

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET



FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUEES
DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du diplôme de Master

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Electromécanique

Spécialité: Maintenance Industrielle

THÈME

PROBABILITES

DANS LE DIAGNOSTIC MACHINE

« CAS D'UN COMPRESSEUR THERMODYN RC5S »

Préparé par:

ADDA MUSTAPHA
BENMEDJBER SALEH

Soutenu le 29 / 07 2019

Devant le Jury :

Nom et prénoms	Grade	Lieu d'exercice	Qualité
MAZARI Djamel	MAA	UIK Tiaret	Président
SAAD Mohamed	MAA	UIK Tiaret	Examinateur
GUEMMOUR M.B	MAA	UIK Tiaret	Encadreur

PROMOTION 2018 / 2019

Remerciements

*En premier lieu, nous tenons à remercier Allah le tout puissant, notre créateur qui nous a donné la force pour accomplir ce modeste travail. Ce présent mémoire de fin d'étude, n'aurait pu avoir le jour sans contribution de nombreuses personnes, dont nous faisons aujourd'hui un plaisir et un devoir de les remercier. Avant tout, nous tenons à remercier messieurs les membres du jury pour leurs collaborations durant l'examen de ce travail et leurs participations à la soutenance. Nous adressons tout particulièrement notre reconnaissance à notre encadreur Mr: **GUEMMOUR MOHAMED BOUTKHIL** pour l'encadrement de cette thèse, pour ses conseils et son aide. Sans oublier les enseignants du département génie mécanique. Enfin nous remercions tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce présent mémoire, trouvent ici l'expression de notre profondes gratitudes et respect*

Sommaire

Introduction.....	2
Chapitre I: Outils en relation avec l'étude de cas	
I.1 LE DIAGNOSTIC INDUSTRIEL	4
I.1.1 Introduction.....	4
I.1.2 Diagnostic industriel.....	4
I.1.2.1 Définition	4
I.1.2.2 Objectifs	4
I.1.2.3 Terminologie	4
I.1.2.4 Critères de sélection d'une méthode de diagnostic	6
I.1.2.5 Procédure de diagnostic industriel	7
I.1.3 Classifications des méthodes de diagnostic	7
I.1.3.1 Méthode de diagnostic par redondance matérielle	8
I.1.3.2 Méthodes internes et méthodes externes	8
I.1.3.3 Les méthodes inductives et les méthodes déductives.....	11
I.2 PROBABILITES	13
I.2.1 Introduction.....	13
I.2.2 Définitions	13
I.2.3 Notions fondamentales	13
I.2.3.1. Evénement.....	14
I.2.3.2. Probabilité d'un événement	14
I.2.3.3. Fréquence d'un événement	14
I.2.3.4. Certitude d'un événement.....	15
I.2.3.5. Principe de certitude d'un événement.....	16
I.2.3.6. Variable aléatoire	16
I.2.3.7. Evénement et variable aléatoire	17
I.2.4 Calcul des probabilités.....	18
I.2.4.1. Eléments fondamentaux	18
I.2.4.2. Méthodes de calculs	20
Chapitre II : Présentation du compresseur centrifuge THERMODYN RC5S	
II.1 : TECHNOLOGIE DU COMPRESSEUR THERMODYN RC5S	27
II.1.1 Introduction	27
II.1.2 La compression.....	27
II.1.3 Définition des compresseurs	27
II.1.3.1 Différents types des compresseurs industriels	27
II.1.4 Présentation générale d'un compresseur centrifuge	28
II.1.4.1 Conception des compresseurs centrifuges	29

II.1.4.2	Fonctionnement d'un compresseur centrifuge	33
II.1.5	Le compresseur THERMODYN RC5S	34
II.1.5.1	Identification des modèles	35
II.1.5.2	Tableau de performance de compresseur THERMODYN RC5S.....	35
II.1.5.3	Constitution du compresseur centrifuge THERMODYN (RC5S).....	36
II.1.6	Système de lubrification et d'étanchéité	46
II.1.6.1	Circuit de l'huile de graissage :	46
II.1.6.2	Système d'étanchéités en bout d'arbre du compresseur :	47
II.2	MAINTENANCE DE COMPRESSEUR CENTRIFUGE THERMODYN RC5S	49
II.2.1	Introduction	49
II.2.2	La maintenance dans l'entreprise.....	49
II.2.3	Objectifs de la maintenance dans l'entreprise.....	50
II.2.4	Equipements critiques dans une entreprise	50
II.2.5	La surveillance permanente d'un équipement critique.....	51
II.2.5.1	Principe	51
II.2.5.2	Avantages et inconvénients de la surveillance permanente	52
II.2.6	Système de supervision	53
II.2.6.1	Progiciel Delta.V.....	53
II.2.6.2	Instrumentation	53
II.2.6.3	Intérêts et limites d'utilisation des proximètres.....	56
II.2.8	Politique de maintenance pour le compresseur THERMODYN RC5S	57
II.2.9	Sélection multicritère	57
II.2.9.1	Critères influant sur les risques de panne (RP) :.....	57
II.2.9.2	Critères influant sur les conséquences de panne (CP) :	57
II.2.10	Cycle de révision	60
II.2.10.1	Révision partielle	60
II.2.10.2	Révision générale.....	61
II.2.10.3	Surveillance en marche	61
II.2.10.4	Circuit procédé.....	61
II.2.11	TROUBLESHOOTING (Dépannage)	61
II.2.11.1	Causes possibles de mauvais fonctionnement :	61
II.2.11.2	Recherche des pannes :	62

Chapitre III Fiabilité et diagnostic du compresseur

III.1	ANALYSE DE FIABILITE.....	65
III.1.1	Introduction	65
III.1.2	Couple fiabilité-défaillance.....	65
III.1.2.1	Notion de durée de vie.....	65
III.1.2.2	Fiabilité.....	65

III.1.2.3	Fonction de fiabilité.....	66
III.1.2.4	Concept de défaillance.....	67
III.1.2.5	Défaillance.....	68
III.1.2.6	Taux de défaillance $\lambda(t)$	69
III.1.2	Cas des systèmes dont la maintenance est prévisionnel	71
III.1.3	Evaluation de la fiabilité du compresseur THERMODYN RC5S	72
III.1.3.1	La loi exponentielle	74
III.1.3.2	Evolution de la fiabilité du compresseur	74
III.1.3.3	Interprétation des courbes.....	75
III.2	LA METHODE D'ARBRE DE DEFAILLANCE	76
III.2.1	Introduction.....	76
III.2.2	Définition	76
III.2.3	Représentation.....	76
III.2.4	Outils pour la construction de l'arbre défaillance	77
III.2.5	Méthodologie de la méthode arbre de défaillances :.....	78
III.2.5.1	Démarche:.....	78
III.2.5.2	Analyse qualitative :	79
III.2.5.3	Analyse quantitative :	79
III.2.5.4	Résumé des règles importantes de la construction de l'arbre de défaillance :	80
III.2.6	Avantages et Inconvénients	80
III.2.6.1	Avantages:	80
III.2.6.2	Inconvénients:.....	81
III.2.7	Mise en œuvre de l'arbre des défaillances	81
III.2.7.1	Traitement qualitatif du système :	81
III.2.7.2	Traitement quantitatif :	83
III.2.7.3	Interprétation des résultats.....	86
III.2.7.4	Suggestions.....	86
III.2.8	Analyse des anomalies	86
III.2.9	Table de décision	88
	Conclusion	
	Bibliographie	
	Résumé	

Liste des figures

Figure I.1.1 :	Ordonnancement des anomalies selon leur criticité.....	06
Figure I.1.2 :	Méthodes de diagnostic.....	07
Figure I.1.3 :	La redondance matérielle.....	08
Figure I.1.4 :	Méthode du modèle.....	09
Figure I.1.5 :	Méthode d'identification de paramètres.....	09
Figure I.1.6 :	Méthode d'estimation du vecteur d'état.....	10
Figure I.2.1	Méthodes de calculs.....	21
Figure II.1.1 :	les compresseurs volumétriques.....	28
Figure II.1.2 :	les compresseurs dynamiques.....	28
Figure II.1.3 :	entraînement de compresseur par moteur électrique.....	29
Figure II.1.4 :	Compresseur centrifuge avec plan de joint vertical (Barrel).....	29
Figure II.1.5 :	Compresseur centrifuge avec plan de joint horizontal et à deux étages.....	30
Figure II.1.6 :	Stator à plan de joint horizontal.....	31
Figure II.1.7 :	Stator à plan de joint vertical.....	31
Figure II.1.8 :	Rotor avec roues.....	32
Figure II.1.9 :	Positionnement du rotor.....	32
Figure II.1.10 :	Les différents types de roues.....	32
Figure II.1.11 :	Passage du gaz et augmentation de pression à travers une cellule.....	33
Figure II.1.12 :	écoulement de gaz dans un compresseur centrifuge.....	34
Figure II.1.13 :	Compresseur RC5S.....	35

