanique

I.3 Conclusion :

Les garnitures mécaniques sont employées dans un grand nombre de configurations, particulièrement dans des applications à hautes performances (vitesses élevées, forts gradients de pression, hautes températures). Ces composants peuvent être utilisés pour tous types de fluides suivant les matériaux en présence. Le chapitre suivant représente les différents domaines d'utilisation des principaux dispositifs d'étanchéité d'arbres tournants.

Chapitre II
Les processus d'étanchéité
Dans les systèmes industriels

II.1 Introduction

Dans les systèmes industriels, l'étanchéité constitue un paramètre fondamental assurant l'intégrité des équipements et l'efficacité des processus. Une conception adéquate des dispositifs d'étanchéité permet de prévenir les pertes de fluides, de limiter l'usure des composants et d'optimiser la disponibilité opérationnelle des installations.

Les défaillances d'étanchéité, qu'il s'agisse de fuites liquides ou gazeuses, compromettent l'efficacité énergétique des systèmes, entraînent des interruptions non planifiées et augmentent les coûts de maintenance. Elles peuvent également générer des perturbations environnementales et des risques sanitaires, en particulier dans les secteurs manipulant des substances toxiques ou inflammables.

La sélection d'un système d'étanchéité repose sur une analyse rigoureuse de divers paramètres physiques et chimiques. Les principaux facteurs influençant cette sélection incluent la pression et la température du fluide, la nature du milieu véhiculé (hydrocarbures, fluides cryogéniques, produits corrosifs), la dynamique des surfaces en contact (vitesse de rotation, frottement) ainsi que les contraintes environnementales spécifiques (exposition aux agents oxydants, vibrations, variations thermiques).

Ce chapitre se propose d'examiner de manière approfondie les principes fondamentaux de l'étanchéité industrielle, en mettant en évidence son rôle stratégique dans la pérennité des équipements, les effets délétères des fuites, ainsi que les critères de conception et de sélection des solutions d'étanchéité adaptées aux exigences des environnements industriels complexes.

II.2 Classification des systèmes d'étanchéité selon la nature du fluide

L'étanchéité mécanique peut être classée en fonction de la nature du fluide à contenir, car les caractéristiques physiques et chimiques des liquides et des gaz influencent directement le choix des solutions d'étanchéité. Ainsi, les méthodes et les matériaux utilisés diffèrent pour garantir une performance optimale et une sécurité maximale dans chaque application industrielle. Par conséquent, elle peut être classée en :

II.2.1 Étanchéité pour les fluides liquides :

Dans les systèmes industriels, l'étanchéité mécanique aux liquides joue un rôle essentiel dans le maintien de l'efficacité des équipements et la prévention des pertes de fluides qui pourraient compromettre les performances opérationnelles. En raison de leur densité et viscosité élevées, les liquides sont plus faciles à contenir que les gaz, ce qui permet l'utilisation de dispositifs d'étanchéité tels que les joints en élastomère, les bagues toriques (O-rings), les garnitures mécaniques simples ou doubles et les joints à lèvres. Ces systèmes fonctionnent en appliquant une pression équilibrée entre les surfaces en contact, minimisant ainsi le risque de fuite, même dans des conditions de température et de pression variables. De plus, l'adhérence naturelle des liquides aux parois des composants facilite l'obtention d'un joint efficace. Pour garantir une étanchéité optimale, ces systèmes sont soumis à des normes strictes, telles que l'ASME B16.20 et l'API 682, qui régissent les performances des solutions d'étanchéité et assurent la durabilité des installations industrielles. [4]

II.2.2 Étanchéité pour les fluides gazeux :

À l'inverse, l'étanchéité mécanique aux gaz requiert des solutions techniques plus avancées en raison de la faible viscosité des gaz et de leur capacité élevée à s'infiltrer à travers les micro-interstices. La prévention des fuites gazeuses constitue un défi majeur, notamment dans les environnements où les pressions et températures sont élevées. Ainsi, des technologies sophistiquées sont mises en œuvre, comme les garnitures mécaniques à gaz sec (Dry Gas Seals), les joints métalliques spiralés, les joints toriques en polymères fluorés (PTFE, FKM) et les systèmes d'étanchéité labyrinthe ou à soufflet. Ces solutions permettent d'assurer une barrière efficace contre les fuites, même dans des conditions extrêmes. Les exigences réglementaires en matière d'étanchéité aux gaz sont particulièrement rigoureuses, avec des normes telles que l'ISO 15848 et l'API 622, qui imposent des seuils de fuite extrêmement bas, en particulier dans les industries manipulant des gaz inflammables ou toxiques. Pour répondre à ces contraintes, les systèmes d'étanchéité aux gaz sont conçus avec une précision mécanique accrue, garantissant ainsi une sécurité optimale et une réduction des impacts environnementaux liés aux émissions gazeuses. [4]

II.2.3 Etanchéité pour fluide toxique :

L'étanchéité pour les fluides toxiques est essentielle dans les industries manipulant des substances dangereuses, susceptibles de nuire à la santé humaine ou à l'environnement. Il est crucial d'utiliser des systèmes d'étanchéité spécifiquement conçus pour prévenir toute fuite de ces fluides. En raison de leur nature chimique, les fluides toxiques, qu'ils soient gazeux ou liquides, nécessitent des matériaux d'étanchéité capables de résister à la corrosion, à la réactivité chimique et à leur toxicité. De plus, ces systèmes doivent garantir la sécurité des opérateurs et de l'environnement, car même une petite fuite peut entraîner de graves risques tels que la contamination, des incendies ou des explosions. Les systèmes d'étanchéité doivent également respecter des normes strictes en matière de sécurité et d'environnement, telles que celles définies par l'OSHA (Occupational Safety and Health Administration), l'EPA (Environmental Protection Agency) et les normes ISO.

Parmi les solutions utilisées, on retrouve les joints mécaniques, utilisés dans les pompes et les compresseurs, les joints en élastomère comme le Viton et le PTFE, ainsi que les joints à lèvre dans les applications tournantes. Les garnitures mécaniques doubles avec systèmes de purge de fluide et les systèmes de confinement à double enveloppe sont aussi utilisés pour éviter toute fuite. Pour garantir une étanchéité optimale, des matériaux comme le PTFE, le Viton et le graphite expansé sont choisis pour leur résistance chimique. Ces systèmes doivent également répondre aux normes telles que l'API 682 pour les garnitures mécaniques, l'ISO 9001 pour la gestion de la qualité et l'ATEX pour les équipements utilisés dans des atmosphères explosives.

II.3 Processus d'étanchéité dans les applications industrielles

II.3.1 Étanchéité dans les turbines

Les turbines sont des machines rotatives qui convertissent l'énergie d'un fluide en énergie mécanique. Elles sont utilisées dans de nombreux domaines, tels que la production d'électricité, la propulsion des avions, les centrales thermiques, les industries pétrolières et gazières. [5]

Il existe deux types de turbine :

- **Turbine à gaz** : Une turbine est dite « à gaz » quand le fluide de moteur utilisé est un gaz (la figure II.1).

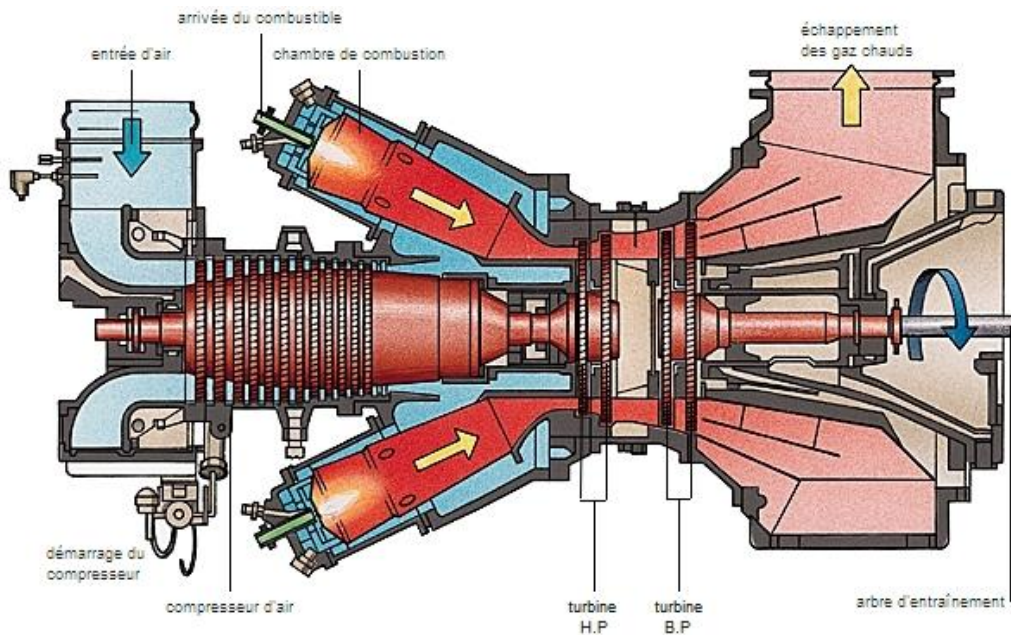


Figure II.1: Turbine à gaz

- **Turbine à vapeur** : Une turbine à vapeur est un dispositif qui utilise la pression de la vapeur pour faire tourner des pales et produire de l'énergie mécanique (la figure II.2).

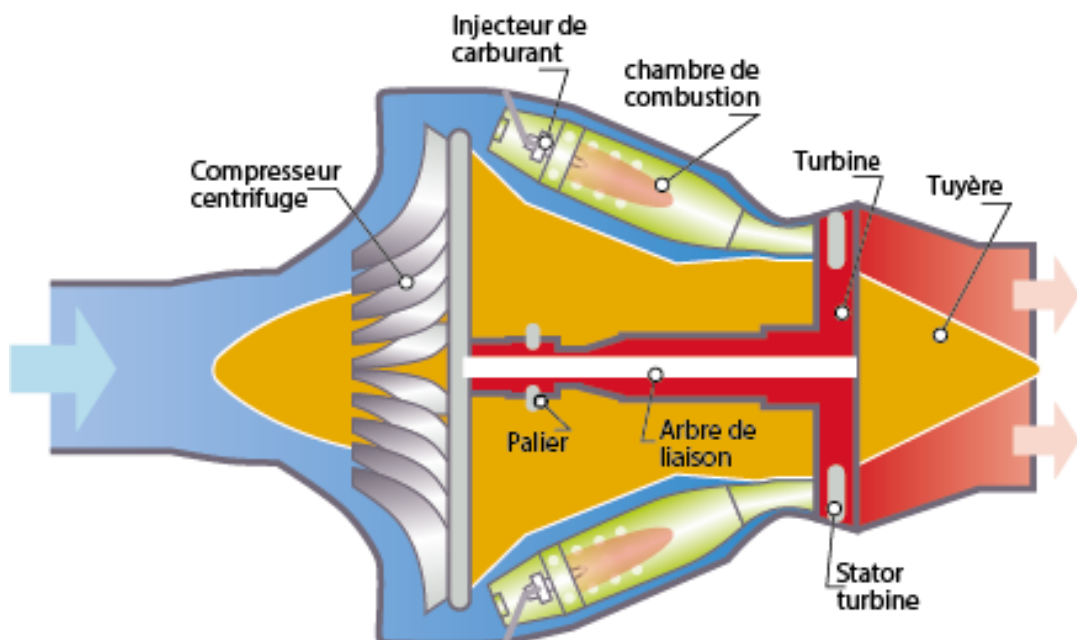


Figure II.2: Turbine à vapeur

II.3.1.1 Les systèmes d'étanchéité utilisés dans les turbines

a. Joints de pales :

Les joints de pale dans les turbines jouent un rôle essentiel dans l'étanchéité et le bon fonctionnement du système (la figure II.3). [6]



Figure II.3: Joints de pales

Voici un aperçu de leur importance :

- Limiter les fuites de fluide (vapeur, gaz ou air) entre les étages d'une turbine.
- Améliorer le rendement en minimisant les pertes d'énergie dues aux fuites.
- Protéger les composants internes contre l'usure prématurée causée par des turbulences ou des débits incontrôlés.

b. Étanchéité par film d'huile :

L'étanchéité par film d'huile est une méthode d'étanchéité dynamique utilisée dans les turbines (et d'autres machines tournantes), où un film mince d'huile est injecté entre deux surfaces (généralement entre l'arbre tournant et le logement fixe) pour créer une barrière contre les fuites de gaz ou de vapeur (la figure II.4). [7]

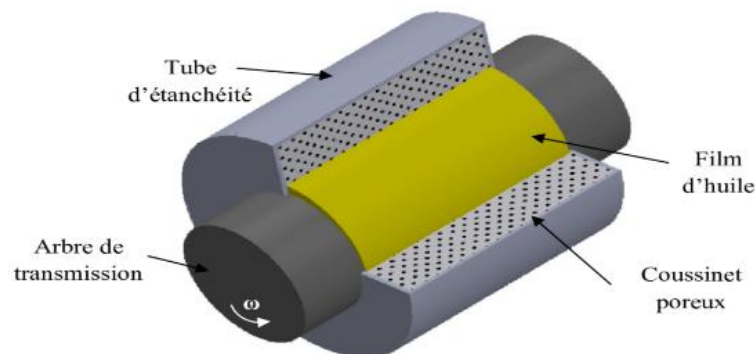


Figure II.4: Étanchéité par film d'huile

Voici un aperçu de leur importance :

- Empêcher les fuites de fluide de travail (gaz, vapeur) : L'huile forme une barrière qui empêche le fluide sous pression dans la turbine de s'échapper vers l'extérieur ou vers d'autres zones de pression.

- Protéger les roulements : L'étanchéité évite que les impuretés, l'humidité ou les gaz chauds ne pénètrent dans la chambre des roulements, ce qui prolonge leur durée de vie.
- Réduire la friction : Le film d'huile agit aussi comme lubrifiant, minimisant le contact métal-métal entre les composants tournants et fixes.
- Maintenir la pression dans la turbine : En empêchant les fuites, l'étanchéité par film d'huile contribue au bon fonctionnement thermodynamique du système.
- Contribuer à l'équilibre thermique : L'huile peut également servir à absorber et à dissiper une partie de la chaleur générée par la rotation et la compression.

c. Étanchéité dynamique :

L'étanchéité dynamique dans les turbines joue un rôle essentiel en empêchant les fuites de fluide entre les parties fixes et mobiles, tout en supportant des conditions extrêmes de pression, de température et de vitesse. Plusieurs méthodes sont utilisées pour assurer cette étanchéité de manière efficace :

- **Jointes labyrinthes:**

Un joint labyrinthe est un type de joint mécanique utilisé pour réduire ou empêcher les fuites de fluides (liquides ou gaz) entre deux pièces en mouvement relatif, généralement en rotation, sans contact direct entre les surfaces d'étanchéité (la figure II.5). [8]



Figure II.5:Jointes labyrinthes

Les joints labyrinthes présentent plusieurs caractéristiques techniques qui les rendent particulièrement efficaces dans certaines applications industrielles :

- Joints sans contact composés d'une série de dents rapprochées.
- Créent un chemin complexe pour le fluide, limitant les fuites.
- Couramment utilisés dans les turbines à gaz et à vapeur.

- **Joints mécaniques :**

Les joints mécaniques à contact sont des dispositifs d'étanchéité utilisés pour empêcher les fuites de fluides (liquides ou gaz) entre deux pièces en mouvement relatif, généralement en rotation, grâce à un contact direct entre les surfaces d'étanchéité. Ce contact crée une barrière physique qui bloque le passage du fluide (la figure II.6). [9]



Figure II.6:Joints mécaniques

Voici les principales caractéristiques des joints mécaniques :

- Joints à surface de frottement contrôlée (ex : bagues carbone-métal).
- Moins utilisés dans les turbines à haute vitesse à cause de l'usure.

- **Joints mécaniques (Dry Gas Seals) :**

Les joints à gaz secs sont des systèmes d'étanchéité non lubrifiés, utilisés principalement dans les compresseurs rotatifs. Ils fonctionnent grâce à un mince film de gaz entre deux surfaces proches sans contact direct, ce qui permet de réduire les fuites, l'usure et la consommation d'énergie (la figure II.7).



Figure II.7:Joints mécaniques

Les joints à gaz se caractérisent par des spécifications techniques qui les rendent particulièrement adaptés aux environnements industriels complexes :

- Utilisent un film de gaz pour séparer deux surfaces sans contact.
- Très efficaces, utilisés dans les environnements à haute pression et haute vitesse.

- **Contre-pression ou soufflage:**

La contre-pression et le soufflage désignent des méthodes utilisées pour réguler ou maintenir une pression dans un système, afin d'empêcher l'entrée de fluides ou de contaminants indésirables, souvent en utilisant un fluide (air ou gaz) sous pression (la figure II.8).



Figure II.8:Contre-pression ou soufflage

Les méthodes de contre-pression et de soufflage se caractérisent par plusieurs techniques utilisées pour optimiser l'étanchéité et prévenir les fuites dans les systèmes industriels :

- Injection d'un fluide (air, gaz) pour repousser ou isoler les fuites potentielles.
- Méthode complémentaire souvent intégrée aux systèmes principaux.

L'efficacité de l'étanchéité dynamique impacte directement les performances globales des turbines. Son importance se manifeste à plusieurs niveaux techniques et opérationnels :

- **Amélioration du rendement** : réduit les pertes d'énergie dues aux fuites internes.
- **Sécurité** : évite les fuites de gaz chauds ou toxiques, crucial dans les turbines à gaz.
- **Durabilité des composants** : limite l'usure prématurée des rotors et paliers.
- **Réduction de la maintenance** : moins de défaillances liées aux fuites ou à la contamination.
- **Conformité aux normes** : répond aux exigences strictes des industries (aéronautique, énergie).

II.3.2 Étanchéité dans les compresseurs

Un compresseur est un dispositif mécanique conçu pour augmenter la pression d'un gaz en réduisant son volume. Il fonctionne en aspirant un gaz à basse pression, puis en le comprimant à une pression plus élevée pour l'utiliser dans des applications industrielles, énergétiques ou domestiques. [10]

Il existe deux types principaux de compresseur :

a. Compresseurs volumétriques :

- **Alternatifs (à piston)** : fonctionnement cyclique avec soupapes d'admission/refoulement (la figure II.9).

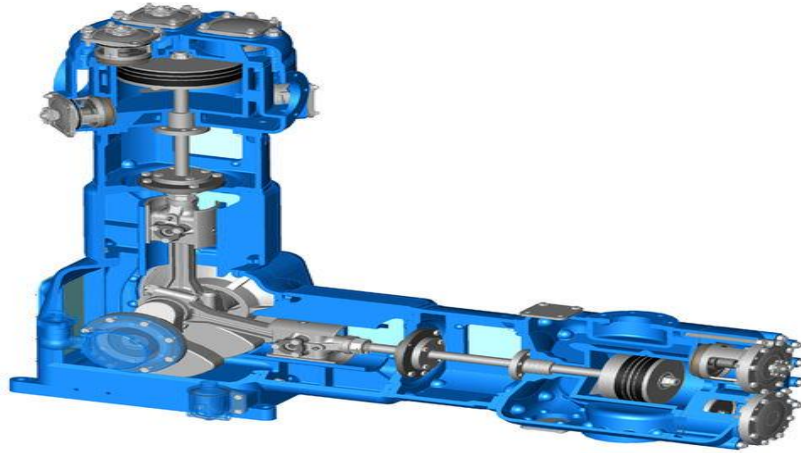


Figure II.9: Compresseurs volumétriques alternatifs (à piston)

- **Rotatifs (à vis, à palettes)** : mouvement rotatif continu, adapté aux débits constants (la figure II.10).

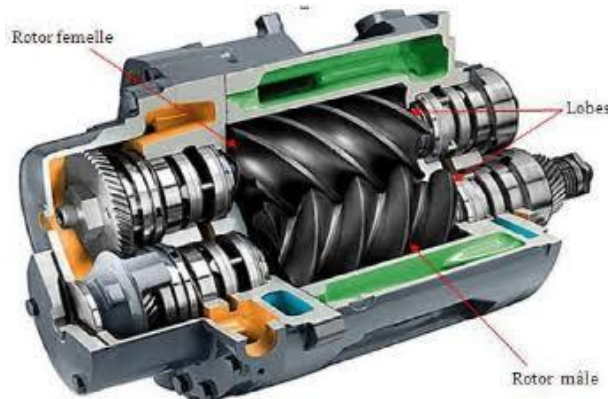


Figure II.10: Compresseurs volumétriques Rotatifs (à vis, à palettes)

b. Compresseurs dynamiques :

- **Axiaux** : utilisés dans les turbines à gaz et moteurs d'avions (la figure II.11).

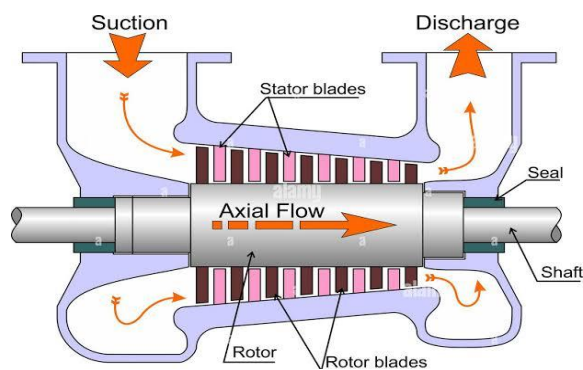


Figure II.11 : Compresseurs dynamiques axiaux

- **Centrifuges** : très utilisés dans l'industrie pour les grands débits (la figure II.12).

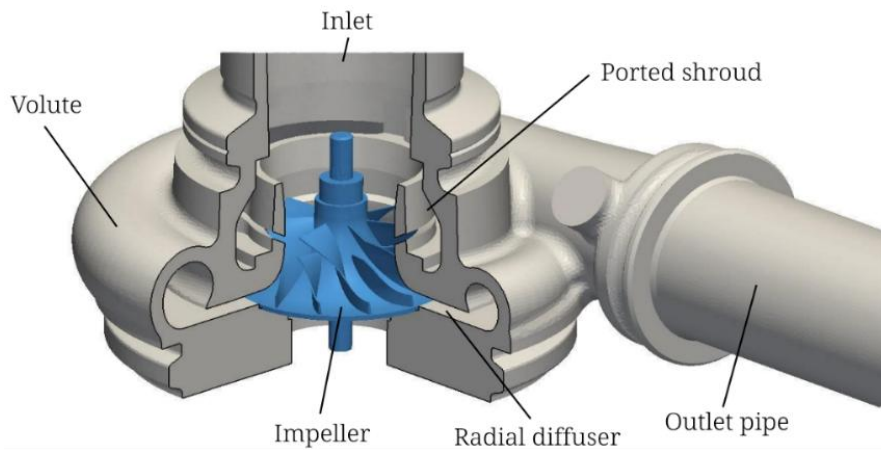


Figure II.12: Compresseurs dynamiques centrifuges

II.3.3 Contraintes liées aux hautes pressions et températures élevées dans les compresseurs :

- **Surchauffe des composants** : Une température d'échappement excessive, dépassant souvent 100 °C, peut entraîner une réduction de la vitesse de fonctionnement du compresseur pour éviter des dommages.
- **Dégradation de l'huile de lubrification** : Les températures élevées accélèrent la dégradation de l'huile, réduisant son efficacité lubrifiante, ce qui augmente la friction et l'usure des composants internes.
- **Usure des roulements et joints** : La combinaison de hautes pressions et températures intensifie l'usure des roulements et des joints, pouvant conduire à des fuites et des défaillances mécaniques.
- **Diminution de l'efficacité opérationnelle** : Les conditions extrêmes peuvent entraîner une baisse de l'efficacité du compresseur, nécessitant plus d'énergie pour maintenir les performances souhaitées.

II.3.3.1 Les systèmes d'étanchéité utilisés dans les compresseurs

- **Garniture sèche de gaz** : Toutes les garnitures sèches de gaz sont faites par deux anneaux, l'un tournant et l'autre stationnaire supporté par un ensemble des ressorts. L'anneau stationnaire a une surface intérieure plate et douce. Sur la surface de rotation de l'anneau on trouve quelques cannelures de forme particulière. Le ressort aligné derrière la partie stationnaire a pour fonction de reprendre la position de ce dernier, en appliquant une force de sens contraire à celle de l'anneau tournant avec une assistance d'une pression de fuite de gaz à travers le dessus de l'anneau stationnaire.
- **Utilisation de systèmes de refroidissement pour optimiser l'étanchéité** : Les systèmes de refroidissement jouent un rôle essentiel dans l'amélioration de l'étanchéité au sein des compresseurs. En réduisant la température générée par le frottement entre les pièces mobiles, notamment au niveau des garnitures et des surfaces en rotation, ils permettent de préserver l'intégrité des composants d'étanchéité. Une température

excessive peut entraîner une usure prématurée ou une déformation des garnitures, provoquant des fuites de gaz et une baisse de performance du compresseur. Le refroidissement efficace de ces zones critiques permet donc de maintenir une étanchéité fiable, d'augmenter la durée de vie des équipements et de réduire les besoins en maintenance.

II.3.4 Étanchéité dans les vérins hydrauliques

Un vérin est l'élément récepteur de l'énergie dans un circuit hydraulique. Il transforme l'énergie hydraulique en énergie mécanique, permettant ainsi de générer un effort important avec une grande précision de mouvement. Grâce à la pression du fluide, le vérin peut produire des forces considérables, ce qui le rend particulièrement utile dans les systèmes industriels, les machines de chantier et les équipements automatisés. Sa capacité à contrôler avec précision la vitesse et la force du déplacement en fait un composant essentiel dans de nombreuses applications techniques.

II.3.4.1 Importance de l'étanchéité dans les systèmes hydrauliques

L'étanchéité est un élément fondamental pour assurer le bon fonctionnement, la sécurité et la durabilité des systèmes hydrauliques. Elle permet de maintenir la pression interne, d'éviter les fuites de fluide et de garantir une performance optimale des équipements :

- Maintien de la pression et performance du système
- Sécurité et prévention des accidents
- Durabilité et réduction des coûts de maintenance
- Choix des matériaux et compatibilité
- Tests et maintenance préventive

II.3.4.2 Les systèmes d'étanchéité utilisés dans les vérins hydrauliques

Dans un vérin hydraulique, l'étanchéité dynamique est essentielle pour assurer un fonctionnement efficace et sans fuite pendant les mouvements continus du piston et de la tige. Deux types principaux de joints jouent un rôle fondamental dans ce processus : [11]

- Les joints de piston : sont montés sur le piston mobile à l'intérieur du cylindre. Leur fonction est de séparer les chambres de pression de chaque côté du piston et de garantir que le fluide hydraulique ne passe pas d'un côté à l'autre. Ils assurent ainsi un transfert d'énergie fluide-mécanique efficace en empêchant les pertes de pression internes (la figure II.13).



Figure II.13: Les joints de piston

- Les joints de tige : quant à eux, sont installés à l'extrémité du cylindre, là où la tige sort du vérin. Leur rôle est d'empêcher le fluide de s'échapper du cylindre vers l'extérieur lors des mouvements de va-et-vient. Ces joints doivent également résister aux contaminations extérieures, comme la poussière ou l'humidité, souvent combinés à des racleurs ou joints anti-poussière (la figure II.14).



Figure II.14: Les joints de tige

L'ensemble de ces joints contribue à maintenir une **étanchéité dynamique**, c'est-à-dire une étanchéité assurée pendant les mouvements actifs des pièces. Pour cela, les matériaux des joints (NBR, PU, PTFE, etc.) sont soigneusement choisis en fonction des conditions de pression, de température, et de vitesse de fonctionnement. Une étanchéité dynamique bien conçue permet non seulement d'éviter les fuites, mais aussi de prolonger la durée de vie des vérins et d'assurer un fonctionnement sûr et fiable de l'ensemble du système hydraulique.

II.3.5 Étanchéité dans les tuyauteries

Les tuyauteries sont un ensemble de conduites, de raccords et d'équipements utilisés pour le transport du pétrole brut depuis les puits jusqu'aux réservoirs de stockage ou vers les raffineries pour traitement. Les réseaux de transport et de distribution du gaz naturel assurent l'acheminement du gaz depuis la source et les réservoirs de stockage jusqu'aux points de consommation, tels que les centrales électriques, les installations industrielles, ainsi que les zones commerciales et résidentielles. Dans les usines chimiques, les papeteries, les unités de transformation alimentaire et autres établissements industriels similaires, les systèmes de tuyauterie sont utilisés pour le transfert de fluides, de produits chimiques, de mélanges, de gaz, de vapeurs et de solides d'un point à un autre.

II.3.5.1 Nécessité d'une bonne étanchéité pour le transport des fluides et des gaz

La bonne étanchéité est essentielle pour garantir le bon fonctionnement et la sécurité des systèmes de transport de fluides et de gaz. Une étanchéité défectueuse peut entraîner des fuites, des risques pour l'environnement, des pertes économiques, et des dangers pour la sécurité des personnes. Voici pourquoi une étanchéité adéquate est cruciale : [12]

- Prévention des fuites.
- Efficacité du système.
- Conformité aux normes et réglementations.

