

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Ibn Khaldoun de Tiaret
Faculté des Sciences Appliquées
Département de Génie Mécanique



MÉMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du Diplôme de Master

Domaine : Sciences et Technologie
Filière : Electromécanique
Spécialité : Maintenance Industrielle

Thème

ARBRE DE DEFAILLANCES DES
GARNITURES MECANIKES POUR POMPES
CENTRIFUGES MULTICELLULAIRES

Préparé par :

BENIDA Rabah Abdelouahab et **OSMANI** Mokhtar

Soutenu publiquement le : 28 / 09 / 2020, devant le jury composé de :

M. SLIMANI .H	Maître de Conférences "A" (Univ. Ibn Khaldoun)	Président
M. BELMILOUD.M.A	Maître de Conférences "B" (Univ. Ibn Khaldoun)	Examineur
M. ATHMANI.H	Maître Assistant "A" (Univ. Ibn Khaldoun)	Examineur
M. GUEMMOUR.M.B	Maître de Conférences "B" (Univ. Ibn Khaldoun)	Encadreur

Année universitaire : 2019 - 2020

REMERCIEMENTS

On tient avant tout à remercier chaleureusement Monsieur **GUEMMOUR Mohamed Boutkhal**, Maître de conférences (B) à l'université Ibn-Khaldoun de Tiaret de nous avoir encadré et assuré le suivi de notre travail. En nous faisant confiance depuis le début de nos travaux, il a su diriger ce travail tout en nous laissant une complète autonomie. On le remercie non seulement pour la qualité de son encadrement mais également pour l'inestimable qualité humaine dont il a toujours fait preuve.

On remercie tout autant Madame **SLIMANI.H**, Maître de Conférences(A) à l'université Ibn-Khaldoun de Tiaret pour avoir accepté de présider le jury de notre mémoire.

Nos sincères remerciements vont également à Messieurs **BENMILOUD.M.A**, Maître de Conférences (B) et Messieurs **ATHMANI.H**, Maître Assistant "A" à l'université Ibn-Khaldoun de Tiaret qui nous ont fait l'honneur d'être examinateur de notre mémoire, et qui ont consacré de leur précieux temps à l'examen et à l'évaluation de notre travail.

On les remercie vivement pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre travail afin de l'expertiser avec une grande efficacité et une grande rapidité, ainsi que pour la patience et la pertinence dont ils ont fait preuve à la lecture de ce document.

SOMMAIRE.

Introduction générale	2
Chapitre I : Etanchéité mécanique pour arbre tournants	
I.1 Introduction	4
I.2 Position du problème	5
I.2.1 Les engins marins	5
I.2.2 Les turbomachines	5
I.2.3 Industries type process.....	6
I.2.4 Organes de transmission de puissance.....	7
I.3 Étanchéité mécanique	8
I.3.1 Définition et rôle.....	8
I.3.2 Choix d'un système d'étanchéité mécanique.....	8
I.3.2.1 variables d'étanchéités et variables d'exploitation	8
I.3.2.2 Critères de choix d'une étanchéité	9
I.4 Classification des étanchéités	10
I.4.1 Étanchéité pour mouvement de rotation	10
I.4.1.1 Etanchéité avec contact.....	10
1- Le presse-étoupe	11
a- Cordon en tresse.....	11
b- Joint torique "V"	11
2- Etanchéité avec joint à lèvres	12
3- Etanchéité avec garniture mécanique	12
I.4.1.2 Etanchéité sans contact	13
1- Douille d'étanchéité	13
2- Etanchéité en labyrinthe	14
3- Visco-étanchéité	14
4- Étanchéité à Ferrofluides	15
I.4.2 Sélectivité d'une étanchéité mécanique dynamique.....	16
Chapitre II :Étanchéité par garniture mécanique	
II.1 Introduction	18
II.2 Pompe centrifuge	18
II.2.1 Définition.....	18
II.2.2 Composants	19

II.2.3 Fonctionnement	20
II.2.4 Classification	21
II.2.4.1 Pompe centrifuge unicellulaires	21
II.2.4.2 Pompe centrifuge multicellulaires	21
II.3 Garniture mécanique	22
II.3.1 Fonction globale	22
II.3.2 Constitution et principe de fonctionnement	23
II.3.2.1 Constitution	23
II.3.2.2 Principe de fonctionnement	24
II.3.3 Technologie	25
II.3.3.1 Garnitures mécaniques d'étanchéité pour liquides	25
II.3.3.2 Garnitures mécaniques d'étanchéité sèches	26
II.3.3.3 Garnitures mécaniques d'étanchéité pour gaz	27
II.3.4 Critères de choix	28
II.3.5 Modes de défaillances	28

Chapitre III :Arbre de défaillance garniture mécanique

III.1 Introduction	31
III.2 Arbre de défaillance	31
III.2.1 Définition	31
III.2.2 Rôle des arbres de défaillances	31
III.2.3 Représentation graphique	32
III.2.4 Construction d'un arbre de défaillances	33
III.2.4.1 Principe	33
III.2.4.2 Etapes de construction	34
III.2.5 Avantages et Inconvénients	35
III.3 Application	35
III.3.1 Identification de l'évènement redouté	35
III.3.2 Construction de l'arbre de défaillance	36
III.4 Conclusion	38
Conclusion générale	40
Bibliographie	42
Résumé	

LISTE DES FIGURES

Figure I.1 : Etanchéité pour propulsion navale.....	5
Figure I.2 : Etanchéité pour turbomachines.....	6
Figure I.3 : Etanchéité pour agitateur, mélangeur et malaxeurs	6
Figure I.4 : Etanchéité dans une transmission de puissance.....	7
Figure I.5 : Etanchéité avec presse-étoupe en tresse	11
Figure I.6 : Etanchéité avec joint torique "V"	11
Figure I.7 : Etanchéité avec joint à lèvres	12
Figure I.8 : Etanchéité avec garniture mécanique	13
Figure I.9 : Douille d'étanchéité fixe	13
Figure I.10 : Etanchéité à labyrinthe.....	14
Figure I.11 : Visco-étanchéité.....	14
Figure I.12 : Etanchéité ferromagnétique	15
Figure I.13 : Arbre de décision	16
Figure II.1 : Pompe centrifuge monocellulaire.....	19
Figure II.2 : pompe centrifuge multicellulaires	21
Figure II.3 : Garniture mécanique dans une pompe centrifuge monocellulaire	23
Figure II.4 : Deux exemples des garnitures mécaniques	23
Figure II.5 : Constitution d'une garniture mécanique (Safeseal SBW John Crane)	25
Figure II.6 : Garniture mécanique simple à cartouche pour les liquides.....	26
Figure II.7 : Garniture mécanique à cartouche pour compresseur	28
Figure II.8 : Différents types de rainures.....	28
Figure III.i : Arbre de défaillance pour garniture mécanique	37

LISTE DES TABLEAUX

Tab I.1: Interaction entre les variables de l'étanchéité et celles de son application.....	8
Tab I.2: Critères de choix d'une étanchéité mécanique	9
Tab I.3: Classification des dispositifs pour étanchéités mécaniques	10
Tab I.4: Ordre de grandeur des principaux paramètres d'une garniture mécanique	12
Tab II.1: Principales causes de défaillance.....	19
Tab III.1: Symboles des évènements dans les arbres de défaillances	32
Tab III.2: Symboles des portes dans les arbres de défaillances	32
Tab III.3: Liste des événements probables	36

**INTRODUCTION
GÉNÉRALE**

Le contenu du présent travail s'intègre dans un contexte technologique, en relation avec le secteur énergétique et en particulier le transport par canalisation (TRC) des hydrocarbures par pompage des produits hydrocarbures (pétrole brut, condensât, gaz naturel et GPL) à partir des gisements. Le processus de ce transport, est assuré par des turbomachines telles que pompes et compresseurs.

Dans notre cas, il s'agit des stations de pompages implantés le long des lignes de transport des hydrocarbures des divisions Réseau Transport Ouest (RTO). Les moyens autour desquels sont construites ces stations sont les pompes et les compresseurs. Ce sont des machines composée de deux parties : partie fixe appelée stator (corps de pompe ou corps de compresseur) et une partie mobile appelée rotor (Arbre + Impulseur). Ce dernier convertit l'énergie mécanique fournie par un organe moteur en énergie cinétique pour faire mouvoir et accélérer la quantité de fluide le long de la canalisation.

Pour garantir la disponibilité de l'énergie électrique sur le réseau de SONELGAZ, la fonction maintenance a pour mission de maintenir outil de production. Elle doit être apte à offrir aux différents station de pompage ainsi qu'aux équipements qui leurs sont annexés, une prestation de service de qualité qui permet d'atteindre les objectifs tracés par la RTO pour satisfaire la demande de ses clients. La qualité du service offert par la maintenance à son client qui est le transport est tributaire de la conduite d'un certain nombre d'activités techniques et/ou de gestion qui font appel à des démarches, des méthodes, outils et des techniques qu'il faudra appliqués ou mettre en œuvre pour que la fonction maintenance se réalise.

Dans le cadre de notre travail dont le thème s'intitule « études des défaillances des garnitures mécaniques pour pompes centrifuges multicellulaires », on a traité l'une des deux activités de la fonction maintenance, à savoir l'activité technique et en particulier la maintenance préventive. Notre centre d'intérêt était la garniture mécanique.

Dans le but de mettre en pratique et valoriser nos connaissances théoriques acquise durant notre cursus universitaire dans la spécialité maintenance industrielle, notre objectif était de fournir aux hommes de maintenance un outil d'aide pour diagnostiquer qualitativement et quantitativement les défaillances qui peuvent survenir aux niveau des garnitures mécaniques pour pompes centrifuges multicellulaires afin d'améliorer son taux de sa disponibilité et garantir sa longévité

Pour ce faire, notre travail, a été synthétisé en un mémoire structuré en trois chapitres. Le premier chapitre est consacré d'une manière générale à la présentation à l'une des fonctions mécaniques qui est l'étanchéité mécanique. Le deuxième chapitre présente la solution constructive de la garniture mécanique utilisée dans les pompes centrifuges. Enfin le troisième chapitre est une étude de cas réservée à l'application de l'arbre de défaillance comme outil de diagnostic des défauts de garnitures mécaniques. A la fin, une conclusion a été donnée pour clôturer notre travail.

Chapitre I

ÉTANCHEITÉ MÉCANIQUE *POUR* *ARBRES TOURNANTS*

I.1. INTRODUCTION

En technologie de construction mécanique, lors de la conception-construction d'un groupe fonctionnel de pièces pour un organe de machine, les solutions constructives sont recherchées à travers les fonctions mécaniques tel que : assemblage de deux pièces mécaniques, guidage en translation, guidage en rotation, transmission de puissance, lubrification et étanchéité mécanique. Dans les systèmes techniques qui nécessitent des commandes hydrauliques et/ou pneumatiques, et dans lesquelles les fluides de commandes circulent à travers des réseaux de conduites sous pression, l'étanchéité devient une fonction fondamentale pour ce genre de systèmes.

Vu que le confinement d'un fluide, de par sa nature, n'est pas aisé et qu'une bonne fiabilité en matière d'étanchéité n'est pas souvent facile à obtenir en cas de fuite de gaz ou de liquide, le fonctionnement et la sécurité de l'installation ainsi que celle des hommes seront menacés. Donc 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. A cet effet, l'étanchéité reste une fonction qui revêt une grande importance 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.

En outre, la fonction étanchéité pour qu'elle soit correctement assurée, elle fait appel à de nombreuses notions de physique et de chimie où les propriétés des matériaux tiennent une place importante. Pour une solution constructive, les problèmes à résoudre sont variés et doivent intégrer un nombre important de paramètres difficiles à optimiser simultanément, spécialement en dynamique. C'est pour cela que les meilleures solutions en techniques d'étanchéité ne sont presque toujours que le résultat de savants compromis. [1]

Ce chapitre donne tout d'abord la définition de l'étanchéité mécanique, décrit les différents types d'étanchéité ensuite il expose les solutions à mettre en œuvre dans le cas de l'étanchéité dynamique en rotation et en particulier les joints d'étanchéités annulaires.

I.2 POSITION DU PROBLEME

Le fonctionnement des machines tournantes ou alternatives exige toujours des étanchéités au niveau des arbres tournants afin de retenir les fluides lubrifiants et empêcher les particules étrangères de pénétrer dans l'enceinte à étancher et d'endommager les machines faisant subir à celles-ci une défaillance prématurée. Les conditions de fonctionnement pouvant considérablement varier, la conception des systèmes d'étanchéités ont évolués pour répondre à ces conditions. Certaines applications tolèrent une petite quantité de fuite, tandis que d'autres ne permettent aucune fuite. En général, la complexité, des étanchéités, et les coûts augmentent à mesure que le besoin de zéro fuite augmente [2]. Parmi les machines et organes de machines qui rentrent dans ce contexte, on peut citer les applications suivantes :

1°. Les engins marins

Les engins marins (bateau de plaisance, navire scientifique, de pêche ou de commerce, bâtiment militaire, sous-marin, drone) font appel à différents modes de propulsion pour se déplacer sur ou sous les mers. La transmission doit traverser la coque pour entraîner l'hélice de propulsion d'où la nécessité d'une étanchéité mécanique entre la coque et l'arbre de transmission (**Figure 1.1**).