Figure II.1.14	:	demi-corps inferieure de compresseur RC5S.....	36
Figure II.1.15	:	Diaphragme.....	37
Figure II.1.16	:	Rotor.....	38
Figure II.1.17	:	Partie rotor inclue l'arbre (Rotor Shaft).....	38
Figure II.1.18	:	Roue.....	39
Figure II.1.19	:	Tambour d'équilibrage.....	40
Figure II.1.20	:	Accouplement d'entraînement.....	40
Figure II.1.21	:	Collet de butée.....	41
Figure II.1.22	:	Palier a butée.....	42
Figure II.1.23	:	Palier porteur.....	42
Figure II.1.24	:	Garniture à labyrinthe.....	43
Figure II.1.25	:	coupe longitudinal d'un compresseur centrifuge.....	45
Figure II.1.26	:	circuit de lubrification d'un compresseur centrifuge.....	47
Figure II.1.27	:	Etanchéité à labyrinthe en bout d'arbre.....	48
Figure II.1.28	:	système d'huile d'étanchéité.....	48
Figure II.2.1	:	Répartition des couts opérationnels d'une usine pétrochimique.....	50
Figure II.2.2	:	Place de la chaîne d'acquisition de données dans le système mesure.....	54
Figure II.2.3	:	Chaine d'acquisition avec centrale de mesure.....	54
Figure II.2.4	:	exemple des proximètres.....	55
Figure II.2.5	:	Principe du capteur inductif à courants de Foucault.....	55
Figure II.2.6	:	Positionnement des capteurs de déplacement par paire à 90°.....	56
Figure III.1.1	:	Fonction fiabilité et fonction défaillance.....	69

Figure	III.1.2:	Courbe	d'évolution	du	taux	de
défaillance.....						70
Figure	III.1.3	:	Courbe	de	taux	de
défaillance.....						73
Figure	III.1.4 :	Les	courbes	de	fiabilité	et la
fonction.....						75

Liste des tableaux

Tab	II.1.1	performance	de	compresseur
.....				35
Tab	II.2.1	Critères	évaluation	des risques de
panne.....				58

Tab	II.2.2	Critères	évaluation	des	conséquences	de	
panne.....							59
Tab	III.1.1				l'historique	de	
compresseur.....							73
Tab	III.1.2		Evolution	de	la	fiabilité	du
compresseur.....							75
Tab	III.2.1 :	Symboles	des	évènements	dans	les	arbres de
défaillances.....							77
Tab	III.2.2	Symboles	des	portes	dans	les	arbres de
défaillances.....							77
Tab	III.2.3	:	Liste	des	évènements		
probables.....							81
Tab	III.2.4 :			Codes		des	
évènements.....							82
Tab	III.2.5		Tableau	d'apparition		des	
évènements.....							83
Tab	III.2.6	Probabilités	des	évènements		de	
base.....							83

Introduction générale

Introduction

Aujourd'hui, la production industrielle a connu un développement considérable grâce à l'amélioration de la technologie, et les systèmes industriels sont plus en plus complexes et sophistiqués, ce qui nécessite un développement continue de la maintenance à travers des méthodes de recherche scientifique pour atteindre l'objectif zéro panne, et assurer la disponibilité opérationnelle d'une machine, c'est-à-dire d'augmenter le temps où elle est réellement productive.

L'un des paliers de base de la maintenance est le diagnostic car ça fonction consiste à détecter les anomalies, de localiser ces origines, et de déterminer ces causes.

Ceci permet d'envisager des actions correctives, pour que le système retourne à son fonctionnement nominal.

Ce travail porte sur l'amélioration de l'une des activités de maintenance, en s'appuyant sur les connaissances et les raisonnements des experts dans le domaine, et sur les données historiques du système, et à l'aide de l'outil mathématique probabilité statistique, a pour objectif de déterminer une base forte de diagnostic, qui permet d'aider les ingénieurs de maintenance.

La méthodologie proposée est basée sur une analyse probabiliste des anomalies de compresseur centrifuge THERMODYN RC5S, qui est utilisé dans le train de production de gaz comprimé au complexe industriel NAILI ABDELHALIM " CINA ", dans la région de HASSI MESSAOUD. En s'appuyant sur le retour d'expérience, et sur une méthode d'aide à la décision. Notre choix est porté sur une méthode probabiliste graphique " l'arbre de défaillance ". Cette dernière permet une représentation graphique d'une connaissance, en tenant compte des incertitudes éventuelles. et aussi permet de faire des analyses et des diagnostics.

Notre mémoire est structuré en trois chapitres, chaque chapitre est devisé en deux parties.

Le premier chapitre, présente les outils en relation avec l'étude de cas, dans la première partie en parle du diagnostic industriel et dans la deuxième, sur la probabilité statistique.

Dans le deuxième chapitre nous présentons le compresseur THERMODYN RC5S en deux parties, l'une parle sur la technologie de compresseur et l'autre sur sa maintenance.

Le dernier chapitre de ce mémoire passe par une analyse fiabilité du compresseur dans la première partie, en suit dans la deuxième, nous traiterons la problématique de diagnostic par la méthode déductive arbre de défaillance. On termine par une table de décision qui permet l'utilisation de la machine d'une manière optimale, en réduisant les durées d'arrêt et le coût de la maintenance.

Chapitre I

Probabilité et Diagnostic

I.1 LE DIAGNOSTIC INDUSTRIEL

I.1.1 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.

Dans ce chapitre, après un rappel des divers concepts et terminologies propre au diagnostic, nous classifions les différentes méthodes de diagnostic et nous terminerons ce chapitre par une explication de chaque méthode.

I.1.2 Diagnostic industriel

I.1.2.1 Définition

La définition qui a été retenue par les instances internationales de normalisation (AFNOR, CEI) est la suivante : "le diagnostic est l'identification de la cause probable de la (ou des) défaillance(s) à l'aide d'un raisonnement logique fondé sur un ensemble d'informations provenant d'une inspection, d'un contrôle ou d'un test". Cette définition très courte et concise résume les deux tâches essentielles du diagnostic [1] :

- Reconnaître les symptômes de la défaillance.
- Identifier la cause de la défaillance à l'aide d'un raisonnement logique fondé sur un ensemble d'observations.

I.1.2.2 Objectifs

Le diagnostic industriel, a pour objet de :

- Trouver les causes des défaillances.
- Résoudre les problèmes liés aux dysfonctionnements des systèmes techniques.
- Prendre les décisions stratégiques permettant d'assurer la disponibilité.
- Evaluer les performances de différentes fonctions du système industriel.

I.1.2.3 Terminologie

Le vocabulaire relatif au diagnostic dans le domaine technique (le diagnostic industriel) (**Figure I.1.1**) [1-2].

- **Système "dispositif"**: un ensemble déterminé d'éléments discrets (ou composants) interconnectés ou en interaction.
- **Processus**: ensemble de phénomènes organisés dans le temps rapportés à un même système physique.
- **Observation**: c'est une information obtenue sur le dispositif réel. Cette information peut être obtenue soit à une entrée, soit à une sortie du dispositif ou encore entre deux composants de celui-ci.
- **Symptôme**: caractère distinctif d'un état fonctionnel anormal (Variation anormale d'une quantité observable).
- **Signe** : un défaut est perceptible au travers d'un signe, caractère manifestant un état comportemental anormal. Un signe est caractérisé par un ensemble d'observations en provenance d'un système physique et est révélateur de la présence d'un défaut.
- **Anomalie**: particularité non conforme à la loi naturelle ou à la logique. Plus précisément: particularité non conforme à une référence comportementale ou fonctionnelle.

Exemple : Les défauts, les défaillances, ou les pannes sont des anomalies.

- **Défaut** : dysfonctionnement tolérable qui ne cause pas un arrêt complet du système dû à une imperfection physique liée à la conception, ou à la mise en œuvre du dispositif, il peut donner lieu à une défaillance. Les défauts selon leurs sources peuvent être classifiés comme suit :
 - Défaut des capteurs,
 - Défaut des actionneurs,
 - Défaut du système lui-même (fuite, rupture d'organe, ..),
 - Défaut de l'unité de traitement ou de commande,
 - Défaut dû à l'opérateur humain.
- **Défaillance**: L'altération ou la cessation de l'aptitude d'un système à accomplir sa ou ses fonctions requise(s) avec les performances définies dans les spécifications techniques". Elle définit une anomalie fonctionnelle au sein du système. La défaillance peut se produire à différents niveaux: capteurs, actionneurs, composants du procédé, contrôle dans le cas d'une boucle.
- **L'imprécision** : fait référence à la description incomplète d'un état de la réalité par une proposition.
- **Panne** : C'est l'inaptitude d'un dispositif à accomplir une fonction requise. Il est clair que dès l'apparition d'une défaillance, caractérisée par la cessation du dispositif à accomplir sa fonction, on déclarera le dispositif en panne. Par conséquent une panne résulte toujours

d'une défaillance mais la présence d'une défaillance n'entraîne pas obligatoirement la présence d'une panne.

- **Résidu** : souvent, lorsque le modèle comportemental de référence est analytique, les signaux porteurs de signes ou de symptômes sont appelés résidus parce qu'ils résultent d'une comparaison entre un comportement réel et un comportement de référence.
- **Une dégradation** : représente une perte de performances des fonctions assurées par le système.