II.3.5.2 Les systèmes d'étanchéité utilisés dans les tuyauteries

Il existe trois principales méthodes utilisées pour garantir une bonne étanchéité des tuyauteries, chacune étant adaptée aux exigences du système et aux conditions de fonctionnement : [13]

- **Joints industriels** : sont utilisés pour créer une étanchéité statique entre deux éléments fixes d'un assemblage mécanique et pour maintenir cette étanchéité dans des conditions de fonctionnement qui peuvent varier en fonction des changements de pression et de température. S'il était possible d'avoir des brides parfaitement ajustées et de maintenir un contact intime entre ces brides parfaitement accouplées, même dans des conditions de fonctionnement extrêmes, l'utilisation d'un joint ne serait pas nécessaire (la figure II.15). [14]



Figure II.15: Joints industriels

- **Soudage d'étanchéité** : est une technique couramment utilisée pour assurer une jonction hermétique et durable entre deux éléments métalliques dans les systèmes de tuyauterie. Cette méthode est essentielle lorsque l'étanchéité absolue est requise, notamment dans les industries chimique, nucléaire, pétrolière et alimentaire, où toute fuite pourrait entraîner des conséquences graves. [15]
- **Systèmes d'étanchéité sous pression** : Les systèmes d'étanchéité sous pression sont essentiels dans les installations industrielles, en particulier dans les réseaux de tuyauterie, les réservoirs, les chaudières et les appareils sous pression. Ils doivent garantir une étanchéité absolue même à la présence de hautes pressions, températures élevées, produits chimiques agressifs ou gaz dangereux. Ces systèmes sont basés sur l'utilisation de joints, garnitures mécaniques, soudures d'étanchéité et autres dispositifs spécialisés.

II.3.6 Étanchéité dans les pompes

Les pompes sont des machines utilisées pour soulever des liquides ou des mélanges de liquides d'un niveau inférieur à un niveau supérieur, ou pour pomper des liquides d'une région de basse pression à une région de haute pression.

Le fonctionnement d'une pompe consiste à réaliser une différence de pression entre la zone d'aspiration et la zone de refoulement au moyen de l'organe actif (piston, roue, etc.) de la pompe. D'un point de vue physique, la pompe transforme l'énergie mécanique de son moteur d'entraînement en énergie hydraulique. [16]

II.3.6.1 Classification des pompes

Afin de répondre aux diverses applications industrielles, plusieurs types de pompes ont été conçus.

Ces pompes se répartissent en deux grandes catégories :

a. Les pompes hydrauliques volumétriques :

On distingue deux grands types de pompes volumétriques :

- **Les pompes volumétriques alternatives :**

Ces pompes sont caractérisées par le fait que la pièce mobile est animée d'un mouvement alternatif (la figure II.16).

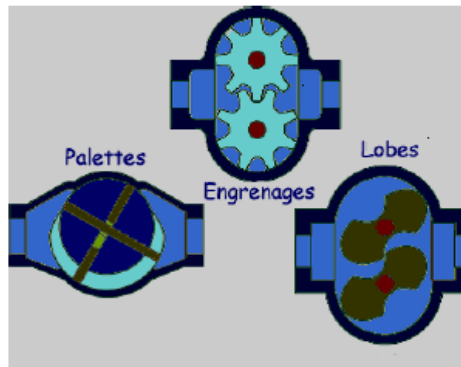


Figure II.16: Les pompes volumétriques alternatives

Les principaux types de pompes sont les suivants :

- À piston.
- À membrane ou à soufflets.

Les pompes volumétriques alternatives usuelles font appel à deux principes :

- Le déplacement d'un piston animé d'un mouvement alternatif.
- La déformation d'une membrane.

- **Les pompes volumétriques rotatives :**

Ces pompes sont constituées par une pièce mobile animée d'un mouvement de rotation autour d'un axe, qui tourne dans le corps de pompe et crée le mouvement du liquide pompé par déplacement d'un volume depuis l'aspiration jusqu'au refoulement (la figure II.17).

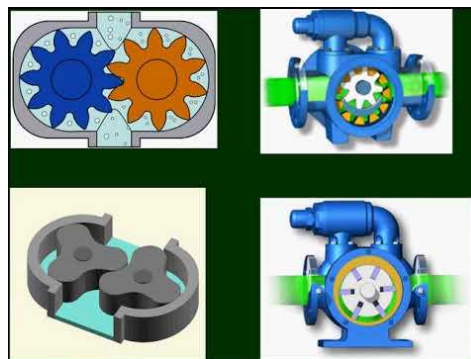


Figure II.17: Les pompes volumétriques rotatives

Les principaux types des pompes rotatives sont :

- Pompes à engrenage.
- Pompes à vis.
- Pompes à lobes.
- Pompes à palettes

b. Les pompes hydrauliques non volumétriques (roto-dynamique) :

Qui transmettent au fluide une charge dépendant du débit de fluide qui les traverse. Une roue fournit au fluide de l'énergie cinétique qui est ensuite transformée en pression au fluide de l'énergie cinétique qui est ensuite transformée en pression dans une volute (la figure II.18).

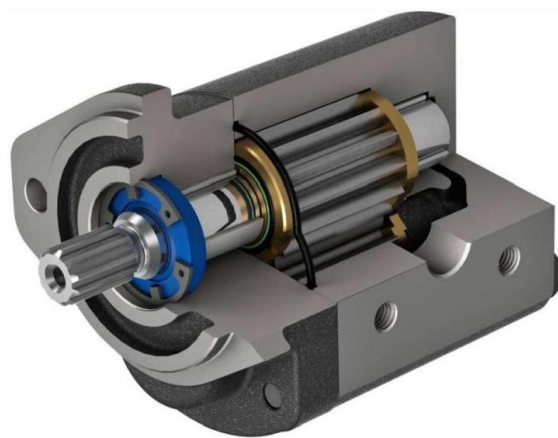


Figure II.18: Les pompes hydrauliques non volumétriques (roto-dynamique)

Dans la famille roto dynamiques, on classe les pompes :

- **Les pompes centrifuges (à écoulement radial) :**

Une pompe centrifuge est une machine rotative qui pompe un liquide en le forçant ou travers d'une roue à aube ou d'une hélice appelée impulseur (souvent nommée improprement turbine).

Les pompes centrifuges sont les plus utilisées dans le domaine industriel à cause de la large gamme d'utilisation qu'elles peuvent couvrir, de leur simplicité et de leur faible coût. Néanmoins (la figure II.19).

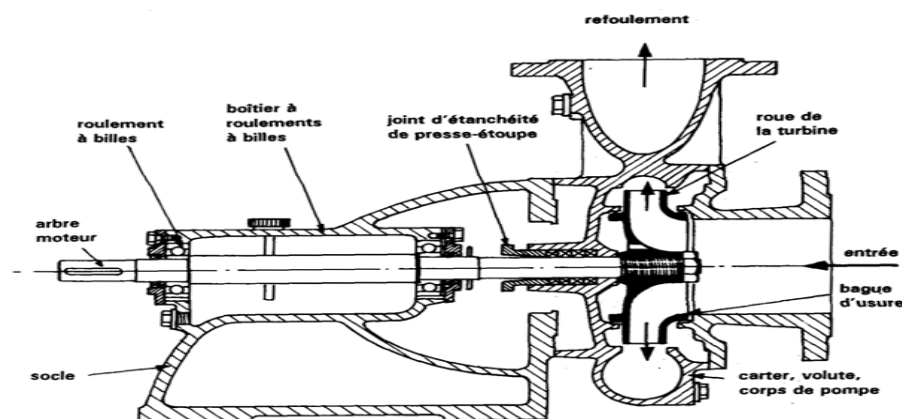


Figure II.19: Les pompes centrifuges (à écoulement radial)

Il existe des applications pour lesquelles elles ne conviennent pas, comme :

- Utilisation de liquides visqueux, la pompe centrifuge nécessaire serait énorme par rapport aux débits possibles.
- Utilisation de liquides "susceptibles" c'est-à-dire ne supportant pas la très forte agitation dans la pompe (liquides alimentaires tel que le lait).
- Utilisation comme pompe doseuse ; la nécessité de réaliser des dosages précis Instantanés.

- **Pompes hélico-centrifuges :**

Les pompes hélico-centrifuges ne sont pas utilisées pour les faibles débits, car dans ce cas elles conduisent à des vitesses de rotation élevées ou très élevées (la figure II.20).



Figure II.20:Pompes hélico-centrifuges

- **Pompes hélices :**

Bonne capacité d'aspiration, permettant une installation facile, ainsi qu'une courbe caractéristique toujours descendante, assurant un fonctionnement stable à n'importe quel débit (la figure II.21).

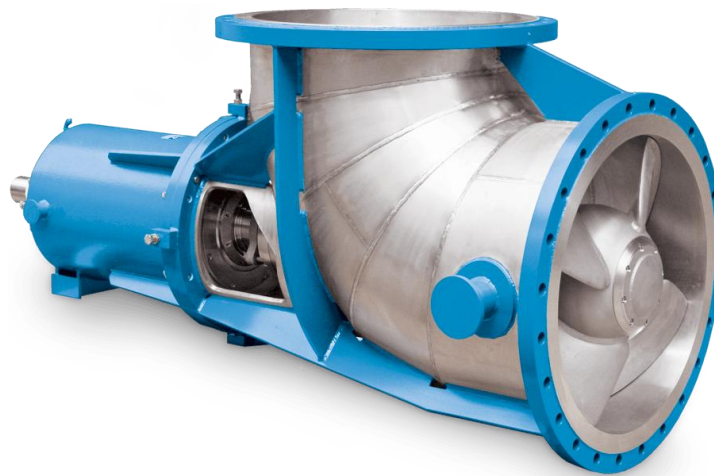


Figure II.21:Pompes hélices

II.3.6.2 Importance de l'étanchéité dans les pompes

L'étanchéité est essentielle au bon fonctionnement des pompes. Elle permet :

- De prévenir les fuites de liquide : Une étanchéité satisfaisante empêche le fluide transporté d'échapper, ce qui est primordial pour assurer la pression et l'efficacité du système.
- De défendre les composants internes : Elle empêche l'intrusion de contaminants (poussière, air, eau) susceptibles de casser les pièces internes de la pompe, tels que les paliers ou les roulements.
- D'assurer la sécurité : Dans le cas des pompes à liquides toxiques, inflammables ou corrosifs, une défaillance d'étanchéité peut causer un danger important pour les opérateurs et l'environnement.
- De prolonger la durée de vie de la pompe : En limitant l'usure causée par les fuites ou la contamination, une bonne étanchéité favorise la fiabilité et la longévité de l'équipement.
- D'améliorer l'efficacité énergétique : Une pompe bien étanchée travaille dans de meilleures conditions, réduisant ainsi les pertes d'énergie.

II.3.6.3 Systèmes d'étanchéité utilisés dans les pompes

a. Garniture mécanique :

Les garnitures mécaniques d'étanchéité sont un des éléments constitutifs des machines tournantes les plus critiques. En effet, de leur intégrité dépend le bon fonctionnement des applications où elles sont utilisées.

b. Joint statique :

Un joint statique est un type de joint utilisé pour assurer l'étanchéité entre deux pièces fixes ou non mobiles dans un système mécanique. Contrairement aux joints dynamiques, qui sont utilisés pour des composants en mouvement (comme les joints d'arbre ou les garnitures d'étanchéité), les joints statiques sont conçus pour éviter les fuites de fluides ou de gaz entre des surfaces qui ne subissent pas de mouvement relatif.

c. Systèmes d'étanchéité dynamiques :

Les systèmes d'étanchéité dynamiques, tels que les joints labyrinthes (labyrinth seals) et joints flottants (floating seals), sont utilisés pour éviter les fuites de fluides ou de gaz dans les systèmes où des pièces sont en mouvement relatif. Ces systèmes sont principalement employés dans des applications où il y a des surfaces en rotation ou en mouvement, comme dans les moteurs, les turbines, ou les pompes.

II.4 Conclusion

En conclusion de ce chapitre, les technologies et les systèmes d'étanchéité appliqués en milieu industriel ont été présentés, en particulier les joints statiques et dynamiques : joints labyrinthes et joints flottants. L'importance d'un choix judicieux de son système d'étanchéité a été soulignée afin de diminuer les fuites, d'optimiser le rendement de ses équipements industriels et de prolonger leur durée de vie. L'impact de ces technologies sur la performance et la durabilité des systèmes a également été souligné. En filigrane ont été introduites les perspectives d'évolution vers des matériaux intelligents et des solutions d'étanchéité, ouvrant ainsi la voie à des systèmes plus performants et plus respectueux de l'environnement.

Chapitre III

Étude de la garniture mécanique

III.1 Historique

Au début du 20^{ème} siècle, les joints d'étanchéité frontaux ont commencé à apparaître de manière sporadique dans le secteur de la construction mécanique. Leur but principal était d'améliorer la fonctionnalité et la conception face aux défis d'étanchéité complexes que posaient les garnitures souples et les presse-étoupes traditionnels. La forme la plus basique de ces joints (voir figure a) consistait à faire buter une bague fixée à l'arbre contre une surface du carter. Cependant, en raison du manque de matériaux adéquats et d'outils d'usinage appropriés, ces dispositifs n'ont pas pu montrer pleinement leurs avantages techniques. Ce n'est qu'à partir des années 1920 que les garnitures mécaniques ont commencé à être largement adoptées, notamment dans les systèmes de réfrigération. Plus récemment, un type de joint élastique, connu sous le nom de "bague en V" (voir figure b), a été introduit dans la classe I du tableau 1. Bien qu'il repose sur le même principe de conception, ce joint bénéficie d'une partie élastique grâce au matériau utilisé, ce qui lui permet de mieux compenser les mouvements axiaux causés par la chaleur ou les contraintes mécaniques. L'industrie automobile a rapidement saisi les avantages de ces joints auto-ajustables et fiables, les intégrant d'abord dans les pompes à eau des moteurs à combustion. Aujourd'hui, ces pompes sont exclusivement équipées de garnitures mécaniques. Il est intéressant de noter que les exigences imposées à ces garnitures étaient relativement modérées, compte tenu des conditions d'utilisation : une pression de quelques bars, un faible niveau de pollution, une température ne dépassant que rarement 100 °C, et une vitesse de glissement de seulement quelques mètres par seconde (la figure III.1).

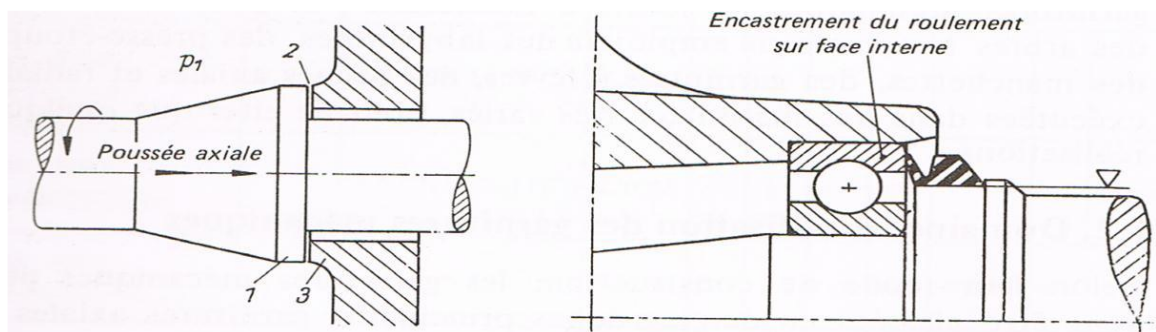


Figure III.1: a) garniture mécanique simple b) bague d'étanchéité élastique à effet axial.

Grâce à de nouvelles méthodes de fabrication et à l'utilisation de matériaux de meilleure qualité, la sécurité et la durabilité des garnitures mécaniques ont été considérablement améliorées, tout en permettant une réduction significative des coûts de production. Une fois que la production en série de garnitures mécaniques axiales est devenue économiquement viable, surtout dans le secteur automobile, leur utilisation s'est rapidement répandue. Après la Seconde Guerre mondiale, les fabricants de pompes et l'industrie chimique lourde ont de plus en plus adopté ces garnitures mécaniques, élargissant progressivement leur domaine d'application. Par souci de sécurité et de fiabilité, l'industrie pétrolière a même commencé à exiger leur utilisation exclusive dans les raffineries, les stations de pompage et les navires-citernes.

Vers 1945 des pressions d'étanchéité de 15 bars et des vitesses de frottement au-delà de 10 m/s étaient déjà critiques. Au cours des années 50 et 60, les possibilités relatives à la pression et à la

vitesse de frottement ont décuplé et dans les années 70 les procédés de fabrications s'orientent vers des pressions de 500 bars. [17]

Les applications des garnitures mécaniques continuent de s'étendre, touchant aujourd'hui une multitude de secteurs : de l'automobile à l'industrie pétrolière, sans oublier les domaines pharmaceutiques, chimiques, ainsi que le traitement de l'eau et des eaux usées. Ces dispositifs sont désormais conçus pour résister à des conditions particulièrement difficiles, notamment en matière de température et de pression, tout en garantissant un débit de fuite minimal. Grâce aux avancées technologiques, les garnitures mécaniques modernes ont une durée de vie prolongée, et les fabricants offrent des solutions sur mesure pour répondre aux besoins spécifiques de chaque application. Les dernières technologies intègrent même des systèmes de surveillance en temps réel pour des paramètres critiques comme la température et la pression. Ces dispositifs d'alerte permettent de repérer rapidement les anomalies et de prendre les mesures correctives nécessaires, ce qui optimise la fiabilité et la durabilité des garnitures.

III.2 Les garnitures mécaniques

III.2.1 Définition :

Une garniture mécanique est un dispositif d'étanchéité d'arbre qui forme un joint d'étanchéité dynamique entre les parties tournantes et fixes d'un équipement rotatif, développé pour pallier les inconvénients de la garniture traditionnelle de presse-étoupe à compression. Les garnitures mécaniques sont généralement utilisées dans des applications nécessitant une étanchéité de qualité supérieure. L'efficacité des garnitures mécaniques dépend fortement d'une installation correcte et d'un environnement de travail constamment propre (la figure III.2). [18]

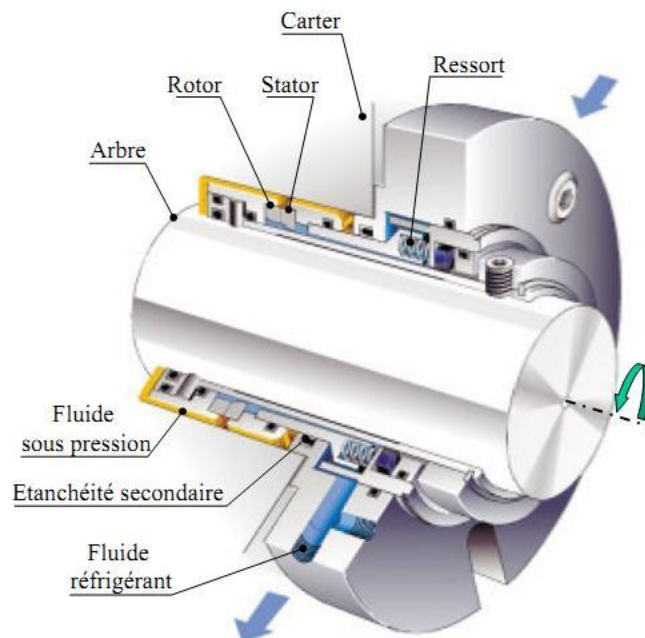


Figure III.2: Constitution d'une garniture mécanique

III.2.2 Principe de fonctionnement des garnitures mécaniques :

Le joint primaire est réalisé par deux faces très plates et rodées, qui créent un chemin de fuite difficile perpendiculairement à l'arbre. Le contact par frottement entre les deux surfaces d'accouplement plates minimise les fuites. Pour les joints de type, une face est maintenue fixe dans un logement et l'autre face tourne avec l'arbre. L'une des faces est généralement constituée d'un matériau non gélif, tel que le carbone-graphite. L'autre est généralement un matériau relativement dur comme le carbure de silicium.

Il y a quatre points d'étanchéité principaux dans une garniture mécanique à face frontale. L'étanchéité primaire se situe au niveau de la face de la garniture, indiquée ci-dessous par le point A. Le chemin de fuite au point B est bloqué par un joint torique, un joint en V ou une cale. Les voies de fuite aux points C et D sont bloquées par des joints ou des joints toriques. [18]

Des matériaux différents sont généralement utilisés pour l'insert fixe et la face rotative de la bague d'étanchéité, afin d'empêcher l'adhérence des deux faces. La face la plus molle présente généralement une surface d'accouplement plus petite et est communément appelée nez d'usure.

La garniture mécanique fonctionne grâce à l'utilisation de deux faces rodées très plates (généralement à 3 bandes légères près), qui rendent difficile toute fuite (au-delà d'une vapeur). L'une des faces est fixe et l'autre tourne avec l'arbre.

L'une des deux faces est généralement constituée d'un matériau non gélif, tel que le carbone-graphite. L'autre est un matériau plus dur, ce qui permet à des matériaux différents d'entrer en contact et à l'un d'entre eux d'être sacrifié.

La face la plus tendre de la garniture mécanique présente généralement une surface d'accouplement plus petite et est communément appelée le "nez d'usure" de la garniture mécanique. Dans les systèmes contenant des fluides très corrosifs, il est recommandé d'utiliser des garnitures mécaniques avec des ressorts externes (la figure III.3).

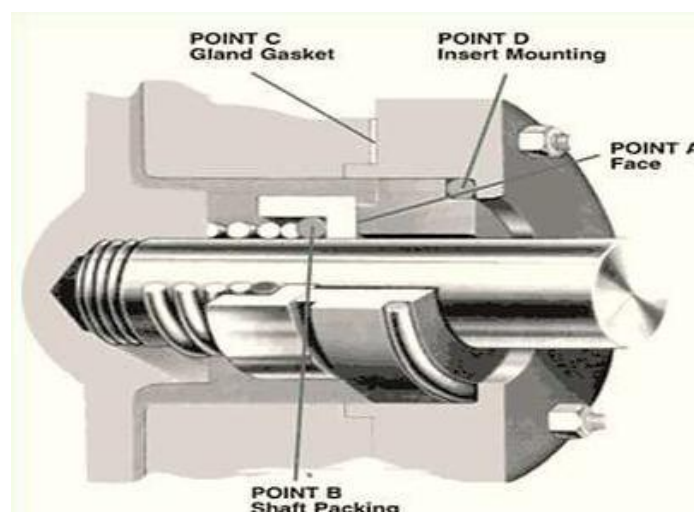


Figure III.3: Description sommaire d'une garniture mécanique

III.2.3 Différents types de garnitures:

III.2.3.1 Sélection du type de garnitures :

Les données à prendre en compte pour sélectionner une garniture sont nombreuses et peuvent parfois être complexes, cependant elles peuvent être réparties en quatre catégories :

- Les conditions de service (vitesse, pression, température).
- Le fluide à étancher (nature, dangerosité...).
- Les normes ou exigences applicables.
- La facilité de montage ou d'intervention exigée.

La sélection définitive doit être faite en collaboration avec les utilisateurs/constructeurs suivant un cahier des charges établi afin de garantir les meilleurs aspects sécurité et fiabilité de l'étanchéité (la figure III.4). [19]

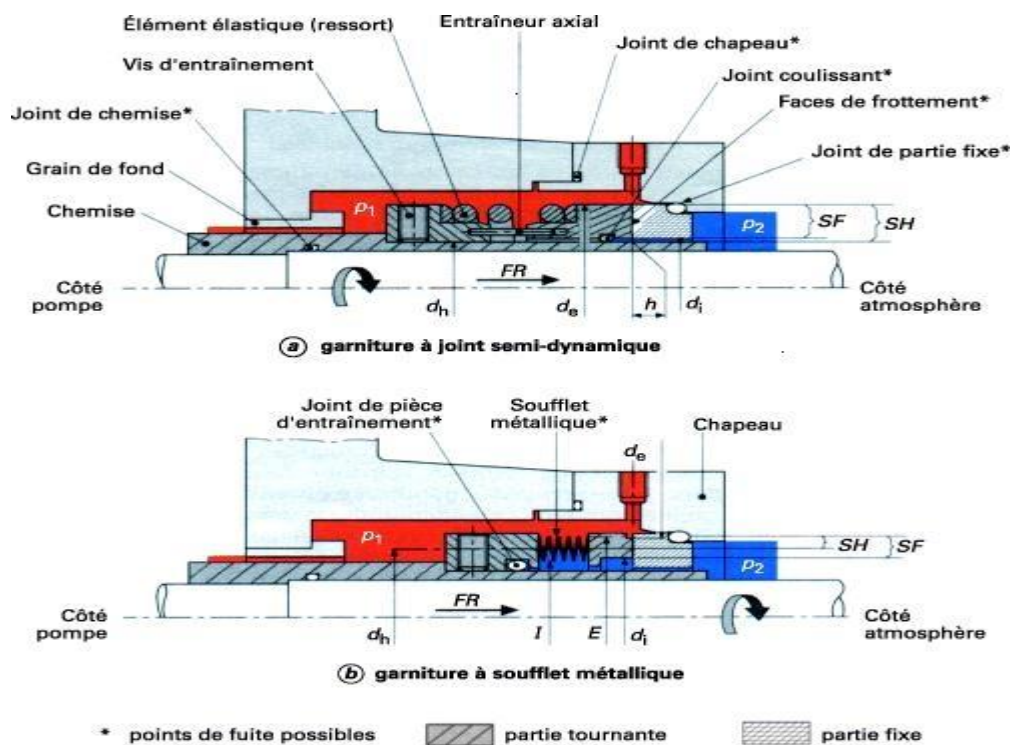


Figure III.4:Types de garnitures

III.2.3.2 Paramètres influents :

Parmi les paramètres techniques listés précédemment et qui influent sur la sélection, quatre d'entre eux présentent un caractère primordial et doivent nécessairement être pris en compte. À noter que chacun des paramètres ci-dessous ne peut être pris en compte indépendamment l'un de l'autre. En effet, leur combinaison modifie les caractéristiques de fonctionnement de la garniture mécanique.

a. Pression à étancher p :

Il est nécessaire de connaître avec précision la valeur de la pression du fluide à étancher afin de sélectionner une garniture mécanique compensée ou non. En effet, les garnitures mécaniques non

compensées sont généralement limitées à 10 bars, dépendant du type et de la taille de la garniture mécanique. La limitation en pression des garnitures compensées est fonction principalement des déformations mécaniques des pièces soumises à pression.

b. Vitesse de rotation N :

Une garniture mécanique doit être dynamiquement stable à sa vitesse de rotation. Des défauts géométriques sur la machine ou générés lors du montage entraînent à haute vitesse un film interface instable. Au-dessus d'une vitesse périphérique de 20 m/s environ au niveau des faces, on adopte des garnitures mécaniques stationnaires acceptant plus de défauts géométriques car non soumises aux efforts centrifuges.

La vitesse de rotation influe également sur le choix des matériaux des faces de frottement afin de limiter la génération de chaleur, ce qui permet de conserver un film interface toujours stable.

c. Température T :

Tous les composants de la garniture mécanique doivent garder leur intégrité dans toute la plage de température de fonctionnement, que cela soit pendant les phases de fonctionnement normales ou accidentelles. Les garnitures mécaniques à joint semi-dynamique sont généralement limitées à 200 - 250 °C à cause de la tenue des élastomères. Pour des températures supérieures, les garnitures mécaniques à soufflet métallique sont préférées ; il en est de même pour les très basses températures (inférieures à -50 °C).

d. Fluide à étancher :

Les caractéristiques suivantes du fluide à étancher sont très importantes pour déterminer le type de conception.

- **Propriétés chimiques** : tous les matériaux de la garniture mécanique doivent résister à la corrosion et aux attaques chimiques générées par celui-ci.
- **Présence de particules** : un fluide abrasif peut entraîner des dégradations rapides des faces de frottement et détermine le choix des matériaux. De plus, les risques de colmatage doivent être pris en compte lors du choix de la garniture.
- **Volatilité** : pour les garnitures liquides, le fait de maintenir dans l'interface un film toujours liquide est fortement lié au type de montage de la garniture mécanique. Si des risques de vaporisation sont présents, il conviendra de limiter l'échauffement aux faces :
 - Par le choix de matériaux ayant de faibles coefficients de frottement et une bonne conductivité thermique.
 - Par une conception particulière de la garniture mécanique permettant d'adapter la pression au niveau de l'interface.
 - Par le choix de dispositifs d'exploitation appropriés.
- **Dangerosité** : pour les fluides qui présentent des caractères d'explosivité, de toxicité ou d'inflammabilité, il convient de choisir un montage et/ou un dispositif d'exploitation qui garantit l'absence de fuite dans l'environnement.

Lors de la conception d'une garniture, c'est bien un compromis entre ces quatre paramètres techniques que le constructeur devra appréhender. En effet, les déformations mécaniques induites par la pression peuvent être fortement modifiées par la superposition de déformations induites par la température qui, elle-même, peut être fonction de la vitesse de rotation et du fluide à étancher.

I y a deux critères pour le choix du type :

Selon la technologie :

- **Garnitures à joint semi-dynamique (à ressort) :**

Les garnitures mécaniques à joint semi-dynamique sont compensées ou non compensées. Le ressort peut être dans ou en dehors du fluide à étancher. L'arrêt en rotation de la partie coulissante peut se faire par goupille, par crabot ou par ressort.

Généralement, elles sont limitées par la tenue en température des joints utilisés. Il est possible de fonctionner à de hautes pressions (plus de 150 bars) (la figure III.5).