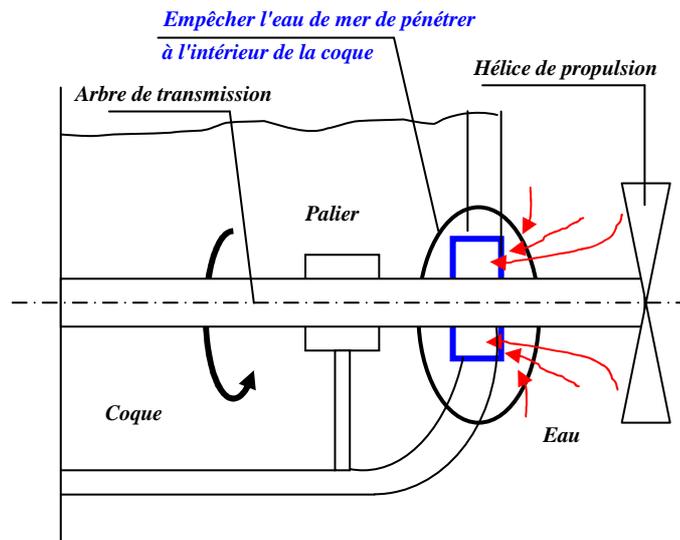


Fig 1.1: étanchéité pour propulsion navale

2°. Les turbomachines

Pour pouvoir entraîner leurs rotors, toutes les turbomachines possèdent des paliers lisses ou à roulement pour assurer le guidage en rotation de l'arbre d'entraînement et présenter un accès pour ce lui-ci, sans pour autant permettre une fuite excessive du fluide à impulser. D'où la nécessité d'une étanchéité mécanique entre le fluide à faire transporter et le milieu extérieur (**Figure 1.2**).

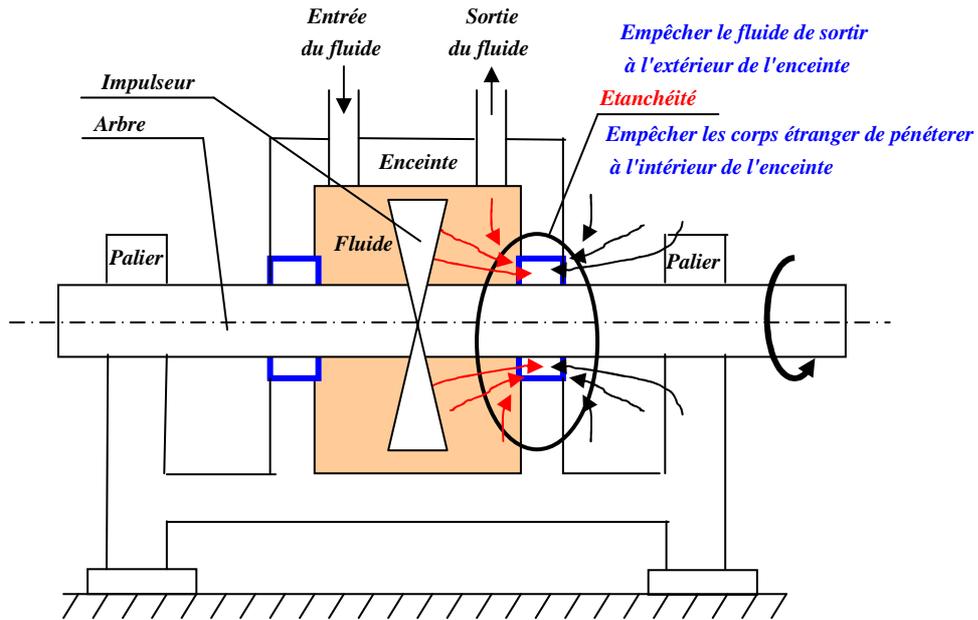


Fig 1.2: étanchéité pour turbomachines

3° Industries type process

Les industries tel que l'agroalimentaire, Chimie, pétrochimie, pharmaceutique, biotechnologie, cosmétique, traitement des eaux, nucléaire, etc., utilisent tous d'une manière intensive dans leurs processus des organes tel que agitateurs, malaxeurs et mélangeurs industriels. Il arrive que ces dernières soient immergées dans le fluide devant être traité ou à transporté. Là aussi, apparaît la nécessité d'une étanchéité mécanique dynamique entre l'intérieur et l'extérieur de la pompe (Figure 1.3).

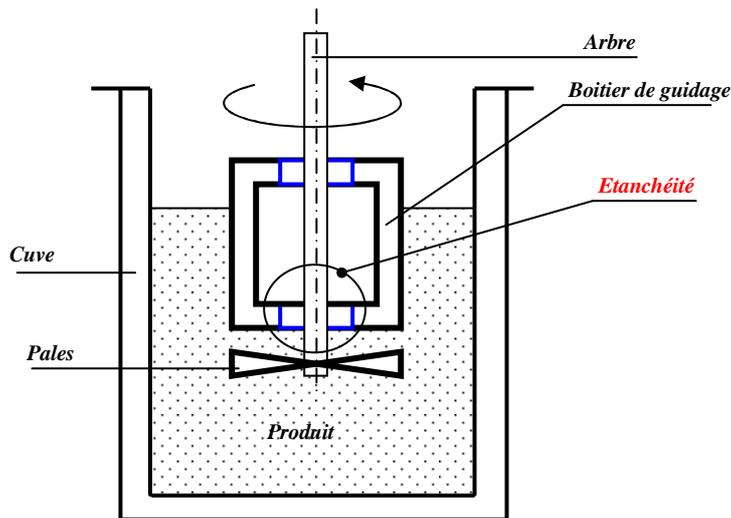


Fig 1.3: étanchéité pour agitateur, mélangeur et malaxeurs

4°. Organes de transmission de puissance

Pour pouvoir transmettre une puissance entre un organe moteur (exp: moteur électrique) et un organe récepteur (exp: soufflante), les organes de machines tel que embrayages, freins, réducteurs de vitesses utilisent des arbres de transmission guidés en rotation continues et portés à l'aide de paliers à roulements lubrifiés dans un carter. Ce dernier nécessite une étanchéité mécanique dynamique entre les arbres d'entrées et sortie, et le milieu extérieur (**Figure 1.4**).

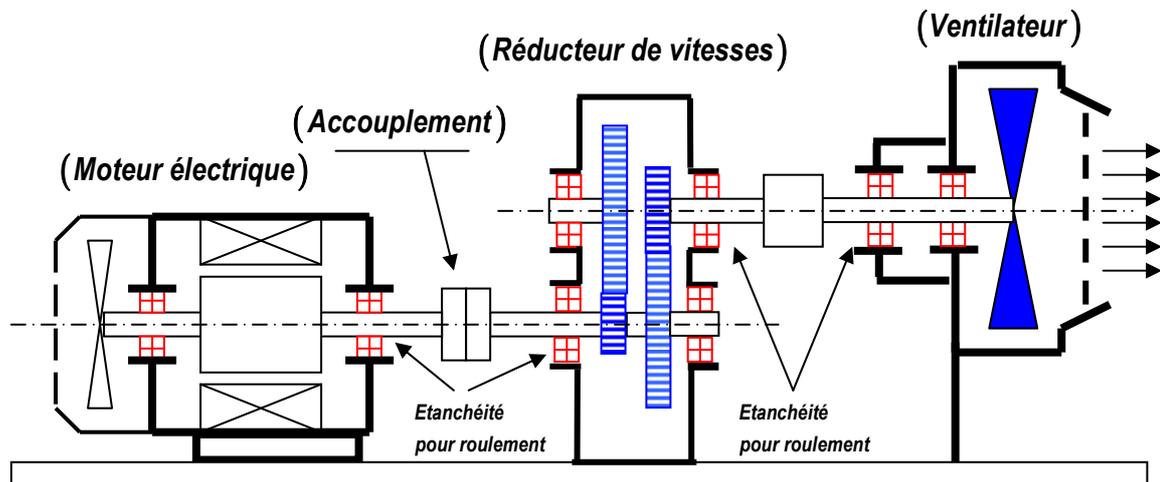


Fig 1.4: étanchéité dans une transmission de puissance

I.3 ÉTANCHÉITÉ MÉCANIQUE

I.3.1. Définition et rôle

L'étanchéité mécanique est une fonction mécanique qui consiste à séparer deux milieux fluides (liquide, vapeur, gaz) ou pseudo-fluides (pâte, graisse, peinture, pétrole, boue, polymères, etc..) de nature et/ou d'états physico-chimiques différents, en assurant leur confinement à l'intérieur d'une enceinte. On dit qu'une enceinte est parfaitement étanche si [3]:

- aucune quantité de fluide qui y est contenu ne peut sortir vers extérieur ;
- aucune particule étrangère ou fluide étranger ne peut pénétrer à l'intérieur.

Dans les applications industrielles, le but général d'une étanchéité mécanique est de minimiser ou d'empêcher une fuite quelconque d'un milieu à un autre et cela afin d'éviter une défaillance qui peut mener à une perte de performances de l'installation, et/ou empêcher une contamination par pollution ou par réaction chimique qui touche la sécurité de l'installation et peut induire un accident industriel.

I.3.2 Choix d'un système d'étanchéité mécanique

I.3.2.1 variables d'étanchéités et variables d'exploitation [4]

Généralement, il n'est pas facile de déterminer quel type d'étanchéité satisfera de manière économique le besoin de la mise en œuvre d'une étanchéité dynamique. Un examen attentif des variables d'exploitation doit être fait pour s'assurer que le type, le matériau et la conception de l'étanchéité répondent au besoin escompté. Les variables d'étanchéité, contrôlées par le concepteur, peuvent interagir avec les variables d'exploitation pour influencer les fuites de fluides (Table 1.1).

Tab 1.1: Interaction entre les variables de l'étanchéité et celles de son application[5]

Variables d'étanchéités	Effets provoquant une fuite statique ou dynamique	Variables d'exploitation
<ul style="list-style-type: none"> - Type - Matériau - Conception 	<ul style="list-style-type: none"> - Dilatation et contraction thermique - Dégradation du matériaux d'étanchéité - Corrosion - Fatigue - Vibrations - Usure - Défectuosité de l'arbre ou de l'alésage - Panne de lubrifiant - Cas de fuite - Désalignement 	<ul style="list-style-type: none"> - Statique ou dynamique - Propriétés du milieu à étancher - Mouvement et vitesse de l'arbre - Excentricité de l'arbre - Diamètre de l'arbre - Etat de finition de l'arbre - Matériau de l'arbre - Logement: <ul style="list-style-type: none"> - Etat de finition - Excentricité - Interférence de tolérance - Opération <ul style="list-style-type: none"> - Cycle (pression, température) - Temps d'exécution - Ambiance <ul style="list-style-type: none"> - Plage de température - Plage de pression - Poussière / Boue

I.3.2.2 Critères de choix d'une étanchéité

Les critères à prendre en compte pour sélectionner une étanchéité mécanique sont nombreuses et peuvent parfois être complexes, cependant elles peuvent être réparties en quatre catégories [5]: les conditions de service (vitesse, pression, température); le fluide à étancher (nature, dangerosité....); les normes ou exigences applicables et la facilité de montage ou d'intervention exigée. Le **tableau 1.2**, présente les critères de choix d'une étanchéité mécanique.

Tab 1.2: Critères de choix d'une étanchéité mécanique	
Critères relatifs aux pièces à étancher	- Nature du mouvement relatif entre les surfaces de contact des éléments à étancher
	- Vitesse du mouvement et importance des vitesses relatives
	- Formes des surfaces à étancher
	- Dimensions et tolérances
	- Etats de surfaces
	- Porosité des matériaux
	- formes complémentaires
	- Encombrement disponible.
	- Durée de vie souhaitée
	- Tolérance d'une fuite
	- Simplicité de la conception
	- Contrôle de l'étanchéité
	- Entretien, maintenance
- Aspect commercial	
Critères relatifs au fluide à confiner	- Nature du fluide à étancher: liquide, semi-liquide, solide, gazeux
	- Viscosité ;
	- Compatibilité chimique entre le joint et le fluide
Critères relatifs au milieu ambiant	- Température de dilatation ;
	- Différence des pressions
	- Impuretés en suspension dans ce milieu ambiant ;
	- Composition (attaque chimique possible du joint).

I.4 CLASSIFICATION DES ETANCHEITES

L'industrie d'une manière générale utilise un grand nombre de systèmes d'étanchéité dans divers secteurs tel que : l'industrie mécanique, automobile, navale, aéronautique et spatiale mais aussi dans l'énergétique industrielle dans les installations à base de turbopompes, turbocompresseurs et turboalternateurs. Sans oublier le secteur des industries pétrochimiques. Tous ces secteurs, utilisent des dispositifs d'étanchéité qui isolent les moyens technique les uns des autres là où les pressions, les températures ou les différents agents propulseurs sont contenus. Dans la pratique, il existe une grande variété d'étanchéités. Suivant la configuration du système à étancher on peut adopter la classification donnée sur le **tableau 1.3**.