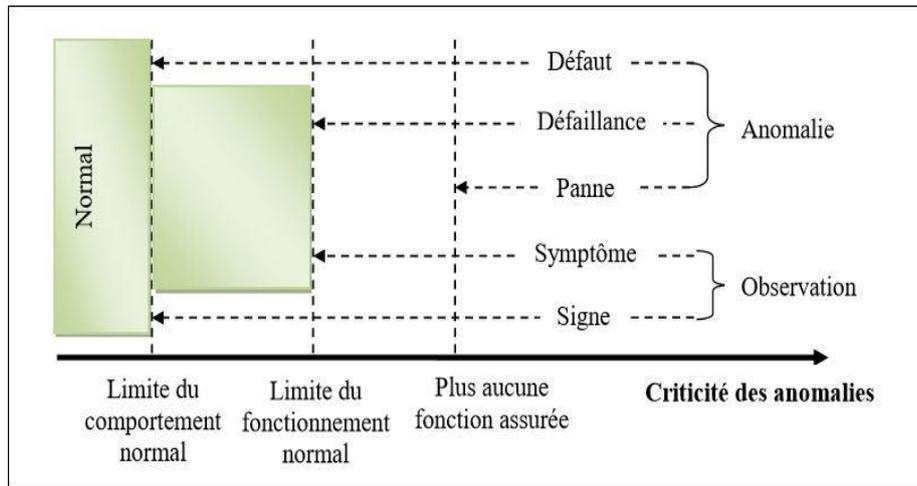


Figure I.1.1 : Ordonnement des anomalies selon leur criticité [1]

I.1.2.4 Critères de sélection d'une méthode de diagnostic

De nombreuses méthodes sont à la base des travaux en diagnostic, le choix de l'une de ces méthodes est lié à la connaissance que l'on souhaite acquérir sur le système, mais aussi à la complexité de ce système. La sélection de la méthode de diagnostic la plus appropriée à un système industriel donné, ne peut se faire qu'après un recensement des besoins et des connaissances et des informations disponibles. Les critères à considérer pour la sélection d'une méthode de diagnostic sont [1] :

1. Nature des causes de défaillances à localiser,
2. Connaissance des signatures associées aux défaillances induites par les causes,
3. Maîtrise des moyens de mesure des symptômes,
4. Maîtrise des moyens de traitement des symptômes,
5. Connaissance des mécanismes physiques entre les causes et les effets,
6. Inventaire du retour d'expérience,
7. Recensement des expertises disponibles,
8. Définition du niveau de confiance dans le diagnostic,
9. Identification des utilisateurs finaux du diagnostic.

I.1.2.5 Procédure de diagnostic industriel

La procédure de diagnostic de défaillances d'un processus industriel tourne autour des étapes suivantes [1] :

1. L'extraction des informations à partir de moyens de mesures appropriées ou d'observations réalisées lors des rondes par le personnel de surveillance,
2. L'élaboration des caractéristiques et signatures associées à des symptômes,
3. La détection d'un dysfonctionnement,
4. La mise en œuvre d'une méthode de diagnostic de la défaillance ou de la dégradation à partir de l'utilisation des connaissances sur les relations de cause à effet,
5. La prise de décision (arrêt de l'installation ou reconfiguration).

Le diagnostic peut s'effectuer dans deux contextes différents: le diagnostic hors ligne (off line) utilisé pour les traitements curatifs de panne et le diagnostic en ligne ou encore en temps réel (on line) utilisé en vue d'une tâche de supervision pour détecter les défauts au moment où ils se produisent.

I.1.3 Classifications des méthodes de diagnostic

Dans la littérature [1-2] on distingue plusieurs classifications concernant les méthodes de diagnostic. La taxinomie des méthodes de diagnostic permet une première classification en plusieurs grandes familles (**Figure I.1.2**):

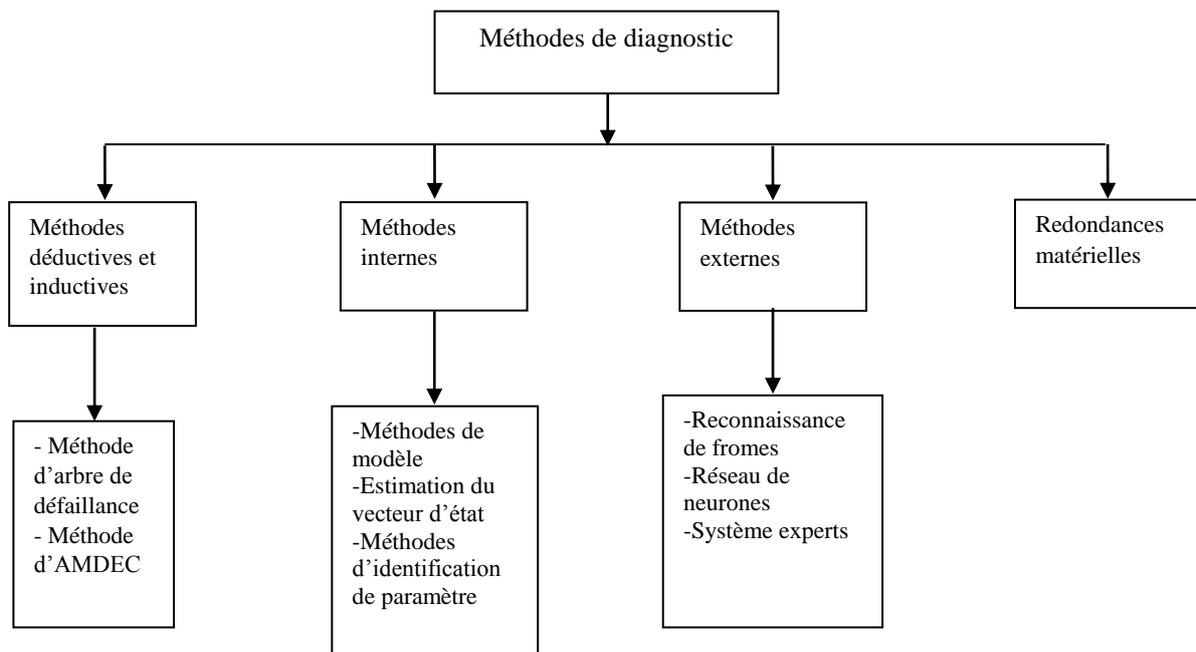


Figure I.1.2 : Méthodes de diagnostic

I.1.3.1 Méthode de diagnostic par redondance matérielle

Les premières méthodes de diagnostic ont été basées sur la redondance matérielle, parce qu'elle est très répandue dans les domaines où la sûreté de fonctionnement est cruciale comme dans le secteur de l'aéronautique ou du nucléaire. L'idée principale est de multiplier les chaînes de mesure, pour une acquisition fiable d'une grandeur physique (**Figure. I.1.3**). Les mesures sont comparées entre elles, si une mesure ne concorde pas avec les autres mesures, un vote logique permet d'isoler le capteur défaillant. Le rôle du voteur est de déterminer le capteur défaillant par l'analyse de la dispersion des trois mesures r_1 , r_2 et r_3 [2].

L'approche redondance matérielle est très efficace bien qu'elle ne couvre pas les pannes de mode commun (exemples : panne d'alimentation électrique, panne de masse, etc...)

Le coût et l'encombrement ainsi qu'un champ d'application strictement limité aux pannes de capteurs constituent les inconvénients majeurs de cette méthode.

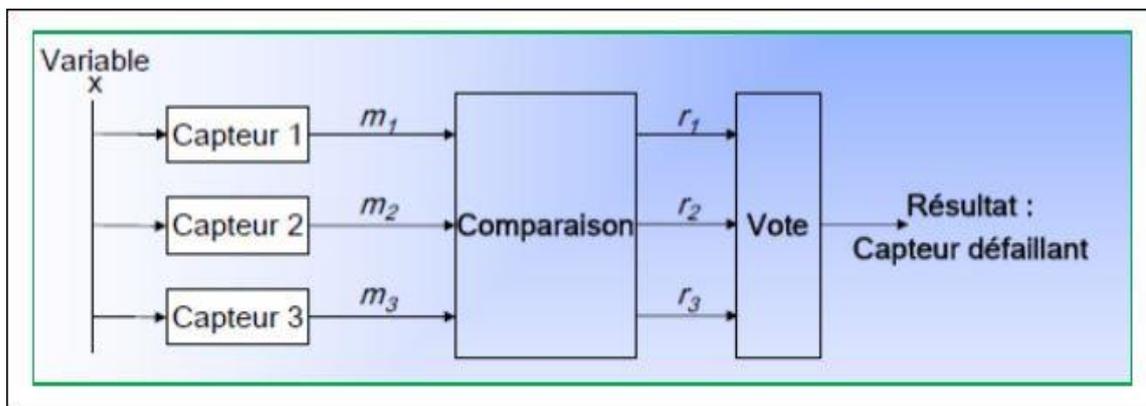


Figure. I.1.3 : La redondance matérielle [2]

I.1.3.2 Méthodes internes et méthodes externes

I.1.3.2.1 Les méthodes internes

Ces méthodes sont basées sur des modèles physiques ou mathématiques validés par les techniques d'identification de paramètres. Le diagnostic de défaillance est possible en suivant en temps réel l'évolution des paramètres physiques ou bien en utilisant l'inversion de modèles de type « boîte noire ». On distingue trois grandes familles [1] :

- Méthode du modèle;
- Méthodes d'identification de paramètres;
- Méthode d'estimation du vecteur d'état.

1° Méthode du modèle

Le système à diagnostiquer est doublé par un modèle qui fonctionne en parallèle. Les entrées du système sont répercutées sur les entrées du modèle. (Figure I.1.4)

A partir des sorties déduites du modèle et des mesures directement observées sur le système réel, un résidu qui exprime les écarts de comportement, est généré. La présence d'un écart signifie l'apparition d'une anomalie.