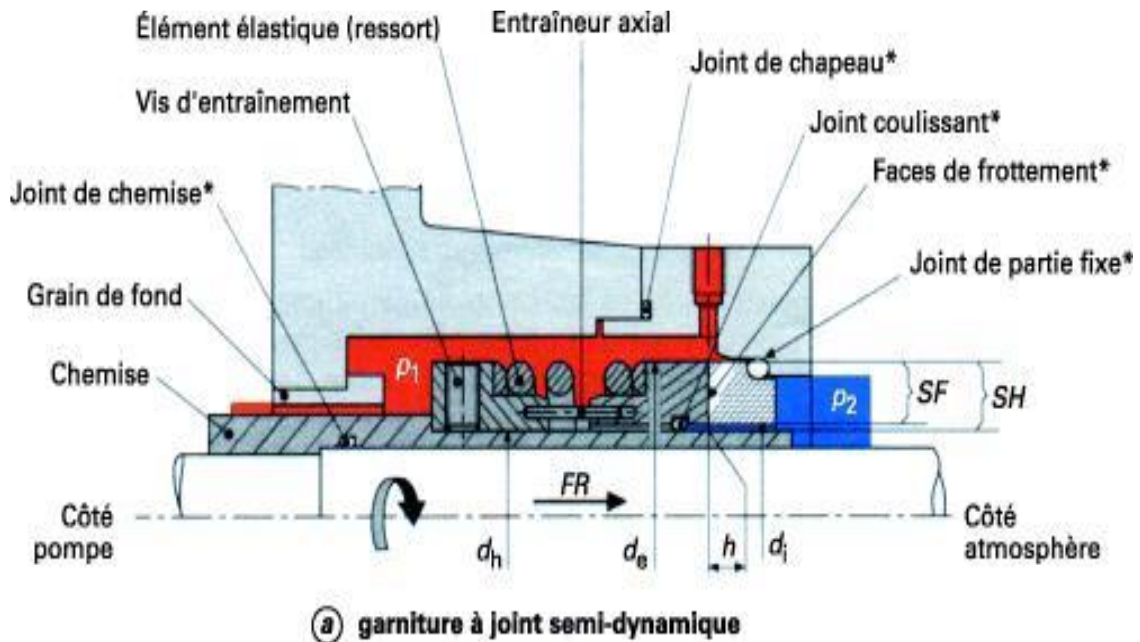


Figure III.5: Garnitures à joint semi-dynamique (à ressort)

- **Garnitures à soufflet ou membrane :**

Ces garnitures mécaniques ont des membranes en élastomère ou des soufflets métalliques. Du fait de leur conception, elles sont compensées. Ces garnitures sont montées directement sur un arbre lisse. Le soufflet assure trois fonctions : la force mécanique (élément ressort), l'entraînement en rotation de la face tournante et l'étanchéité secondaire (absence de joint semi-dynamique). En fonction

des matériaux de construction, les garnitures à soufflet peuvent être utilisées à des températures élevées (jusqu'à 500 °C) et leur limite de pression se situe aux environs de 50 bar (la figure III.6). [5]

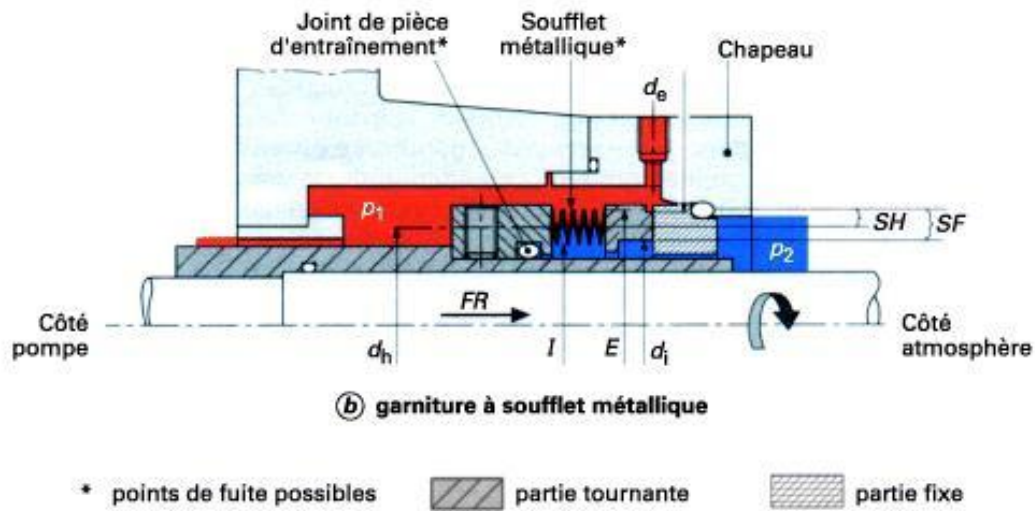


Figure III.6: Garnitures à soufflet ou membrane

Selon la nature de la lubrification :

- **Garniture mécanique avec contact :**

Le principe de base consiste à assurer l'étanchéité entre deux faces en mouvement relatif (rotation) lubrifiées par un film liquide. Ce film entretenu par la rotation provient du fluide véhiculé par la machine ou d'un fluide auxiliaire. Une infime partie du film peut s'écouler hors des faces de frottement. Ce débit est appelé fuite ou consommation de la garniture. Le frottement, au niveau du film, produit de la chaleur qui chauffe les faces de frottement, le film lui-même, et le fluide environnant. Pour assurer une durée de vie optimale des faces de la garniture, le film doit être stable et liquide. Pour éviter sa vaporisation, le fluide à étancher doit avoir une pression suffisante au droit de la garniture (voir tension de vapeur des fluides considérés).

- **Garniture mécanique sans contact (dite garniture gaz) :**

Le principe de base consiste à assurer l'étanchéité entre deux faces en mouvement relatif (rotation) par un film gazeux.

Constitution :

Les éléments principaux de la garniture mécanique sans contact sont similaires à ceux de la garniture mécanique avec contact ; à l'exception :

- Des faces de frottement qui sont plus larges.
- De la présence d'une série de rainures (formes géométriques en creux) spécifiques à chaque fabricant sur l'une des faces.

Le principe de fonctionnement de la garniture sans contact à rainures est basé sur un équilibre des forces aérostatiques et des forces aérodynamiques qui fournit un jeu interface minimal et stable (la figure III.7).



Figure III.7: Différents types de rainures

III.2.3.3 Variantes de conception :

Le choix d'un type de garniture mécanique est réalisé en optimisant chaque détail de sa conception par rapport aux conditions de service de l'application. Les caractéristiques comparatives des variantes de conception les plus répandues sont présentées dans le tableau 5. Le choix définitif d'un type de garniture mécanique se fera en prenant pour chaque variante la solution optimisée pour l'application (par exemple, garniture mécanique à joint semi-dynamique, interne, tournante, compensée, mono-ressort dans le produit à étancher).

III.2.4 Sélection du type de montage :

Il existe trois types de montage pour les garnitures mécaniques :

- Montage simple.
- Montage tandem.
- Montage double.

Le type de montage sera sélectionné principalement en fonction des propriétés du fluide à étancher, en prenant les paramètres suivants en compte.

III.2.4.1 Montage simple :

Le produit à étancher est isolé de l'atmosphère par une seule garniture mécanique, le film lubrifiant est assuré par le produit étanché. Ce type de montage (la figure III.5) est le plus économique et le plus répandu.

Le fluide à étancher doit être propre, non abrasif, et non dangereux (la figure III.8).

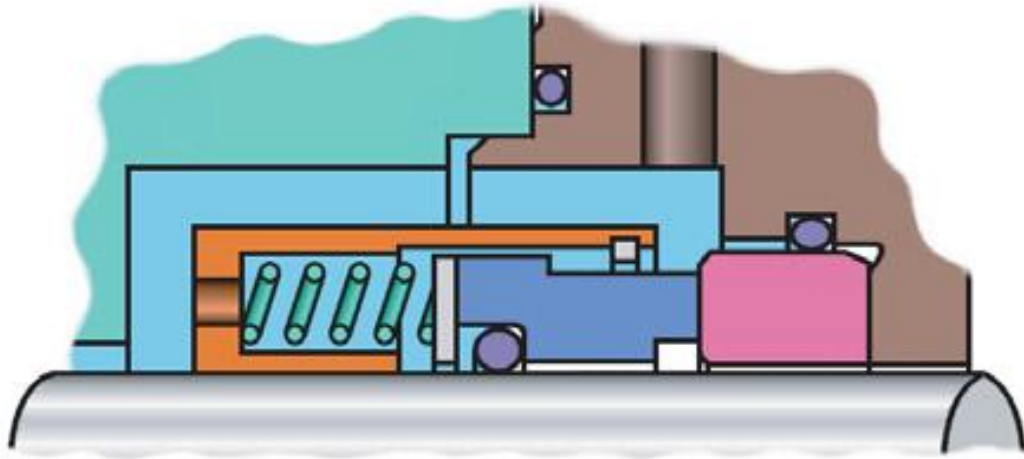


Figure III.8: Montage simple

III.2.4.2 Montage tandem :

Le produit à étancher est isolé de l'atmosphère par un liquide auxiliaire (liquide tampon) compatible avec celui-ci et confiné entre deux garnitures mécaniques (la figure III.9).

Il s'agit de deux garnitures mécaniques simples, montées l'une derrière l'autre. La garniture

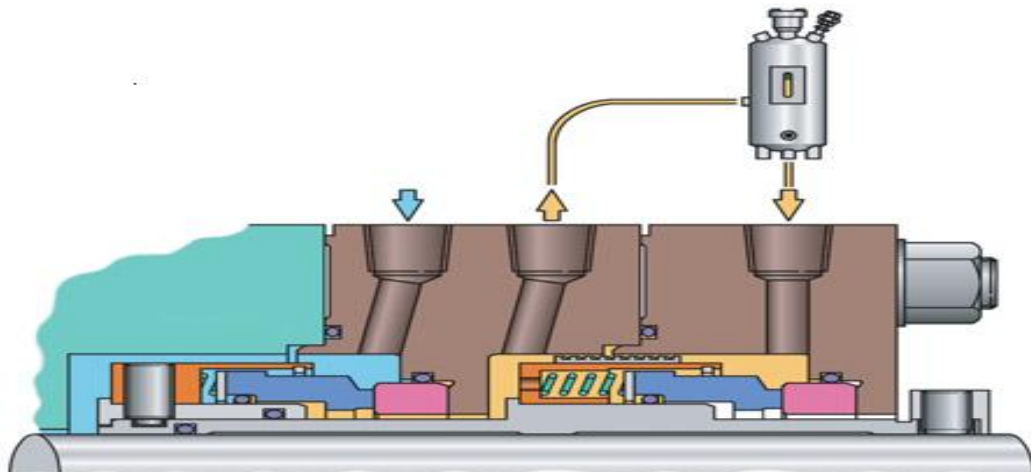


Figure III.9: Montage tandem

primaire sert à étancher le produit véhiculé, la garniture secondaire étanche un fluide auxiliaire (contenu dans un réservoir ou venant d'une source extérieure à la pression atmosphérique).

L'un des buts est de limiter la pollution de l'atmosphère par le produit véhiculé.

En cas de défaillance de la garniture primaire, la garniture secondaire doit pouvoir la suppléer le temps d'intervenir sur la machine.

Une variante consiste à utiliser une garniture sèche capable de fonctionner à sec ou une garniture sans contact capable de fonctionner sans fluide auxiliaire, évitant ainsi l'installation d'un système annexe.

Dans le cas particulier d'une garniture tandem pressurisée, la garniture côté produit possède une fonction de double compensation pour résister aux inversions de pression différentielle sans s'ouvrir.

La caractéristique de la double compensation est qu'elle permet aux faces de rester en contact et d'assurer l'étanchéité secondaire même si la pression du fluide auxiliaire vient à manquer. La garniture restera fermée grâce à la pression qui lui est appliquée côté produit. Cette conception permettra à la garniture de fonctionner comme une garniture en montage tandem sans la pression intermédiaire du fluide extérieur.

III.2.4.3 Montage double:

Le produit à étancher est isolé de l'atmosphère par un liquide auxiliaire (liquide de barrage) compatible avec celui-ci et confiné entre deux garnitures mécaniques. La pression de ce liquide est toujours supérieure à la pression du produit à étancher aux conditions maximales éventuelles d'exploitation ($\Delta p \geq 2bar$). Les garnitures étanchent alors le liquide auxiliaire. Il est évident que ce type de garniture mécanique est particulièrement recommandé pour étancher les produits dont aucune fuite n'est tolérée à l'atmosphère (la figure III.10): produits nocifs, polluants, radioactifs, corrosifs.

Ce type de montage est également utilisé lorsque la pression est négative (vide), que le produit à

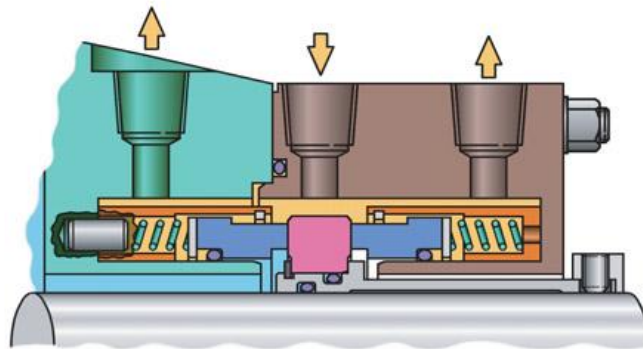


Figure III.10: Montage double

étancher est un gaz ou lorsque les températures sont très basses ou très élevées.

III.2.5 Caractéristiques des garnitures mécaniques :

Une garniture mécanique est un dispositif d'étanchéité utilisé principalement dans les systèmes rotatifs ou oscillants tels que les pompes, les compresseurs, les mélangeurs, etc. Elle a pour rôle d'empêcher le fluide de fuir le long de l'arbre tournant.

L'état de stabilité ou d'instabilité d'une garniture mécanique est un enjeu essentiel pour la durabilité, la sécurité et la performance de l'équipement.

III.2.5.1 Garniture mécanique stable :

Une garniture mécanique est stable lorsqu'elle :

- Fonctionne sans vibrations trop importantes.
- Si les surfaces d'étanchéité demeurent bien alignées et correctement lubrifiées.
- Il n'y a pas de grande variation de la pression de contact.

- On supporte sans fuite ni détérioration rapide les variations de température, de pression, de vitesse.

Une garniture stable fonctionne plus longtemps de manière fiable.

III.2.5.2 Garniture mécanique instable :

Une garniture mécanique est instable si on a :

- Des vibrations importantes (provenant de la pompe ou d'un défaut du montage).
- Les surfaces d'étanchéité oscillent (instabilité dynamique).
- Si l'on use trop vite, si l'on fuit trop souvent ou si l'on tombe en panne.
- Une forte sensibilité aux variations de pression ou température.

L'origine des éventuels problèmes de fonctionnement peut provenir d'une mauvaise conception, d'un mauvais montage, ou des conditions de service (cavitation, fonctionnement à sec, etc...). [20]

III.2.6 Systèmes de rinçage des garnitures mécaniques :

Les systèmes de rinçage des garnitures mécaniques sont conçus pour introduire un liquide propre et compatible dans la chambre d'étanchéité afin de refroidir, lubrifier et éliminer tout contaminant des faces d'étanchéité. Cela contribue à prolonger la durée de vie de la garniture mécanique et à prévenir une défaillance prématurée. Les systèmes de rinçage sont couramment utilisés dans les applications où le fluide de procédé est sale, abrasif ou ne convient pas au contact direct avec les faces du joint.

Le liquide de rinçage est généralement introduit dans la chambre d'étanchéité à une pression légèrement supérieure à celle du fluide de traitement pour empêcher le fluide de traitement de pénétrer dans la chambre d'étanchéité. Le débit du fluide de rinçage est soigneusement contrôlé pour assurer un refroidissement et une lubrification adéquats sans provoquer d'usure excessive des faces d'étanchéité (la figure III.11). [21]

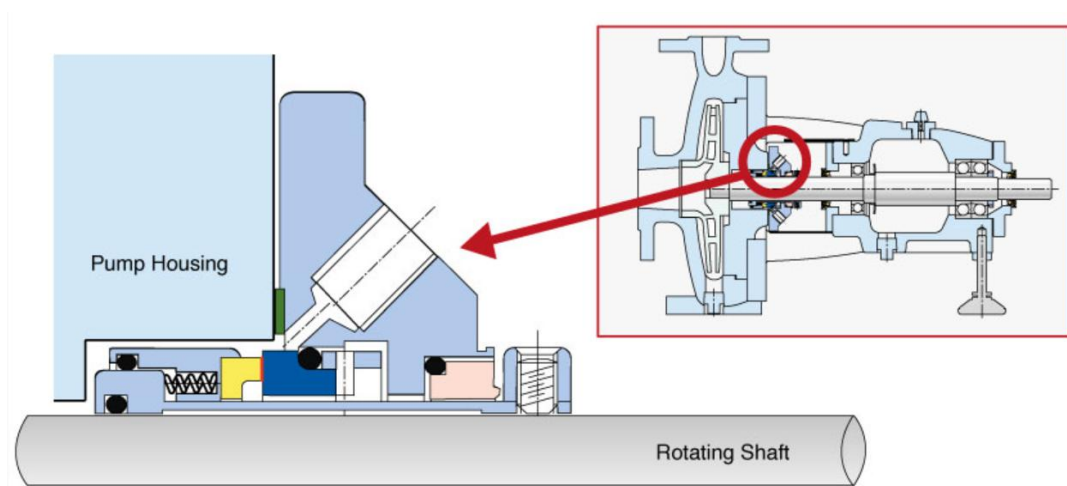


Figure III.11: Systèmes de rinçage des garnitures mécaniques

Ce système est utilisé selon la norme API 682 dans plusieurs plans (parmi lesquels : plan 11,21,23,32).

Parmi les avantages de ce système, on peut citer :

- Prolonge la durée de vie de la garniture.
- Réduit le frottement et l'usure.
- Protège contre la contamination du fluide process.
- Améliore la fiabilité des équipements.

III.2.7 Systèmes de QUENCH :

Le quench consiste à injecter ou maintenir un fluide (généralement un gaz ou un liquide neutre) du côté atmosphérique de la garniture mécanique, dans une garniture simple ou secondaire dans une garniture double.

Ce système permet d'atteindre plusieurs objectifs, parmi lesquels :

- Empêcher la formation de dépôts sur la face extérieure de la garniture.
- Éviter la cristallisation ou la polymérisation des produits au contact de l'air.
- Diluer ou évacuer les fuites légères pour des raisons de sécurité ou d'hygiène.
- Éviter la corrosion externe des pièces exposées.
- Réduire l'inflammation dans les produits inflammables en éliminant l'oxygène.

Types de fluides de quench :

Tableau III.1:Types de fluides de quench

Type de fluide	Application courante
Azote (N ₂)	Produits sensibles à l'oxygène ou inflammables
Air sec	Applications simples pour éviter la condensation
Vapeur	Produits collants ou cristallisants
Liquide 'eau, huile'	Refroidissement ou nettoyage externes

API Plan 62 c'est le plan standard pour les systèmes de quench. Il consiste à injecter un fluide du côté atmosphérique de la garniture, sans recirculation (la figure III.12).

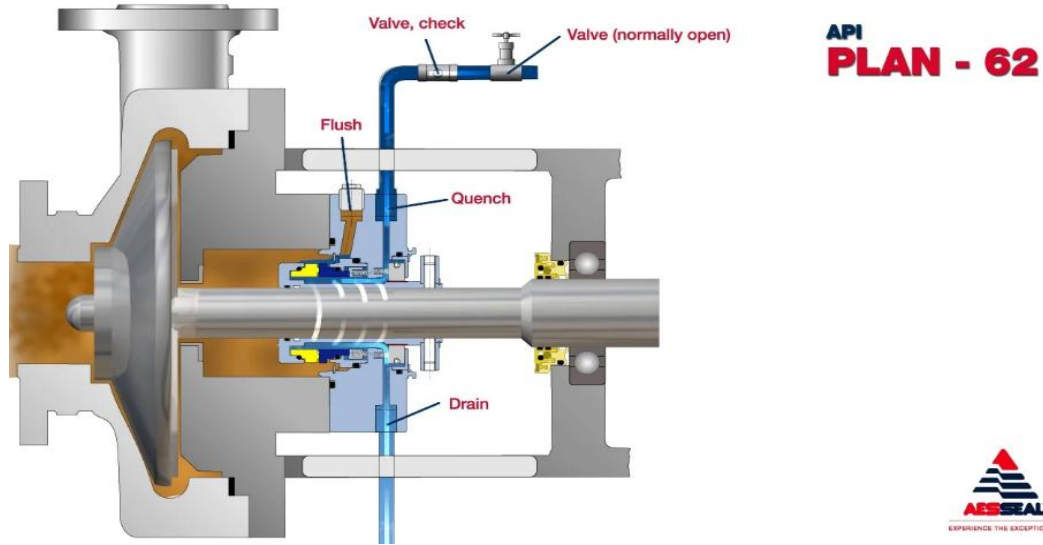


Figure III.12: API Plan 62

III.3 La norme API 682

III.3.1 Historique :

Les garnitures mécaniques sont acceptées depuis de nombreuses années comme la méthode standard d'étanchéité pour les pompes rotatives. Bien que certaines normes relatives aux garnitures mécaniques aient existé, elles étaient généralement intégrées dans d'autres normes plus générales telles que la DIN 24960, ANSI B73 ou encore API 610. Ces normes étaient avant tout des normes de conception de pompes, et les références aux garnitures se limitaient à leur interaction avec ces pompes.

À la fin des années 1980, un groupe d'ingénieurs et de responsables techniques issus de raffineries a entrepris de comparer les différentes solutions d'étanchéité utilisées dans les environnements critiques des raffineries. Sous la direction de V. R. Dodd (Chevron), ce groupe a proposé l'élaboration d'une norme spécifique. L'American Petroleum Institute (API – Washington, D.C.) a accepté de développer une norme dédiée aux garnitures mécaniques : la norme API 682.

Un groupe de travail (Task Force) a été constitué en 1990 et la première réunion a eu lieu en janvier 1991. Ce groupe comprenait quatorze membres issus de raffineries, de fabricants de garnitures et de constructeurs de pompes. Dans le cadre du développement de cette norme, le groupe a défini des terminologies normalisées : types de garnitures, configurations d'arrangement, et procédures de qualification par essais.

La Première Édition de la norme API 682 a été publiée en octobre 1994, et a rencontré un succès immédiat, avec une diffusion dans plus de 25 pays. Bien que cette édition ait été largement adoptée à l'international, elle ne constituait pas encore une norme reconnue mondialement.

Pour assurer une reconnaissance internationale, l'API a ouvert le processus de normalisation à l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO – Genève, Suisse). Ainsi, la Deuxième Édition d'API 682 a introduit de nouveaux concepts comme les catégories de garnitures, les garnitures à gaz, et les garnitures de confinement. Elle a aussi élargi le champ d'application aux pompes destinées aux produits chimiques, avec l'introduction de nouveaux plans de tuyauterie et procédures d'essai de qualification.

Cette deuxième édition fut confirmée comme norme internationale sous la référence ISO 21049 en 2002, avec des modifications mineures. Pour un alignement complet, la Troisième Édition d'API 682 a été publiée en 2004.

Depuis lors, la technologie des garnitures mécaniques a continué d'évoluer. Les utilisateurs finaux et les fabricants ont recommandé d'élargir encore le champ d'application pour inclure de nouvelles conceptions et applications émergentes. Des améliorations dans les plans de tuyauterie ont permis une fiabilité accrue des installations. De nouveaux critères de sélection des garnitures ont également été développés.

Le groupe de travail API 682 a ainsi intégré les besoins industriels et les avancées technologiques dans une nouvelle édition. Le fruit de ce travail est la Quatrième Édition d'API 682, qui continue à servir de référence mondiale pour les systèmes d'étanchéité mécanique.

Récemment, l'API a décidé d'émettre ses futures normes de manière indépendante de l'ISO. Par conséquent, la prochaine édition ne sera publiée que sous l'intitulé API 682 Fourth Edition, sans équivalent ISO 21049. [22]

III.3.2 Généralité :

III.3.2.1 Dimension :

La norme a été élaborée en tant que norme de l'ISO, avec toutes les dimensions exprimées en unités du Système international (SI). Les unités impériales américaines sont également indiquées entre parenthèses à titre de référence secondaire. Il revient à l'utilisateur de spécifier si les données, les schémas, les matériaux (y compris les fixations) et les équipements fournis conformément à cette norme devront utiliser les unités SI ou les unités impériales américaines.

III.3.2.2 Catégories de joint:

Des catégories de joints ont été introduites dans la deuxième édition de la norme, sous forme de sous-spécifications clairement définies. Avant d'en détailler le contenu, il est pertinent de comprendre les raisons ayant conduit à leur mise en place.

La première édition de la norme avait initialement défini un type de joint destiné aux services sévères, intégrant des dispositifs spécifiques tels qu'une bague de distribution de charge, un manchon de commande de puissance, ainsi qu'un jeu radial flottant applicable à toutes les garnitures simples. Ces éléments ont rendu les joints plus volumineux et coûteux, souvent au-delà des besoins réels de nombreuses applications générales.

Pour ces dernières, certains utilisateurs ont commencé à spécifier des joints ne comprenant que certains des dispositifs exigés dans la norme de base. Ces modèles étaient alors décrits comme étant

conçus « dans l'esprit de 682 » ou « avec l'intention de 682 ». Il est ainsi devenu évident que les exigences complètes de la première édition n'étaient pas nécessaires dans toutes les situations.

Avec l'élargissement du périmètre de la norme pour inclure des pompes chimiques, il est apparu évident que cette pratique allait se poursuivre. En effet, ces pompes sont généralement conçues pour fonctionner à des pressions et températures inférieures à celles des pompes API 610. Il était donc logique de définir une catégorie de joint adaptée à ces conditions de fonctionnement.

Ainsi, une catégorie de garniture est définie comme une sous-spécification technique qui établit les caractéristiques spécifiques suivantes :

- Le type de pompe concerné,
- Les plages de fonctionnement,
- Les matériaux utilisés,
- Les caractéristiques de conception,
- Les conditions de documentation requises pour la garniture.

La norme reconnaît trois catégories distinctes, identifiées comme catégorie 1, catégorie 2, et catégorie 3.

a. Un joint de la catégorie 1 :

Est un joint destiné aux pompes chimiques.

b. Un joint de la catégorie 2 :

Est prévu pour des pompes d'API 610 (OIN 13709) dans des services de raffinerie exigeant moins de dispositifs qu'un joint de la première édition 682.

c. Le joint de la catégorie 3 :

Est prévu pour des pompes d'API 610 et est fondamentalement le même joint défini dans la première édition.

Tableau III.2: Comparaison des caractéristiques techniques des garnitures mécaniques selon les catégories API 682

Caractéristique	Catégorie 1	Catégorie 2	Catégorie 3
Taille de la chambre d'étanchéité	ANSI ASME B73.1 et B73.2, ISO 3069 Cadre C	API-610, ISO 13709	API-610, ISO 13709
Plage de température	-40°F à 500°F	-40°F à 750°F	-40°F à 750°F
Plage de pression absolue	315 PSI	615 PSI	615 PSI

Caractéristique	Catégorie 1	Catégorie 2	Catégorie 3
Matériaux de face	Carbone résistant au cloquage de qualité supérieure contre le carbure de silicium auto-fritté	Carbone résistant au cloquage de qualité supérieure contre le carbure de silicium lié par réaction	Carbone résistant au cloquage de qualité supérieure contre le carbure de silicium lié par réaction
Rinçage distribué requis pour les joints simples avec éléments flexibles rotatifs	Lorsque spécifié par l'acheteur ou requis dans des applications à faible marge de pression vapeur	Lorsque spécifié par l'acheteur ou requis dans des applications à faible marge de pression vapeur	Requis
Exigences de bague d'étranglement pour les joints simples	Bague fixe en carbone requise. L'acheteur peut spécifier une bague flottante en carbone	Bague fixe en métal non étincelant requise. L'acheteur peut spécifier une bague flottante en carbone	Bague flottante en carbone requise
Portée du test de qualification du fournisseur	Testé en tant que joint de catégorie 1 sauf si les faces sont interchangeables avec des joints déjà testés	Testé en tant que joint de catégorie 2 sauf si les faces sont interchangeables avec des joints déjà testés	Test requis en tant qu'assemblage cartouche complet
Exigences de données pour la proposition	Minimales	Minimales	Rigoureuses
Exigences de données contractuelles	Minimales	Minimales	Rigoureuses

III.3.2.3 Types de joint:

Le type de joint définit la conception de base d'un joint aussi bien que les matériaux de conception. Ils sont restés en grande partie inchangés depuis la première édition. Les types de joint sont définis comme type A, B, ou C.

a. Un joint du type A :

C'est une garniture à ressort avec un élément flexible tournant, carbure de silicium contre faces en carbone, l'alliage C-276, les joints circulaires en « fluoro-elastomer », et les composants métalliques sont en acier 316 SS (la figure III.13).