Tab 1.3: Classification des dispositifs pour étanchéités mécaniques [2-5]

ETANCHEITE STATIQUE		ETANCHEITE DYNAMIQUE			
Directe	Indirecte	Pour mouvement de rotation		Pour mouvement de translation	
		Avec contact	Sans contact	Avec contact	Sans contact
<i>Plan / plan</i>	<i>Joints plats</i>	<i>Joints toriques</i>	<i>Rainure</i>	<i>Joints toriques</i>	<i>Rainure</i>
<i>Sphère / cône</i>	<i>Joints toriques</i>	<i>Joint quadrilobes</i>	<i>Douille</i>	<i>Joint quadrilobes</i>	<i>Douille</i>
<i>Cône / cylindre</i>	<i>Joint quadrilobes</i>	<i>Joints à lèvres</i>	<i>Labyrinthe</i>	<i>Segments</i>	
<i>Cône / Cône</i>	<i>Soufflet</i>	<i>Presse-étoupe</i>	<i>Turbine à vis</i>	<i>Presse-étoupe</i>	
	<i>Diaphragme</i>	<i>Garniture</i>			
	<i>Membrane</i>				

I.4.1 Étanchéité pour mouvement de rotation

Les étanchéités pour mouvements tournants se déclinent en deux grands groupes : étanchéité avec contact et étanchéité sans contact [3].

I.4.1.1 Etanchéité avec contact

L'étanchéité avec contact établit un contact direct entre la partie fixe à étancher (stator) et la partie tournante (Rotor). Les fuites du fluide à confiner sont minimales, mais en raison du contact solide–solide il se produit une perte d'énergie en raison du phénomène de frottement avec glissement et une perte de matière sur les deux parties en contact en raison du phénomène d'usure.

On distingue trois types d'étanchéités avec contact :

- *Presse-étoupe*
- *Joints à lèvres radiaux*
- *Garnitures mécaniques*

1° Le presse-étoupe

Un **presse-étoupe** est un système d'étanchéité qui existe depuis très longtemps. Il a été utilisé initialement dans les pompes et la robinetterie ainsi que dans la marine pour assurer l'étanchéité du passage des arbres de transmission au niveau de la coque. Son concept consistait à compresser dans un logement de forme tubulaire à l'aide d'une bague métallique une étoupe (sous-produit fibreux non tissé issu essentiellement du travail du chanvre ou du lin). Actuellement, l'étoupe est remplacée par l'une des solutions suivantes :

a. Cordon en tresse

Dans ce cas, l'étanchéité est assurée par une tresse de section carrée à enrouler, faite de matériaux tels que carbone-graphite, aramide-kevlar ou fibre de verre (**figure 1.5**).

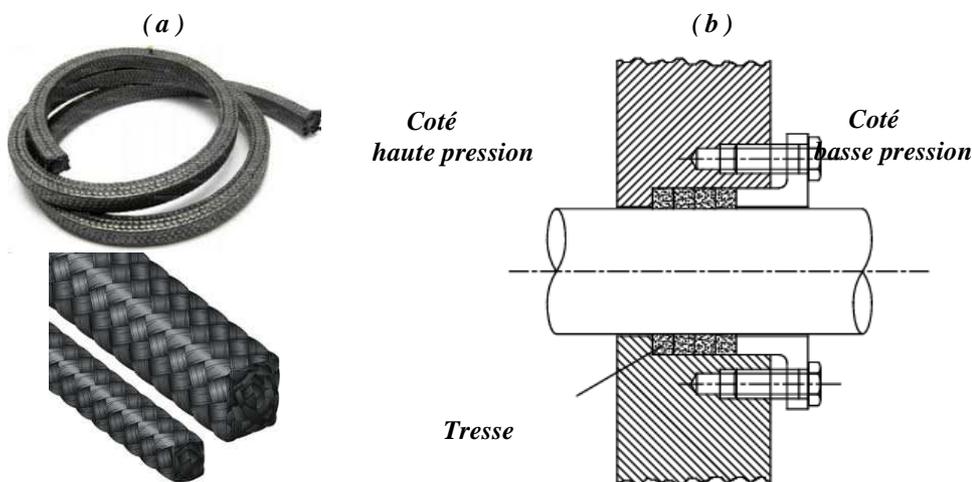


Fig 1.5: Etanchéité avec presse-étoupe en tresse : (a) Aspect extérieur d'une tresse, (b) Montage

b. Joint torique "V"

Dans ce cas, le dispositif d'étanchéité sera un ensemble de joint torique "V" en matière synthétique ou en caoutchouc, empilés les uns à côté des autres (**Figure 1.6**).

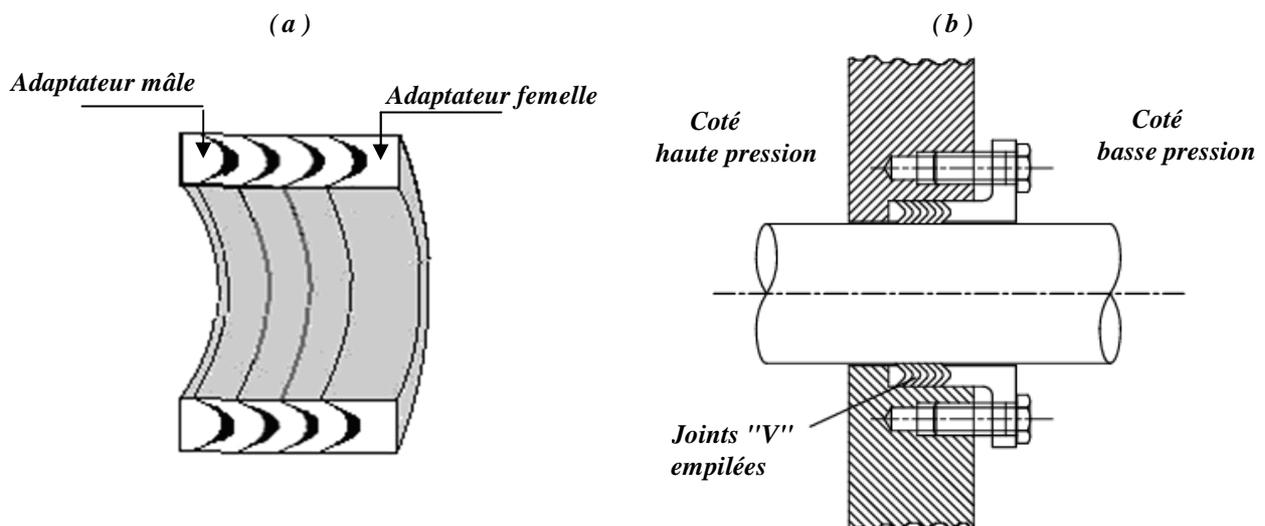


Fig 1.6: Etanchéité avec joint torique "V" : (a) Aspect extérieur, (b) Montage

2°. Étanchéité avec joint à lèvres

Les joints à lèvres sont principalement utilisés pour retenir le lubrifiant et exclure la contamination. Ils assurent soit une étanchéité dans un seul sens par contact sur l'arbre, soit une étanchéité dans un seul sens avec une protection dite « antipoussière » dans l'autre sens. Dans le cas de la lubrification à la graisse la lèvre est orientée vers l'extérieur du palier pour permettre le passage de la graisse usagée lors des renouvellements par pompe. Tandis que dans le cas de la lubrification à l'huile, la lèvre est orientée vers l'intérieur du palier afin assurer la retenue de l'huile, L'avantage de ce type d'étanchéité c'est son moindre coût, son encombrement minime et la simplicité de montage (Figure 1.7).

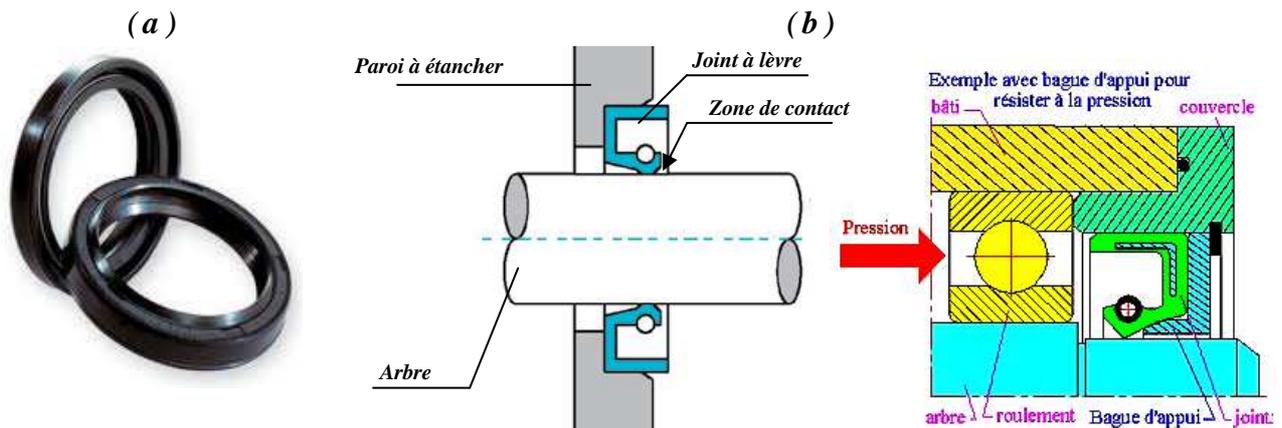


Fig 1.7: Étanchéité avec joint à lèvres: (a) aspect extérieur d'un joint à lèvres, (b) montage [7]

3°. Étanchéité avec garniture mécanique

Les garnitures mécaniques aussi appelées joint d'étanchéité à faces radiales sont des dispositifs mécaniques qui assurent la fonction étanchéité dynamique entre un arbre en rotation et une enceinte stationnaire fixe (Figure 1.8). Elles sont utilisées dans les environnements où les conditions d'exploitation sont extrêmement sévères qui ne permettent pas l'utilisation de joints classiques en élastomère. [1]. 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 [1]. A titre indicatif, on donne l'ordre de grandeur des principaux paramètres opérationnel nécessitant l'utilisation d'une garniture mécanique (Tableau 1.4)

Tab 1.4: ordre de grandeur des principaux paramètres d'une garniture mécanique

Pressions de service	> 15MPa ;
Températures	de -200 °C à plus de 400 °C
Fréquence de rotation	> 10000 tr min
Diamètres	> 500mm ;
Durée de vie	≈ 10 000 heures

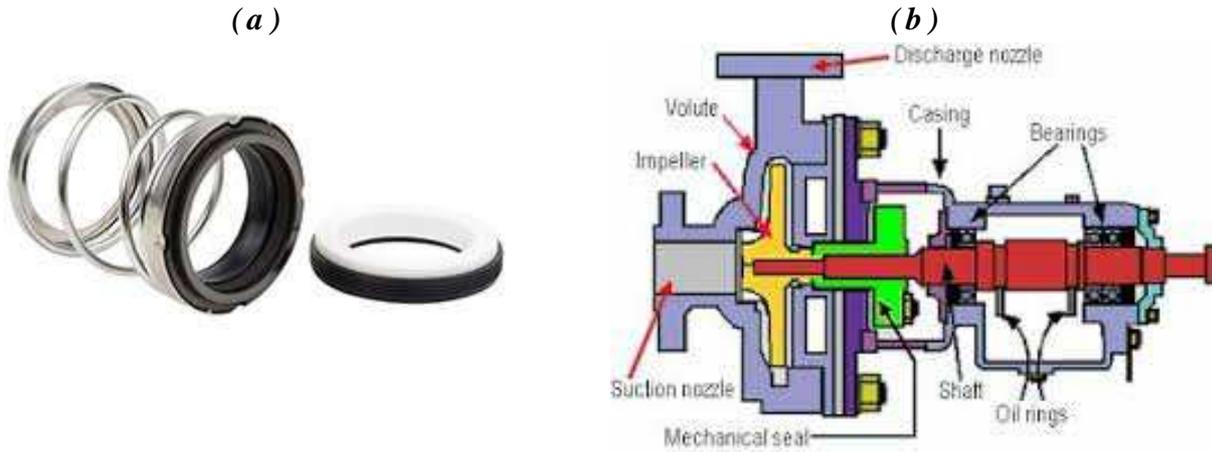


Fig 1.8: Étanchéité avec garniture mécanique: (a) aspect extérieur d'une garniture mécanique, (b) montage

I.4.1.2 Étanchéité sans contact

L'étanchéité sans contact établit un contact indirect entre la partie fixe à étancher (stator) et la partie tournante (Rotor). Ce type d'étanchéité est contrôlé par les jeux existants entre la partie fixe et la partie mobile. Comme il n'y a pas de contact solide/ solide avec le frottement, les fuites sont minimales mais inévitables, cependant le frottement et l'usure sont éliminés. Il existe cinq types d'étanchéités sans contact :

1°. Douille d'étanchéité

- L'étanchéité à douille fixe est un manchon monté avec ajustement serré dans la partie fixe et avec ajustement glissant avec jeu par rapport à la partie tournante (Figure 1.9).
- La partie externe est une bague en alliage d'aluminium dans laquelle est emmanché un coussinet d'étanchéité mince.