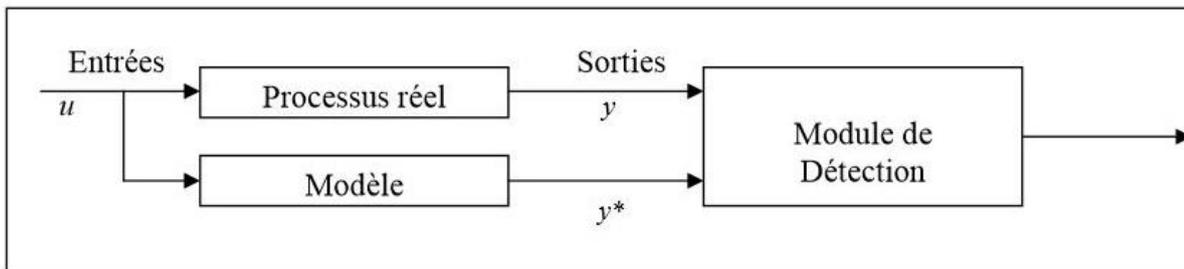


Figure I.1.4 : Méthode du modèle [1]

2° Les méthodes d'identification de paramètres

Elle s'applique au cas où l'on souhaiterait suivre l'évolution de certains paramètres critiques pour le fonctionnement du système et qui ne sont pas directement mesurables. Le principe général de cette méthode est d'estimer les paramètres internes physiques représentés par un vecteur paramètre du modèle à partir de la connaissance des signaux d'entrées u et de sortie y mesurés sur le système par des méthodes appropriées. Le diagnostic se fait en suivant l'évolution au cours du temps du paramètre physique concerné et de le comparer à un seuil prédéterminé. (Figure I.1.5)

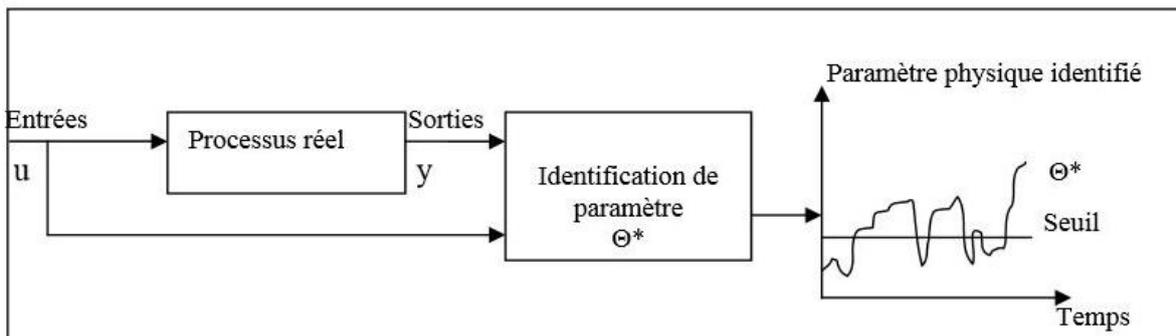


Figure I.1.5: Méthode d'identification de paramètres [1]

3° Méthode d'estimation du vecteur d'état

Cette méthode est utilisée lorsque les anomalies se manifestent directement sur les variables d'état. Son principe consiste à estimer par des techniques appropriées (observateurs d'état) toutes les composantes du vecteur d'état x à partir de la connaissance du vecteur de mesure y et du vecteur

d'entrée u . L'analyse du comportement des estimations des états qui ont un sens physique permet la réalisation du diagnostic. (**Figure I.1.6**)

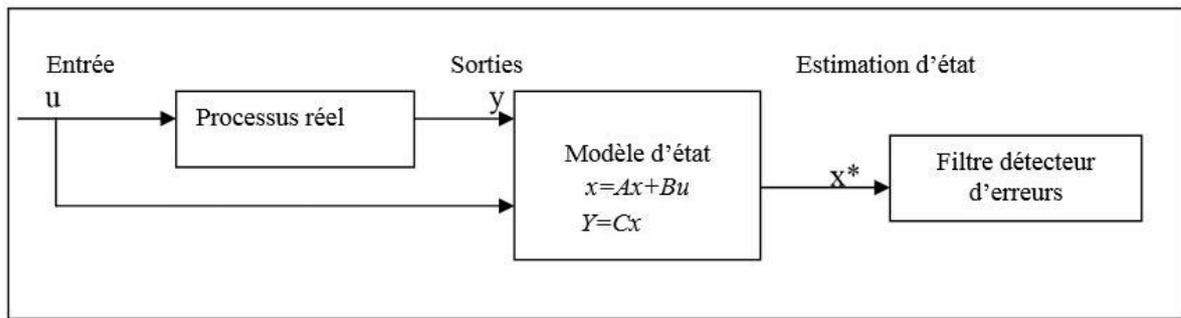


Figure I.1.6 : Méthode d'estimation du vecteur d'état [1]

Les éléments des matrices A , B , C , représentent les paramètres physiques du processus et sont supposés connus.

I.1.3.2.2 Méthodes externes

Ces méthodes supposent qu'aucun modèle n'est disponible pour décrire les relations de cause à effet. La seule connaissance repose sur l'expertise humaine confortée par un solide retour d'expérience. Dans cette catégorie on retrouve toutes les méthodes basées sur l'intelligence artificielle et les approches probabilistes. La résolution de diagnostic des défaillances par les méthodes de l'intelligence artificielle est due principalement aux avantages suivants [1]:

- Le non nécessité à la modélisation.
- L'insertion de connaissances d'experts sous forme linguistique : soit pour la détection ou la localisation des défauts.
- La simplicité de la mise en œuvre, une fois que les règles d'expert sont préparées.
- La robustesse face aux perturbations.

1° Reconnaissance de formes

L'interprétation des signatures des défaillances fait appel aux techniques de reconnaissance des formes, ou :

Les formes, sont les vecteurs des observations, les classes, les modes de fonctionnement, et la discrimination, le choix du mode de fonctionnement.

Le vecteur forme correspond à une combinaison d'un nombre connu de signaux de capteurs température au point A, niveau de pression en B, débit, etc. Il est construit en Composantes Principales) aident à la conception du vecteur forme. Pour chaque nouvelle observation, on doit

identifier et quantifier l'état actuel du système ainsi que toute éventuelle évolution vers un autre état: en particulier, l'état de défaillance.

On doit estimer la vitesse de cette évolution et exécuter les mesures d'urgences nécessaires dans des délais acceptables

2° Réseaux de neurones artificiels

Les réseaux de neurones sont parmi les techniques heuristiques des plus utilisées dans les applications industrielles. Ils ont la capacité de classifier des signatures même si les formes présentées sont entachées de bruits ou ont des informations manquantes. Faire un diagnostic consiste à déterminer à quelle classe appartient une situation particulière.

3° Systèmes experts

Un système expert (SE) est un système informatique destiné à résoudre un problème précis à partir d'une analyse, d'une représentation des connaissances et du raisonnement d'un (ou plusieurs) spécialiste(s) de ce problème. L'un des principaux modules d'un SE est la base de connaissances formée de:

- La base de règles : qui contient les règles permettant l'association des faits entre eux.
- La base des faits : elle contient les éléments observables collectés sur le système à diagnostiquer, ou des faits déduits par le système expert à partir des éléments observés.

I.1.3.3 Les méthodes inductives et les méthodes déductives

Les notions de démarche inductive ou déductive se basent sur celles développées dans les approches d'analyse inductive ou déductive de risques. Par exemple, la méthode AMDEC (Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leurs Criticité) est une méthode d'analyse déductive car elle part des défaillances de composants pour en déterminer les conséquences alors que la méthode MAC (Méthode des Arbres de Causes. Elle est également connue sous les noms de Méthode des Arbres des Défauts ou Méthode des Arbres des Défaillances) est une approche inductive car elle se focalise sur les événements redoutés d'abord pour identifier leurs causes ensuite [3].

I.1.3.3.1 Les méthodes déductives

Pour ces méthodes, la démarche est bien sûr inversée puisque l'on part de l'événement indésirable et l'on recherche ensuite par une approche descendante toutes les causes possibles.

Une vérification des effets trouvés par rapport aux effets possibles permet de confirmer ou d'infirmer l'existence du défaut. La prise de décision par les spécialistes des matériels qui possèdent

une maîtrise des phénomènes physiques, s'exerce à chaque étape d'une procédure de diagnostic industriel. Lors de la détection de dysfonctionnement, il faut fixer des seuils de pré-alarme et alarme sur la valeur de l'écart mesuré entre la signature nominale et celle mesurée. Pour déterminer ces seuils, il est alors nécessaire de définir des tests de décisions.

1° Méthode AMDEC [4]

L'AMDEC est une méthode d'analyse prévisionnelle de la fiabilité qui permet de recenser les défaillances potentielles dont les conséquences affectent le bon fonctionnement du moyen de production ou du bien d'équipement étudié, puis d'estimer les risques liés à l'apparition de ces défaillances, afin d'engager les actions correctives à apporter lors de la conception, de la réalisation ou de l'exploitation (production, maintenance) du moyen.

L'AMDEC est une méthode déductive qui s'applique à tous les systèmes risquant de ne pas tenir les objectifs de fiabilité, maintenabilité, qualité du produit fabriqué et sécurité. On différencie plusieurs types d'AMDEC réalisées lors des phases successives de développement du produit automobile. On définit principalement :

L'AMDEC PRODUIT : qui est l'analyse de la conception du produit automobile.