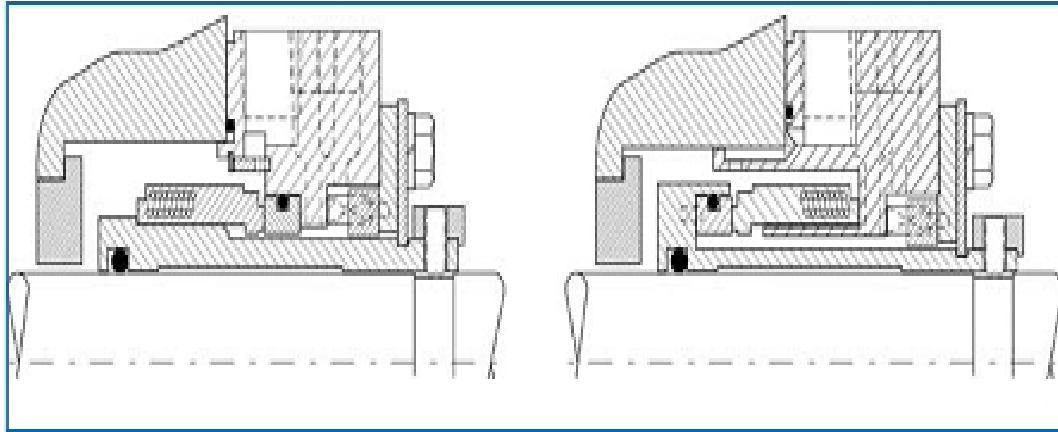


Figure III.13: Un joint du type A

b. Un joint du type B :

C'est un joint de soufflets avec un élément flexible tournant, carbure de silicium contre des faces en carbone, alliage C-276 diaphragmes, joints circulaires de fluoro-elastomer, et 316 SS composants en métal (la figure III.14).

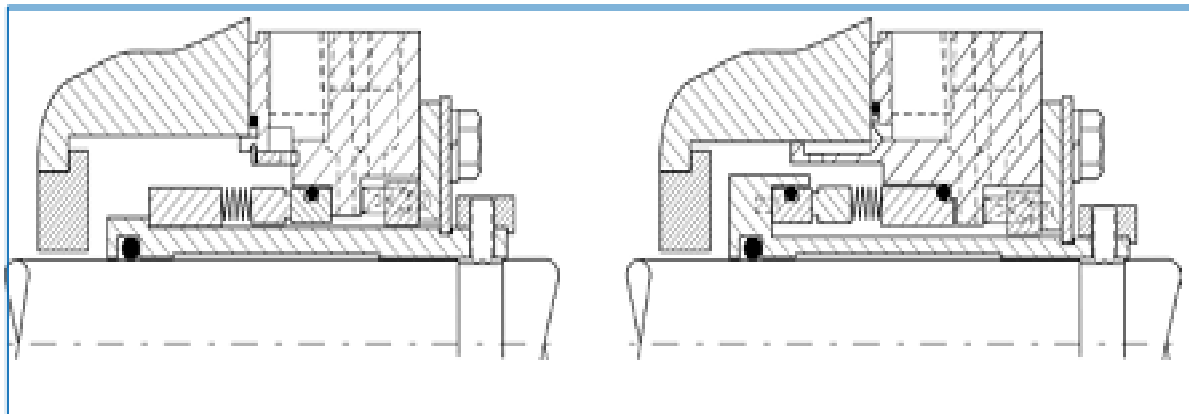


Figure III.14: Un joint du type B

c. Un joint du type C :

C'est un joint à soufflets avec un élément flexible stationnaire, silicium carbure contre des faces en carbone, les diaphragmes en alliage 718, les joints secondaires de graphite flexible, et composants métalliques en acier 316 SS (la figure III.15).[23]

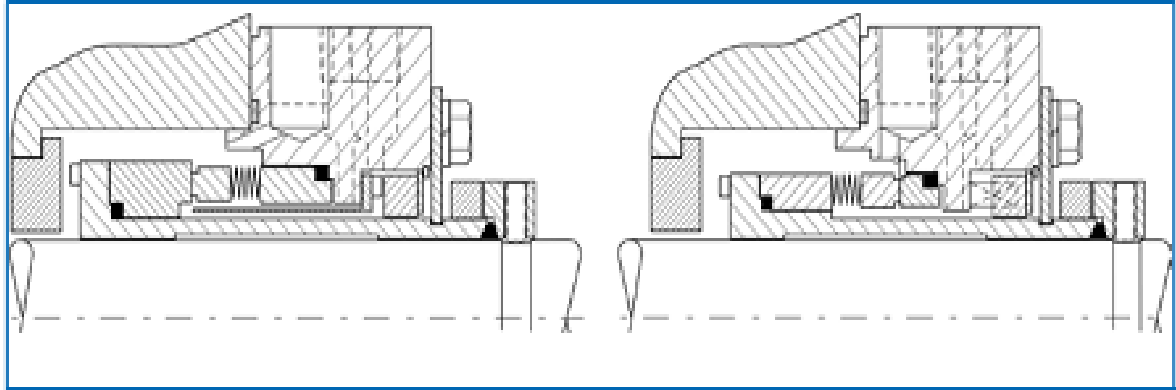


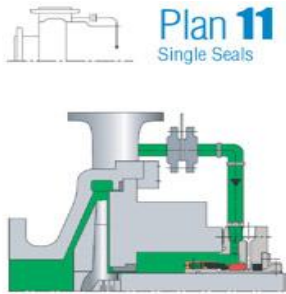
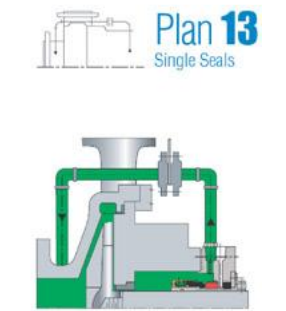
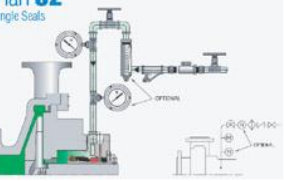
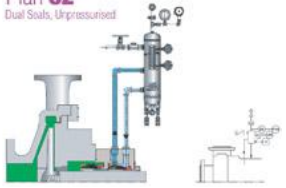





Figure III.15: Un joint du type C

Tableau III.3:Résumé des plans API 682 appliqués aux garnitures mécaniques

Plans	Description	Avantages	Commentaires
 <p>Plan 01 Single Seals</p>	<p>Circulation interne depuis le refoulement de la pompe vers la chambre de la garniture mécanique. Plan similaire à un plan 11 mais sans tuyauterie externe</p>	<p>Pas de risque de contamination du produit et pas de tuyauterie externe. Avantageux sur les produits très visqueux à basse température, le risque de gel étant écarté contrairement à une tuyauterie externe exposée aux intempéries</p>	<p>Ce type de lubrification ne doit être employé que pour des fluides non chargés puisque des particules pourraient obstruer l'orifice interne. N'est pas recommandé sur pompe verticale</p>
 <p>Plan 02 Single Seals</p>	<p>Chambre d'étanchéité en cul de sac sans circulation du produit éliminant tout risque de rétention de gaz</p>	<p>Les particules solides ne sont pas introduites dans la garniture de façon continue. Le dégazage s'effectue automatiquement sans matériel extérieur avec les boîtes à garnitures coniques sans grain de fonds</p>	<p>Idéal pour des garnitures ANSI/ASME B73 à boîte large ou conique, pour les boîtes à garnitures ISO 3069 ou pour produits chauds utilisant une boîte refroidie. Pour ces dernières, un Plan 62 avec vapeur peut également être utilisé pour offrir un refroidissement supplémentaire</p>

 <p>Plan 11 Single Seals</p>	<p>C'est le plan le plus couramment utilisé aujourd'hui. Circulation externe du refoulement de la pompe (ou d'un point intermédiaire) directement vers la garniture via un orifice. Cela permet de refroidir et de lubrifier les faces de la garniture</p>	<p>Pas de contamination du produit et réalisation simple</p>	<p>L'efficacité du refroidissement est améliorée si la garniture est installée avec une injection multipoint</p>
 <p>Plan 13 Single Seals</p>	<p>Circulation partant de la chambre d'étanchéité allant vers l'aspiration de la pompe</p>	<p>Avec un Plan 13, il est possible d'augmenter ou de diminuer la pression sur garniture en dimensionnant correctement la taille d'orifice et le jeu au grain de fond</p>	<p>Généralement, le Plan 13 est utilisé sur des pompes verticales pour assurer le dégazage de la garniture située au point haut de la pompe. En raison de la différence dans les configurations d'écoulement, le Plan 13 est moins efficace que le Plan 11 pour éliminer les calories et donc le débit devra être plus élevé</p>
 <p>Plan 32 Single Seals</p>	<p>Injection d'un liquide propre externe vers la garniture. Ce plan est presque toujours utilisé avec un grain de fond à jeu réduit</p>	<p>Le fluide externe, quand il est sélectionné correctement, peut allonger la durée de vie de la garniture de façon significative</p>	<p>Quand une source externe est utilisée, l'utilisateur doit prendre en considération des questions relatives à la dilution du produit et/ou d'ordre économique</p>
 <p>Plan 52 Dual Seals, Unpressurised</p>	<p>Le Plan 52 utilise un réservoir externe pour fournir un liquide tampon à la garniture externe (double non pressurisée)</p>	<p>Comparativement avec les garnitures simples, les garnitures doubles non pressurisées présentent moins de fuites à l'atmosphère en fonctionnement normal ou en cas de défaillance</p>	<p>Des serpentins de refroidissement présents dans le réservoir peuvent également éliminer la chaleur du liquide tampon</p>
 <p>Plan 53A Dual Seals, Pressurised</p>	<p>Le Plan 53A utilise un réservoir externe pour alimenter en liquide en barrage une garniture double pressurisée. La pression du réservoir est générée par un gaz, principalement de l'azote et doit être supérieure à la pression à étancher. La circulation est assurée par un anneau de pompage installé sur la garniture</p>	<p>La taille du réservoir peut être optimisée en fonction du débit. Des particules provenant de l'usure des garnitures se déposent au fond du réservoir et ne circulent plus</p>	<p>La chaleur est dissipée par un serpentin intégré dans le réservoir. Le fluide tampon est soumis à la dissolution du gaz dans un liquide à des pressions supérieures à 21 bar</p>

Plans	Description	Avantages	Commentaires
	<p>Le Plan 54 utilise une source externe propre et sous pression pour alimenter en fluide de barrage une garniture double pressurisée</p>	<p>Peut offrir une circulation pressurisée à plusieurs installations de garniture pour réduire les coûts. Élimine radicalement les émissions fugitives vers l'atmosphère</p>	<p>Les systèmes Plan 54 peuvent être faits sur mesure pour répondre aux exigences de l'application</p>
	<p>Le Plan 74 fournit un gaz à pression plus élevée que la pression à étancher pour empêcher le fluide véhiculé de s'échapper à l'atmosphère. Le panneau de contrôle enlève l'humidité, filtre le gaz et règle la pression de barrage</p>	<p>Des coûts et une maintenance réduite comparativement aux systèmes doubles pressurisés liquides. La fuite vers l'atmosphère est un gaz inerte</p>	<p>Le gaz de barrage est fourni en général par le réseau d'azote local. Pour des applications à pression plus élevée, la pression du système peut être accrue avec un amplificateur de pression gaz</p>

III.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié en détail la garniture mécanique, en abordant ses principes de fonctionnement, ses composants principaux, ses différents types ainsi que les critères de choix selon les conditions d'utilisation. Cette analyse nous a permis de comprendre l'importance de ce composant dans l'étanchéité des systèmes rotatifs, notamment dans les pompes.

Cette base théorique et technique est essentielle pour passer à une étape plus appliquée : le dimensionnement et l'évaluation des performances d'une garniture mécanique à travers des outils de calcul et de simulation.

Et c'est ce que nous verrons dans notre quatrième chapitre.

Chapitre IV
Calcul et conception
de la garniture mécanique

IV.1 Introduction

Jusqu'au début des années 1980, les pompes étaient généralement étanchées à l'aide de tresses d'étanchéité. Depuis cette époque, les garnitures mécaniques ont progressivement remplacé ces tresses d'étanchéité, dans presque tous les secteurs industriels.

Pour le transport d'hydrocarbures, les conditions de fonctionnement sont souvent difficiles (pompes à fort débit, grande taille, ...) et la mise en œuvre de garnitures mécaniques s'impose en remplacement des tresses tant les avantages offerts par ces dernières apparaissent indiscutables.

Voici la démarche à réaliser pour remplacer les tresses d'étanchéité par une garniture mécanique sur une pompe vertical :

IV.2 Etude de cas :

La pompe étudiée est une pompe booster centrifuge verticale conçue par BYRON JACKSON Pump Division, et fournie par International Sales Division of General Electric Co. Utilisée par RTE (Région Transport Est) SONATRACH dans le transfert du pétrole brute par l'oléoduc Haoud El Hamra-Skikda, elle est placée au niveau du terminal terrestre de Skikda.

IV.2.1 Schéma et caractéristiques de la pompe :

Voici ci-dessous une image de la pompe suivi d'une coupe verticale (la figure IV.1). Le schéma technique de la pompe avec toute la dimension sera aussi présenté (Annexe B).

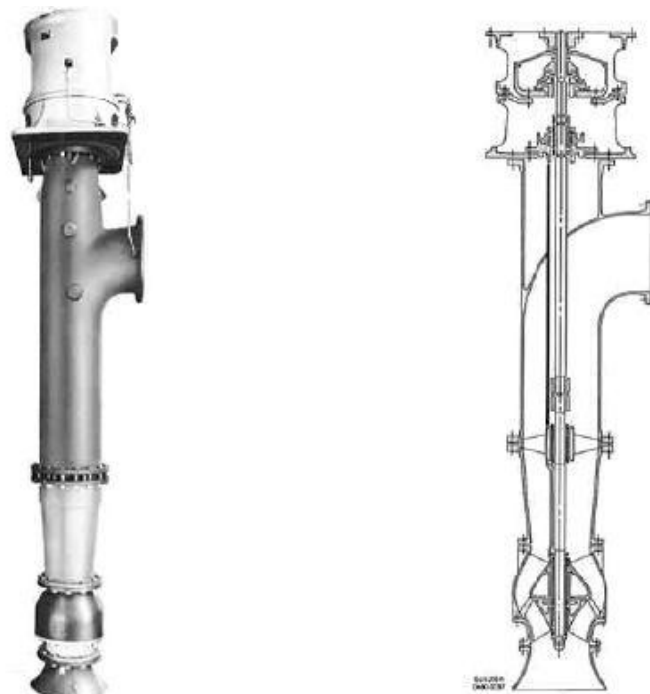


Figure IV.1: Pompe Byron Jackson avec coupe verticale

Tableau IV.1:Données techniques et caractéristiques de la pompe

Données techniques et Caractéristique:	
Taille de la pompe:	42 KX
Type de la pompe:	Un seul étage VMT, style SBEP
Numéro de série:	741-n-0613 / 19
Service:	Pompe booster verticale pour pétrole brute
Rotation:	Contraire au sens de la montre (vu du moteur)
Entrainement:	General Electric, VSS Motor, TEFC, Chassis 6348 P42, 1000 HP, 750 Tr/min
Accouplement:	BYRON JACKSON rigide à bride, 3 pièces ajustables couplées avec une bague fendue pour l'arbre d'entraînement
Diamètre de l'arbre:	116 mm
Joint d'arbre:	Presse-étoupe avec (4) anneaux de tresse John Crane 100M ; 4-1/2.1.D. x 5/8 carré

IV.2.2 Rôle de la pompe « booster » dans le process :

La pompe booster comme son nom l'indique est utiliser pour booster le fluide, ce qui veut dire augmenter sa pression et sa vitesse (débit) il existe 7 pompes de ce type dans le terminal terrestre de Skikda, chacune d'elle est reliée à un bac de stockage qui est à l'amont de la pompe. La pompe est posée dans une cavité verticale qu'on appelle souvent « puis ». Après l'ouverture des vannes des bacs de stockage, le pétrole brut remplit le puis, puis il est pompé par « la booster » essentiellement vers la « Raffinerie de Skikda » mais aussi vers les pompes de chargement soit celles qui se trouvent au niveau du terminal marin, ou celles qui se trouvent au niveau des bouées (pour un chargement sur mer). Les pompes de chargement comme leur nom indique chargent ensuite le pétrole dans les bateaux.

IV.3 Système d'étanchéité actuelle de la pompe booster :

L'étanchéité dans les pompes booster ce fait actuellement par le biais de « garnitures à tresses », ce système était le système utilisé dans ce type de pompe et en effet c'est leur système d'origine. Mais avec le temps il a montré quelques failles, et avec le développement technologique que vivent les systèmes d'étanchéité un remplacement s'impose.

IV.3.1 Présentation du système « garniture à tresses » ou presse-étoupe :

Le presse-étoupe, un dispositif d'étanchéité à bourrage en matériaux fibreux tressés, est toujours composé d'un bourrage en étoffe, généralement de jute ou d'amiante, qui est serré autour de l'arbre à l'aide d'un écrou ou d'une bride avec des boulons, ce mécanisme étant responsable d'un couple de frottement important et de l'importance de puissance recherchée. Il est cependant de moins en moins

présent dans de nombreux cas en remplacement de joints à lèvres ou joints prétendus « de surface » mais est encore présent dans des applications à haute pression par exemple où il occupe un rôle important même, comme dans le cas de joints de culasse dans les automobiles, là où les applications à haute pression remplacent ceux-ci par des joints de culasse, précisément dans l'automobile (la figure IV.2).

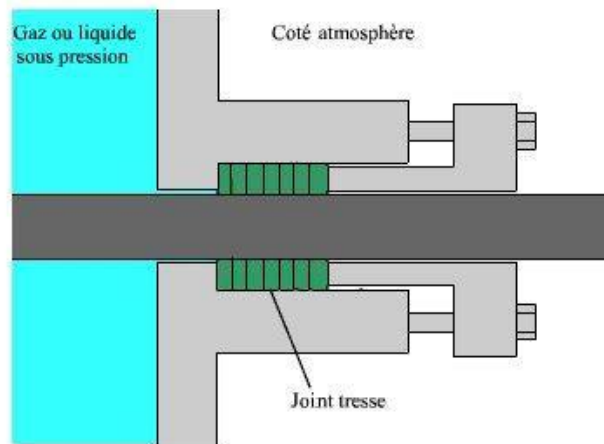


Figure IV.2:Schéma simplifié de la garniture à tresse

La tresse est insérée entre l'arbre et l'alésage (ou chemise), son bon graissage supprimant les frottements, par contre, si la forme de la tresse, de la forme et de la pression qui est faite par les vis, lorsqu'effectivement serrées, l'étanchéité ne sera pas bonne du tout, bien au contraire elle dépend étroitement de la forme de la tresse et de la pression effectivement apposée par les vis.

IV.3.2 Types de tresses d'étanchéité

Les tresses d'étanchéité peuvent être classées selon deux critères principaux : la forme de leur section et le type de matériau utilisé pour leur fabrication.

a. Selon la section

On distingue principalement deux types :

- Tresses à section carrée : ce sont les plus couramment utilisées dans l'industrie (la figure IV.3)



Figure IV.3:Tresses à section carrée

- Tresses à section trapézoïdale : plus récentes, elles sont adaptées à certains profils de logements spécifiques (la figure IV.4).

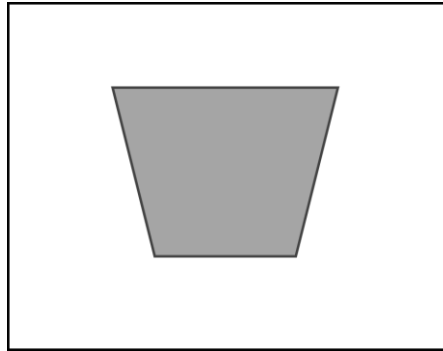


Figure IV.4: Tresses à section trapézoïdale

b. Selon les matériaux constitutifs

À l'origine, les tresses étaient fabriquées à partir de fibres d'amiante, en raison de leur résistance thermique. Cependant, l'usage de l'amiante étant aujourd'hui interdit pour des raisons de santé publique, d'autres matériaux ont été adoptés :

- PTFE (polytétrafluoroéthylène)
- Graphite
- Fibres d'aramide
- Kevlar, entre autres.

Ces matériaux sont choisis pour leur résistance à la température, aux produits chimiques, et à l'usure mécanique.

IV.3.3 Failles de l'étanchéité à tresses

Dans le secteur pétrolier, et plus particulièrement dans le transport des hydrocarbures, les systèmes à tresses ont progressivement été abandonnés au profit des garnitures mécaniques. Ces dernières sont aujourd'hui considérées comme la solution la plus fiable, sécurisée et durable pour l'étanchéité des machines tournantes. Ce remplacement est motivé par de nombreuses limites techniques et sécuritaires liées aux garnitures à tresses.

- **Problèmes liés aux matériaux constitutifs**

Historiquement, la majorité des tresses étaient fabriquées à base d'amiante, un matériau aujourd'hui interdit dans de nombreux pays, y compris en Algérie, en raison de ses effets cancérigènes avérés. Son utilisation présente un risque important pour la santé des opérateurs, notamment lors des opérations de maintenance ou de remplacement.

- **Fuites inévitables**

Contrairement aux garnitures mécaniques, les garnitures à tresses ne permettent pas une étanchéité parfaite. Elles fonctionnent avec une fuite contrôlée, notamment à haute température, ce qui peut entraîner :

- **Accumulation de fluide sur l'équipement** : provoquant à terme sa dégradation.
- **Écoulement au sol** : engendrant des risques environnementaux et de pollution des sols.

- **Évaporation du fluide** : ce qui contribue à la pollution de l'air.
- **Risques techniques liés au serrage**
 - En cas de serrage excessif, la fuite est supprimée, empêchant ainsi le renouvellement du fluide de lubrification. Cela engendre une surchauffe du système, pouvant endommager la tresse et l'arbre, voire provoquer des égratignures ou déformations graves.
 - À l'inverse, un jeu trop important entraîne une fuite excessive, provoquant des pertes de fluide considérables, et donc des coûts économiques accrus.

- **Couple de frottement élevé**

Les tresses sont montées directement sur l'arbre et nécessitent un serrage important, ce qui génère un couple résistant élevé, réduisant ainsi l'efficacité énergétique de la machine.

- **Sensibilité aux défauts d'alignement**

En cas de désalignement ou de présence d'efforts radiaux, les garnitures à tresses se dégradent rapidement, compromettant l'étanchéité du système.

- **Contamination du fluide**

Des particules issues de l'usure de la tresse peuvent se détacher et contaminer le fluide en circulation, affectant ainsi la qualité du produit ou la performance de l'installation.

- **Entretien fréquent et coûteux**

Les garnitures à tresses exigent une surveillance régulière du débit de fuite. En cas d'augmentation de ce dernier :

- Il est nécessaire de resserrer le presse-étoupe jusqu'à atteindre un débit minimal acceptable.
- Si le serrage est déjà maximal et que la fuite persiste, il faut alors remplacer la tresse, ce qui implique l'arrêt de la machine.
- Dans le contexte industriel, tout arrêt de production représente une perte financière significative.

IV.4 Solution proposée

Il n'y a guère de doute possible, les garnitures à tresse ou presse-étoupe, constituent le moyen d'étanchéité depuis la nuit des temps dans l'univers des machines tournantes en général, des pompes en particulier, malgré leurs nombreuses limitations. Cependant, avec l'essor de l'industrie de la production, l'accélération des cadences de production, les contraintes de plus en plus sévères sur l'environnement de la sphère tout particulièrement, lors de l'exploitation des gisements pétroliers, décisives, il devenait donc nécessaire d'engager des démarches concrètes pour résoudre cette problématique.

Les garnitures mécaniques ont très vite aidé à résoudre le problème d'étanchéité. En très peu de temps, elles sont devenues une solution de remplacement. Elles sont ainsi apparues comme des solutions de première ligne pour ne plus avoir à recourir aux anciennes solutions que sont les garnitures à tresse. Étalonnant même si peu sur le taux de fuite (l'étanchéité y est quasi totale), le rendement (répondant à un couple faible et un frottement faible) et la sécurité (grandeur introduite ici en regard de la Haute Sécurité) y compris pour la maintenance.

Au reste leur grande taille pour un large éventail de dimensions, la possibilité de les réaliser en plusieurs matériaux différents, leur facilité d'intervention et de maintenance permettent ainsi l'hypothèse de l'introduction de solutions propres, efficaces et spécifiques dans chaque cas de figure.

IV.4.1 Critères de choix du type de garniture

Comme mentionné dans le chapitre 3, le choix d'une garniture mécanique dépend de différents paramètres qu'on peut classer en 4 catégories : condition de service (température, pression, vitesse de rotation ...), propriétés du fluide à étancher (nature, dangerosité...), normes applicables et la facilité du montage.

Les 2 tableaux ci-dessous regroupent les paramètres de service de la pompe étudiée (la pompe booster Byron Jackson 42kx) et les propriétés du fluide à étancher qui est du pétrole brut.

Remarque : les valeurs sont légèrement variables surtout celles de la température et des pressions et cela dû aux conditions atmosphériques mais aussi aux exigences des pompes de chargement (pression et débit) qui sont précisées par les clients (raffinerie ou bateaux de chargement), par conséquent les valeurs présentées dans ces tableaux seront des valeurs extrêmes (minimales ou maximales).

- La norme appliquée sera la norme API 682.
- Le montage sera décrit après.

Tableau IV.2:Condition de service de la pompe

Paramètre	Valeur	Unité
Température	68 (max)	°C
Pression à l'aspiration	1,5 (min)	Bars
Pression au refoulement	11 (max)	Bars
Vitesse de rotation	750	Tr/min

Tableau IV.3:Propriétés du fluide à étancher

Paramètre	Valeurs	Unité
Fluide	Pétrole brut	-
Densité	0.8	Kg/cm ³
Viscosité	5.1	CSt
Tension de vapeur	0.738	TVR
Présence de particules	Possible (Grains de sable)	-
Dangerosité	Oui	-

IV.5 Précision du type de garniture mécanique

Après une étude approfondie des garnitures mécaniques (leurs types, technologies et matériaux) ainsi qu'une analyse détaillée des conditions de fonctionnement de la pompe et des propriétés du fluide à étancher, et après consultation des normes applicables, il a été décidé de remplacer la garniture à tresse John Crane 100M de la pompe booster Byron Jackson 42KX par une garniture de type A selon la norme API 682, autrement dit « Une garniture simple mono-ressort compensée ».

IV.5.1 Présentation de la garniture mécanique simple mono-ressort compensée

Il est permis de considérer que les garnitures mécaniques simples à ressort unique constituent les garnitures les plus largement répandues et les plus utilisées dans le secteur de la pétrochimie, en dépit de l'apparition de nouveaux types de garnitures, tels que les garnitures à soufflet, à sec ou encore magnétiques et malgré le fait que leur utilisation soit mise à mal dans plusieurs applications au profit de nouveaux types de garnitures, dans des situations où ces dernières sont laissées de côté, les garnitures simples mono-ressort sont toujours d'actualité dans les chambres à garnitures des machines tournantes sur lesquelles de nombreux exploitants semblent être fidèles à ces garnitures jugées être les plus pratiques et les plus fiables.

On parlera de garniture mécanique simple quand on parle d'un premier procédé d'étanchéité par un contact unique, à une seule étape.

La garniture double correspond à un assemblage de deux garnitures simples montées en série, dans un même corps.

On peut également parler de garniture simple là où la lubrification de la garniture est assurée directement par le fluide du procédé.

Une garniture mécanique telle qu'on l'écrit mono-ressort est équipée d'un unique ressort central, à l'opposée des garnitures multi-ressort pour lesquelles s'agissant du nombre de ressorts, il s'agira de ceux intégrés au tronçon machine, en fonction de la conception et design du fabricant choisi.

IV.5.2 Eléments composants :

Une garniture mécanique simple mono-ressort comporte essentiellement une partie stationnaire, une partie rotative, un ressort et des joints toriques. Tout ça emballé dans une chemise. Elle comporte aussi d'autres éléments qu'on appelle « accessoires » qui se différencient d'un constructeur à un autre.

Voici un schéma simplifié de la garniture (figure IV.5)

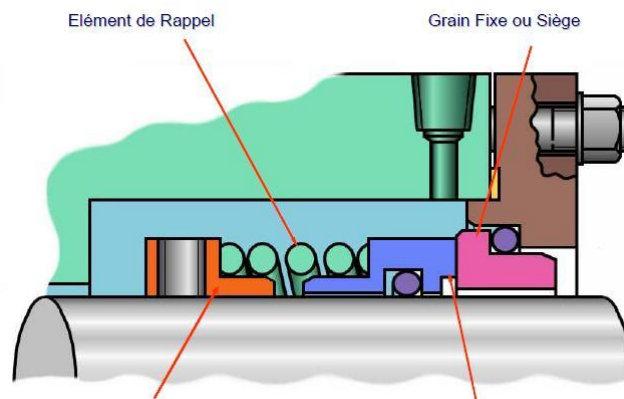


Figure IV.5: Eléments composants

- **Grain tournant** : il représente la partie tournante de la garniture, il est fixé sur l'arbre.
- **Grain fixe** : représente la partie fixe il est fixé sur la chambre.
- **Le ressort** : avec sa force de rappel il assure le contact entre le grain fixe et le grain mobile.
- **Le corps de la garniture** : représente le revêtement extérieur de la garniture.
- **Les joints** : ils empêchent le passage du fluide.
- **Éléments de liaison** : chemise, couvercle, support...

IV.5.3 Matériaux utilisée:

On se référant à la norme API682 les matériaux utilisés dans chaque élément doivent être les suivant :

- Les grains fixe et mobile : vu que le pétrole brut n'est pas abrasif, l'un des grains doit être en carbone-graphite et l'autre doit être en carbure de silicone. Les degrés de ces matériaux doivent être précisés par le constructeur.
- La chemise : dans le cas général elle doit être en acier 316 AISI Standard Type.
- Le ressort : dans le cas général les garnitures mécaniques mono-ressort doivent comporter un ressort en acier 316 AISI Standard Type.
- Joints : en élastomère ou PTFE.