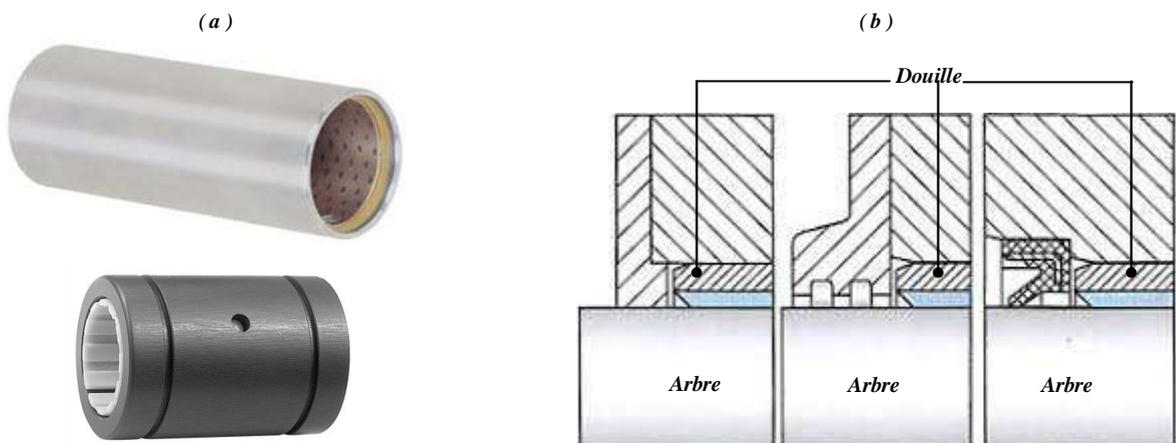


Fig 1.9: Douille d'étanchéité fixe: (a) Aspect extérieur, (b) montages

2°. Étanchéité en labyrinthe

Les étanchéités à labyrinthes sont utilisées principalement dans les applications à grandes vitesses là où de grandes vitesses de fuites peuvent être tolérées et où la simplicité d'une technologie est nécessaire. Dans ce cas, une étanchéité correctement conçue ne requière pas une lubrification ou une maintenance. Si une usure d'étanchéité se produit, la seule conséquence c'est une augmentation dans les pertes par fuites (Figure 1.10).

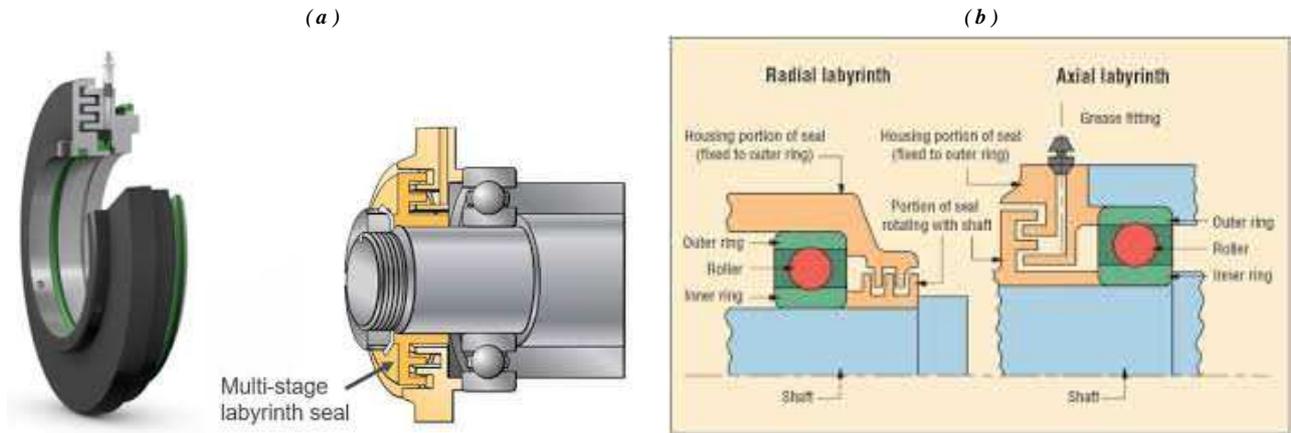


Fig 1.10: Étanchéité à labyrinthe (a) Aspect (b) Montage

3°. Visco-étanchéité [6]

Les visco-étanchéités sont des dispositifs qui possèdent des rainures ou des gorges hélicoïdales usinées soit sur le rotor (partie tournante) soit dans le stator (partie fixe). Le sens de l'hélice doit être contraire au sens de rotation du rotor afin de fournir une action positive qui empêche la fuite. L'effet de l'étanchéité est obtenu par la viscosité du fluide à étancher qui circule dans le jeu existant entre le rotor et le stator. Pour des vitesses de rotation faibles, une étanchéité secondaire tel que joint à lèvres doit être prévue (Figure 1.11).

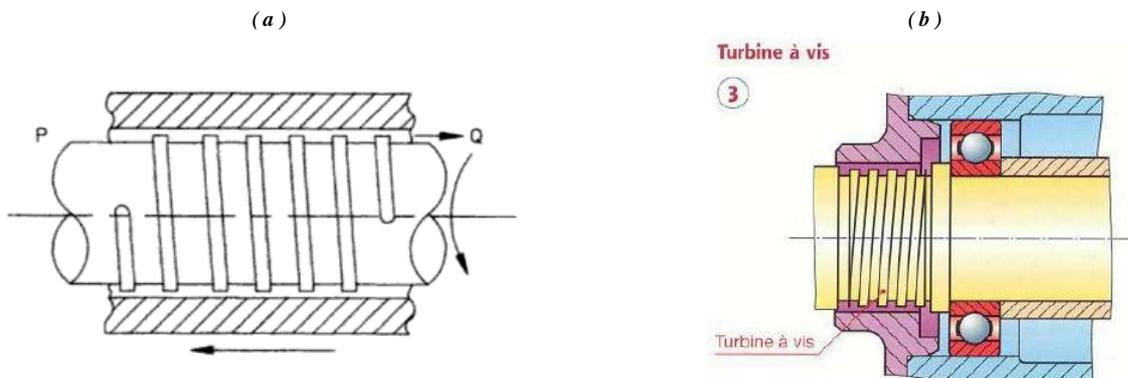


Fig 1.11: Visco-étanchéité (a) Principe, (b) Montage [2], [6]

4° Étanchéité à Ferrofluides [6]

Les joints magnétiques utilisent une suspension colloïdale de particules magnétiques, focalisée par des aimants permanents, pour créer un joint (**Figure 1.12**). En plus de fournir un joint presque parfait avec une usure ou un frottement négligeable, ils sont tolérants au voilage de l'arbre. Ils peuvent être utilisés à des vitesses allant jusqu'à 120 000 tr / min, à des températures allant jusqu'à 200 °C et à des pressions de 7 psi / étage. Les joints d'étanchéité sont principalement utilisés avec des gaz et excluent l'humidité, les brouillards et les solides fins.

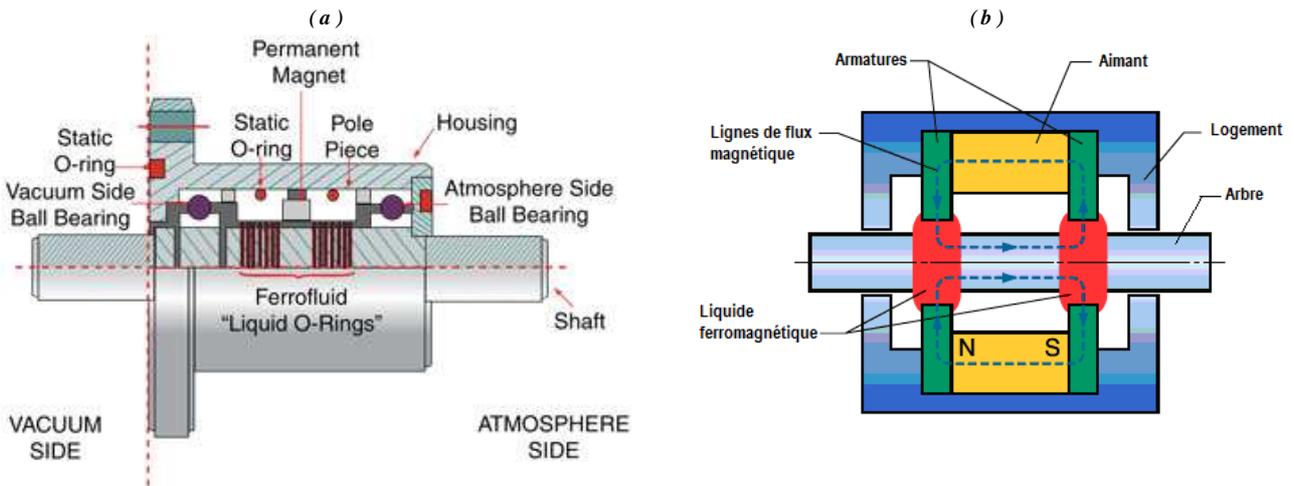


Fig 1.12: Étanchéité ferromagnétique (a) principe, (b) Montage [8]

1.4.2 Sélectivité d'une étanchéité mécanique dynamique

Certaines variables d'exploitation peuvent être contrôlées par le concepteur de l'équipement en concertation avec l'utilisateur final. Dans ce cas, il est essentiel pour le concepteur de l'étanchéité, le concepteur de l'équipement et l'utilisateur final d'œuvrer ensemble pour l'obtention de la meilleure solution à mettre en oeuvre. 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 1.13** présente un arbre de décision afin d'aider et de faciliter le choix judicieux d'une solution d'étanchéité à adopter [5].

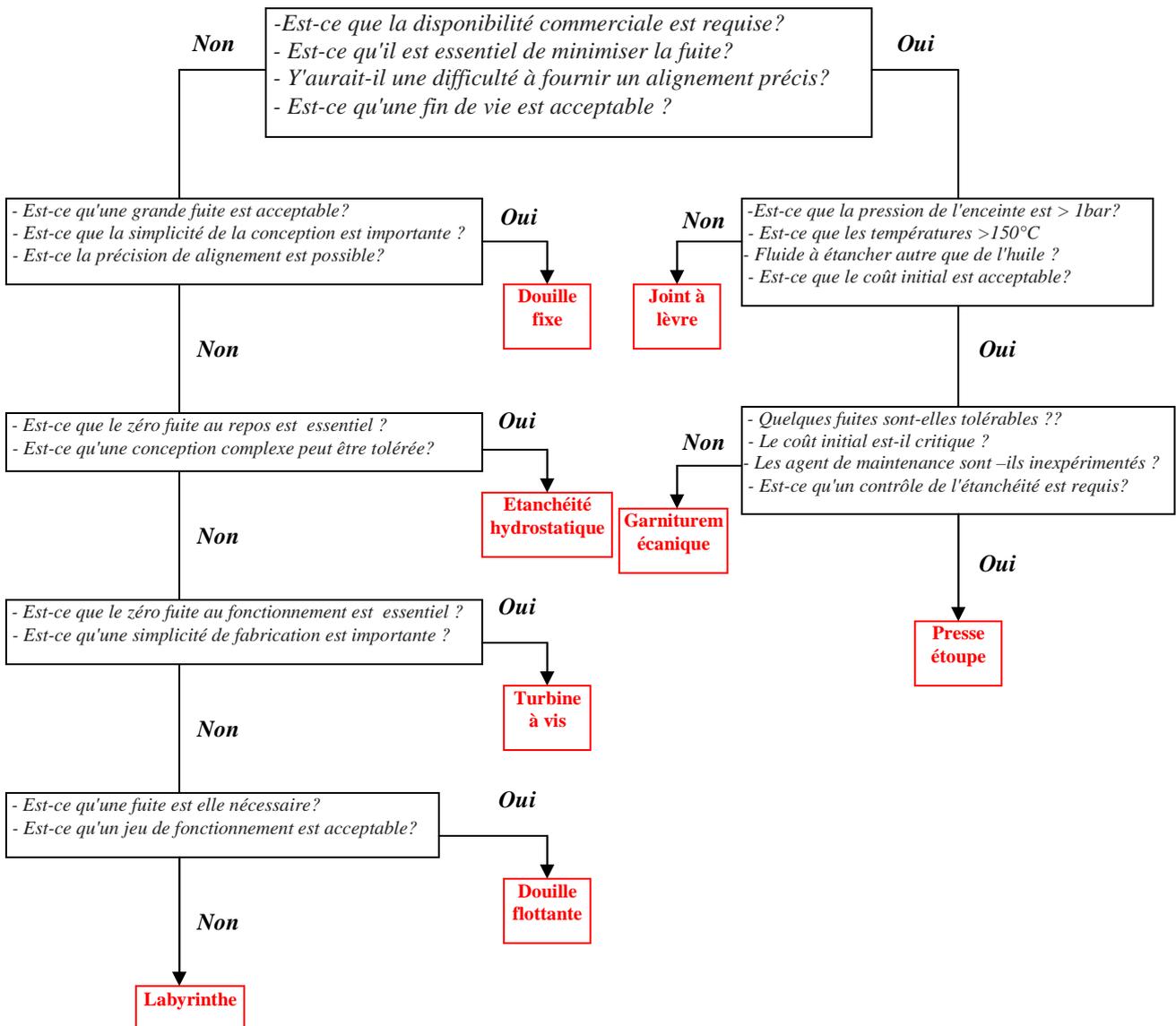


Fig 1.13: Arbre de décision pour la sélection d'un type d'étanchéité dynamique en rotation [5]

Chapitre II

ÉTANCHEITÉ PAR GARNITURE MÉCANIQUE

II.1 INTRODUCTION

La présence d'un fluide quelle que soit sa nature qui circule dans une enceinte, implique de recourir à une solution constructive d'étanchéité pour empêcher sa fuite vers l'extérieur. Une grande endurance de l'étanchéité est en effet recherchée, principalement pour des raisons d'ordre écologique, si le fluide revêt un caractère dangereux, et économique, afin de limiter les opérations de maintenance. A ce titre, les garnitures mécaniques d'étanchéité sont des composants robustes qui remplissent parfaitement ces obligations, et dont la compétitivité est évaluée en examinant deux paramètres principaux qui sont le débit de fuite et le frottement. Ainsi, pour des machines tournante telles que les pompes, compresseurs, agitateurs, turbines à gaz, centrifugeuses, clarificateurs, raffineurs, réacteurs, ...etc., la garniture mécanique est donc un organe essentiel.