L'AMDEC PROCESSUS : qui est l'analyse des opérations de production.

L'AMDEC MOYEN DE PRODUCTION : qui est l'analyse de la conception d'un moyen de production.

I.1.3.3.2 Les méthodes inductives

Ces méthodes correspondent à une approche montante où l'on identifie toutes les combinaisons d'événements élémentaires possibles qui entraînent la réalisation d'un événement unique indésirable. En d'autres termes il faut interpréter les symptômes ainsi que leurs combinaisons possibles afin de trouver le défaut.

1° Méthode arbre de défaillance

L'arbre de défaillance est l'une de ces méthodes qui a deux objectifs: déduire les causes d'un événement unique indésirable et représenter graphiquement l'enchaînement de ses causes.

Il est constitué de niveaux successifs tels que chaque événement à un niveau donné est généré à partir de combinaisons logiques «ET» et «OU» d'événements du niveau inférieur. Le chemin critique est le scénario d'événements élémentaires, indépendants entre eux, qui entraînent l'apparition de l'événement redouté. Les Arbres de défaillances peuvent être transformés en arbres de tests par l'ajout de nœuds correspondants aux tests qui doivent être réalisés pour augmenter la connaissance et permettre de déterminer la cause de la défaillance parmi les causes possibles [2].

I.2 PROBABILITES

I.2.1 Introduction

Le terme probabilité possède plusieurs sens : venu historiquement du latin probabilitas, il désigne l'opposé du concept de certitude ; il est également une évaluation du caractère probable d'un évènement, c'est-à-dire qu'une valeur permet de représenter son degré de certitude. Récemment, la probabilité est devenue une science mathématique et appelée théorie des probabilités ou plus simplement probabilités. Dans notre cas, la notion de probabilité sera associée à celle de la fonction fiabilité et fonction de défaillance.

I.2.2 Définitions [7]

- **Probabilité:** C'est une science du domaine des mathématiques appliquées. Elle a pour objet l'étude des lois qui régissent les "phénomènes aléatoires", à travers un ensemble de règles qui permettent de déterminer le pourcentage des chances de réalisation ce phénomène.
- **Phénomène aléatoire :** C'est un "fait" ou "événement" qui se reproduit plusieurs fois, de sorte que le résultat change et varie d'une manière "aléatoire" et imprévisible.

Exemple : jet d'un dé ; remplissage de la caisse d'un autobus ; la pesée répétée d'un corps sur une balance automatique ; temps de vol d'un avion entre deux points ; tir d'un obus à partir d'une pièce d'artillerie.

- **Aléas :** On appelle "aléas", un "événement" qui dépend d'un "hasard" défavorable.
- **Hasard :** On appelle "hasard", l'imprévisibilité des "événements" qui sont soumis à la seule loi des "probabilités".
- **Évènement :** En statistique, on entend par "événement", une "éventualité" qui se réalise.
- **Éventualité :** On entend par "éventualité", un "fait" qui peut se réaliser.

I.2.3 Notions fondamentales

"Toute science qui développe la théorie générale d'un ensemble de phénomène fait usage d'un certain nombre de notions fondamentales". Dans la théorie des probabilités, de telles notions fondamentales de base existent et qui sont [7] :

- La notion d'évènement
- La probabilité d'un évènement
- La fréquence d'un évènement
- La certitude d'un évènement
- La possibilité ou l'impossibilité d'un évènement.

I.2.3.1. Evénement

Dans la théorie des probabilités, on entend par événement tout fait qui peut soit se réaliser soit ne pas se réaliser par une expérience. Exemple :

- "L'APPARITION DE FACE", Jet d'une pièce de monnaie;
- "L'APPARITION DE FACE 03 FOIS DE SUITE", Jet d'une pièce de monnaie 3 fois de suite;
- "L'ATTEINTE D'UNE CIBLE", lorsqu'on tire un coup;
- "LE TIRAGE D'UN AS" dans un jeu de cartes;
- "LA DETECTION D'UN OBJECTIF" dans un cycle d'exploration d'une station radar;
- "LA RUPTURE D'UN FIL" pendant une heure de fonctionnement d'un métier à tisser

I.2.3.2. Probabilité d'un événement

Dans la théorie des probabilités, on entend par probabilité d'un événement la mesure numérique de la possibilité effective de cet événement. Exemple:

- "l'événement A est plus probable que les événements B et C"
- "Les événements C, F et F sont moins probable"

La probabilité d'un événement, consiste à :

- comparer quantitativement les événements entre eux suivant leur possibilité de réalisation ;
- associer à chaque événement un certain nombre qui est d'autant plus grand que, la possibilité de réalisation est plus élevée.

I.2.3.3. Fréquence d'un événement [8]

La notion pratique de fréquence d'un événement est liée à la notion de probabilité d'un événement. C'est-à-dire :

- Evénement "fréquent" = événement qui se produit souvent → événement "plus probable"
- Evénement "peu fréquent" = événement qui se produit presque jamais → événement "peu probable"
- Evénement "non fréquent" = événement rare → événement "moins probable".

Il existe 2 définitions de la fréquence : une définition statistique et une définition temporelle. Selon la définition statistique, la fréquence est un évènement sans dimension représentant le quotient entre le nombre d'observations d'un type et l'effectif total d'une population :

$$fréquence = \frac{\text{nombre d'observations}}{\text{population totale}}$$

C'est alors une notion de statistique descriptive déterminée à partir d'une population observée. Il s'agit d'une grandeur sans dimension comprise entre 0 et 1 et qui converge avec la probabilité lorsque la population observée est suffisamment grande .

Selon la définition temporelle, la fréquence est le quotient entre le nombre d'observations d'un évènement et la période totale d'observation :

$$\text{fréquence} = \frac{\text{nombre d'observations}}{\text{temps total d'observation}}$$

Son unité est alors l'inverse de l'unité de temps considérée (h^{-1} , an^{-1}). L'inverse de la fréquence est alors la période de retour moyenne de l'évènement.

I.2.3.4. Certitude d'un évènement [5]

I.2.3.4.1. Evénement certain

Dans la théorie des probabilités, on entend par "évènement certain", un évènement qui doit "obligatoirement" se produire dans l'expérience. Dans la théorie des probabilités, on attribue à l'évènement certain, une probabilité égale à "1". Exemple : On est certain que le jet d'un dé n'amène pas plus de 06 points.

I.2.3.4.2. Evénement presque certain

Dans la théorie des probabilités, on entend par "évènement presque certain", un évènement dont la probabilité n'est pas exactement égale à "1", mais en est très proche.

I.2.3.4.3. Evénement presque impossible

Dans la théorie des probabilités, on entend par "évènement presque impossible", un évènement dont la probabilité n'est pas exactement égale à "0", mais en est très voisine.

I.2.3.4.4. Evénement impossible

Dans la théorie des probabilités, on entend par "*évènement impossible*", un évènement qui "ne peut pas " se produire dans l'expérience en question. Dans la théorie des probabilités, on attribue à l'évènement impossible, une probabilité égale à "0". L'évènement impossible est le contraire de l'évènement certain.

Remarques :

- Les deux limites extrêmes de l'échelle des probabilités sont : la probabilité de l'évènement impossible qui est égale à "0" et la probabilité de l'évènement certain qui est égale à "1".
- Dans la pratique on a souvent affaire non pas à des évènements impossibles et certains, mais à des évènements presque impossible et presque certain.

- Du point de vue de la théorie des probabilités, on peut indifféremment parler d'événements presque impossibles ou d'événements presque certains, car ils s'accompagnent toujours les uns les autres.
- Les événements presque impossible et presque certains jouent un rôle très important dans la théorie des probabilités. Toutes les applications pratiques sont basées sur ces deux notions.

I.2.3.5. Principe de certitude d'un événement [6]

Enoncé : " Si la possibilité d'un quelconque événement A dans une expérience E est suffisamment petite, on peut être presque certain que lorsque l'expérience E est effectuée une seule fois, l'événement A n'aura pas lieu".

En d'autres termes, si la probabilité de l'événement A dans une expérience donnée est très petite, on peut mener cette expérience comme si cet événement était impossible, c'est-à-dire sans tenir compte de la possibilité de son réalisation.

Exemple :

- Si la probabilité d'un événement dans une expérience est égale à 0.03 → on ne peut pas s'attendre à l'apparition de l'événement.
- Si la probabilité d'un événement dans une expérience est égale à 0.98 → on peut s'attendre à l'apparition de l'événement.
- Si la probabilité d'un événement dans une expérience est égale à 0.3 → on ne peut pas prévoir le résultat de l'événement.

L'un des problèmes essentiels de la théorie des probabilités est :

- La recherche des événements pratiquement impossibles (c'est-à-dire presque certains) permettant de prévoir le résultat de l'expérience
- La recherche des conditions pour lesquelles tel ou tel événement devient impossible (ou certain)

I.2.3.6. Variable aléatoire [5]

I.2.3.6.1. Définition

On appelle "variable aléatoire", une grandeur qui peut prendre des valeurs qui changent et varient d'une manière "*aléatoire*" et *imprévisible*. Exemple :

- le nombre de coups réussis parmi trois coups tirés ;
- le nombre d'appels journalier d'un central téléphonique ;
- la fréquence de face dans une partie de 10 coups.