IV.5.4 Principe de fonctionnement :

Au sein d'une garniture mécanique d'une construction simple, l'étanchéité est maintenue par l'interaction de deux composants principaux : d'une part, un anneau relié à l'arbre tournant, communément nommé rotor, d'autre part, un anneau solidaire du bâti, qui est aussi généralement dénommé stator.

Ces deux éléments sont séparés par un film liquide de très faible épaisseur, ou interface, qui permet d'assurer le contact contrôlé entre le rotor et le stator, garantissant ainsi un fonctionnement optimal. On peut assurer un alignement rigide et une souplesse de fonctionnement, en construisant l'un des deux anneaux sur une relation souple.

L'étanchéité entre chaque anneau (ou « grain ») et son support est obtenue au moyen de joints en élastomère, ce que l'on appelle l'étanchéité secondaire (la figure IV.6).

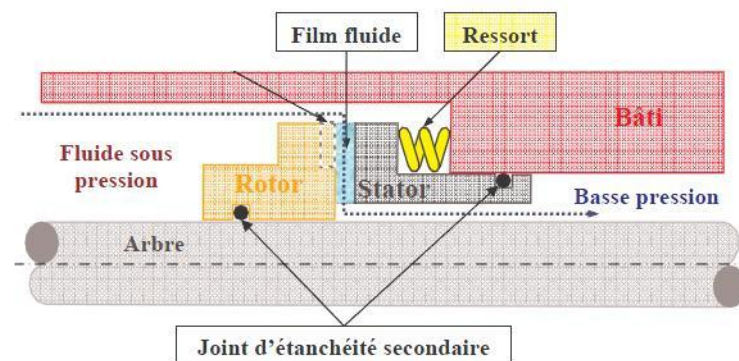


Figure IV.6:Principe de fonctionnement

D'une part, le fluide sous pression génère une force sur la face arrière du rotor, à laquelle s'additionne la poussée du ressort permettant aux deux faces de s'agripper. D'autre part, faiblement sous pression, le fluide qui circule entre ces deux faces engendre une force opposée, qui tend à les séparer.

En fonctionnement, un équilibre dynamique entre ces forces opposées doit être constamment maintenu afin de préserver l'épaisseur minimale du film liquide assurant l'étanchéité sans contact direct excessif.

L'usure naturelle des faces d'étanchéité et/ou des joints rend leur remplacement périodique nécessaire, afin d'assurer la fiabilité du système.

IV.5.5 Justification du choix:

On trouve une grande variété de garnitures mécaniques, et chaque fabricant affirme que sa technologie constitue la solution la plus efficace aux problèmes d'étanchéité. Toutefois, après une analyse approfondie du problème, des consultations avec des experts et des opérateurs spécialisés dans les pompes et les garnitures, et surtout en s'appuyant sur les normes internationales, il devient possible de prendre une décision appropriée.

Afin de parvenir à notre choix, nous nous sommes appuyés sur les critères suivants :

IV.5.5.1 Garniture simple:

Dans notre situation, le fluide à contenir est du pétrole brut, lequel présente les caractéristiques suivantes :

- Le pétrole brut est considéré comme un fluide non-abrasif.
- La température de service du fluide à étancher est plus au moins faible dépassant pas les 68°C.
- Pression de service relativement faible (ne dépasse pas les 11 bars).
- Le pétrole brut est considéré comme un fluide non-dangereux et non-toxique
- Viscosité moyenne (environ 5.1 CSt).
- Vitesse de rotation stable (750 tr/min).

C'est pourquoi l'utilisation d'une garniture mécanique simple suffit et garantit une étanchéité efficace. Installer une garniture mécanique double aurait été superflu (et beaucoup plus coûteux).

Grâce à sa température relativement basse et sa viscosité moyenne, le pétrole brut possède un bon pouvoir lubrifiant, ce qui rend inutile l'utilisation d'un montage double. (Dans les stations situées au sud du pays, où les températures extérieures peuvent atteindre 60°C et où la température du fluide est très élevée, il pourrait être prématuré d'utiliser des garnitures doubles, lubrifiées par exemple à l'azote liquide, qui conserve ses propriétés même à très haute température. Cependant, puisque notre installation se trouve à Skikda, où les températures extérieures ne dépassent pas 42°C, l'utilisation d'une garniture simple devrait suffire).

IV.5.5.2 Garniture à ressort:

Le choix d'une garniture à ressort plutôt qu'une garniture à soufflet s'explique par les caractéristiques du pétrole brut, en particulier sa faible densité. Étant donné que la membrane du soufflet est relativement fine et que son effet amortissant est limité, le fonctionnement dans des

conditions de « stick-slip » peut engendrer des vibrations axiales susceptibles de provoquer des ruptures par fatigue.

La garniture à ressort reste le modèle le plus utilisé dans le domaine des hydrocarbures et cela pour plusieurs raisons :

- Moins chères que les garnitures à soufflet.
- Disponible dans la plupart des tailles.
- De conception particulièrement robuste.
- Température de service relativement moyenne, donc des joints en PTFE seront suffisant et pourront bien résister.

IV.5.5.3 Garniture mono-ressort:

En ce qui nous concerne, on s'est orienté vers une garniture mono-ressort même si la technologie multi-ressort est récente et qu'elle compense mieux les défauts d'alignement étant donné que chaque ressort est réglé séparément.

Toutefois, ces garnitures multi-ressorts posent problème, et surtout un risque, en effet malgré la très bonne qualité du pétrole brut Algérien en raison d'un pourcentage très faible de soufre ou d'impuretés (teneur en soufre $< 0.1\%$), du filtrage du fluide, de l'utilisation de crépines, du sable est souvent transporté avec le fluide jusqu'aux pompes, ceci étant dû à un mauvais nettoyage des pipes ou autre appareil du process de transport. Et vu le petit diamètre des ressorts des garnitures multi-ressorts, le sable s'infiltré à l'intérieur des ressorts et cela les colle empêchant le bon fonctionnement de la garniture et provoquant son échauffement, et nécessite soit de remplacer celle-ci, soit de changer un ressort là où cela est possible.

Alors que l'utilisation d'un grand ressort unique n'engendrerait pas ce type de problème. Et ce juste avec une fixation.

IV.5.5.4 Garniture compensée:

On recourt à une garniture compensée dans le but de réduire l'impact de la force de pression sur les zones de frottement et ce, dans le but d'éviter la friction et de ce fait réduire le couple résistant.

IV.5.6 Dimension de la garniture:

Le choix de la dimension d'une la garniture mécanique est normalisé. Pour les garnitures mécaniques simple il est fonction surtout de 2 paramètres A et B qui représentent le diamètre de l'arbre et le diamètre de la chambre à garniture.

- Pour le diamètre de l'arbre on prend la valeur maximale.
- Pour le diamètre de la chambre à garniture on prend la valeur minimale.

Ces paramètres sont présentés dans la figure suivante (la figure IV.7) :

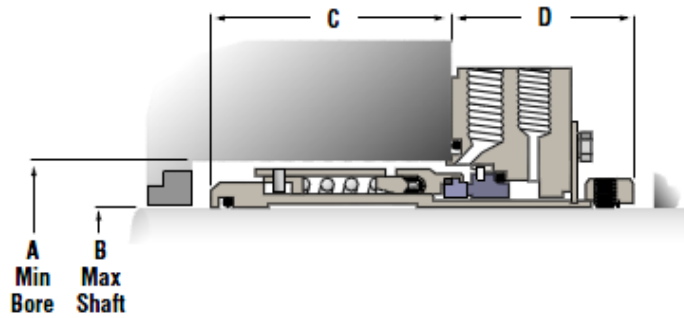


Figure IV.7: Différents paramètres de dimensions d'une garniture.

La plupart des dimensions existantes des paramètres A, B, C et D sont regroupées dans des tableaux que chaque constructeur propose pour chacun de ses modèles et en reliant leurs valeurs on obtient la dimension de la garniture convenable pour la chambre à garniture de la pompe étudiée.

Si les valeurs ne figurent pas sur le tableau, il faudra consulter le constructeur pour des solutions adaptées.

En se référant au schéma de la chambre à garniture de la pompe (annexe B) on obtient les valeurs suivantes :

- Diamètre maximal de l'arbre A = 4.500" (114.30mm).
- Diamètre minimal de la chambre à garniture B = 5.7500" (146.6mm).

IV.6 Le Plan API 13

On utilise le plan 13 pour réguler la pression à l'intérieur de la chambre de la garniture mécanique. Si le fluide de la chambre venait à disparaître, les dommages seraient considérables : la disparition du film lubrifiant mettrait alors en contact les faces de frottement, entraînant une usure et une surchauffe du joint pouvant causer une défaillance du joint en élastomère.

Il est donc essentiel de maintenir une pression suffisante dans la chambre, supérieure à la pression d'évaporation du fluide. La norme API 682 précise qu'il convient d'avoir un écart d'au moins 3,4 bars de pression, afin que la garniture fonctionne en toute sécurité et en toute fiabilité.

IV.6.1 Définition du plan 13:

Le Plan 13 consiste en une recirculation du fluide de la chambre d'étanchéité vers l'aspiration de la pompe, via un orifice de restriction. Ce flux permet de maintenir une pression positive dans la chambre d'étanchéité, supérieure à la pression de vapeur du fluide, évitant ainsi son évaporation et assurant une lubrification adéquate des faces de la garniture. [24]

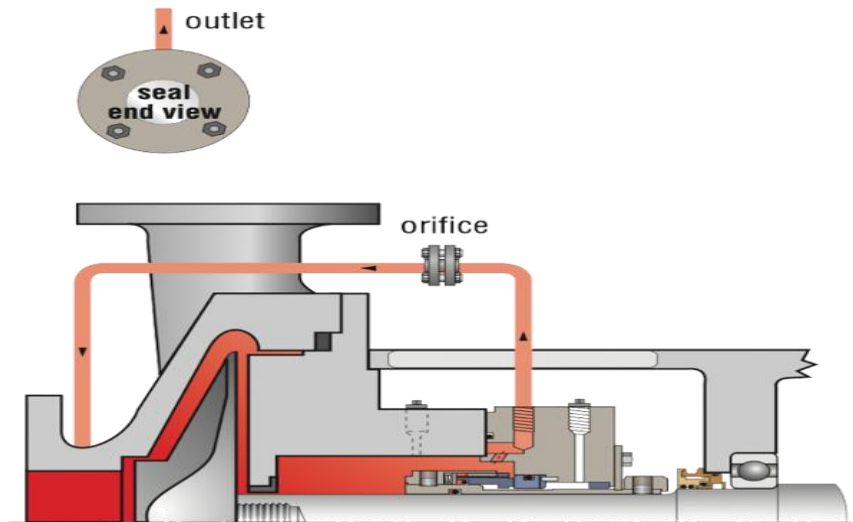


Figure IV.8:Plan 13

Remarque : On peut utiliser un autre liquide pour refroidir la garniture (azote liquide par exemple) mais pour éviter les risques de contamination du fluide process (fluide à étancher) on utilise le même fluide.

IV.6.2 Conditions d'utilisation d'un plan 13 :

- Pompes verticales.
- Pression à l'intérieur de la chambre plus importante que la pression à l'aspiration.
- Température modérée.
- Fluide contenant un pourcentage modéré de solides.
- Fluide non-polymère.

IV.6.3 Considérations prises lors de l'installation d'un plan 13 :

- Support et protection convenable pour éviter des dommages provoqués par vibration ou par chargement.
- Accessibilité facile en cas d'opération de maintenance ou de nettoyage.
- L'installation ne doit pas constituer un obstacle en cas de maintenance ou entretien de la pompe
- Minimiser au maximum les pertes de charges en minimisant l'utilisation de coudes, vannes... [25]

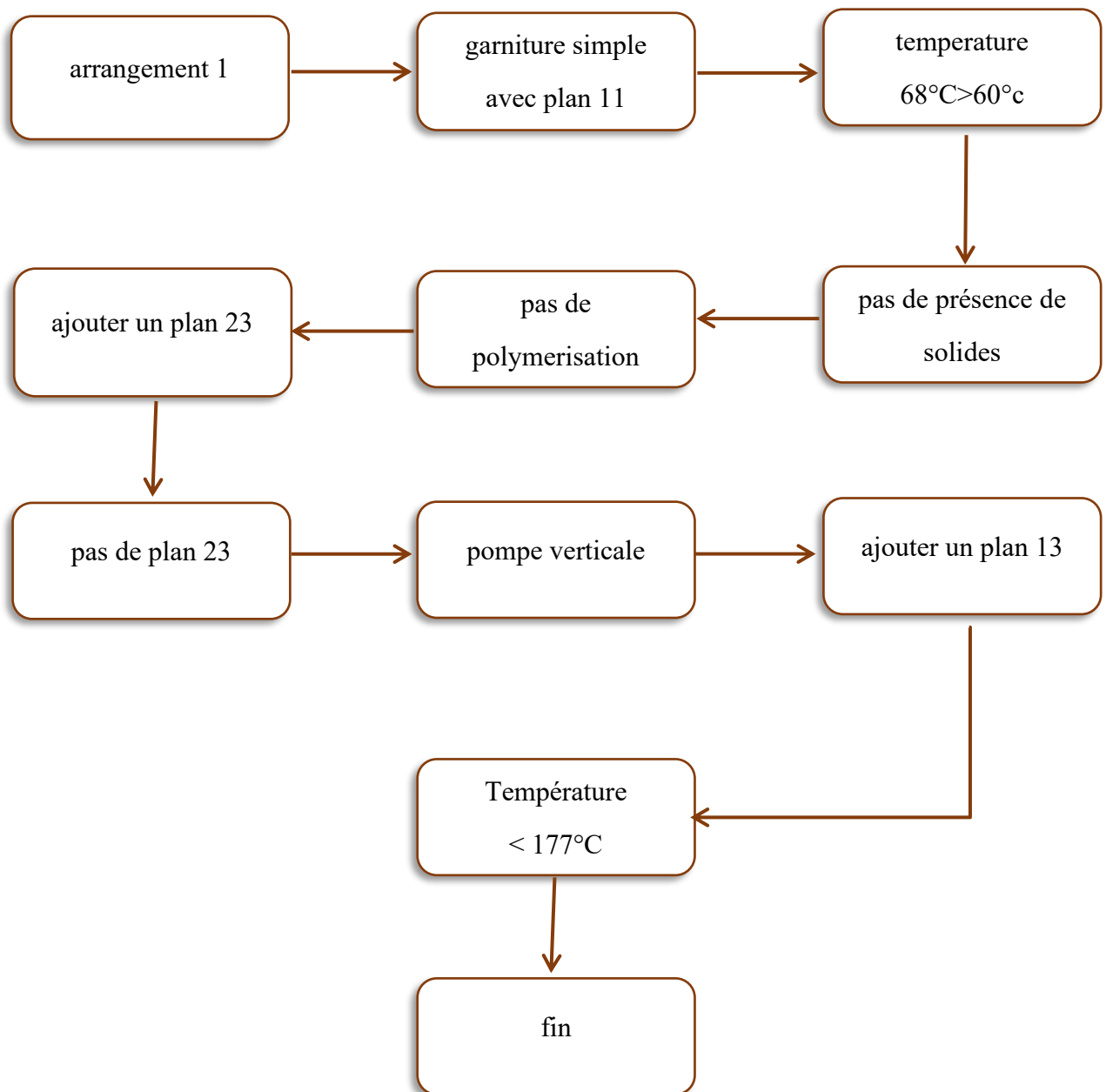


Schéma IV.1: le chemin suivi sur l'algorithme général pour le choix de systèmes auxiliaires

IV.7 Dimensionnement du plan 13

IV.7.1 Calcul du débit:

On applique l'équation de Bernoulli entre un point à l'intérieur de la garniture (1) et le trou qu'on perce à l'aspiration de la pompe (2) : [26]

$$p_1 = p_2 + \rho gh + \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (\text{IV.1})$$

p_2 est la pression à l'aspiration, $p_2 = 1,5 \text{ bar}$

p_1 est à l'intérieur de la garniture, $p_1 = TVR + 30\%TVR$

30% représente la marge qu'on doit prendre (selon la norme API 682)

TVR est la tension de vapeur Reid, dans notre cas : $TVR = 9,92 \text{ bar}$

Ce qui donne : $p_1 = 1,3 TVR$

$H = 34 \text{ mm}$

H étant la différence de hauteur entre le point (1) et (2) (Voir figure 6.8).

$D = 20 \text{ mm}$

D étant est le diamètre du tube (Valeur normalisé).

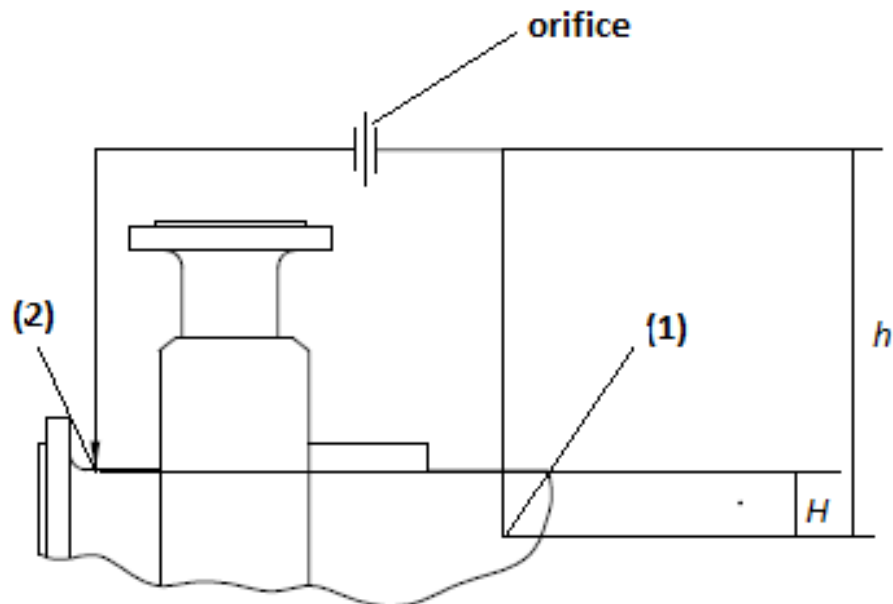


Figure IV.9:Schéma du plan 13

En remplaçant ces valeurs dans l'équation (IV.1) et compte tenu de la relation entre le débit et la vitesse : $Q = V.S$ avec $S = \pi \frac{D^2}{4}$

On trouve l'expression suivante :

$$Q = \sqrt{\frac{\rho \pi^2 D^4}{8} (p_1 - p_2) - \frac{gh \pi^2 D^4}{8}}$$

$$Q = 13,41 \text{ l/min}$$

IV.7.2 Calcul du diamètre de l'orifice :

D'après la formule approximative de calcul des orifices [26]

$$Q = 19,636Cd^2\sqrt{h} \quad (\text{IV.2})$$

h est la différence entre la hauteur l'orifice et le point (1) : $h = 152,4 \text{ mm}$

C est le coefficient de décharge : $C = 0,82$

D'après l'équation (IV.2) on tire d :

$$d = 5,96 \text{ mm}$$

La valeur trouvée du diamètre de l'orifice d est comprise entre 3 et 6 mm ce qui est conforme avec la norme API 682.

IV.8 Démontage d'une garniture tresse

A l'issue des opérations de purge et avant toute opération de démontage, il convient de : garantir que la pompe est totalement vidangée, prendre toutes mesures utiles pour empêcher toute mise en rotation, interdire toute mise en marche, même accidentelle.

IV.8.1 Outillage nécessaire:

- Clés plates pour les vis.
- Tournevis plat.
- Extracteur de tresse.

IV.8.2 Procédure de démontage d'une garniture à tresse :

- Dresser les deux vis.
- Libérer le fouloir en le faisant glisser le long de l'arbre.
- Enlever soigneusement la garniture usée.

IV.8.3 Procédure de montage d'une garniture mécanique :

La manière de manipuler une garniture mécanique est essentielle. Il est impératif de lire attentivement et de respecter les instructions de montage spécifiques à chaque type de garniture. Pour cela, il convient de se référer au Guide Pratique du Montage (annexe D).

Certaines précautions doivent être observées tout au long du processus de montage d'une garniture mécanique. Ces précautions sont définies pour chaque étape de son installation et de son utilisation :

- Vérification et précautions concernant la garniture avant son montage.
- Vérification et précautions concernant la machine à équiper.

- Précautions liées à l'installation de la garniture sur la machine.
- Précautions spécifiques lors du montage de la garniture elle-même.
- Vérifications lors de la mise en service :

Contrôle préalable avant le démarrage.

Surveillance pendant le démarrage.

Contrôle en cours de fonctionnement.

IV.9 Maintenance

Le manque d'étanchéité des garnitures mécaniques peut, en effet, avoir des causes diverses. Le plus souvent, la fuite se produit à travers l'interface d'étanchéité formée par les deux faces de frottement.

Néanmoins, des éléments d'étanchéité défectueux, tels que les joints de chemise, de couvercle, coulissants, de pièce d'entraînement etc., et une trop grande rugosité des surfaces en contact peuvent créer des fuites additionnelles. De même, les soufflets, les membranes ou les autres constituants de la garniture peuvent occasionner des fuites.

Le tableau 6.4 présente de façon synthétique les principales causes de défaillance à partir des principaux symptômes : fuite et durée de vie limitée ; ce tableau expose les causes possibles et préconise quelques remèdes de base peuvent être suffisants. [24]

Tableau IV.4:Principales causes de défaillance

Symptômes	Causes possibles	Remèdes
La garniture fuit au démarrage	<ul style="list-style-type: none"> - Éclats ou rayures sur le joint secondaire lors du montage - Taux de serrage incorrect du joint secondaire 	<ul style="list-style-type: none"> - Remplacer le joint secondaire - Vérifier auprès du fabricant que les joints sont appropriés - Vérifier que les chanfreins sont corrects
Fuite goutte à goutte ou grincement en fonctionnement	<ul style="list-style-type: none"> - Vaporisation du liquide au niveau des faces de frottement - Lubrification insuffisante 	<ul style="list-style-type: none"> - Augmenter le refroidissement au niveau des faces de la garniture - Vérifier l'équilibrage de la garniture auprès du fabricant - Mettre en place un système de flushing si absent - Élargir le diamètre de la tuyauterie de flushing et des orifices du chapeau - Vérifier le refroidissement avec le fabricant

Symptômes	Causes possibles	Remèdes
Courte durée de vie de la garniture	<ul style="list-style-type: none"> - Fluides abrasifs - Machine décentrée - Défaillance du ressort - Érosion du matériel - Corrosion des mécanismes d'entraînement - Vieillesse des joints toriques - Attaque chimique 	<ul style="list-style-type: none"> - Éviter le dépôt de particules abrasives - Mettre en place un flushing si absent - Utiliser un séparateur ou filtre - Aligner la machine - Vérifier le frottement garniture/arbre - Remplacer les pièces - Consulter le fabricant pour des matériaux alternatifs

IV.10 La durée de vie

Selon la norme API 682 ainsi que les recommandations des fabricants, la durée de vie d'une garniture mécanique (c'est-à-dire jusqu'à l'usure complète des deux faces) est estimée à environ 30000 heures.

Dans notre cas, la pompe fonctionne en régime discontinu, avec une moyenne de 10 heures de fonctionnement par jour. En effectuant un simple calcul, cela correspond à une durée de vie d'environ 3 000 jours.

IV.11 Comparaison entre 2 modèles

De nombreux fabricants de garnitures mécaniques sont présents dans le commerce. Bien que le schéma de principe et de fonctionnement reste comparable entre tous les types de garnitures, les différences entre les modèles s'illustrent au niveau des détails, c'est-à-dire des matériaux, de la forme des joints, des circuits auxiliaires, etc.

IV.11.1 Garniture à ressort « Flowserve UC » :

- Image en coupe :



Figure IV.10: Garniture Flowserve UC

- **Avantages :**

- Une face tournante en carbure de silicium encapsulée dans un support étanché par Un joint en graphite. Elle assure une planéité optimale pour le contrôle des basses émissions et elle assure aussi un montage étroit en éliminant toute distorsion rétrécie.
- Une garniture mono-ressort compensée avec ressort simple rotatif qui sert à empêcher l'anneau flottant et il ne transmet pas le couple moteur.
- Les dimensions du ressort sont un peu grandes mais son coefficient de raideur est faible qui permet la facilité du montage et démontage.
- La flexibilité et le jeu de la garniture UC lui permettent de compenser les légers désalignements de l'arbre et du palier.
- Conception hautement compensée pour basses émissions en hydrocarbures légers.
- Toute la partie tournante peut être enlevée pour l'inspection ou la réparation sans avoir enlevé l'arbre et la chemise.
- Protection contre l'endommagement lors de l'assemblage de la garniture.
- Possibilité de plan API pour quench ou flush

- **Matériaux :**

- La partie métallique : 316 Acier pur, alliage 20, alliage 400, alliage C-276.
- La face rotative : Carbure de silicium/ joint en graphite.
- La face stationnaire : Carbone, Carbure de silicium

- **Plages de fonctionnement :**

- Pression : jusqu'à 69 bars.
- Température : de -40 jusqu'à 204°C.
- Liquide : très bonne pour les hydrocarbures légers.
- Dimensions de l'arbre : de 14.1 jusqu'à 148mm.
- Vitesse de rotation : jusqu'à 23m/s.

- **Dimension de la garniture convenable à notre cas :**

Selon le tableau normalisé fournie par Flowserve Corp (Annexe D). La dimension est de : 5500 (cette valeur est un code constructeur sans unité).

IV.11.2 John crane TYPE 5610Q-1/5620P-1/5620D-1:

- **Image en coupe :**

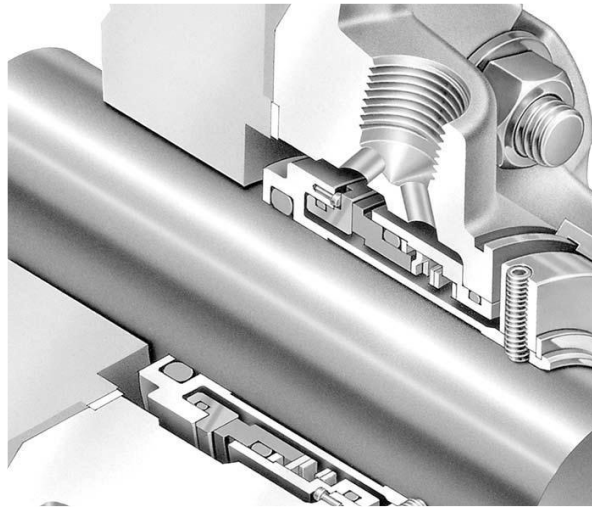


Figure IV.11:Garniture John Crane Type 5610Q-1

- **Avantages :**

- Qualifications API682 testés et approuvés.
- Possibilité d'un plan 13.
- Très bonne pour les hydrocarbures.
- Anneau tournant optimiser pour de très faibles émissions.
- Tété de garniture réversible pour des opérations rotatif ou stationnaire.
- Un très bon design.
- Possibilité d'un fonctionnement sec en cas de problème.
- Minimum de vices de fixation pour le corps de la garniture.

- **Matériaux :**

- La partie métallique : 316 Acier pur, alliage 20, alliage 400, alliage C-276.
- La face rotative : Carbure de silicium/ joint en graphite.
- La face stationnaire : Carbone, Carbure de silicium.
- Joints : Fluorélastomère.

- **Plages de fonctionnement :**

- Pression : jusqu'à 21 bars.
- Température : de -30 jusqu'à 205°C.
- Liquide : très bonne pour les hydrocarbures légers.
- Dimensions de l'arbre : /.

- Vitesse de rotation : jusqu'à 25m/s.

- **Dimension de la garniture convenable à notre cas :**

Selon le tableau de choix normalisé de John Crane (Annexe E) on trouve : La dimension de la garniture : 4.830“

IV.11.3 Comparaison entre les 2 modèles :

« Flowserve » et « John Crane » représentent les 2 plus grands constructeurs de garnitures mécaniques à l'échelle mondiale, ils ont surtout une très grande expérience dans le domaine des hydrocarbures. 70% des garnitures mécaniques de Sonatrach sont des garnitures John Crane. Néanmoins Flowserve commence à prendre beaucoup de part de marché en Algérie.

- **Points communs :**

- Les 2 modèles sont certifiés API682, catégorie A.
- Les 2 modèles présentent la possibilité de l'application d'un plan 13.
- Ils ne sont pas conçus exclusivement pour les hydrocarbures légers, mais sont fortement adaptées pour.
- Les 2 possèdent des grains l'un en carbone et l'autre en carbure de silicium.
- Les 2 conviennent à nos paramètres de service et propriétés du fluide.
- Dimensions disponibles.

- **Différences :**

- La garniture Flowserve est plus compensée ce qui est très important en hydrocarbure pour les basses émissions.
- Lors de la maintenance périodique, pour la garniture Flowserve on change que les 2 grains et les 3 joints, tandis que pour la John crane on doit changer 5 joints.
- La Flowserve est conçu avec un ressort rotatif lié au grain mobile ce qui n'implique pas de possibilité de transmission de couple moteur.
- La John crane possède moins de vices ce qui veut dire un montage plus simple.

De là on trouve que la Flowserve est mieux adaptée que la John Crane et demande moins de maintenance.