De plus, les différentes études menées par tous les services de maintenance des industriels montrent que la solution constructive de garniture mécanique est globalement la plus optimale car présentant le meilleur compromis entre fiabilité et coût. Dans une logique économique de moindre coût, il est important d'espacer au maximum les opérations de maintenance sur les garnitures mécaniques qui nécessitent de stopper le processus industriel dans lequel elles interviennent. Cependant, dans le cas de produits dangereux ou toxiques, un défaut d'étanchéité peut avoir de graves conséquences pour le personnel et l'environnement. Il est donc essentiel de cerner les facteurs influant sur les performances et la durée de vie des joints d'étanchéité à faces radiales.

II.2 POMPE CENTRIFUGE

II.2.1 Définition [7]

Le terme pompe est d'origine italienne "pompa". Il désigne toutes machines hydrauliques qui servent à déplacer les liquides d'un milieu à basse pression vers un milieu à haute pression.

Une pompe centrifuge est une machine tournante qui aspire un liquide en le forçant à travers une roue à aube ou d'une hélice appelée impulseur et le refoule vers l'extérieur. Les pompes centrifuges sont le type de pompe le plus répandu en industrie.

II.2.2 Composants

La pompe centrifuge la plus simple est la pompe monocellulaire à roue en porte à faux comme représentée sur le schéma ci- dessous (**Figure II.1.**).

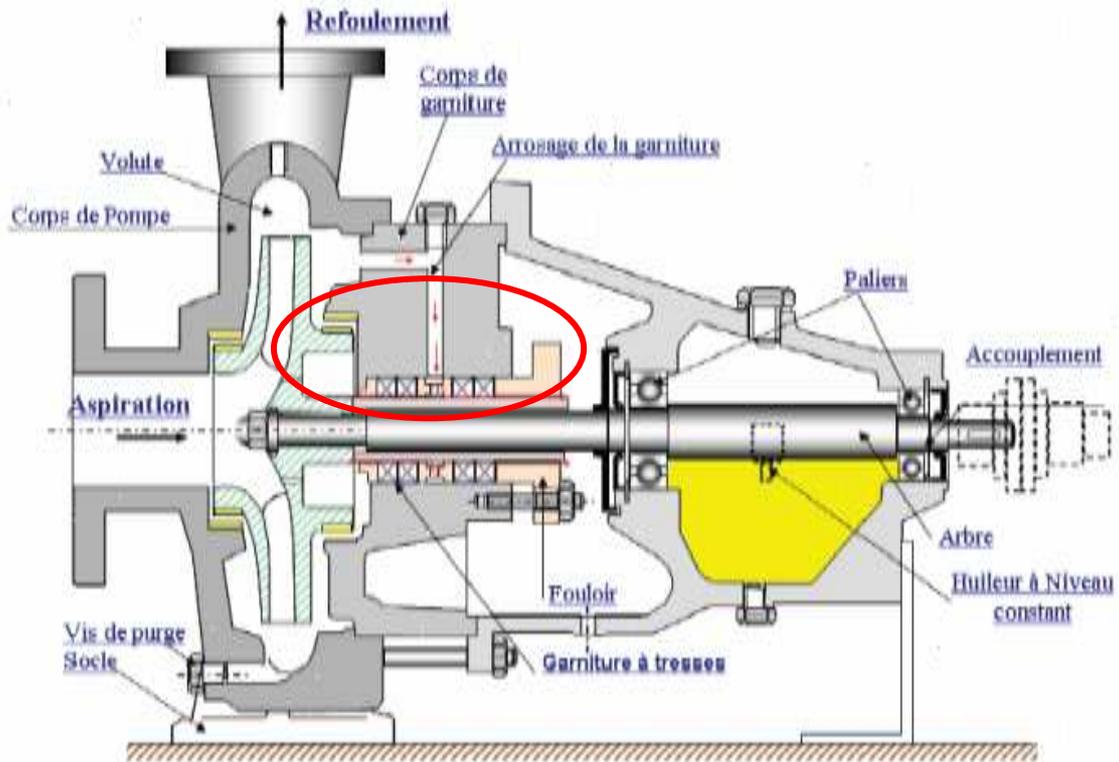


Fig II.1 - Pompe centrifuge monocellulaire[8]

Cette pompe est composée d'éléments fixes et d'éléments mobiles en mouvement de rotation.

1. le corps de pompe(ou stator) : il constitue le stator élément fixe constitué :

- *Conduits et brides d'aspiration*
- *Conduits et brides de refoulement,*
- *Volute et les pieds (ou pattes) de fixation sur le châssis.*

2. Les parties tournantes : elles constituent le rotor composé de

- le moyen d'accouplement avec le moteur d'entraînement
- l'arbre sur lequel sont montés les roulements,
- les pièces tournantes de la garniture.
- l'impulseur (ou roue),

3. le corps de garniture (ou plateau de garnitures) fermant l'arrière du corps de pompe, est traversé par l'arbre et reçoit le système d'étanchéité (tresses ou garniture mécanique).

4. **le corps de palier** dans lequel sont montés des roulements ou des paliers à coussinet et qui contient le système de lubrification. Le corps de palier possède souvent une béquille de soutien.

II.2.3 Fonctionnement

- Son fonctionnement consiste à produire une différence de pression entre la région d'aspiration et la région de refoulement au moyen de l'organe actif (impulseur.) de la pompe.
- Les pompes ont pour fonction d'accroître la pression d'un liquide et de générer un débit.

On peut décomposer le fonctionnement en trois étapes :

1. L'aspiration

- Le liquide est aspiré au centre du rotor par une ouverture appelée distributeur dont le rôle est de conduire le fluide depuis la conduite d'aspiration jusqu'à la section d'entrée du rotor.
- La pompe étant amorcée, c'est à dire pleine de liquide, la vitesse du fluide qui entre dans la roue augmente et par conséquent la pression dans l'ouïe diminue et engendre ainsi une aspiration et maintient l'amorçage.

2. L'accélération

- Le rotor transforme l'énergie mécanique appliquée à l'arbre de la machine en énergie cinétique.
- Du point de vue physique, la pompe transforme l'énergie mécanique en énergie hydraulique.
- Par l'effet de la rotation de l'impulseur, le fluide pompé est aspiré axialement dans la pompe, puis accéléré radialement, et enfin refoulé tangentiellement.

3. Refoulement

- A la sortie du rotor, le fluide se trouve projeté dans la volute dont le but est de collecter le fluide et de le ramener dans la section de sortie.
- La section offerte au liquide étant de plus en plus grande, son énergie cinétique se transforme en énergie de pression.

Leur fonction est d'assurer le débit de liquide souhaité par l'exploitant mais dans des conditions de pression imposées par les procédés et les applications, avec des contraintes particulières à l'installation, l'environnement, la fiabilité, la sûreté, etc.

II.2.4 Classification

Selon le nombre d'étages, on distingue :

- **Pompe monocellulaire** : avec un seul impulseur sur l'arbre.(figure II.1)
- **Pompe multicellulaire** : avec plusieurs impulseur sur l'arbre disposé en série.
(figure II.2)

II.2.4.1 Pompe centrifuge unicellulaires

- La pompe centrifuge simple, c'est-à-dire unicellulaires, ne peut engendrer de fortes pressions à une vitesse de rotation de 1750 tr/min, par exemple, la pression de refoulement peut atteindre un maximum d'environ 30min d'eau.
- On ne peut accroître démesurément le diamètre du rotor et sa vitesse à cause de la force d'inertie ou "centrifuge" qui risquerait de faire éclater le rotor.

II.2.4.2 Pompe centrifuge multicellulaires

Pour obtenir une plus grande hauteur de charge, on peut recourir à plusieurs solutions possibles :

- On peut faire usage de deux ou trois pompes en série, la conduite de refoulement de la première conduisant à l'entrée de la deuxième et ainsi de suite.
- On peut également utiliser une pompe munie de plusieurs rotors et stators en série agencés dans un même bâti. Un tel arrangement permet de réduire le diamètre des rotors sans abaisser la pression pouvant être engendrée et permet, par ailleurs, d'obtenir de plus fortes pressions en augmentant la vitesse de rotation.
- De telles machines sont dites pompes multicellulaires, chaque rotor, avec son stator, constituant une cellule.
- Ces pompes peuvent être à axe horizontal ou à axe vertical.

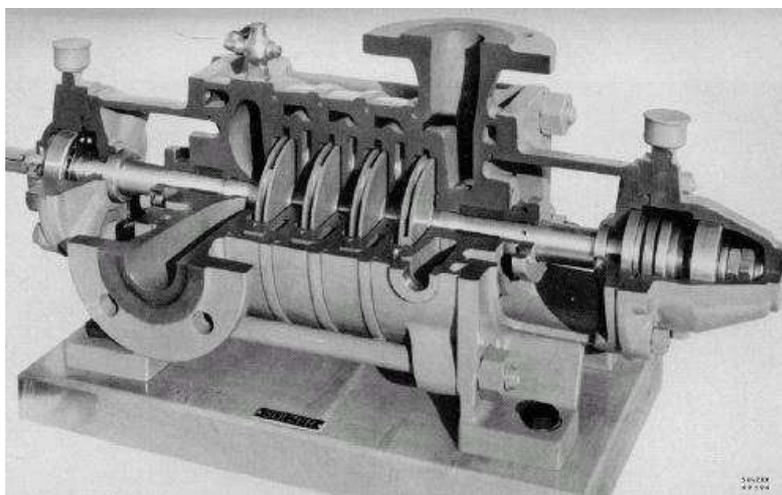


Fig II.2 : pompe centrifuge multicellulaires[8]

- Les principaux dispositifs accessoires sont les anneaux d'usure et d'étanchéité, le presse-garniture et les paliers.
- On trouve des anneaux d'usure et d'étanchéité remplaçables autour de l'arbre, à l'intérieur du corps de pompe ; ils ont pour fonction de subir l'usure due au mouvement du rotor et ainsi de protéger le corps de pompe.
- Ils assurent de plus l'étanchéité entre la zone d'aspiration et celle du refoulement.
- On trouve aussi une presse garniture, appelé aussi « boîte de garniture », là où l'arbre moteur pénètre dans le corps de pompe.
- Ce dispositif comporte un espace réduit dans le corps de pompe, autour de l'axe, destiné à contenir une garniture et un fouloir qui sert à refouler la garniture et à la maintenir en place.
- Dans certains cas, la garniture comporte un anneau lanterne permettant l'injection de liquide sous pression dont la fonction est de sceller la pompe et d'empêcher l'entrée d'air.
- Étant donné le frottement qu'occasionne la garniture, on prévoit en cet endroit la présence d'une douille ou manchon d'usure sur l'arbre. [9]

II.3 GARNITURE MECANIQUE

II.3.1 Fonction globale

Les garnitures mécaniques ou joint d'étanchéité à faces radiales sont utilisées pour assurer l'étanchéité d'arbres tournants lorsque les conditions de vitesse, de température et/ou de pression ne permettent pas l'utilisation de joints classiques en élastomère. Les critères économiques du monde industriel nécessitent des étanchéités dynamiques de plus en plus performantes et conduisent donc à une généralisation de l'emploi des garnitures mécaniques.

Les avancées technologiques permanentes permettent l'utilisation des joints d'étanchéité à faces radiales dans des conditions d'exploitation extrêmement sévères [10] :

- hautes pressions : plus de 15MPa ;
- hautes et basses températures : de 200 à plus de 400°C ;
- grandes vitesses : plus de 10000tr/ min ;
- grands diamètres : supérieur à 500mm ;
- Durée de vie : plusieurs dizaines de milliers d'heures.