I.2.3.6.2. Classification

Les variables aléatoires peuvent se classer en deux catégories : les variables aléatoires discrètes et les variables aléatoires continues :

1°. Variable aléatoire discrète

Les variables aléatoires discrètes, sont des variables qui peuvent prendre des valeurs discrètes, pouvant être énumérées d'avances. Exemple :

- Les valeurs prise par le nombre de coups réussis parmi trois coups tirés, sont 0, 1, 2,3
- Les valeurs prise par le nombre d'appels journalier d'un central téléphonique, sont : 1,2,3,4,..
- Les valeurs prise par la fréquence d'apparition de face dans une partie de 10 coups, sont 0 ; 0.1 ; 0.2; 1.0.

2°. Variables aléatoires continues

On dit qu'une variable aléatoire est continue, si dans un certain intervalle donné elle peut prendre des valeurs d'une manière continue. Les éventuelles valeurs de ces variables ne sont pas séparées les unes des autres. Exemple :

- L'erreur de pesée d'un corps sur une balance automatique ;
- La vitesse d'un avion à une altitude donnée
- Le poids d'une graine de blé prise au hasard.

I.2.3.7. Événement et variable aléatoire

I.2.3.7.1. Passage de l'événement à la variable aléatoire

Il est important de savoir que la théorie classique des probabilités opère principalement avec des événements, tandis que la théorie moderne de la probabilité opère principalement avec les variables aléatoires [6].

Le passage de la notion d'événement à la notion de variable aléatoire est très important.

- Soit une expérience dans laquelle un événement A peut apparaître ou ne pas apparaître.
- Au lieu de l'événement A on peut envisager une variable aléatoire X , tel que :

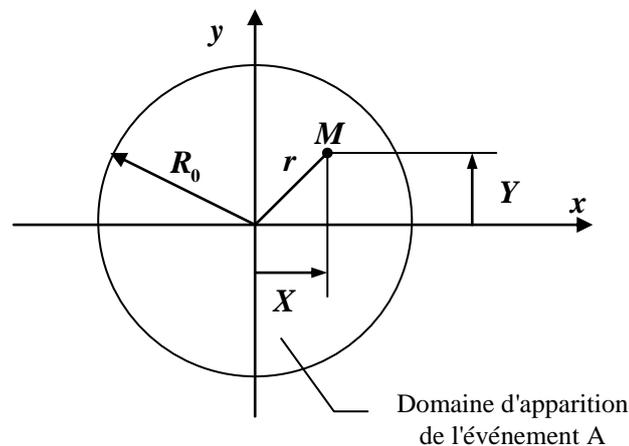
- $X = 1$ si l'événement A apparaît
- $X = 0$ si l'événement A n'apparaît pas

- Dans ce cas, la variable aléatoire X est discrète, car elle peut prendre que deux valeur possibles 0 et 1 . Elle est appelée variable indicatrice de l'événement A .

- Dans la pratique, au lieu d'utiliser des événements, il est plus commode d'utiliser des variables indicatrices qui leur sont associées.
- Dans la pratique, pour calculer la probabilité d'un événement il est plus commode de lui associer une variable aléatoire continue (ou un système de variables aléatoires continues)

I.2.3.7.2. Exemple

Soit donné un événement A , tel que son apparition équivaut à ce qu'un point aléatoire M de coordonnées (X, Y) se trouve à l'intérieur d'un cercle de centre O et de rayon R_0 : $C(O, R_0)$.



Pour que l'événement A ait lieu, il faut que le point M soit situé à l'intérieur du cercle et que les coordonnées X et Y qui deviennent des variables aléatoires doivent satisfaire à l'inégalité de l'équation d'un cercle : $X^2 + Y^2 < R_0^2$

Dans ce cas, la probabilité de l'apparition de l'événement A n'est rien d'autre que la probabilité de la satisfaction de l'inégalité. Cette probabilité peut être déterminée si l'on connaît les propriétés des variables aléatoires X et Y . Dans la théorie moderne des probabilités, il existe un lien étroit entre les événements et les variables aléatoires. Chaque fois qu'il est possible, il faut effectuer le passage d'un système d'événement à un système de variables aléatoires.

I.2.4 Calcul des probabilités [8]

I.2.4.1. Eléments fondamentaux

1°. Résultat symétrique

On appelle "résultat symétrique", le résultat fourni par une expérience artificielle.

Exemple : expérience du jet d'un dé.

- Si le dé est équilibré, il sera considéré comme un cube symétrique sur les faces duquel sont portés 1, 2, 3, 4, 5 et 6 points.

- Vu la symétrie du dé, on dit que tous les six résultats de l'expérience sont symétriques
- On attribue une probabilité de $1/6$ à l'apparition de chacune des faces.
- Le nombre $1/6$ caractérise les propriétés effectives du phénomène "jet de dé", à savoir la symétrie des résultats possibles de l'expérience.

2°. Système complet d'événements

On dit que plusieurs événements forment un "système complet d'événements" si, dans une expérience, un et un seul événement est réalisé à la fois.

Exemple :

- L'apparition de pile ou face lorsqu'on jette une pièce de monnaie ;
- Un coup porté ou coup raté lors d'un tir ;
- L'apparition de 1, 2, 3, 4, 5, 6 points lors d'un jet de dé ;
- Le tirage d'une boule blanche ou d'une noire lorsqu'on tire une boule d'une urne contenant par exemple 2 boules blanches et 3 boules noires ;
- Zéro, une, deux, trois ou plus d'erreurs d'impression dans une page d'épreuve ;
- De deux coups tirés au moins un coup atteint la cible ou un coup rate la cible.

3°. Événements incompatibles

On dit que des événements sont "incompatibles" si, dans une expérience, ils ne peuvent pas apparaître simultanément.

Exemple :

- l'apparition simultanée de pile et de face lorsqu'on jette une pièce de monnaie ;
- atteindre et rater simultanément une cible par un seul coup ;
- l'apparition de 1, 2, 3 points simultanément lors du jet d'un dé ;
- une, deux, trois pannes simultanées d'un dispositif technique pour 10 heures de fonctionnement ;

4°. Événements équiprobables

On dit que des événements sont "équiprobables" si, aucun événement n'est plus probable qu'un autre.

Exemple :

- l'apparition de pile et de face lorsqu'on jette une pièce de monnaie ;
- L'apparition de 1, 2, 3, 4, 5, 6 points lors d'un jet de dé ;

- Le tirage d'un carreau, d'un cœur, d'un trèfle ou d'un pique dans un jeu de carte ;
- Le tirage d'une boule portant le n° 1, 2, 3,.....lorsqu'on tire des boules d'une urne contenant 10 boules numérotées ;

5°. Les cas

On dit que plusieurs événements forment un "cas" si, les événements en question forment un système complet d'événements et sont incompatibles et équiprobables.

Exemple (jet d'une pièce de monnaie) :

- l'apparition de pile et de face lorsqu'on jette une pièce de monnaie ;
- L'apparition de 1, 2, 3, 4, 5, 6 points lors d'un jet de dé ;

6°. Système de cas

On dit qu'une expérience se réduit à un "*système de cas*" si, les cas en questions forment un système exhaustif de résultats symétriques, équiprobables et mutuellement incompatibles.

7°. Cas favorables

On dit qu'un cas est un "cas favorables" à un événement si, son apparition entraîne la réalisation de l'événement en question.

Exemple (jet d'un dé):

Si l'événement recherché est "l'apparition d'un nombre pair de points", les cas 2, 4 , 6 points constituent des cas favorables ou bien ils sont dit cas favorables. Les trois autres cas sont dit cas défavorables.

I.2.4.2. Méthodes de calculs

Dans le calcul des probabilités, on distingue deux méthodes de calcul : les méthodes directes et les méthodes indirectes [6].

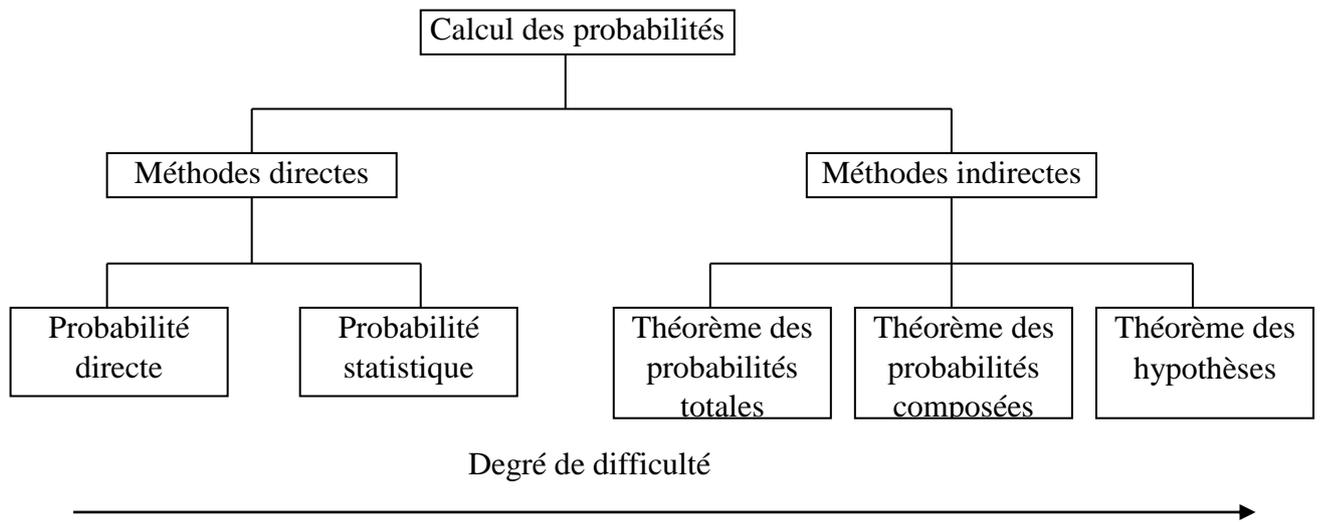


Figure I.2.1 Calcul des probabilités

I.2.4.2.1. Méthodes directes [8]

1° Probabilité directe

Soit donné :

E : Un événement aléatoire ;

F : Le nombre des cas favorables de l'événement *E* , tirés parmi les cas possibles ;

N : Le nombre de tous les cas possibles

a. Définition

Si une expérience se réduit à un système de cas, la probabilité de l'événement **E** dans cette expérience peut être estimée comme la proportion des cas favorables.