IV.12 Conception du dispositif

IV.12.1 Objectif:

Concevoir et réaliser une garniture mécanique adaptée à une pompe centrifuge axiale afin d'assurer l'étanchéité entre la partie hydraulique et la partie mécanique de la pompe, dans le but de prévenir toute infiltration de fluide vers les composants internes sensibles, garantir un fonctionnement fiable, réduire les besoins en maintenance, et augmenter la durée de vie de la pompe.

- Éviter les fuites de fluide à travers l'arbre tournant.
- Résister aux conditions de fonctionnement (pression, température, type de fluide).
- Les garnitures présentent des faces légèrement chargées qui consomment moins de puissance que la technique du presse-étoupe.
- Limiter l'usure des composants (arbre, chemise).
- Réduire les pertes d'énergie dues au frottement.
- La maintenance au quotidien est réduite car les garnitures disposent de ressorts intégrés qui les ajustent automatiquement à mesure que les faces s'usent.
- Faciliter la maintenance tout en prolongeant la durée de vie du système.
- Cette technologie permet également de sceller le vide, ce qui n'était pas possible avec le presse-étoupe car l'air était aspiré dans la pompe.

IV.12.2 Conception CAO:

Pour la conception des composantes de notre dispositif, nous avons utilisé le logiciel SolidWorks (figure IV.12).



Figure IV.12: Le logiciel SolidWorks

Le logiciel de CAO SOLIDWORKS est une application de conception mécanique 3D paramétrique qui permet aux concepteurs d'esquisser rapidement des idées, d'expérimenter des fonctions et des cotes afin de produire des modèles et des mises en plan précises (figure IV.13). [27]

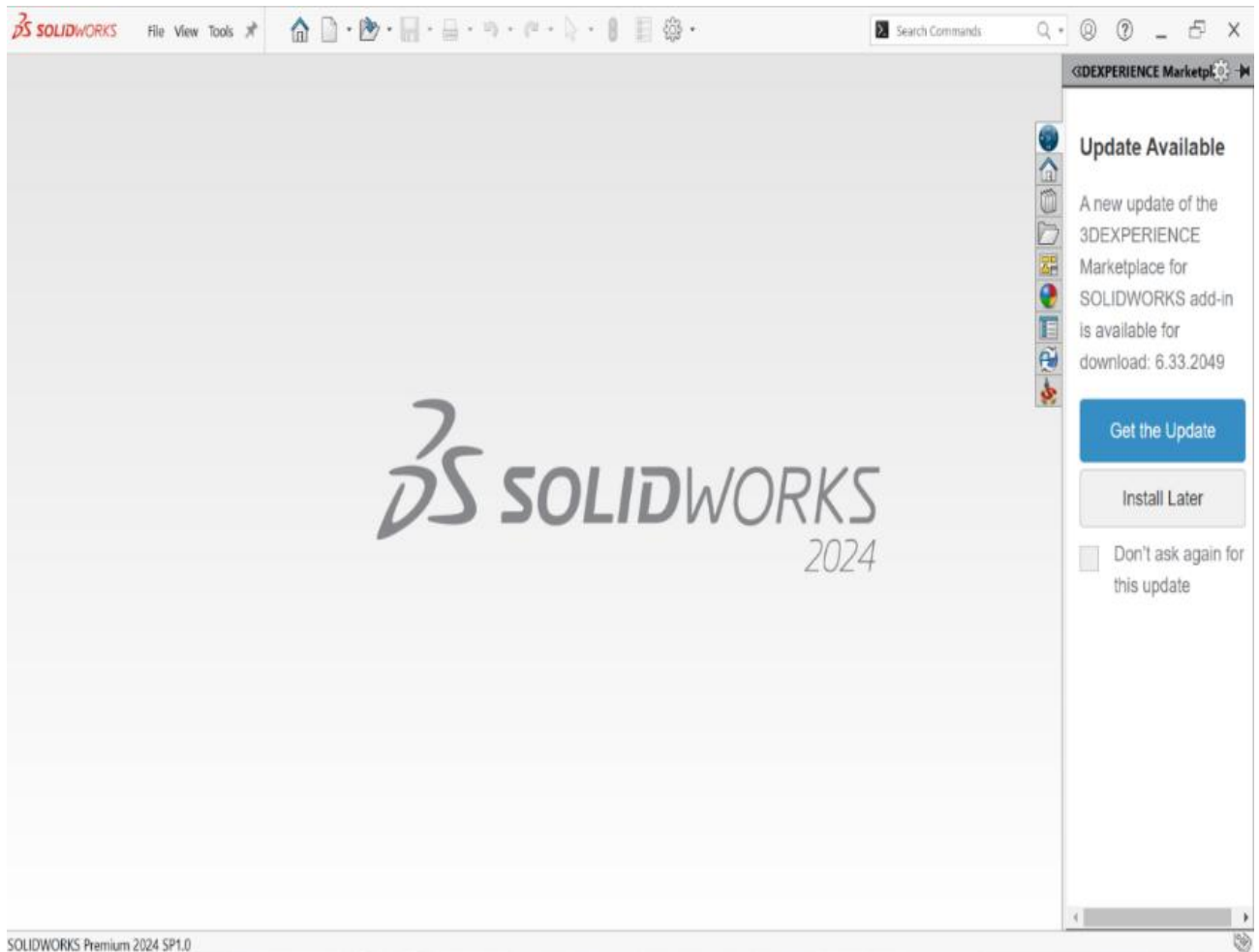


Figure IV.13: Interface de démarrage SolidWorks

IV.12.2.1 Apport de SolidWorks :

Dans le cadre de cette mémoire, le logiciel SolidWorks a été utilisé comme principal outil de conception. Son choix s'explique par sa capacité à offrir un environnement complet pour modéliser des composants mécaniques complexes, simuler leur fonctionnement et vérifier leur compatibilité dans un système assemblé.

L'objectif principal de son utilisation était de traduire les idées conceptuelles en modèles 3D précis et exploitables, facilitant ainsi l'analyse technique, la communication avec l'équipe de travail, et la préparation à la fabrication. SolidWorks a permis d'avoir une vision concrète du produit final bien avant sa réalisation physique.

IV.12.2.2 Fonctionnalités principales utilisées:

Plusieurs fonctionnalités essentielles de SolidWorks ont été exploitées tout au long du projet :

- **Conception de pièces :** Cette fonctionnalité permet de modéliser individuellement chaque composant du projet à l'aide d'esquisses, d'extrusions, de révolutions et d'opérations booléennes (figure IV.14).

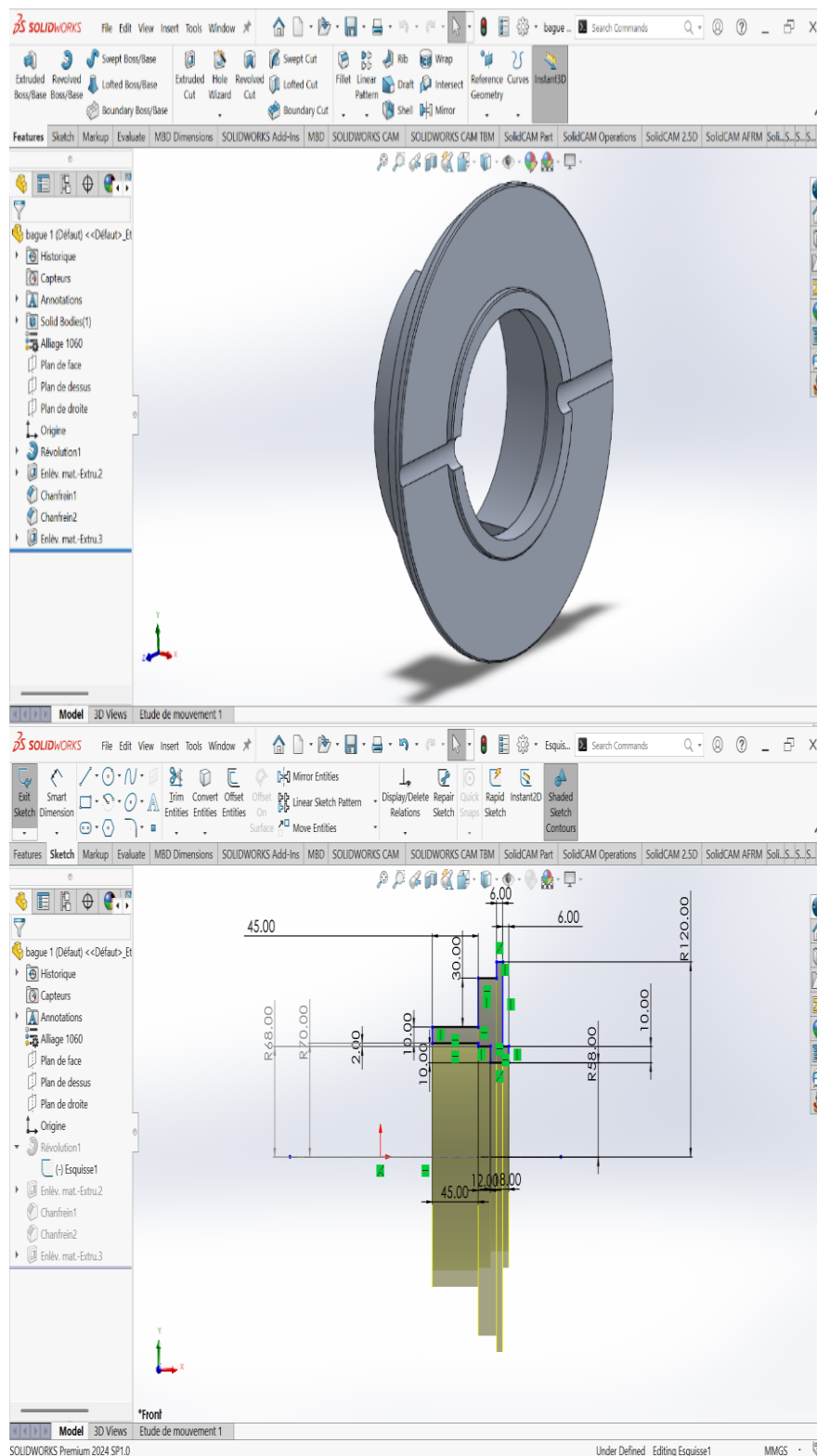


Figure IV.14: Interface de modélisation d'une pièce dans SolidWorks

- **Assemblage** : Grâce à cette fonction, les différentes pièces conçues ont été réunies dans un seul environnement virtuel afin de vérifier leur interaction, leur mouvement relatif, et de détecter d'éventuels conflits ou interférences (figure IV.15).

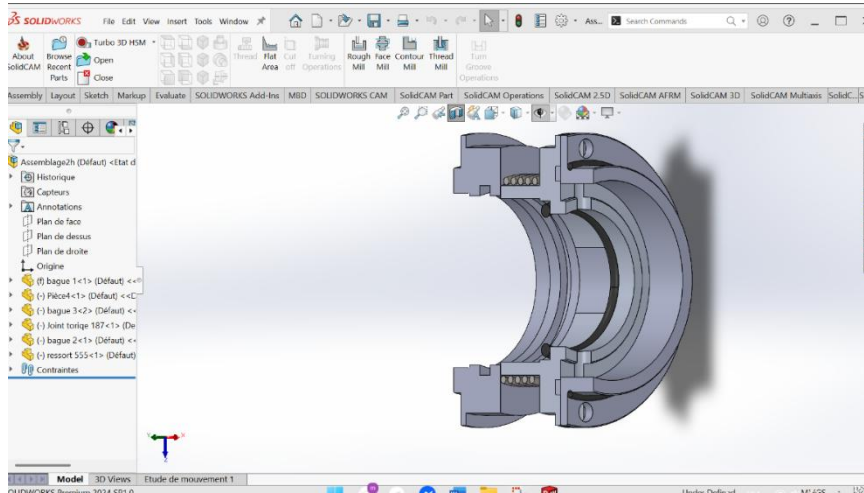


Figure IV. 15:Interface d'assemblage dans SolidWorks

- **Mises en plan techniques (Dessin 2D)** : Des dessins techniques cotés ont été générés automatiquement à partir des modèles 3D, facilitant la documentation du projet et la communication avec les techniciens ou les fabricants (figure IV.16).

Ces fonctionnalités, combinées, ont assuré un flux de travail cohérent allant de la conception

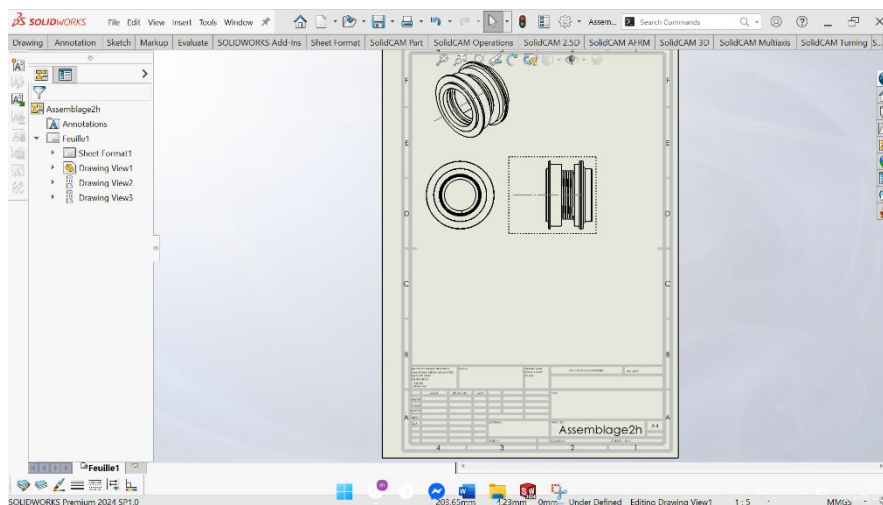


Figure IV. 16:Interface de mise en plan dans SolidWorks

initiale à la validation technique.

IV.12.2.3 Avantages du logiciel :

L'utilisation de SolidWorks a apporté plusieurs avantages notables :

- **Précision** : Le logiciel permet de travailler avec une grande rigueur dans les dimensions, ce qui est essentiel dans les systèmes mécaniques où la tolérance est souvent critique.

- **Visualisation 3D** : La possibilité d'examiner les pièces et les assemblages sous différents angles a facilité la compréhension du fonctionnement global.
- **Détection des erreurs** : Les outils d'assemblage et de simulation ont permis d'identifier des erreurs potentielles de conception avant la fabrication, réduisant ainsi les coûts et les délais.
- **Gagner de temps** : Grâce aux fonctions automatisées (répétitions, symétries, bibliothèque de composants, etc.), le temps de conception a été optimisé.
- **Compatibilité avec d'autres logiciels** : SolidWorks permet également l'exportation vers d'autres formats standards (STEP, IGES, DXF), ce qui facilite l'échange de données avec d'autres outils de CAO ou de fabrication assistée par ordinateur (FAO).

IV.12.3 Choix des matériaux:

Pour ce qui concerne les matériaux à usiner afin d'obtenir les pièces de notre dispositif (éléments de la garniture), il est important de tenir compte des paramètres thermiques et chimiques (température de fusion, résistance à l'oxydation) des matériaux à utiliser ainsi que des caractéristiques des matériaux en termes de caractéristiques mécaniques (résistance et durabilité). Pour répondre à ces critères, on a retenu un alliage d'aluminium bon compromis pour ce type d'application.

La matière brute nécessaire à la fabrication est disponible sur le marché local.

Propriétés physiques et mécaniques de l'alliage utilisé :

Les propriétés de l'alliage utilisé sont proches de celles de l'aluminium, constituant principal de l'alliage (94% en masse).

- **Les propriétés physiques :**
 - Température de fusion est de 660°C ; celle de l'alliage est au maximum de 580°C (alliages d'aluminium avec eutectique).
 - Bonne conductivité thermique.
- **Les propriétés mécaniques :**
 - Module de Young 66,6 GPa, module de torsion 25 GPa.
 - Coefficient de poisson (0.33-0.35).
 - Bon rapport rigidité/densité.
 - Facile à usiner.

IV.12.4 Modélisation géométrique du dispositif:

Nous avons conçu les pièces à l'aide du logiciel SolidWorks en suivant trois étapes principales.

- Création des pièces en 2D (2 dimensions).
- Création des pièces en 3D (3 dimensions).
- Assemblage des pièces.

IV.12.4.1 Partie mobile de la garniture :

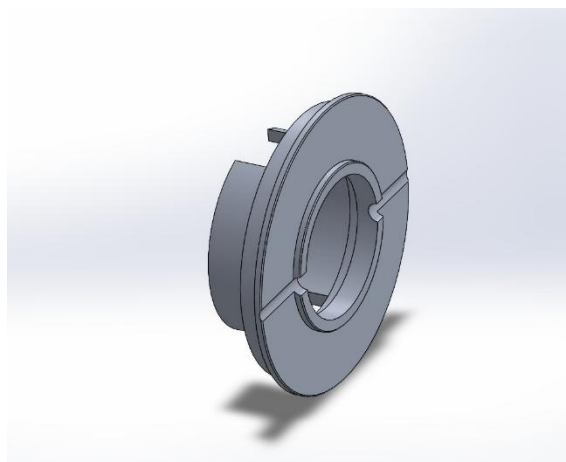


Figure IV.19: Bague 1

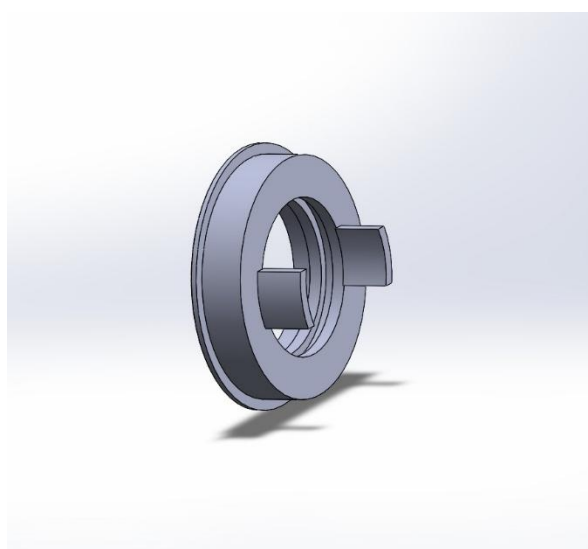


Figure IV.17: Bague 2

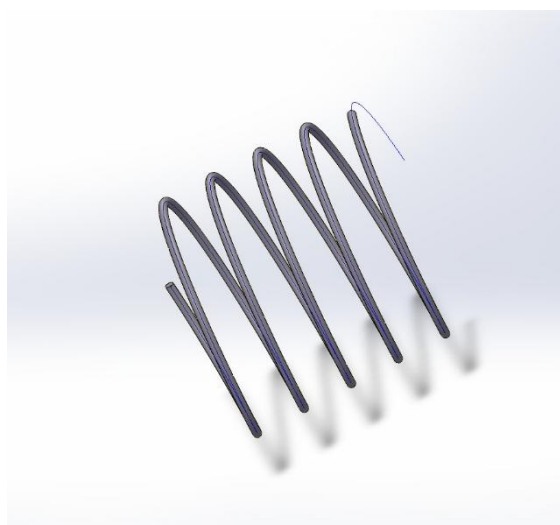


Figure IV.18: Rossort

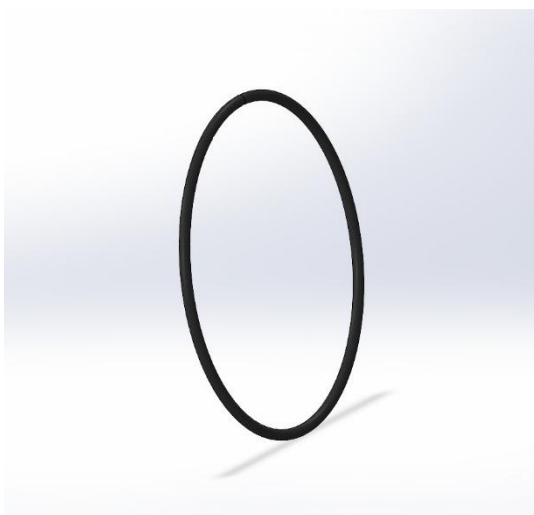


Figure IV.22: Joint torique Ø187

IV.12.4.2 Partir fixe de la garniture :

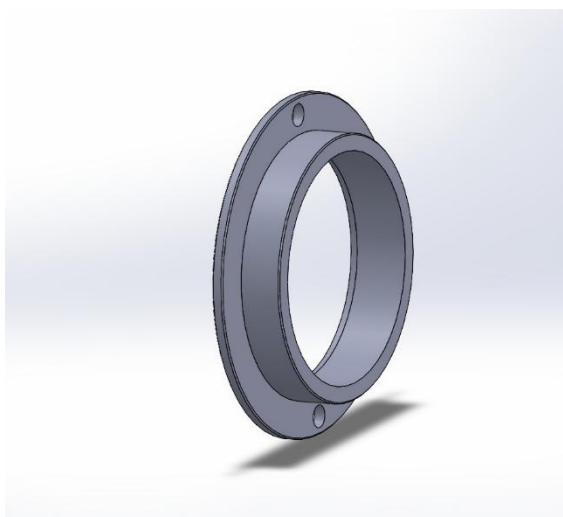
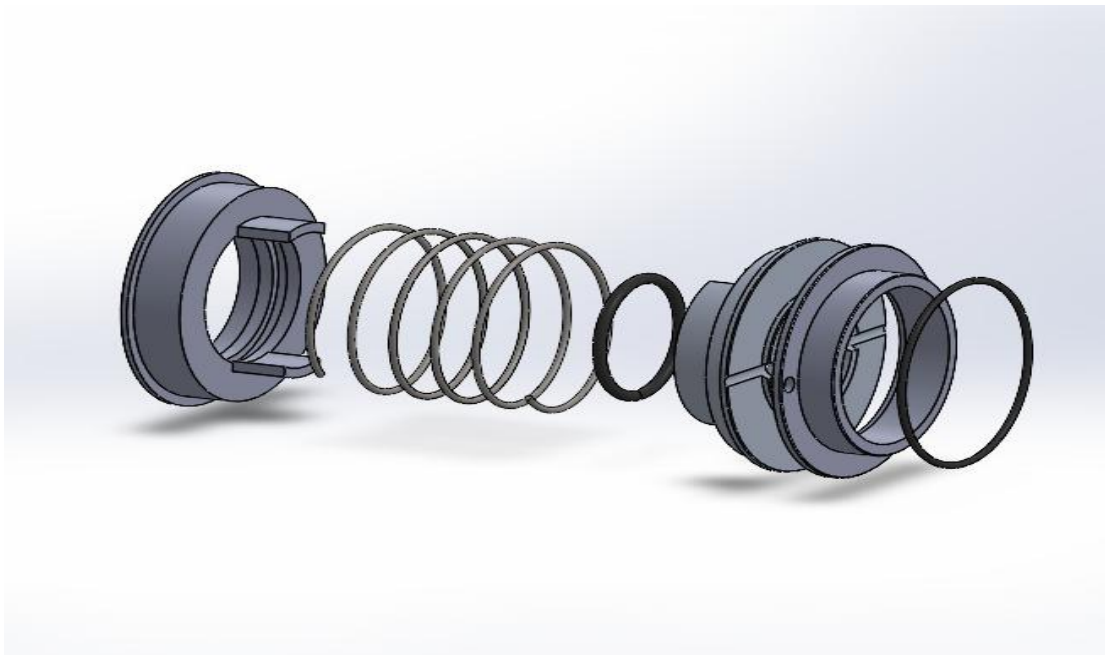
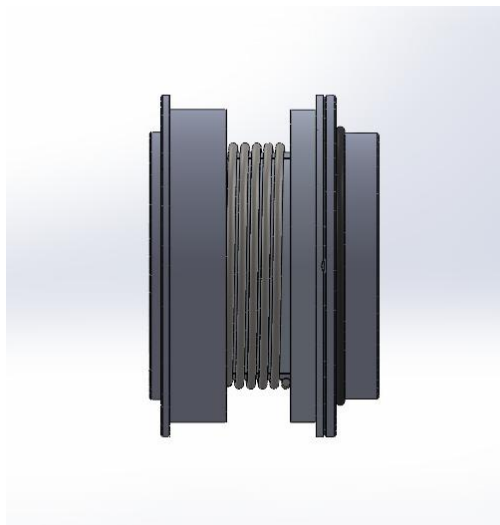


Figure IV.21: Bague 3



Figure IV.20: Joint torique Ø116

IV.12.4.3 Modèle en perspective démonté de la garniture mécanique :**Figure IV.23:**Vue tri-métrique de la garniture mécanique**IV.12.4.4 Assemblage de garniture:****Figure IV.24:**Assemblage de garniture**IV.12.5 Choix des joints toriques:**

Le dispositif contient deux joints toriques qui servent d'étanchéités, c'est des joints standard, ils ont été choisis selon des normes.

- Joint torique Ø 187.
- Joint torique Ø 116.

IV.12.6 Localisation des joints toriques:

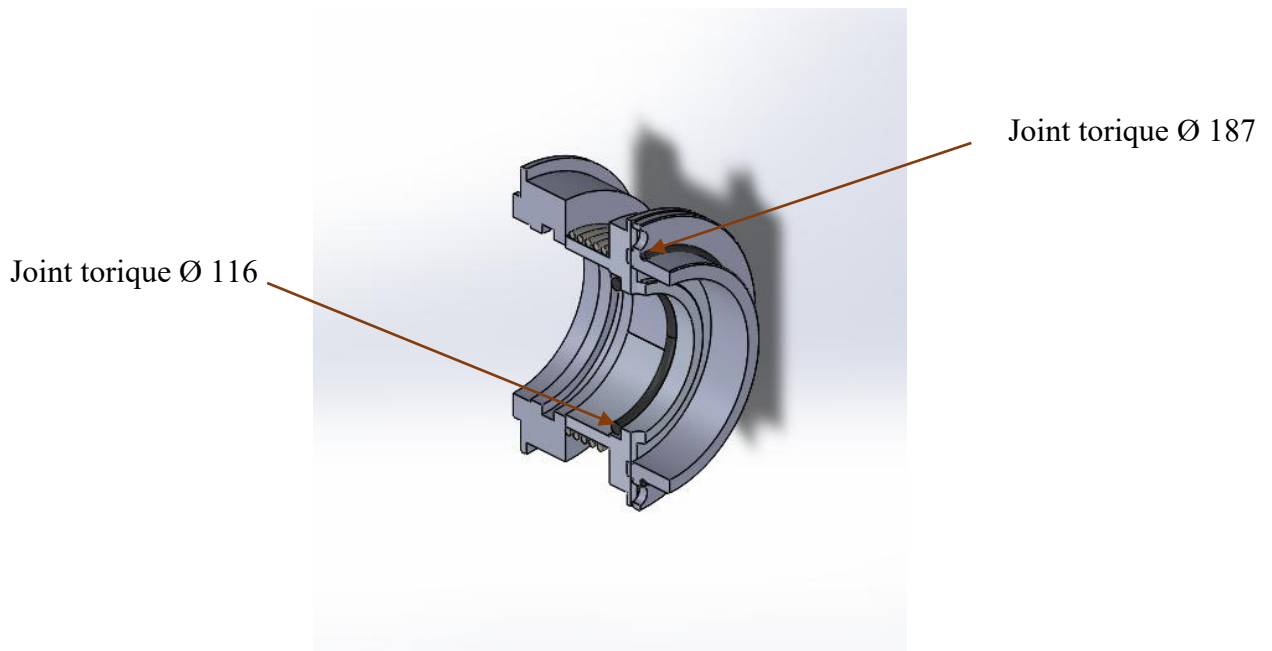


Figure IV.25: Localisation des joints toriques

IV.12.7 Choix du matériaux:

Pour les applications avec les joints mécaniques, un faible coefficient de frottement et faible usure sont essentiels dans la gestion de matière sèche qui est directement en contact.

Une des matériaux les utilisés par sa structure cristalline et d'excellentes propriétés lubrifiantes est le graphite, le coefficient de frottement et de friction est relativement faible.

Ce matériau est aussi utilisé pour la manipulation, l'usinage, la fabrication d'outillages et la mise en forme du verre chaud.

- **Avantage :**
 - Bonne résistance aux chocs thermiques.
 - Pas d'adhérence au verre.
 - Évite les tensions mécaniques dans le verre et les rayures sur le verre chaud.
 - Excellente résistance à l'usure.
 - Coefficient de frottement et une conductivité thermique favorable.

IV.13 Fabrication du dispositif

IV.13.1 Matériels utilisés :

Tous les composants de notre pièce ont été fabriqués à l'aide de plusieurs machines, telles qu'un tour universel, une fraiseuse verticale et une scie mécanique.

- **Scie mécanique** : C'est une machine qui utilise un moteur pour couper des matériaux pour couper les bruts.



Figure IV.26: Scie mécanique

- **Tour universel** : pour effectuer toutes les opérations de tournage des pièces (chariotage, dressage, perçage et la réalisation des gorges en forme v des poules, etc.). Les outils utilisés pour l'opération de tournage sont : outil à dresser, outil à aléser, outil à charioter, foret, foret à centrer, outil à filtrer, outil à rainurer.



Figure IV.27: Tour universel

- **Fraiseuse verticale** : pour les opérations de fraisage on a utilisé des fraises comme outil.