Les garnitures mécaniques sont présentes dans tous les secteurs d'activités : chimie, industrie pétrolière et de transformation, agro-alimentaire, papeterie, transport, nucléaire... Elles sont donc amenées à assurer l'étanchéité de divers fluides liquides, pâteux ou gazeux et éventuellement

chargés de particules solides sur de nombreuses machines telles que pompes (figure II.3), compresseurs, agitateurs, turbines à gaz.

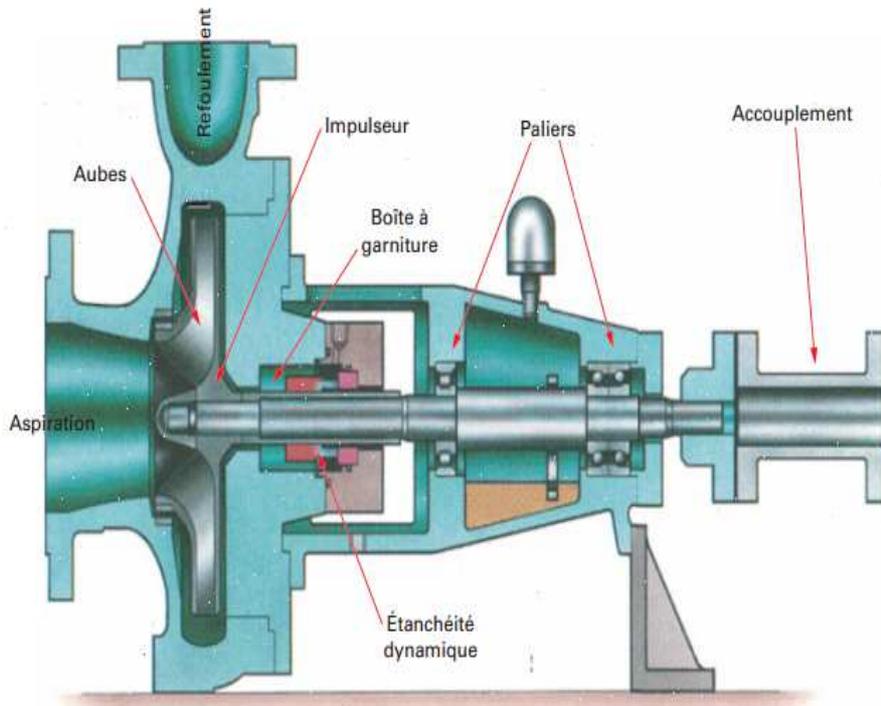


Fig II.3 – Garniture mécanique dans une pompe centrifuge monocellulaire [10]

II.3.2 Constitution et principe de fonctionnement

II.3.2.1 Constitution

L'étanchéité principale d'une garniture mécanique est une étanchéité faciale réalisée entre deux bagues en contact, l'une étant en rotation solidaire de l'arbre, l'autre étant fixe et solidaire du bâti de l'appareil. Une garniture mécanique est donc composée de deux sous-ensembles (figure II.4) : l'un statique et l'autre tournant.

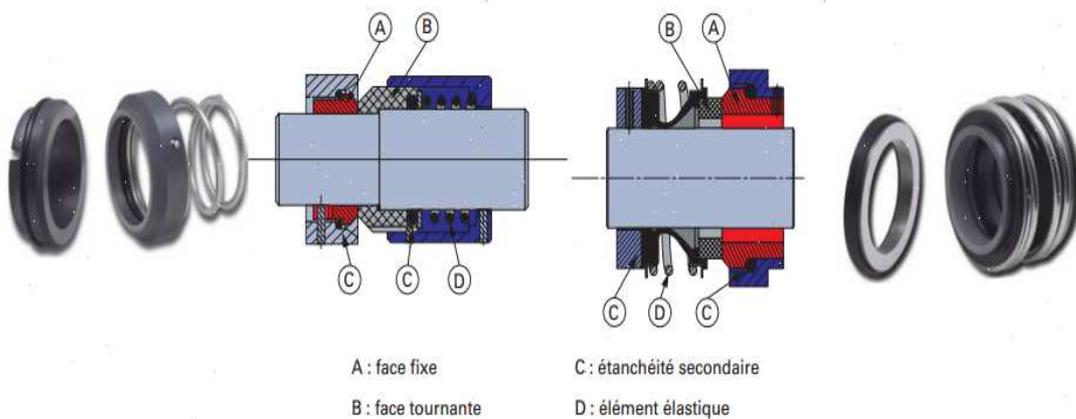


Figure II.4 - Deux exemples des garnitures mécaniques [10]

Les éléments principaux sont :

- les **faces de frottement** qui assurent l'étanchéité principale ;
- les **étanchéités secondaires** (joints, soufflet métallique, membrane synthétique) qui assurent la liaison étanche entre les faces et leurs supports (arbre et boîtier de garniture) ;
- un **élément élastique** (ressort(s), soufflet métallique, membrane synthétique), dans l'un des sous-ensembles qui assure à la fois une pression de contact entre les faces et l'étanchéité de l'ensemble à l'arrêt ;
- des **éléments de liaison** des deux sous-ensembles à la machine (chemise, couvercle, vis, support, etc.).

II.3.2.2 Principe de fonctionnement

Une garniture mécanique se compose principalement d'un ensemble tournant ou rotor lié à l'arbre et d'un ensemble fixe ou stator lié au carter de la machine. Dans l'exemple présenté sur la (figure II.5), le rotor est fixé de façon rigide à l'arbre. Les étanchéités secondaires, réalisées par des joints toriques, et les ressorts confèrent au stator les degrés de liberté nécessaires à un alignement parfait avec l'élément tournant. Le joint est dit "stator flottant". Réciproquement, il existe des joints à "rotor flottant", mais nous nous limitons volontairement à l'étude du premier type de garniture.

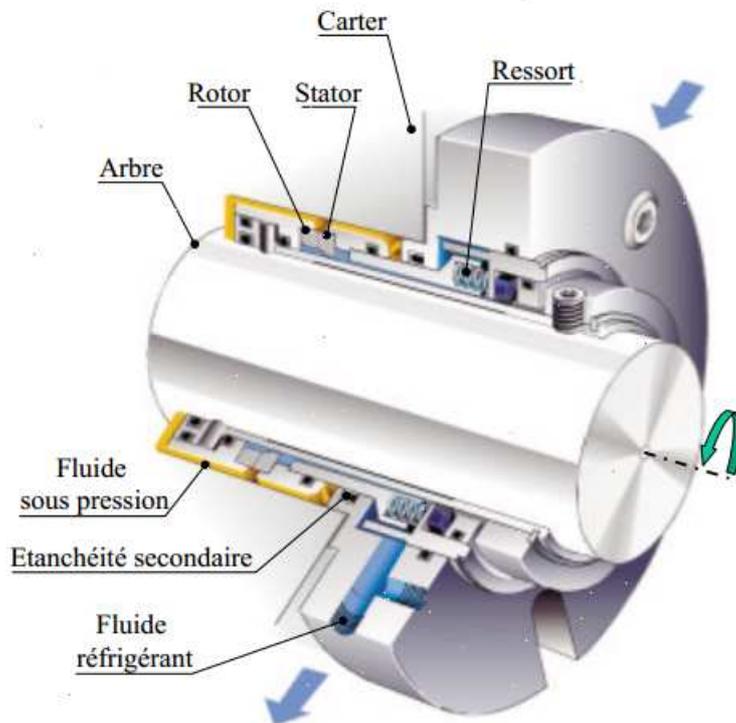


Fig II.5- Constitution d'une garniture mécanique (Safeseal SBW John Crane)

Les faces de frottement du rotor et du stator constituent la barrière entre les deux milieux. Celles-ci sont maintenues en contact par l'effort exercé par les ressorts et par le fluide sous pression. Les étanchéités statiques entre les autres éléments de la garniture sont assurés par des joints toriques comme sur l'exemple de la (figure II.5). Sur certains modèles de joint un soufflet métallique ou en élastomère remplace les ressorts et joue le rôle d'étanchéité secondaire. Une étanchéité efficace implique un débit de fuite nul. Néanmoins, lorsque les critères de fiabilité sont prépondérants, les deux bagues constituant la garniture doivent être séparées par un film fluide très mince (de l'ordre de quelques μm) afin d'éviter l'usure des faces de la garniture tout en limitant la fuite à une valeur acceptable.

Le film fluide est fortement cisailé en raison du mouvement relatif des anneaux et de la différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur du joint. La puissance dissipée par frottement visqueux génère une élévation de température au sein du film et des éléments contigus. Les conditions de lubrification de l'interface du joint se trouvent alors modifiées en raison de l'évolution de la viscosité du fluide avec la température, des déformations thermo-élastiques des éléments du joint qui peuvent être du même ordre que l'épaisseur du film et de l'apparition, dans certains cas, de changement de phase. Une telle évolution peut aboutir à un comportement instable du joint qui se caractérise par une fuite importante ou bien par le contact des faces entraînant une détérioration rapide. Toutefois l'injection d'un fluide réfrigérant permet, dans certains cas, d'éviter ces situations critiques (figure II.5). En revanche, les effets thermiques peuvent être utilisés pour améliorer les performances du joint (fuite réduite, meilleur comportement dynamique...).[11]

II.3.3 Technologie

Selon la nature du fluide présent à l'interface, on distingue deux familles différentes, qui sont :

1. Garniture mécanique avec contact :
 - Garniture mécanique lubrifiée par un liquide ;
 - Garniture mécanique non lubrifiée dite « sèche » ;
2. Garniture mécanique sans contact :
 - La garniture mécanique lubrifiée par gaz.

II.3.3.1 Garnitures mécaniques d'étanchéité pour liquides

Le point crucial dans le fonctionnement de ces garnitures mécaniques est la capacité à former « automatiquement » un film lubrifiant entre les deux faces, qui influera directement sur le niveau de fuite, le frottement et la puissance dissipée ainsi que sur la durée de vie de la garniture. Le film interfacial d'épaisseur typiquement comprise entre 1 et 10 μm , est entretenu par la rotation et provient du fluide à étancher 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 cisaillement du film lubrifiant produit de la chaleur transférée aux faces de frottement, au fluide et aux pièces mécaniques environnantes.

Selon les conditions de fonctionnement, le film peut être complet ou partiel. Dans ce dernier cas, des contacts ponctuels peuvent avoir lieu au niveau des aspérités des faces. On parle alors de lubrification mixte. Le bon fonctionnement des garnitures mécaniques repose donc sur un compromis entre une bonne lubrification des faces, qui augmente la consommation, et une bonne étanchéité qui augmente le frottement des faces et les températures de contact. Pour assurer une durée de vie optimale des faces de la garniture, le film doit être stable et rester en phase liquide. Pour éviter sa vaporisation, le fluide à étancher doit avoir une pression suffisante au droit de la garniture.



Fig II.6- Garniture mécanique simple à cartouche pour les liquides [12]

II.3.3.2 Garnitures mécaniques d'étanchéité sèches

Contrairement aux garnitures mécaniques avec contact lubrifié par un liquide, les garnitures sèches fonctionnent avec un régime de frottement sec. Les faces sont en contact direct. Il en résulte une usure et un échauffement plus importants. De ce fait, les applications (exemple : agitation...) sont limitées à des vitesses de rotation modérées (quelques centaines de tours par minute) et des pressions faibles (du vide à quelques bars). Pour minimiser ces phénomènes, des matériaux particuliers sont utilisés afin de combiner leurs propriétés tribologiques (frottement), leur résistance mécanique et leur résistance chimique. Généralement, on utilise des faces carbonées contre des faces carbure de silicium ou céramique (alumine).



Fig II.7-Garniture mécanique à cartouche pour compresseur [12]

II.3.3.3 Garnitures mécaniques d'étanchéité pour gaz

Le principe de base consiste à assurer l'étanchéité entre deux faces en mouvement relatif (rotation) par un film gazeux. Ce film, entretenu par la rotation, provient du fluide véhiculé par la machine ou d'un fluide auxiliaire. Une partie du film s'écoule hors des faces actives (consommation de la garniture). Le fonctionnement sur un film gazeux génère un échauffement négligeable. Pour assurer une durée de vie optimale des faces de la garniture mécanique, le film doit être stable. De ce fait, les garnitures sont dites sans contact. 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 (figure II.8).

Ces formes sont généralement obtenues par gravure laser.

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.



Fig II.8 – Différents types de rainures [10]

II.3.4 Critères de choix

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

II.3.5 Modes de défaillances

II.3.5.1 Principales causes de défaillance d'une garniture mécanique

La défaillance d'une garniture mécanique peut avoir des causes diverses. Le plus souvent, la fuite se produit à travers l'interface d'étanchéité formée par les deux faces de frottement. Il est également nécessaire d'effectuer un diagnostic sur les autres composants de la garniture, afin d'expliquer les causes d'une défaillance (joints de chemise, de couvercle, coulissants, pièce d'entraînement , état des surfaces en contact). **Le tableau II.1** présente de façon synthétique les principales causes de défaillance à partir des principaux symptômes observés : fuite et durée de vie limitée. Ce tableau expose les causes possibles et préconise quelques remèdes de base pouvant être suffisants.