On définit la probabilité **P (E)** de l'événement **E** comme le rapport du nombre **F** de cas favorables au nombre **N** de tous les cas possibles :

$$P(E) = \frac{F}{N} \tag{1}$$

b. Caractéristiques

- le nombre de tous les cas favorables se trouve toujours entre **0** et **1** (**0** pour l'événement impossible et **1** pour l'événement certain).
- La probabilité de l'événement calculée par la relation (1) est toujours une fraction rationnelle propre ; tel que : $0 \leq P(E) \leq 1$
- La relation (1) est une formule de calcul direct des probabilités quand l'expérience se réduit à un système de cas.

2° Probabilité statistique

Dans la pratique, il existe une classe importante d'événements dont les probabilités ne peuvent pas être calculées par la relation (1), car toutes les expériences ne peuvent pas se réduire à un système de cas. Cependant, si ces expériences sont menées un grand nombre de fois de façon homogène, l'événement possédera une certaine probabilité appelée "probabilité statistique" qui indiquera la fréquence moyenne de ses apparitions. A cet effet, l'événement en question possédera une possibilité effective qui peut être calculée numériquement par sa "fréquence relative" en utilisant la relation (1)

a. Définition

Soit donné :

- E : Un événement aléatoire
- Une série de N d'expériences au cours de laquelle l'événement E peut ou ne peut pas apparaître
- F : le nombre des expériences de l'apparition de l'événement E dans les N expériences
- N : Nombre total des expériences.

"Si une expérience menée N fois ne peut pas se réduire à un ensemble de cas, la probabilité statistique de l'événement E dans cette expérience peut être estimée comme le rapport du nombre F des expériences où E est apparu, au nombre total N des expériences effectuées".

$$P^*(E) = \frac{F}{N}$$

b. Caractéristiques

- Si le nombre d'expérience n'est pas important, la fréquence de l'événement a un caractère aléatoire et peut notablement changer d'un groupe d'expérience à un autre.
- Les caractéristiques aléatoires qui interviennent dans chaque expérience isolée se trouvent mutuellement compensées et la fréquence tend à se stabiliser vers une certaine grandeur constante.
- La "stabilité des fréquences, vérifiées maintes fois par les observations et confirmé par toute l'expérience humaine est une des lois les plus caractéristiques des phénomènes aléatoires.
- Il existe un lien entre la fréquence d'un événement et sa probabilité, car lorsqu'on estime la probabilité d'un événement, on se base forcément sur sa fréquence.
- Lorsque le nombre d'expérience augmente, la fréquence de l'événement ne tend pas vers sa probabilité mais converge en probabilité vers ce nombre.

I.2.4.2.2. Méthodes indirectes [8]

1° Probabilité totale

a. Théorème

"La probabilité de la somme de deux événements E_1 et E_2 incompatibles est égale à la somme des probabilités des deux événements en question".

$$P(E_1 + E_2) = P(E_1) + P(E_2)$$

D'une manière générale :

$$P\left(\sum_{i=1}^N E_i\right) = \sum_{i=1}^N P(E_i)$$

b. Caractéristique

- Si les E_i événements forment un système complet d'événements incompatibles, la somme de leurs probabilités est égale à l'unité :

$$\sum_{i=1}^N P(E_i) = 1$$

- La somme des probabilités des événements contraires est égale à l'unité

$$P(E) + P(\bar{E})$$

2° Probabilité conditionnelle

a. Événements indépendants : On dit qu'un événement E_1 est "indépendant" de l'événement E_2 , si la probabilité de E_1 ne dépend pas de celle de E_2 .

b. Événements dépendants : On dit qu'un événement E_1 est "dépendant" de l'événement E_2 , si la probabilité de E_1 change selon la probabilité de E_2 .

c. Théorème

On appelle "probabilité conditionnelle" de l'événement E_1 relativement à l'événement E_2 et noté : $P(E_1 \setminus E_2)$, la probabilité de l'événement E_1 calculée sous condition que l'événement E_2 s'est réalisé.

- Si E_1 est indépendant de E_2 : $P(E_1 \setminus E_2) = P(E_1)$
- Si E_1 est dépendant de E_2 : $P(E_1 \setminus E_2) \neq P(E_1)$

3° Probabilité composée

a. Théorème

La probabilité du produit de deux événements est égale au produit de la probabilité de l'un deux multipliée par la probabilité conditionnelle de l'autre, calculée sous condition que le premier ait lieu

$$P(E_1.E_2) = P(E_1).P(E_2 | E_1)$$

b. Caractéristique

- Si E_1 est indépendant de E_2 , alors E_2 ne dépend pas de E_1

$$P(E_1 | E_2) = P(E_1)$$

$$P(E_2 | E_1) = P(E_2)$$

- La probabilité du produit de deux événements indépendants est égale au produit des probabilités de ces événements.

$$P(E_1.E_2) = P(E_1)P(E_2)$$

En général:

$$P\left(\prod_{i=1}^N E_i\right) = \prod_{i=1}^N P(E_i)$$

4° Formule des probabilités totales

Cette formule est un corollaire des deux théorèmes fondamentaux c'est-à-dire théorème des probabilités totales et du théorème des probabilités composées.

Soit:

- E un événement aléatoire
- $\{H_1, H_2, \dots, H_n\}$: un ensemble d'hypothèses formant un système complet d'événements incompatibles et ayant lieu simultanément avec E

"La probabilité de l'événement E se calcule comme la somme des produits de la probabilité de chacune des hypothèses par la probabilité de l'événement conditionnel à cette hypothèse"

$$P(E) = \sum_{i=1}^N P(H_i).P(E | H_i)$$

5° Formule de BAYES

Le théorème des hypothèses ou formule de Bayes, est un corollaire du théorème des probabilités totales et de la formule des probabilités totales conditionnelles.

$$P(H \mid E) = \frac{P(H_i)P(E \mid H_i)}{\sum_{i=1}^N [P(H_i) \cdot P(E \mid H_i)]}$$

Chapitre II

Présentation du
compresseur centrifuge
THERMODYN RC5S

II.1 : TECHNOLOGIE DU COMPRESSEUR THERMODYN RC5S

II.1.1 Introduction

Dans le domaine de l'expédition des hydrocarbures tel que le GNL, les équipements comme les turbomachines et en particulier les compresseurs centrifuges occupent une place centrale dans les installations dédiées à cette activité. Parmi les constructeurs présents au niveau international, THERMODYN. Avec son compresseur modèle RC5S. Ce dernier fait l'objet du présent chapitre. Dans un premier temps en va commencer avec des généralités sur la compression et les compresseurs. Dans un deuxième temps, en va présenter la technologie de compresseur centrifuge d'une manière générale, et en fin. En termine avec une présentation détaillée du compresseur THERMODYN RC5S.

II.1.2 La compression

La compression en générale, peut être imposée par la nécessité technique de déplacer une certaine quantité de gaz d'un système à une certaine pression, vers un autre système à une autre pression plus élevée. Cette opération a pour but de [9]:

- Faire circuler un gaz dans un circuit fermé.
- Produire des conditions favorables (de pression) pour des réactions chimiques.
- Envoyer un gaz dans un pipe-line de la zone de production vers l'utilisateur
- Obtenir de l'air comprimé pour la combustion.
- Récupérer du gaz (unités de G.N.L ou autres)

II.1.3 Définition des compresseurs

Les compresseurs sont des appareils qui transforment l'énergie mécanique fournie par une machine motrice en énergie de pression, est une machine qui doit assurer un débit de gaz il est soumis à des contraintes notamment de pressions ou liées à la nature du gaz qui influent sur le débit.

II.1.3.1 Différents types des compresseurs industriels

Les types de compresseurs les plus couramment rencontrés dans l'industrie pétrochimique. Il s'agit [10] :

II.1.3.1.1 Les compresseurs volumétriques

Dans cette famille de machines on distingue : (**Figure II.1.1**)

- Les compresseurs volumétriques alternatifs à piston, à membrane.
- Les compresseurs volumétriques rotatifs à palettes, à lobes, à vis, à anneau liquide.