Figure IV.28: Fraiseuse verticale

IV.14 Feuille d'analyse de fabrication

IV.14.1 Exemple pour bague N°1 :

IV.14.1.1 Repérage des surfaces élémentaires:

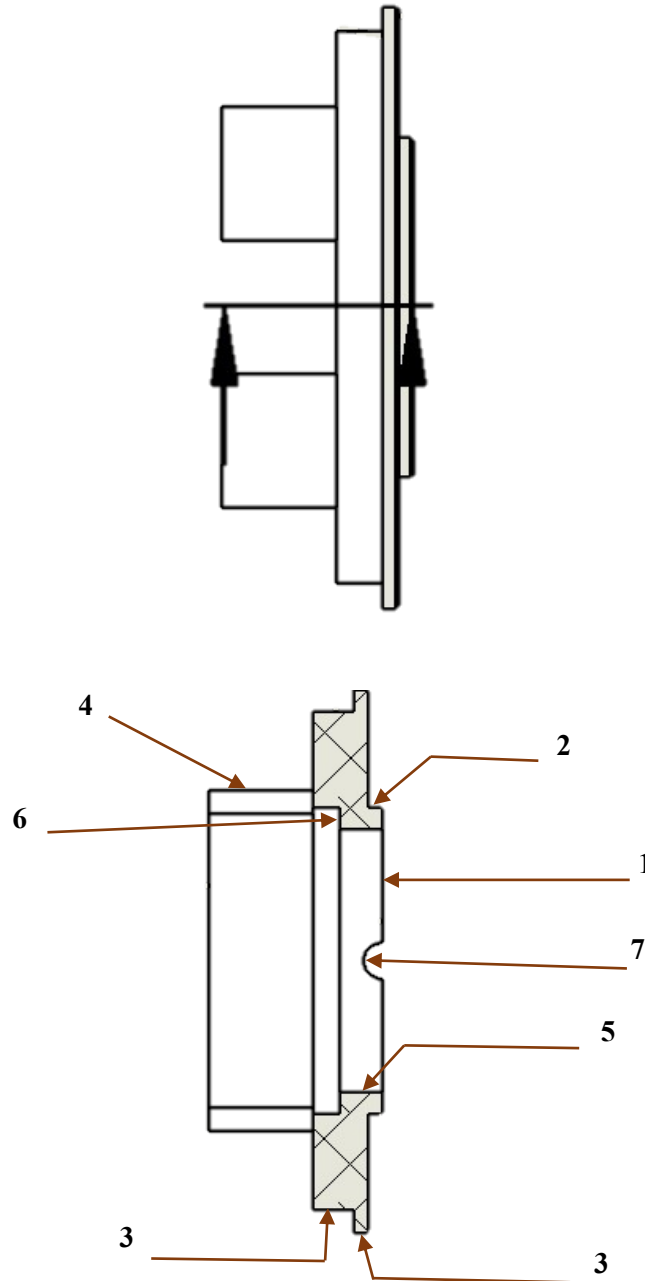


Figure IV.29: Coupe A-A de bague 1

Schéma	Rep	m	M	IT	N°ch
	CF1	75	75.8	0.8	
	CPM E B1	0.3 75.5			
CHAINE DE COTE	CPM E	0.3			
	CF1 B1		75.8 75.5		

IV.14.1.2 Gamme d'usinage :

Ensemble : Garniture mécanique. Organe : Bague1.		Matière : Alliage d'aluminium Brut : Moulé Cadence : Travail unitaire	
N° de phase	Désignation des opérations	Machine utilisée	Moyens de contrôles
100	Contrôle du brut	Scie mécanique	Règle graduée
Croquis de la pièce			

	Schéma	Rep	m	M	IT	N°ch
BE		CM1	68.9	69.1	0.2	
BDM		CPM E	0.5			
		CPM F	0.2			
		CM3				
		B1				
		B1				
CHAINE DE COTE		CPMF	0.2			
		CM1		69.1		
		CM2	69.3			
		CPM E	0.8			
		CM3		74.9		
		B1	75.5			

Ensemble : Garniture mécanique Organe : Bague1		Matière : Alliage d'aluminium. Brut : Moulé. Cadence: Travail unitaire.		
N° de phase	Désignation des opérations	Machines utilisé	Appareillages outils coupants	Contrôle
200	Tournage : Sous phase 210 : Isostatisme définis par : -Appui normal sur surface 8, en 3 normales :1,2,3 -centrage court sur surface2, en 2 normales :4,5 -serrage concentrique. Opération 211 : Dressage de la surface 1, ébauche et finition. CM=69±0.1 $\sqrt{3.2}$	Tour //	Moyen de prise: Mandrin trois mors Outil coupant : Outil à dresser en acier au carbone	Pied à coulisse

Croquis de la pièce

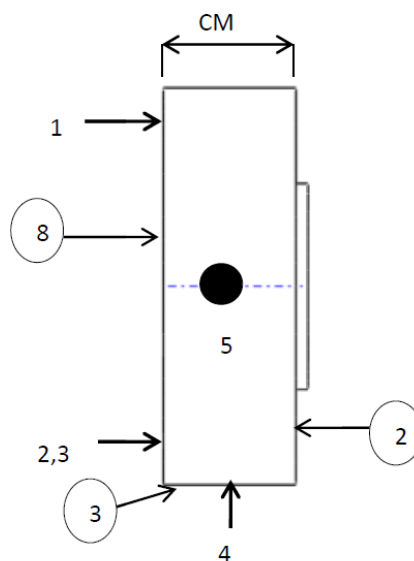
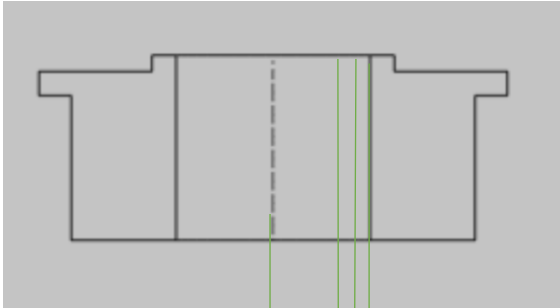


Schéma	Rep	M	M	IT	N°ch
 BE	CM1	57.9	58.1	0.2	
	BM	CPM E			
		CPM F			
		CM 2			
		B 1			
CHAINE DE COTES		CM 1		58	
		CPM F	0.2		
		CM 2	57.8		
		CM 2		57.9	
		CPM E	0.8		
		B1	57.1		

<p>Ensemble : Garniture mécanique</p> <p>Organe : Bague1</p>		<p>Matière : Alliage d'aluminium.</p> <p>Brut : Moulé.</p> <p>Cadence: Travail unitaire.</p>		
N° de phase	Désignation des opérations	Machines utilisé	Appareillages outils coupants	Contrôle
300	<p>Tournage :</p> <p>Sous phase 310 : Isostatisme définis par : -Appui normal sur surface 1, en 3 normales :1,2,3 -centrage court sur surface2, en 2 normales :4,5 -serrage concentrique.</p> <p>Opération 311 : Perçage de surface 5 alésage de surface 5. Ebauche et finition CM=116H7</p> <p>$\sqrt{3.2}$</p>	Tour //	<p>Moyen de prise: Mandrin trois mors</p> <p>Outil coupant :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Foret a center en acier rapide. - Foret à tête conique Ø115 en carbure de tungstène. - Outil alésage en acier au carbone. 	Comparateur Alésage

Croquis de la pièce

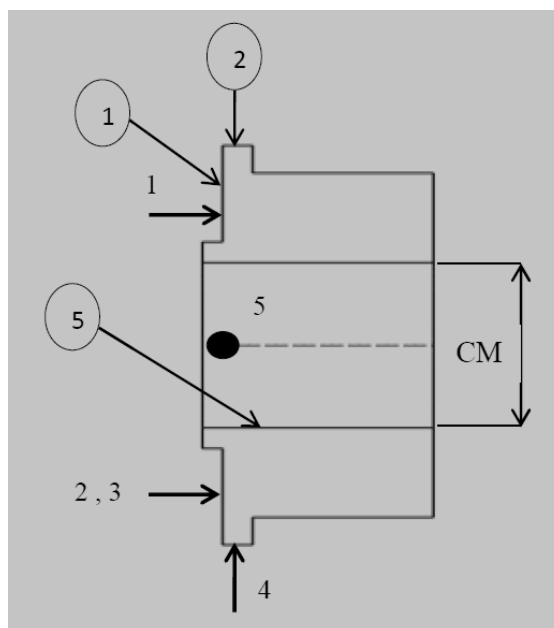


Schéma	Rep	m	M	IT	N°ch
	CM1	109.9	110.1	0.2	
	BE				
	CPM E	7.5			
	CPM F	2.5			
	CM 2	-			
	B1	-			
	CPM F	2.5			
	CM 1		110.1		
			112.6		
	CPM E	7.5			
	CM 2		112.7		
	B1	120.2			
CHAIN DE COTES					

Ensemble : Garniture mécanique Organe : Bague1		Matière : Alliage d'aluminium. Brut : Moulé. Cadence: Travail unitaire.		
N° de phase	Désignation des opérations	Machines utilisé	Appareillages outils coupants	Contrôle
400	Tournage : Sous phase 410 : Isostatisme définis par : -Appui normal sur surface 1, en 3 normales :1,2,3 -centrage court sur surface2, en 2 normales :4,5 -serrage concentrique. Opération 411 : chariotage de la surface 4, ébauche et finition. $2CM=220\pm 0.1$ $\sqrt{3.2}$	Tour //	Moyen de prise : Mandrin trois mors Outil coupant : Outil à charioter Dresser en carbure de tungstène	Pied à coulisse

Croquis de la pièce

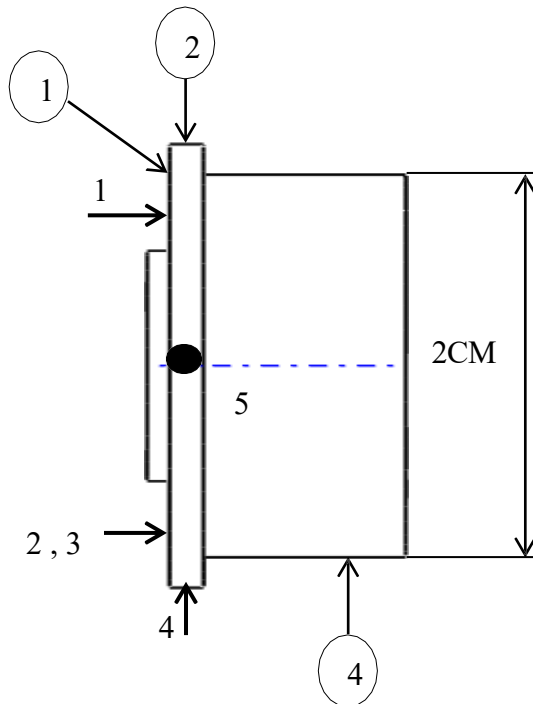
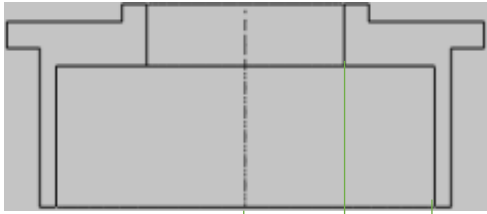
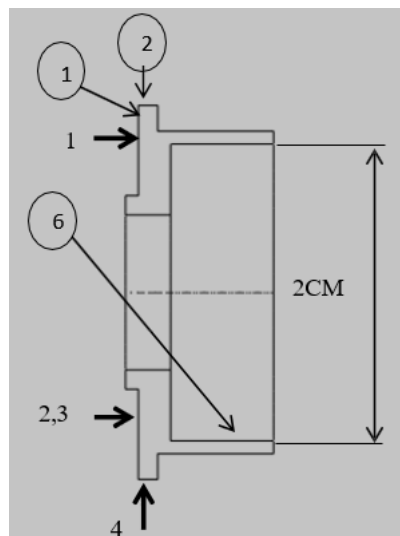


Schéma	Rep	m	M	I	N°ch
	CM1	67.9	68.1	0.2	
	CPM F				
BM	B1				
	CM1		68		
CHAINE	CPM F	10			
	B1	58			

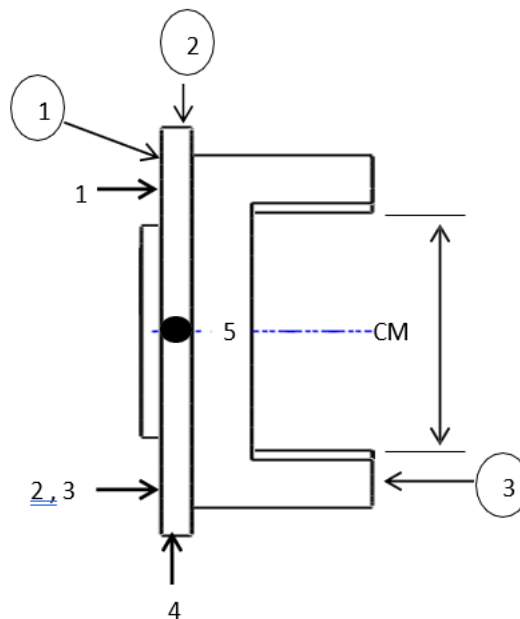
Ensemble : Garniture mécanique Organe : Bague1		Matière : Alliage d'aluminium. Brut : Moulé. Cadence: Travail unitaire.		
N° de phase	Désignation des opérations	Machines utilisé	Appareillages outils coupants	Contrôle
500	Tournage : Sous phase 510 : Isostatisme définis par : -Appui normal sur surface 1, en 3 normales :1,2,3 -centrage court sur surface2, en 2 normales :4,5 -serrage concentrique. Opération 511 : Perçage et Alésage de surface 6. $2CM=136\pm 0.1$ $\sqrt{3.2}$	Tour //	Moyen de prise: Mandrin trois mors Outil coupant : - Foret à tête conique Ø40 en carbure de tungstène. - Outil à alésage en carbure de tungstène.	Comparateur Alésage

Croquis de la pièce



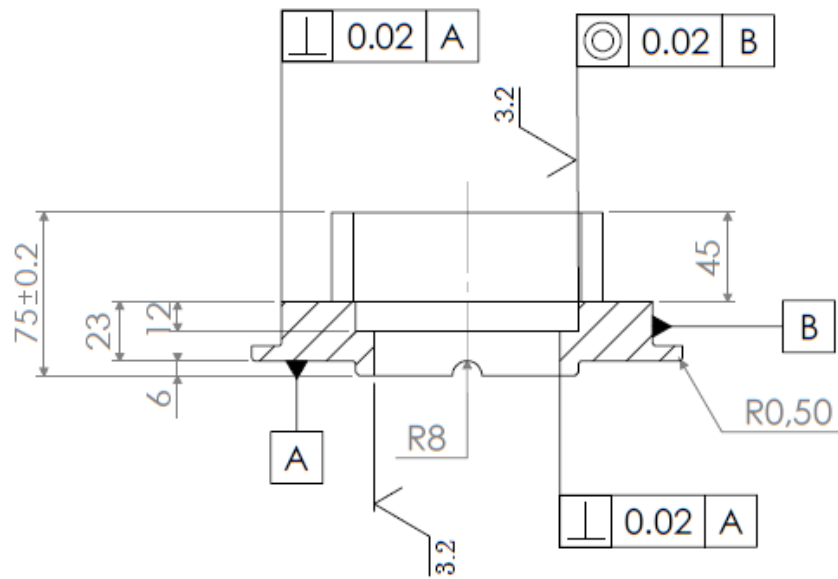
<p>Ensemble : Garniture mécanique</p> <p>Organe : Bague1</p>		<p>Matière : Alliage d'aluminium.</p> <p>Brut : Moulé.</p> <p>Cadence: Travail unitaire.</p>		
N° de phase	Désignation des opérations	Machines utilisé	Appareillages outils coupants	Contrôle
600	<p>Fraisage:</p> <p>Sous phase 610 : Isostatisme définis par : -Appui normal sur surface 1, en 3 normales :1,2,3 -centrage court sur surface2, en 2 normales :4,5 -serrage concentrique.</p> <p>Opération 611 : surfaçage de surface 3. CM=53</p> <p>$\sqrt{3.2}$</p>	fraiseuse	<p>Moyen de prise: Mandrin trois mors</p> <p>Outil : Fraise deux tailles en carbure monobloc.</p>	Pied à coulisse

Croquis de la pièce

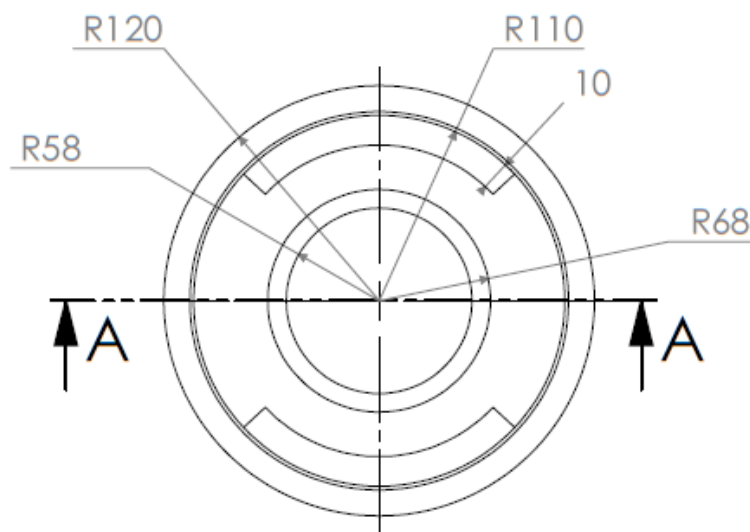


<p>Ensemble : Garniture mécanique</p> <p>Organe : Bague1</p>		<p>Matière : Alliage d'aluminium.</p> <p>Brut : Moulé.</p> <p>Cadence: Travail unitaire.</p>		
N° de phase	Désignation des opérations	Machines utilisé	Appareillages outils coupants	Contrôle
700	<p>Fraisage :</p> <p>Sous phase 710 : Isostatisme définis par : -Appui normal sur surface 1, en 3 normales :1,2,3 -centrage court sur surface2, en 2 normales :4,5 -serrage concentrique.</p> <p>Opération 711 : surfaçage de surface 5. CM= 8±0.2</p> <p>$\sqrt{3.2}$</p>	fraiseuse	<p>Moyen de prise: Mandrin trois mors</p> <p>Outil : Fraise deux tailles en carbure monobloc.</p>	Pied à coulisse
Croquis de la pièce				

**Dessins de définition de chaque
composant de la garniture mécanique**



Coupe A-A



Echelle:
2:9

Bague 1

BOUFAROU M A
BENHALIMA A
BASSOU A

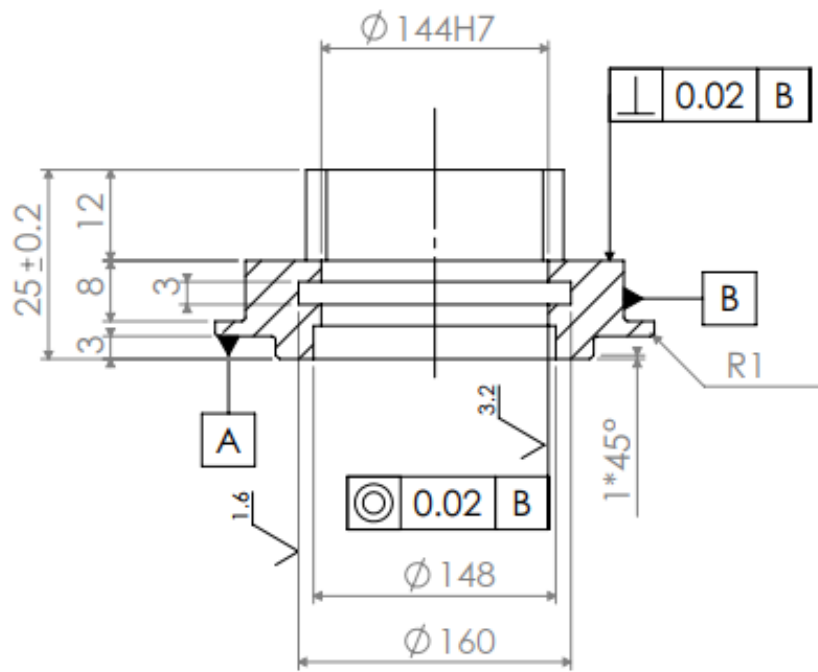
Planche N°:01



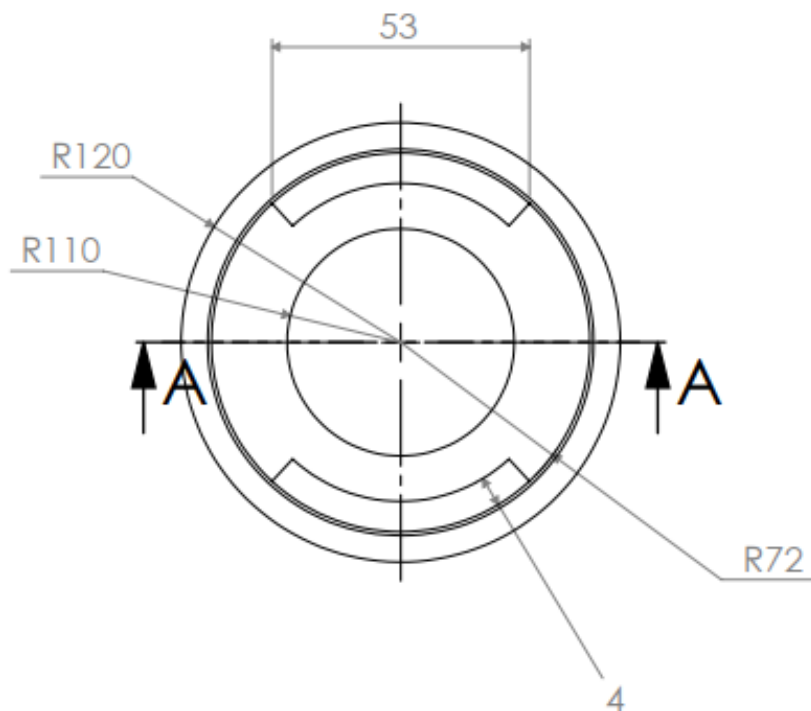
A4

ENSET SKIKDA - DEPARTEMENT DE TECHNOLOGIE

5ème GM



COUPE A-A



Echelle:
2:9

Bague 2

BOUFAROU M A
BENHALIMA A
BASSOU A

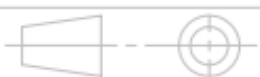
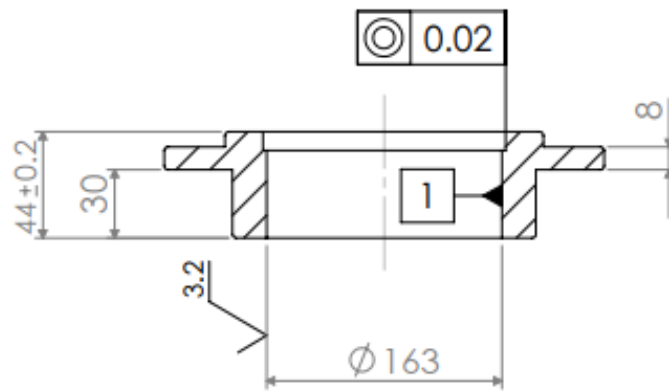


Planche N°:02

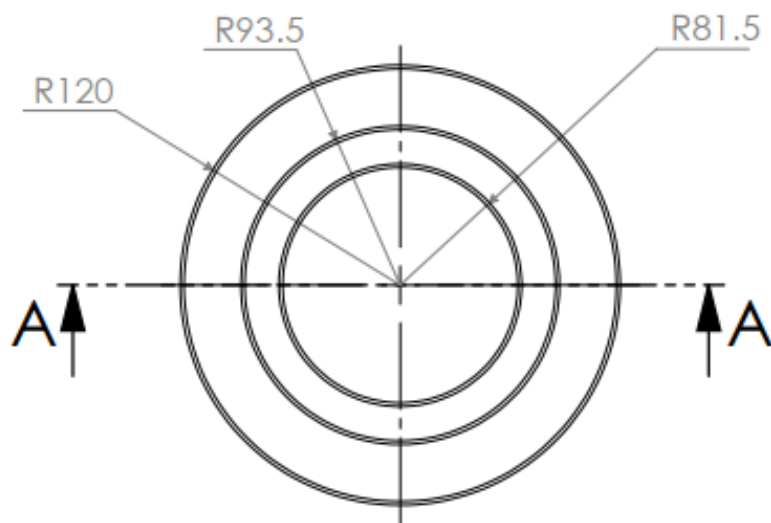
A4

ENSET SIKDA - DEPARTEMENT DE TECHNOLOGIE

5^{ème} GM



COUPE A-A



Echelle :
2:9

Bague 3

BOUFAROU M A
BENHALIMA A
BASSOU A



Planche N°: 03

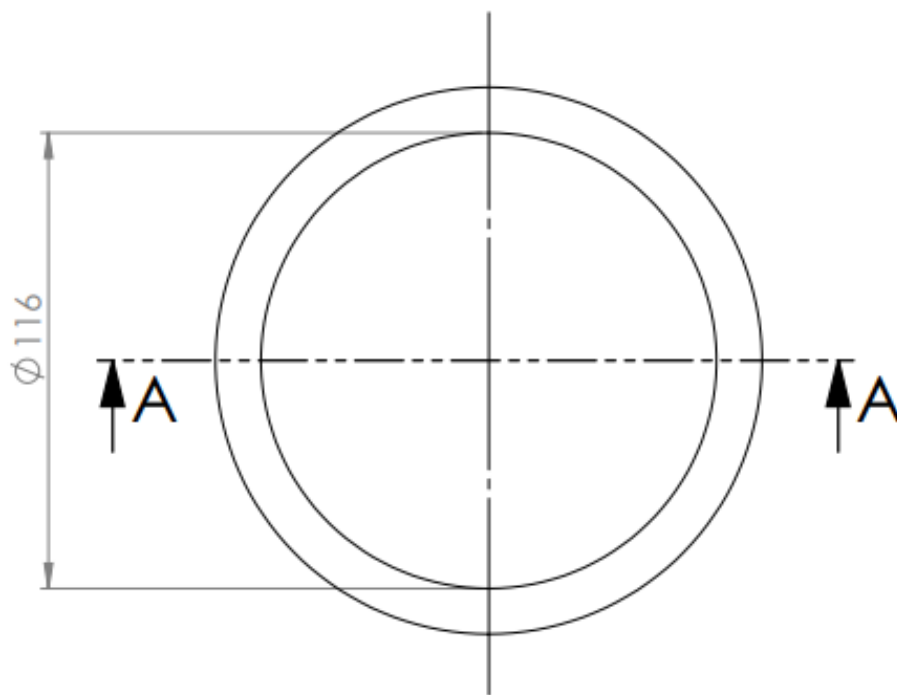
A4

ENSET SKIKDA - DEPARTEMENT DE TECHNOLOGIE

5ème GM



Coupe A-A



Echelle:
1:8

Joint torique

BOUFAROU M A
BENHALIMA A
BASSOU A



Planche N°:4

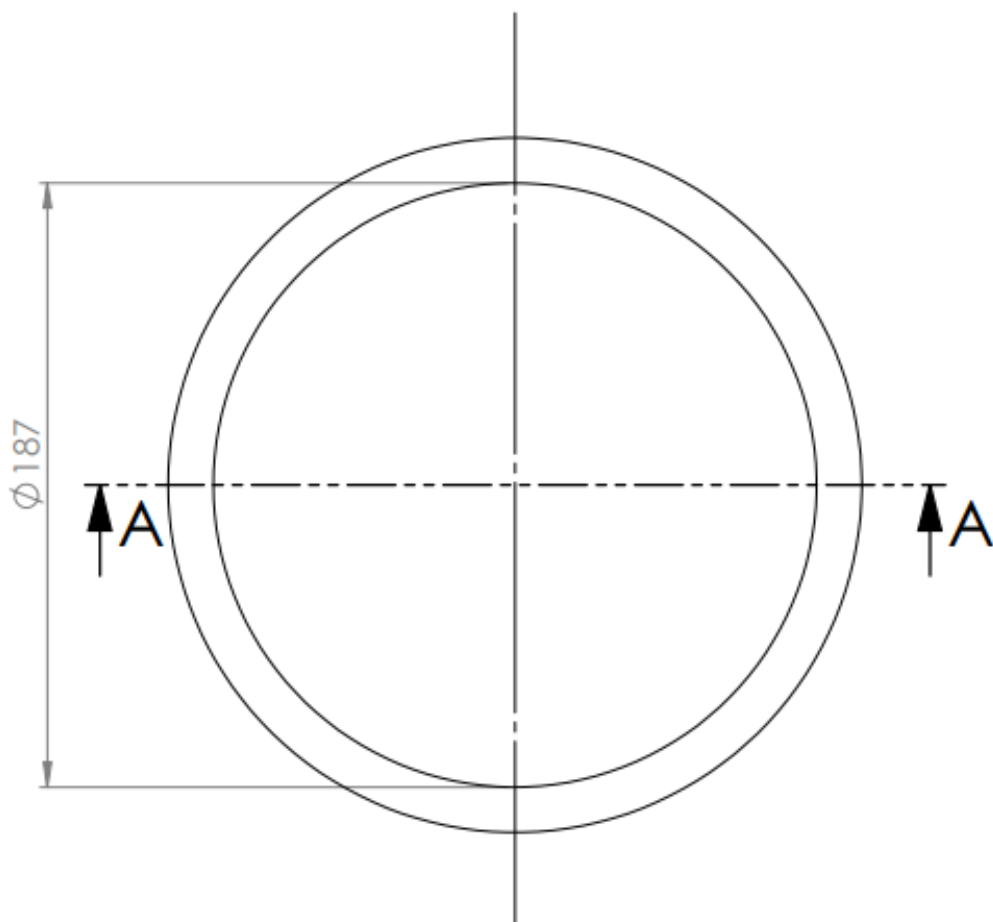
A4

ENSET SKIKDA - DEPARTEMENT DE TECHNOLOGIE

5^{ème} GM



Coupe A-A



Echelle :
1:10

Joint torique

BOUFAROU M A
BENHALIMA A
BASSOU A

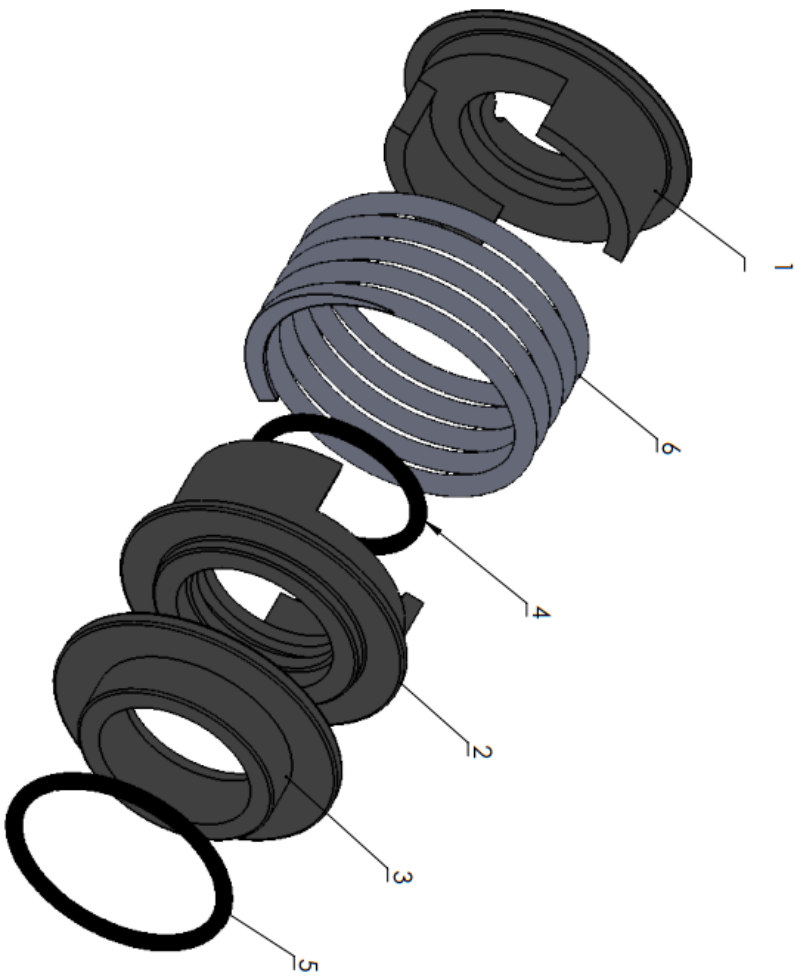


Planche N°:05

A4

ENSET SKIKDA - DEPARTEMENT DE TECHNOLOGIE

5^{ème} GM



06	01	Ressort de compression	52SiCrNi5	
05	01	Joint torique D187	FFKM	
04	01	Joint torique D116	FFKM	
03	01	Bague 3	Graphite	
02	01	Bague 2	Graphite	
01	01	Bague 1	Graphite	
Rep Nbr		Désignation	Matériau	Observation

Echelle :
1:1



Garniture mécanique

A3

ENSET SKKDA - DEPARTEMENT DE TECHNOLOGIE

5ème GM

BOUFAROU M.A

BENHALIMA A

BASSOU A

PLANCHE N°: 06

Conclusion et perspectives

Conclusion et perspectives

Les garnitures mécaniques sont des étanchéités dynamiques pour arbres tournants, les exigences économiques font qu'elles sont de plus en plus utilisées dans l'industrie. Depuis une quarantaine d'années, un effort permanent de recherche contribue à mieux comprendre leur fonctionnement et augmenter au maximum leur fiabilité, pour éviter les fuites dans le cas de l'écoulement des fluides dans les machines tournantes.