Tableau II.1 – Principales causes de défaillance

Anomalie	Causes possibles	Remèdes
La garniture fuita démarrage	<ul style="list-style-type: none"> • Éclats ou rayures sur le joint secondaire provenant du montage • Taux de serrage du joint secondaire 	<ul style="list-style-type: none"> • Remplacer le joint secondaire • Vérifier avec le fabricant, que les joints sont appropriés • Vérifier que les chanfreins sont corrects
La garniture grinceencours de fonctionnement	<ul style="list-style-type: none"> • Liquide de la garniture vaporisant au niveau des faces de frottement • Quantité insuffisante de liquide pour lubrifier les faces de la garniture 	<ul style="list-style-type: none"> • Augmenter le refroidissement au niveau des faces de la garniture • Vérifier, auprès du fabricant, que l'équilibre de la garniture est correct • Nécessité de pratiquer un <i>flushing</i> si celui-ci n'est pas en service • Élargir le diamètre de la tuyauterie du <i>flushing</i> et celui des orifices du chapeau • Vérifier le refroidissement au niveau de la face de la garniture avec le fabricant
La garniture fuit en permanence	<ul style="list-style-type: none"> • Les faces ne sont pas planes • Les faces de la garniture en carbone/graphite présentent des boursouflures (<i>blistering</i>) • Déformation thermique des faces de la garniture 	<ul style="list-style-type: none"> • Vérifier que les cotes de montage sont correctes • Vérifier que les matériaux ou la garniture mécanique utilisée sont conformes à son application • Vérifier la déformation du chapeau, due au serrage des boulons • Vérifier la perpendicularité du nez de boîte à garniture avec l'arbre • Procéder à un alignement correct de toute la ligne d'arbre pour éviter les vibrations d'arbre ou les distorsions • Vérifier l'étanchéité du joint du chapeau (serrage suffisant) • Enlever les particules étrangères qui auraient pu se déposer entre les faces de la garniture • Roder à nouveau les faces, si nécessaire • Vérifier qu'il n'y ait ni fêlures, ni éclats au niveau des faces de la garniture, au cours du montage. Remplacer les faces, si nécessaire • Améliorer le refroidissement par <i>flushing</i>
Courte durée de vie de la garniture	<ul style="list-style-type: none"> • Fluides abrasifs 	<ul style="list-style-type: none"> • Éviter le dépôt de particules abrasives sur les faces de la garniture • Nécessité de pratiquer un <i>flushing</i> si celui-ci n'est pas en service • Utiliser un séparateur ou un filtre
	<ul style="list-style-type: none"> • Garniture fonctionnant à une température élevée par rapport à la température du fluide à étancher 	<ul style="list-style-type: none"> • Augmenter le refroidissement des faces de la garniture • Augmenter le débit de <i>flushing</i> • Vérifier qu'aucune obstruction n'entrave les circuits de refroidissement
	<ul style="list-style-type: none"> • Machine décentrée 	<ul style="list-style-type: none"> • Aligner la machine • Vérifier le frottement de la garniture sur l'arbre
	<ul style="list-style-type: none"> • Défaillance du ressort • Déterioration du matériel due à l'érosion • Corrosion des mécanismes d'entraînement • Défaillance des joints toriques, due au vieillissement • Attaque chimique 	<ul style="list-style-type: none"> • Remplacer les pièces défailtantes • Consulter le fabricant de garnitures pour d'autres matériaux

Chapitre III

ARBRE DE DEFAILLANCES D'UNE GARNITURE MÉCANIQUE

III.1 INTRODUCTION

Le diagnostic des défaillances des systèmes industriels permet de détecter, identifier et localiser un mode de fonctionnement anormal (ou dysfonctionnement). Ce qui permettra d'introduire une solution susceptible de revenir à un mode de fonctionnement plus adapté à la mission pour laquelle ce système a été conçu. Il est donc un élément essentiel d'un système de production ou d'un système conçu pour être utilisé par un tiers. Lorsqu'il s'agit d'étudier les défaillances d'un système, l'arbre de défaillance s'appuie sur une analyse dysfonctionnelle d'un système à réaliser préalablement : une analyse des modes de défaillances et de leurs effets (AMDE). Cette méthode inductive allant des causes aux effets apparaît donc comme préalable à la construction d'un arbre de défaillance puisque l'identification des composants et de leurs modes de défaillance est généralement utilisée au dernier niveau d'un arbre.

III.2 ARBRE DE DEFAILLANCE

III.2.1 Définition

L'arbre de défaillance (ADD) est une méthode déductive, qui fournit une démarche systématique pour identifier les causes d'un événement unique intitulé « événement redouté : ER ». Il consiste en une représentation graphique des combinaisons possibles d'événements qui permettent la réalisation d'un événement indésirable prédéfini en mettant en évidence les relations de causes à effets. Il est complété par un traitement mathématique qui permet la combinaison de défaillances simples ainsi que de leur probabilité d'apparition et de quantifier la probabilité d'occurrence d'un événement indésirable. Il est nécessaire que les événements soient indépendants entre eux. Leurs probabilité d'occurrence doit pouvoir être quantifiée (condition nécessaire seulement dans le cas où l'arbre est destiné à une analyse quantitative). [13]

Contrairement à l'approche inductive de l'AMDEC (analyse des modes de défaillance, de leurs effets et de leur criticité) qui ne cible pas les conséquences des défaillances élémentaires, l'approche déductive de l'arbre de défaillance permet de focaliser exclusivement sur les défaillances contribuant à l'évènement redouté.

III.2.2 Rôle des arbres de défaillances

Les arbres de défaillances sont utilisés dans l'ingénierie de sûreté des industries « à risque » et peuvent être utilisés comme un outil d'évaluation de la conception, ils permettent d'identifier les scénarios conduisant à des accidents dans les phases amont du cycle de vie d'un système et peuvent éviter des changements de conception autant plus coûteux qu'ils sont tardifs. Ils peuvent aussi être utilisés comme un outil de diagnostic, prévoyant la ou les défaillances des composants la ou les plus probables lors de la défaillance d'un système.

III.2.3 Représentation graphique

La représentation graphique de l'arbre de défaillance se fait à travers une symbolisation graphique classée en deux types [14]

- Evènements ;
- Portes logiques

1° Evènements

La symbolisation des évènements a pour but de faciliter la désignation entre les différents types d'évènements. (Tableau 3.1)

Tab 3.1 : Symboles des évènements dans les arbres de défaillances

Symbole	Nom	Description
	Evènement Intermédiaire ou final	Evènement du plus haut niveau: sommet d'arbre « évènement redouté », ou évènement intermédiaire résultant d'un évènement redouté.
	Evènement de base	Evènement du plus bas niveau pour lequel la probabilité d'apparition ou d'information est disponible.
	Evènement non développé	Le développement de cet évènement n'est pas terminé, soit parce que ses conséquences sont négligeables, soit par manque d'information.
	Evènement maison	Evènement qui doit se produire avec certitude lors de la production ou de la maintenance. On peut aussi le définir comme un évènement non- probabilisé ou (P=1).

2° Portes logiques

Les portes logiques (ou connecteurs logiques) sont les liaisons entre les différents branches et/ou évènements. Les plus classiques sont ET et OU (Tableau 3.2). Les portes fonctionnent comme suit :

- OU : l'évènement en sortie/supérieur survient si, au moins, un des évènements en entrée/inférieur survient/est présent ;
- ET : l'évènement en sortie/supérieur survient seulement si tous les évènements en entrée/inférieur surviennent/sont présents

Tab 3.2 : Symboles des portes dans les arbres de défaillances

Symbole	Nom	Description	Nombre d'entrées
	OU (OR)	L'évènement de sortie apparait si au moins un des évènements d'entrées apparait	>1
	ET (AND)	L'évènement de sortie apparait si tous les évènements apparaissent	>1
	SI (IF)	Sortie générée si l'évènement entrée est présent et si la condition X est réalisée	=1

III.2.4 Construction d'un arbre de défaillances

III.2.4.1 Principe[13].

Le principe de la construction d'un arbre de défaillance est fondé sur les points suivants :

- Le point de départ de la construction de l'arbre c'est l'évènement redouté lui-même. Ce dernier étant le niveau le plus haut ne comporte que l'évènement dont on cherche à décrire les sous évènements déclencheurs de sa survenance. Il est essentiel qu'il soit unique et bien identifier.
- Un arbre de défaillance étant construit généralement de haut en bas, il est divisé en niveaux successifs d'évènements tels que chacun est une conséquence d'un ou plusieurs évènements du niveau inférieur et qui s'articulent par l'intermédiaire des portes logiques. Pour chaque évènement d'un niveau donné, le but est d'identifier l'ensemble des évènements immédiats nécessaires et suffisants à sa réalisation.
- Les relations entre les niveaux sont représentées par des liens logiques, dont la plupart sont des « portes OU » et des « portes ET ». Ces portes logiques permettent de définir précisément les liens entre les évènements des différents niveaux. Remonter d'effets en causes de l'évènement redouté à des évènements élémentaires probables et indépendants entre eux en adoptant une logique déductive et booléenne (allant des effets vers les causes). Chaque ligne détaille la ligne supérieure en présentant les combinaisons susceptibles de produire l'évènement de la ligne supérieure auquel elles sont rattachées.
- Le processus déductif est poursuivi niveau par niveau jusqu'à ce que les spécialistes concernés ne jugent pas nécessaire de décomposer des évènements en combinaison d'évènements de niveaux inférieurs, notamment parce qu'ils disposent d'une valeur de probabilité d'occurrence de l'évènement analysé. Ces évènements non décomposés de l'arbre sont appelés évènements élémentaires (ou évènements de bases).

En résumé, les règles importantes de la construction de l'arbre de défaillance sont :

- 1. Partir de l'évènement redouté (sommet de l'arbre),
- 2. Imaginer les évènements intermédiaires possibles expliquant l'évènement sommet,
- 3. Considérer chaque évènement intermédiaire comme un nouvel évènement sommet,
- 4. Imaginer les causes possibles de chaque évènement au niveau considéré,
- 5. Descendre progressivement dans l'arbre jusqu'aux évènements de base.

III.2.4.2 Etapes de construction

Etape 01 : Evènement sommet (évènement indésirable)

- Cette étape réside dans la définition de l'évènement à étudier d'une façon explicite et précise, cet évènement est appelé sommet, ou encore évènement redouté.
- Elle est cruciale quant à la valeur des conclusions qui seront tirées de l'analyse.
- L'arbre de défaillance se veut être une représentation synthétique ; le libellé de l'évènement devra être bref, mais aussi évocateur que possible dans la boîte qui le représente dans l'arbre, on lui associant un texte complémentaire apportant toutes les précisions utiles sur la définition de l'évènement.
- Cette remarque est aussi valable pour tous les éléments qui vont figurer dans l'arbre.

Etape 02 : Evènement intermédiaires

- L'évènement sommet étant défini, il convient de décrire la combinaison d'évènements pouvant conduire à cet évènement sommet.
- Les évènements intermédiaires sont des évènements moins globaux.
- Une fois un évènement définis, ils seront liés à l'évènement sommet via un connecteur.
- Ces évènements intermédiaires peuvent être, à leur tour, redéfinis par d'autres évènements intermédiaires plus détaillés.

Etape 03 : Evènements de base, transfert et conditions

- Il est possible de prendre en compte des évènements sur lesquels les informations sont insuffisantes pour les décomposer davantage ou encore qu'il n'est pas utile de développer plus, ces évènements sont appelés évènements non développés.
- Lors de la construction de gros arbres de défaillances, il est pratique d'utiliser des portes de transfert, permettant ainsi de rendre la lecture et la validation de l'arbre plus aisée.
- Ces portes signalent que la suite de l'arbre est développée sur une autre page.
- Les évènements de bases sont les évènements les plus fins de l'arbre, il ne sera pas possible de les détailler davantage ; ils concernent la défaillance (électrique, mécanique, logiciel...) d'un élément du système.

La construction de l'arbre de défaillance est une phase importante de la méthode car sa complétude conditionne celle de l'analyse qualitative ou quantitative qui sera réalisée par la suite. Cette construction est détaillée dans plusieurs normes industrielles dont la norme **CEI 61025**.

Dans l'objectif de donner une vue claire et structurée des évènements et des enchainements, l'arbre de défaillance étant construit, deux types d'exploitation qualitative peuvent être réalisés [13]:

- Identification des scénarios critiques susceptibles de conduire à l'évènement redouté.
- Analyse des différentes combinaisons de défaillances menant à l'évènement sommet.

III.2.5 Avantages et Inconvénients

En tant que méthode déductive, l'arbre des défaillances possède des avantages qui le mettent dans une position favorable à son utilisation. Cependant, d'autre part étant assujetti à un certain nombre de contraintes il possède aussi des inconvénients [14].

1° Avantages

- ADD combine des d'évènements qualitatifs et une méthode mathématique rigoureuse basée sur des calculs de probabilités. L'analyse donne des résultats quantitatifs précis et fiables.
- Fait apparaitre les conditions les plus critiques et donne instantanément le résultat d'une amélioration en terme de réduction du risque.
- Peut prendre en compte les probabilités de défaillance humaine (à travers les fonctions ET, Si)
- Donne une vue claire et structurée des évènements et des enchainements

2° Inconvénients

- Un peu complexe et consommatrice de temps
- Deux groupes de travail différents peuvent construire des analyses différentes...
- Résultat à utiliser avec précaution en analysant les hypothèses utilisées.
- Incertitude sur certaines probabilités d'occurrence d'évènements élémentaires

III.3 APPLICATION

III.3.1 Identification de l'évènement redouté

L'identification de l'évènement redouté est absolument essentielle à l'efficacité et à la pertinence de la méthode. Il correspond le plus souvent à un évènement indésirable en termes industriels environnemental ou économique. Il peut s'avérer nécessaire parfois de caractériser l'évènement redouté pour chacune des missions du système étudié.

Dans notre cas, d'après l'inventaire des modes de défaillance d'une garniture mécanique on a recensé quatre évènements redoutés et qui sont :

- **ER₁ : Fuite de la garniture mécanique au démarrage**
- **ER₂ : Grincement de la garniture en cours de fonctionnement**
- **ER₃ : Fuite continue de la garniture**
- **ER₄ : Courte durée de vie de la garniture**

Chaque évènement redouté nécessite la construction d'un arbre de défaillance qui développera ses évènements indésirables prédéfinis en mettant en évidence les relations de causes à effets. Dans ce qui suit, on s'intéressera à ER₁.

Les différents évènements recensés pour l'évènement redouté "Fuite de la garniture mécanique au démarrage", sont regroupés dans le **Tableau 3.3**.

Tab 3.3 Liste des évènements probables	
Evènements redouté	Evènement probable
Fuite de la garniture mécanique au démarrage	<i>Extrusion des joints secondaires</i>
	<i>Rayures sur les joints secondaires</i>
	<i>Taux de serrage insuffisant</i>
	<i>Mauvais montage</i>
	<i>Déformation rémanente</i>
	<i>Abrasion</i>
	<i>Erosion</i>

III.3.2 Construction de l'arbre de défaillance

Afin d'identifier tous les évènements possibles et probables générateurs de l'évènement redouté ER_1 , nous avons adopté une démarche déductive (**Figure III.1**). Chaque évènement de rang $(n-1)$ est déduit d'une manière logique de l'évènement n jusqu'à la fin de l'opération et au dernier évènement dit « évènement de base ».

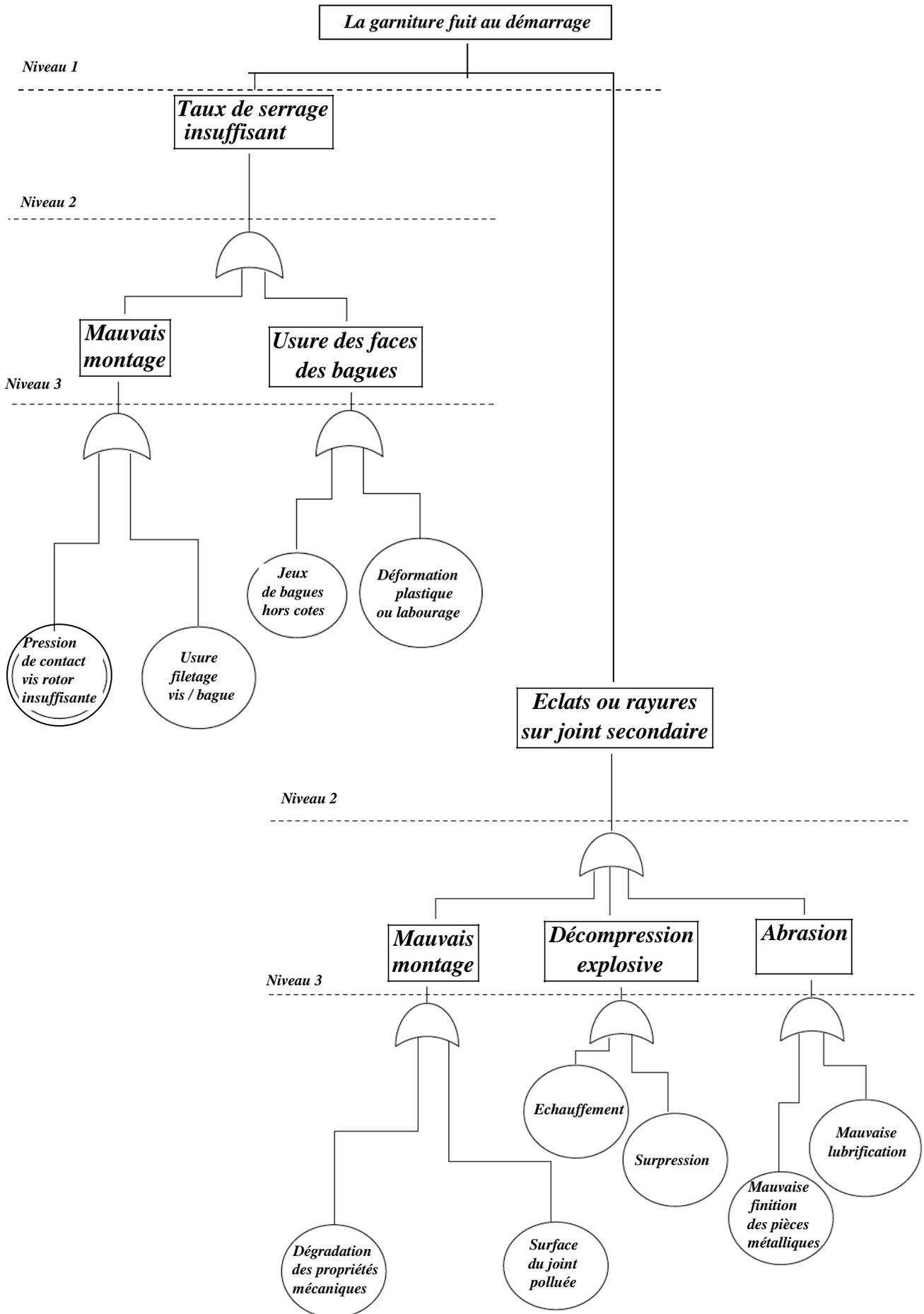


Fig III.1: Arbre de défaillance pour garniture mécanique

III.4 CONCLUSION

Pour assurer la fonction maintenance, il faut :

- Savoir analyser les défaillances rencontrées, c'est-à-dire avoir un retour d'expérience complet et fidèle permettant de trouver la cause première de la défaillance.
- Être capable de juger si la défaillance est due à la fiabilité intrinsèque d'un composant (c'est-à-dire à sa conception) ou si elle provient d'un non-respect des conditions d'utilisation de maintenance ou d'une erreur humaine.

A cet effet, l'arbre de défaillance apparaît comme un outil de qualité pour traiter ce genre de problème. Car étant une méthode déductive, il permet de qualifier et de quantifier chaque cause origine d'un événement redouté indésirable.

**CONCLUSION
GÉNÉRALE**

Dans le récent travail, qui synthétise le projet de fin d'études de notre cursus universitaire au sein du département de génie mécanique de la faculté des sciences appliquées de l'université de Tiaret, nous avons tenté d'étudier et d'évaluer d'un aspect technique et économique une problématique issue du milieu professionnel et industriel de défaillance des garnitures mécaniques des pompes centrifuges multicellulaire par la méthode inductive appelée « l'arbre de défaillance ADD ».

En outre, ce travail a été une occasion de mettre en pratique nos connaissances théorique en tant qu'étudiant et l'intégration progressive dans notre future cadre de travail. On a s'intéressé à un secteur énergétique très major dans l'économie du pays, c'est la société Sonatrach en particulier les stations de pompage et de compression du réseau de Transport Des Hydrocarbures Ouest. Parmi les équipements les plus utilisées dans ces dernières, on peut citer les pompes centrifuges multicellulaires à cause de la simplicité de leurs fonctionnements et leur maintenance.

L'application de la méthode d'arbre de défaillance ADD dans la maintenance préventive des garnitures mécaniques pour assurer la fonction étanchéité mécanique pour les arbres tournants nous permettre un bon diagnostic technique, une étude préalable de fiabilité, un management de sécurité de la machine et de localiser rapidement le ou les éléments défaillants et la ou les causes de défaillances

L'objectif de l'analyse ADD est de construire une synthèse de tout ce qui peut conduire à un événement redouté et d'évaluer l'effet d'une modification du système, de comparer les conséquences des mesures qui peuvent être envisagées pour réduire l'occurrence de l'événement redouté étudié donc réduire les dépenses supplémentaire manifestent par les arrêts d'urgences des machines. Cela permet l'augmentation de la durée de vie de l'équipement en évitant les ruptures brutale, les arrêts brusque et garantir la continuité de production.

Cependant cette méthode peut avoir des difficultés d'application, vu que sa complexité, l'incertitude sur certaines probabilités d'occurrence d'événements élémentaires et les difficultés mathématique dans les approches de calcul d'ingénierie mais elle reste toujours la meilleure méthode connue auprès des ingénieurs fiabilistes œuvrant dans le domaine de sécurité des installations.

RÉFÉRENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **MARTIN.J.**, "Étanchéité en mécanique", B5420 V2, Techniques de l'ingénieur, 2004.
- [2] **FANCHON.J.J.**, "Guide des sciences et technologies industrielles", édition AFNOR-NATHAN, 2001.
- [3] **JOSEPH L. FOSZCZ, PE**, "A guide to shaft seals", Plant engineering magazine march 1, 2001.
- [4] **ARTEMA**, "Garnitures mécaniques-Technologie", Association des roulements des transmissions de l'étanchéité et de la mécatronique associée, Technique de l'ingénieur.2012
- [5] **HORVE.L**, "Shaft seals for dynamic applications", Chicago Rawhide Manufacturing, Company Elgin, Illinois, Marcel Dekker, Inc.,1996.
- [6] **ALAN O. LEBECK**, " Principles and design of mechanical face seals", mechanical seals, John Wiley and sons,Inc,1991.
- [7] **KHALDI et LATRECHE (2014)** : « Etude d'une pompe centrifuge a un étage». Mémoire de projet de fin d'étude pour l'obtention du diplôme de Master en Génie mécanique, Centre Universitaire Ain Temouchent.
- [8] **M REGGIO et J-Y. TREPANIER**: Pompes centrifuge Notes de cours Mécanique des fluides,1316772563esXgEB.pdf
- [9] **JEAN-PAUL BEAUDRY et JEAN-CLAUDE ROLLAND** Livre, mécanique des fluides appliquée, berger, 2005.
- [10] **ARTEMA Groupe** Technique de l'ingénieur (Réf. : BM5426 V2) Garnitures mécaniques d'étanchéité - Montage, maintenance et défaillances
- [11] **NOEL BRUNETIERE**. Etude théorique et expérimentale du comportement thermo hydrodynamique des garnitures d'étanchéité. Université de Poitiers, 2001. French.
- [12] **LATTY INTERNATIONAL** Garniture mécanique pour pompe, www.directindustry.fr .
- [13] **W.E. VESELY, F.F.GOLDBERG, N.H. ROBERTS, D.F. HAASL**, "Fault tree handbook", NUREG report 0492, 1981.
- [14] **O. SILAIRE**, "Ingénieurs Maintenance « Gestion de la maintenance et de la Fiabilité des équipements »", formation professionnalisant IFP Training, Hassi Messaoud / Base24, 14 mai 18--- 23 Avril 2015.
- [15] **CEI 61025** Analyse arbre de pannes : Norme CEI/IEC 61025 second édition 2006-12 (International Electro technical Commission)

Résumé

Le processus de la surveillance des machines tournantes menant à un bénéfice en temps et cout , donc le processus de diagnostic pour objectif de détecter les défauts d'une manière précoce est devenu un impératif. Le diagnostic des défauts avant ses conversions à un dysfonctionnement s'effectue de diverses techniques. Dans notre travail, il vu comme une solution pour améliorer la disponibilité des installations par un isolement rapide des causes des défaillances en utilisant l'arbre des défaillances.

Mot clés : diagnostic ; dysfonctionnement ; disponibilité ; arbre de défaillances

Abstract

The process of monitoring rotating machines leading to a benefit in time and cost, so the diagnostic process to detect defects early became an imperative.

The diagnosis of defects before its conversions to a malfunction is made by various techniques. In our work, we saw as a solution to improve the availability of facilities by quickly isolating the causes of failures using the fault tree.

Keywords : diagnostic , malfunction , availability ,fault tree

ملخص

مراقبة الآلات التي تعمل على تحقيق الربح في الوقت المحدد , لذا فإن عملية التشخيص للكشف عن النقائص في وقت مبكر أصبحت حتمية. يتم تشخيص العيوب قبل تحولها إلى عطل ما من خلال تقنيات مختلفة . لقد رأينا في عملنا حلا لتحسين توافر المرافق عن طريق العزل السريع لأسباب الأعطال باستخدام شجرة الأعطال.

الكلمات المفتاحية : تشخيص , عطل , مرافق , شجرة الأعطال .