Dans la première partie, nous avons commencé par une présentation détaillée des différents types d'étanchéité mécanique, avec un intérêt particulier porté aux garnitures mécaniques. À travers cette analyse, nous avons distingué plusieurs catégories d'étanchéité telles que les joints toriques, les garnitures à tresse et les garnitures mécaniques simples ou doubles. Chacune de ces solutions présente des caractéristiques propres en termes de performance, de coût, de facilité de maintenance et d'adaptation aux conditions de service (pression, température, vitesse de rotation, nature du fluide, etc.). Cette partie a permis de poser les bases fondamentales nécessaires pour comprendre le rôle critique que joue l'étanchéité dans la fiabilité et la sécurité des machines.

La deuxième partie a élargi notre champ d'investigation aux différents procédés d'étanchéité appliqués dans des systèmes industriels variés tels que les turbines, les pompes centrifuges, et les réseaux de tuyauterie. En analysant ces systèmes, nous avons pu constater que les exigences en matière d'étanchéité varient fortement d'un domaine à l'autre, selon les contraintes mécaniques, thermiques et chimiques. Nous avons aussi mis en évidence les problèmes courants rencontrés dans ces équipements (fuites, usure prématurée, cavitation, vibrations, etc.) ainsi que les solutions mises en œuvre pour y remédier, notamment à travers une bonne sélection du système d'étanchéité. Cette partie nous a permis d'avoir une vision globale et comparative des méthodes d'étanchéité, et de mieux cerner l'importance de leur intégration dès la conception des installations industrielles.

La troisième partie de notre étude s'est focalisée sur les garnitures mécaniques, qui représentent aujourd'hui la solution d'étanchéité la plus utilisée dans l'industrie moderne grâce à leur efficacité et leur adaptabilité. Nous avons analysé en profondeur les différents éléments constitutifs d'une garniture mécanique, les matériaux utilisés, les types de lubrification entre les faces, ainsi que les phénomènes physiques qui influencent leur performance (frottement, température, déformation, pression, etc.). Dans cette optique, nous avons intégré l'étude de la norme API 682, reconnue internationalement comme la référence pour la sélection, la conception et l'installation des garnitures mécaniques dans les environnements critiques. Cette norme a constitué pour nous un cadre structurant, permettant de valider techniquement les choix effectués en matière d'étanchéité et d'assurer une conformité aux exigences industrielles actuelles en matière de sécurité, de fiabilité et de respect de l'environnement.

Enfin, la quatrième partie de ce mémoire a été consacrée à la modélisation et au calcul d'un système d'étanchéité mécanique à l'aide du logiciel SolidWorks. Nous avons appliqué nos connaissances théoriques à un cas concret : la conception d'un modèle de garniture mécanique mono-ressort destiné à remplacer un système à tresse dans une pompe centrifuge verticale. Cette modélisation a permis de vérifier la faisabilité de notre solution, de dimensionner correctement les composants, et de simuler le comportement mécanique de la garniture en conditions de service. Cette

approche a renforcé notre capacité à passer de la théorie à la pratique, en mobilisant des outils numériques performants pour concevoir, analyser et optimiser des systèmes mécaniques complexes.

En conclusion, ce travail a permis d'acquérir une vision complète, multidisciplinaire et approfondie du domaine de l'étanchéité mécanique. Il a mis en lumière l'importance de cette fonction technique dans la performance globale des installations industrielles, tout en soulignant les défis techniques à relever pour garantir une étanchéité durable et efficace. L'usage de normes telles que l'API 682, couplé à des outils de conception assistée par ordinateur, constitue aujourd'hui un levier essentiel pour répondre aux exigences croissantes en termes de sécurité, de fiabilité, et de respect de l'environnement.

Pour l'avenir, il serait pertinent d'approfondir certains aspects comme la simulation numérique avancée des champs thermiques et des contraintes dans les garnitures, l'intégration de matériaux composites ou innovants, ou encore l'analyse du cycle de vie complet des systèmes d'étanchéité afin de concilier performance technique et durabilité environnementale.

Références et bibliographiques

REFERENCES ET BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] J. MARTIN, Étanchéité en mécanique, 10 oct. 2004.
- [2] Guide pour l'analyse de l'existant technique, université de Poitier, p. partie 5.
- [3] C. MINET, «Lubrification mixte dans les étanchéités dynamiques,» l'université de Poitiers, 2002.
- [4] H. & B. A. Bloch, «Mechanical Seals fundamentals and practices,» CRC Press, 2020, pp. 125-130.
- [5] H. Allie, Machines hydrauliques et thermique, Dunod, Éd., 2006, p. 213.
- [6] «Techoseal,» [En ligne]. Available: <https://www.techoseal.fr/joints-pales>.
- [7] F. Monnier, Turbomachines : Conception et modélisation, Dunod, Éd., 2013, p. 241.
- [8] G. Rigal, Éléments de construction mécanique : Tome 2 – Étanchéités, transmissions, guidages, 2012, p. 154.
- [9] M. Fillon, Les systèmes d'étanchéité : Étanchéité statique, dynamique, garnitures mécaniques, 2009, p. 112.
- [10] J.-C. Dabadie, Machines thermiques et installations : Turbines, compresseurs, moteurs thermiques, 2010, p. 173.
- [11] H. Lammari, Hydraulique industrielle – Tome 1 : Composants et schémas, 2016, p. 204.
- [12] E. F. Gerwin, chez *PIPING HANDBOOK*, pp. 261-270.
- [13] M. L. Nayyar, chez *PIPING HANDBOOK*, p. 2.
- [14] Gasket Handbook A Technical Guide to Gasketing & Bolted Joints, p. 4.
- [15] H. Granjon, Soudage : Matériaux et procédé, 2008, p. 327.
- [16] J.-P. D. Pont, Pompes et installations de pompage – Choix, fonctionnement, maintenance, 2013, p. chapitre 1.
- [17] E. MAYER, Garnitures mécaniques d'étanchéité, DUNOD, Éd., 1972.
- [18] P. Jurandir Primo, «PDHonline,» 2020. [En ligne]. Available: <https://www.pdhonline.com>.
- [19] T. d. l'Ingénieur, «Garnitures Mécaniques : Technologie,» 2001.
- [20] A. a. H.A.Scibbe, Mechanical Seals: Principles and Design.
- [21] «Cowseal,» [En ligne]. Available: <https://cowseal.com/fr/mechanical-seal-flush-vs-quench>.
- [22] API 682: Advencement in Mechanical Sealing, 4^e édition éd., 2014, p. 1.
- [23] Michael B. HUEBNER, owserve Corporation, publication: « seal solutions », mai2007.
- [24] «Flowserve,» [En ligne]. Available: <https://www.flowserve.com/en/products/products-catalog/seals/mechanical-seal-piping-plans>.
- [25] Flowserve Corporation, Mechanical Seal Piping Plans, FTA160eng, REV04-05.
- [26] C. R. W. & A. W. LOUMIS, ameron Hydraulic Data, 16 édition éd., I. RAND, Éd.
- [27] SolidWorks Corporation, Guide de le logiciel SolidWorks, 2021.

ANEXES

Annexe A :

Equation de Reynolds

A.1 Rappel des équations de Navier-Stokes :

Les équations fondamentales du mouvement s'écrivent, pour un fluide Newtonien :

$$\begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial V_r}{\partial t} + V_r \frac{\partial V_r}{\partial r} + V_\theta \left(\frac{\partial V_r}{\partial \theta} - V_\theta \right) + V_z \frac{\partial V_r}{\partial z} \right) = \\ f_e + \frac{1}{r} \left(\frac{\partial V_r}{\partial r} - \frac{1}{r} \left(V_r + \frac{\partial V_e}{\partial \theta} \right) \right) (\lambda + 2\mu) + \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\mu \left(\frac{\partial V_\theta}{\partial r} + \frac{1}{r} \left(\frac{\partial V_r}{\partial \theta} + V_\theta \right) \right) \right) + \\ \frac{\partial}{\partial r} \left(-P + \frac{\partial V_r}{\partial r} (\lambda + 2\mu) \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \left(\frac{\partial V_z}{\partial r} + \frac{\partial V_r}{\partial z} \right) \right) \end{aligned}$$

Equation 1

$$\begin{aligned} \frac{\partial v_0}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_a}{\partial t} + \frac{v_0}{r} \left(v_r - \frac{\partial v_0}{\partial \theta} \right) + v_x \frac{\partial v_0}{\partial z} = \\ f_0 - \frac{L}{r} \left(2\mu \left(\frac{\partial V_\theta}{\partial r} + \frac{1}{r} \left(\frac{\partial V_1}{\partial \theta} - V_\theta \right) \right) + \frac{\partial}{\partial \theta} \left(-p + \frac{1}{r} \left(V_r + \frac{\partial V_\theta}{\partial \theta} \right) (\lambda + 2\mu) \right) \right) + \\ \frac{\partial}{\partial r} \left(\mu \left(\frac{\partial V_\theta}{\partial r} + \frac{1}{r} \left(\frac{\partial V_1}{\partial \theta} \cdot V_\theta \right) \right) \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \left(\frac{1}{\partial \theta} V_2 + \frac{\partial V_\theta}{\partial z} \right) \right) \end{aligned}$$

Equation 2

$$\begin{aligned} \bullet \quad \frac{\partial v_2}{\partial t} + V_2 \frac{\partial v_2}{\partial t} + V_\theta \frac{\partial v_2}{\partial \theta} + V_z \frac{\partial v_2}{\partial z} = \\ f_r = \frac{1}{r} \left(\mu \left(\frac{\partial V_z}{\partial r} + \frac{\partial V_z}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\mu \left(\frac{1}{r} \frac{\partial V_z}{\partial \theta} + \frac{\partial V_\theta}{\partial z} \right) \right) \right) + \\ \frac{\partial}{\partial r} \left(\mu \left(\frac{\partial V_z}{\partial z} + \frac{\partial V_z}{\partial z} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\cdot P + \frac{\partial V_z}{\partial z} (\lambda + 2\mu) \right) \end{aligned}$$

Equation 3

A.2 Conservation de la quantité de matière :

L'équation de la conservation de masse s'écrit :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial (r \rho V_r)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial (\rho V_\theta)}{\partial \theta} + \frac{\partial (\rho V_z)}{\partial z} = 0$$

Equation 4

A.3 Equation de Reynolds :

Grâce aux équations du mouvement (Equation 1, Equation 2, Equation 3) et l'équation de conservation de la masse (Equation 4) et en faisant certaines hypothèses propres à la lubrification, on peut établir l'équation de Reynolds.

Détaillons tout d'abord les hypothèses :

- L'épaisseur du film est toujours plus faible devant les autres dimensions du contact (hypothèse de base de la lubrification).
- Le milieu est continu.
- Le fluide est Newtonien.
- L'écoulement est laminaire.
- Les forces massiques extérieures sont négligeables.
- Les forces d'inertie dans le fluide sont négligeables
- Il n'y a pas de glissement entre le fluide et les parois du contact.

Avec les hypothèses précédentes les équations de Navier-Stokes se réduisent à :

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \left(\frac{\partial V_t}{\partial z} \right) \right) = \frac{\partial P}{\partial r}$$

Equation 5

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \left(\frac{\partial V_\theta}{\partial z} \right) \right) = \frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial \theta}$$

Equation 6

$$\frac{\partial P}{\partial z} = 0$$

Equation 7

En reprenant l'équation de la conservation de la masse (Equation 4) et en l'intégrant selon l'épaisseur du film, on obtient :

$$\int_{h_2}^{h_1} \frac{\partial \rho}{\partial t} dz + \frac{1}{r} \int_{h_2}^{h_1} \frac{\partial (r \rho V_r)}{\partial r} dz + \frac{1}{r} \int_{h_2}^{h_1} \frac{\partial (\rho V_\theta)}{\partial \theta} dz + \int_{h_2}^{h_1} \frac{\partial (\rho V_z)}{\partial z} dz = 0$$

Equation 8

Il vient après quelques développements l'équation de Reynolds généralisée :

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial r} \left(r G_1 \frac{\partial P}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial \theta} \left(G_1 \frac{\partial P}{\partial \theta} \right) &= \frac{\partial R_1}{\partial t} - \rho_1 \frac{\partial h_1}{\partial t} + \rho_2 \frac{\partial h_2}{\partial t} + V_{r_1} \frac{\partial}{\partial r} (r(R_1 - G_2)) + V_{r_2} \frac{\partial}{\partial r} (r G_2) \\ &+ r \left\{ -\rho_1 V_{r_1} \frac{\partial h_1}{\partial r} + \rho_2 V_{r_2} \frac{\partial h_2}{\partial r} \right\} + r V_{\theta_1} \frac{\partial}{\partial \theta} (R_1 - G_2) + r V_{\theta_2} \frac{\partial}{\partial \theta} (G_2) \\ &+ r \left\{ -\rho_1 V_{\theta_1} \frac{\partial h_1}{\partial \theta} + \rho_2 V_{\theta_2} \frac{\partial h_2}{\partial \theta} \right\} + \rho_1 V_{z_1} - \rho_2 V_{z_2} = 0 \end{aligned}$$

Equation 9

Dans la géométrie particulière des garnitures mécaniques présentée, on obtient l'équation de Reynolds simplifiée :

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(r h^3 \frac{\partial p}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{h^3}{r} \frac{\partial p}{\partial \theta} \right) = 6\mu r \omega \frac{\partial h}{\partial \theta} + 12\mu r V_{z_1}$$

Equation 10

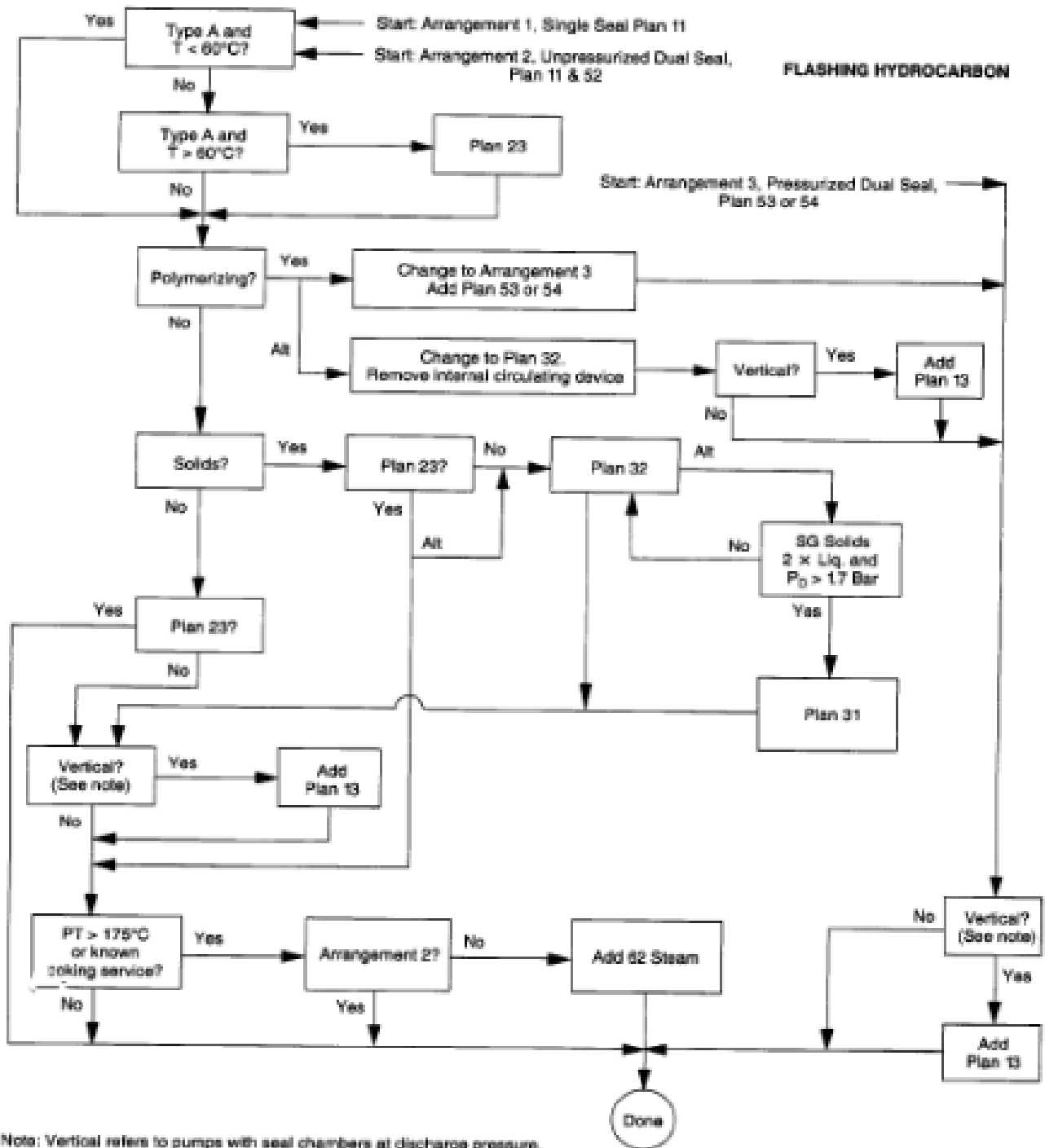
Annexe C :

Procédure de choix d'un plan auxiliaire pour hydrocarbure léger

66

API STANDARD 682

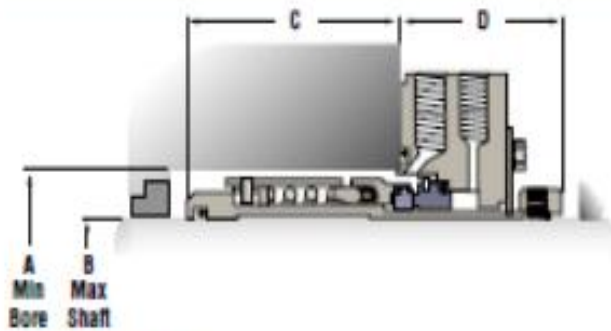
RECOMMENDED SEAL SELECTION PROCEDURE (SI UNITS)
SHEET 9 OF 10



Note: Vertical refers to pumps with seal chambers at discharge pressure.

Annexe D :

Tableau du choix de la dimension de la garniture : « Flowserve UC »



Dimensional Data

Seal Size	Inches					Seal Size	millimeters				
	A	B	C	C(UZ)	D		A	B	C	C(UZ)	D
1062	1.953	0.556	1.797	1.047	1.985	1062	49,61	14,12	45,64	26,59	50,42
1125	2.015	0.587	1.431	1.031	2.032	1125	51,18	14,91	36,34	26,19	51,61
1187	2.109	0.713	1.797	1.016	2.203	1187	53,57	18,11	45,62	25,81	55,96
1250	2.250	0.775	2.141	1.203	2.141	1250	57,15	19,69	54,37	30,56	54,38
1312	2.313	0.838	2.344	1.344	2.250	1312	58,75	21,29	59,53	34,14	52,15
1375	2.390	0.900	2.297	1.328	2.360	1375	60,71	22,86	58,34	33,73	59,94
1437	2.438	0.962	2.156	1.281	2.313	1437	61,93	24,43	54,77	32,54	58,75
1500	2.515	1.025	2.172	1.266	2.360	1500	63,88	26,04	55,17	32,16	59,94
1625	2.813	1.088	3.203	1.734	2.453	1625	71,44	27,64	81,36	44,04	62,31
1750	2.892	1.213	2.375	1.313	2.657	1750	73,44	30,81	60,33	33,35	67,49
1875	3.001	1.338	2.508	1.516	2.609	1875	76,21	33,99	63,69	38,51	66,27
2000	3.344	1.400	3.656	2.031	2.656	2000	84,92	35,56	92,87	51,59	67,46
2062	3.220	1.463	2.641	1.641	2.828	2062	81,78	37,16	67,07	41,68	71,83
2125	3.438	1.525	3.031	1.813	3.000	2125	87,31	38,74	76,99	46,50	76,10
2250	3.393	1.713	2.406	1.750	2.875	2250	86,17	43,51	61,12	44,45	73,02
2375	3.751	1.775	3.594	2.063	2.844	2375	95,26	45,09	91,26	52,40	72,24
2500	3.813	1.900	3.547	2.109	2.891	2500	96,85	48,26	90,09	53,57	73,43
2625	3.876	1.963	2.828	1.859	2.953	2625	98,45	49,86	71,83	47,22	75,01
2687	4.063	2.088	3.594	2.250	2.844	2687	103,20	53,04	91,29	57,15	72,24
2875	4.188	2.275	3.172	2.078	3.078	2875	106,38	57,79	80,57	52,78	78,18
3000	4.438	2.400	3.313	2.250	3.250	3000	112,73	60,96	84,15	57,15	82,55
3125	4.563	2.525	3.391	2.328	3.234	3125	115,90	64,14	86,13	59,13	82,14
3250	4.563	2.650	3.328	2.453	3.234	3250	115,90	67,31	84,53	62,31	82,14
3375	4.876	2.775	3.313	2.156	3.468	3375	123,85	70,49	84,15	54,76	88,09
3500	4.938	2.900	3.063	2.188	3.468	3500	125,43	73,66	77,80	55,58	88,09
3625	4.938	3.025	3.094	2.219	3.500	3625	125,43	76,84	78,59	56,36	88,90
3750	5.188	3.150	3.578	2.891	3.296	3750	131,78	80,01	90,88	73,43	83,72
3813	5.438	3.213	3.703	2.484	3.234	3813	138,13	81,61	94,06	63,09	82,14
4000	5.376	3.400	3.469	-	3.406	4000	136,55	86,36	88,11	-	86,51
4250	5.688	3.650	3.328	-	3.515	4250	144,48	92,71	84,53	-	89,28
4312	5.875	3.650	3.375	-	3.468	4312	149,23	92,71	85,73	-	88,09
4500	6.063	3.900	3.328	-	3.515	4500	154,00	99,06	84,53	-	89,28
4875	6.375	4.213	3.656	-	3.437	4875	161,93	107,01	92,86	-	87,30
5125	6.750	4.463	4.094	-	3.593	5125	171,45	113,36	103,99	-	91,26
5500	7.188	4.838	4.219	-	3.562	5500	182,68	122,89	107,16	-	90,05
6000	7.875	5.400	4.313	-	4.093	6000	200,03	137,16	109,55	-	103,96
6500	8.375	5.838	4.594	-	4.250	6500	212,73	148,29	116,69	-	107,95

Note: For additional sizes and conditions not listed, contact your local Flowserve representative.

Annexe E :

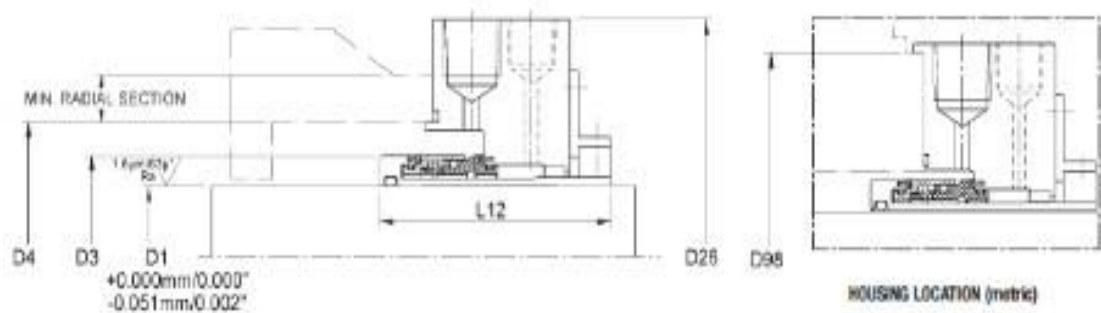
Tableau du choix de la dimension de la garniture : « John Crane 5610Q »



TYPE 5610Q-1/5620P-1/5620D-1

API 682 Category I, Type A Pusher Seals

Type 5610Q-1 API 682 Cat. I Type A Arrangement 1 - Single Cartridge



5610Q-1 Enlarged-Bore Dimensional Data (metric)

Shaft Dia./D1 (mm)	D4 Bore Min.	D3 Seal O.D.	Spigot Dia. D98	L12 Seal Length	D26 Gland O.D.
22	44	39.7	106	72.5	112
25	46	42.9	106	74.0	112
30	51	46.1	110	75.5	117
35	60	55.6	120	75.1	127
40	65	58.7	130	75.1	137
45	70	64.7	135	75.1	142
50	75	71.1	135	78.9	142
55	85	74.2	145	78.9	152
60	90	83.8	170	83.2	177
65	95	90.2	170	84.0	177
75	109	98.2	180	84.0	187
85	119	111.0	190	85.6	197

5610Q-1 Enlarged-Bore Dimensional Data (inches)

Shaft Dia./D1 (inches)	D4 Bore Min.	D3 Seal O.D.	Radial Sect. Min.	L12 Seal Length	D26 Gland O.D.
1.125	2.625	1.812	0.250	2.859	4.750
1.375	2.875	2.187	0.250	2.859	5.375
1.750	3.500	2.550	0.250	2.922	6.500
1.875	3.625	2.673	0.250	3.000	6.500
2.125	3.875	2.923	0.250	3.062	7.156
2.500	4.750	3.551	0.250	3.156	8.000
2.625	4.625	3.614	0.250	3.156	8.000
2.750	4.750	3.864	0.250	3.187	8.000

For sizes not shown, please contact John Crane.