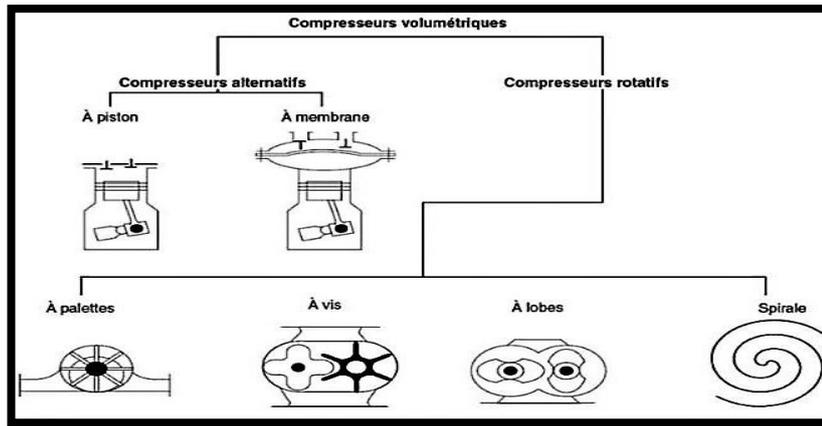


Figure II.1.1 : les compresseurs volumétriques [10]

II.1.3.1.2 Les Compresseurs dynamiques

Ces machines assurent la compression grâce à la force centrifuge, du au mouvement de rotation des roues munies d'aubes ou d'ailettes. (Figure II.1.2)

- Compresseurs centrifuges.
- Compresseurs axiaux.

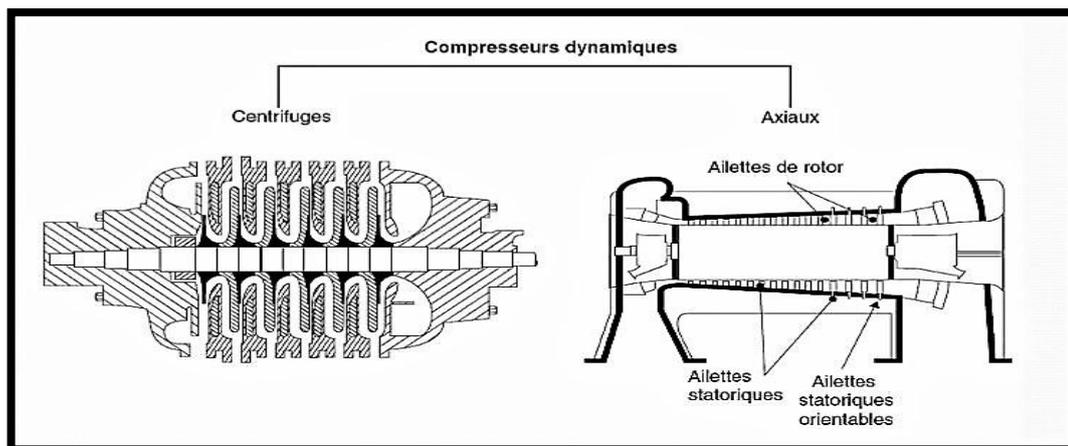


Figure II.1.2 : les compresseurs dynamiques [10]

II.1.4 Présentation générale d'un compresseur centrifuge

Ce sont des machines dans lesquelles l'échange d'énergie a lieu entre un rotor muni d'aubages tournant autour d'un axe et un fluide en écoulement permanent.

Un compresseur centrifuge est un dispositif de compression dynamique qui utilise la force centrifuge pour augmenter la pression du gaz d'un point à un autre, il tourne à vitesse élevée (de 6000 à 30000 tr/min environ) dans laquelle une ou plusieurs roues fournissent l'énergie nécessaire au transfert du gaz.

Lorsque cette énergie (de pression) doit être importante, il est nécessaire de prévoir plusieurs roues (multicellulaire) conduisant parfois à des solutions de machines à plusieurs étages pour des problèmes de température et de refoulement et de rendement, ou même à plusieurs corps pour résoudre des problèmes déstabilisés mécaniques que créeraient des rotors de trop grande longueur.

La puissance mise en œuvre dans ces machines (entre 2 et 30 MW) en font de gros consommateurs d'énergie. La recherche du rendement optimum fait que la vitesse variable est très souvent utilisée pour adapter le débit de la machine au procédé. La machine d'entraînement est alors, soit un moteur électrique à vitesse variable, soit une turbine à vapeur ou à gaz. Selon la vitesse de ces machines d'entraînement, il est possible qu'il y ait un multiplicateur de vitesse [11-12]. (Figure II.1.3)

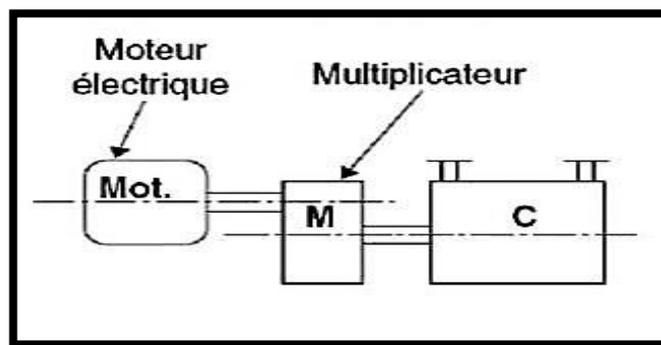


Figure II.1.3 : entraînement de compresseur par moteur électrique [13]

Selon le gaz véhiculé et sa pression, la construction du corps de compresseur peut être du type :

- A plan de joint horizontal ($P < 35/40$ bars, sauf si H_2).
- Barrel pour les fortes pressions ou s'il y a de l'hydrogène.

II.1.4.1 Conception des compresseurs centrifuges

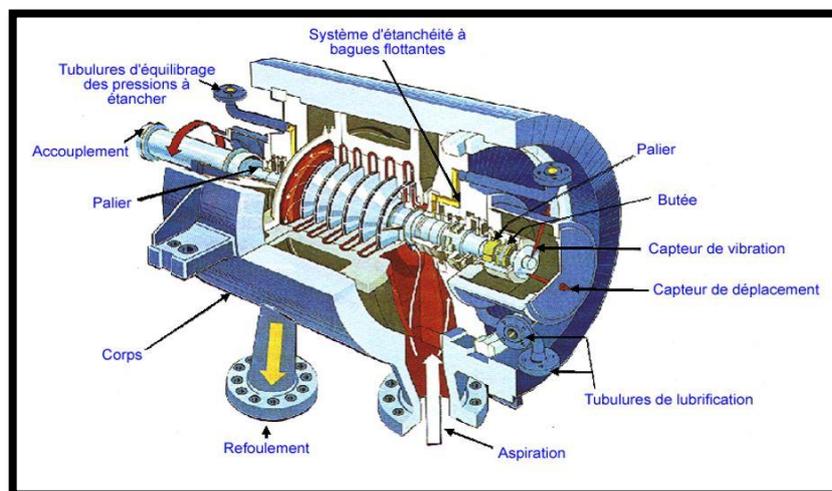


Figure II.1.4 : Compresseur centrifuge avec plan de joint vertical (Barrel) [11]

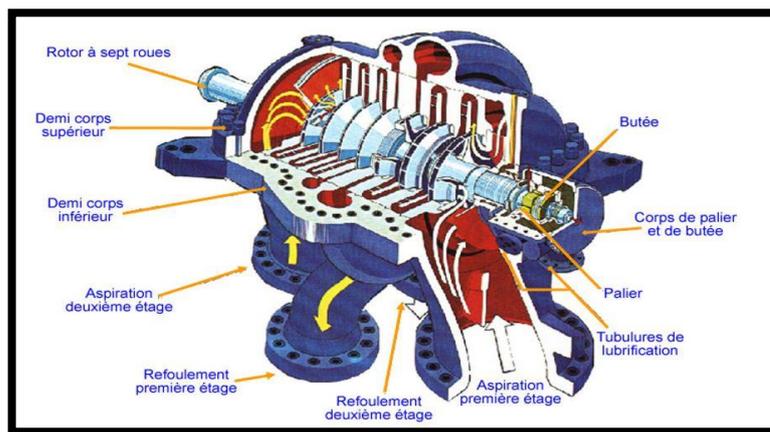


Figure II.1.5 : Compresseur centrifuge avec plan de joint horizontal et à deux étages [11]

II.1.4.1.1 Généralités sur le corps de compresseur

Le corps d'un compresseur doit remplir un certain nombre de fonctions [13]:

- Il reçoit toutes les pièces internes du compresseur : rotor avec ses paliers, sa butée, ses dispositifs d'étanchéité, stator avec les pièces constituant le diffuseur et le canal de retour, capteur de vibration ou de déplacement axial.
- Il assure la liaison avec le procédé par l'intermédiaire des brides d'aspiration et de refoulement.
- Il réalise la résistance mécanique de l'ensemble de la machine à la pression interne ainsi que l'étanchéité de l'enceinte intérieure vis à vis de l'atmosphère.
- Il assure le supporte et le positionnement du compresseur.

II.1.4.1.2 Conception des stators

1° Stator à plan de joint horizontal

Cette conception est utilisée pour des basses et moyennes pression entre 40 et 100 Bars. Le stator est réalisé en deux parties dont l'assemblage est assuré par un joint horizontal (contact métal sur métal). (**Figure II.1.6 - II.1.5**)

Cette configuration est adoptée pour les compresseurs axiaux et les compresseurs centrifuges bas et moyennes pression [11].

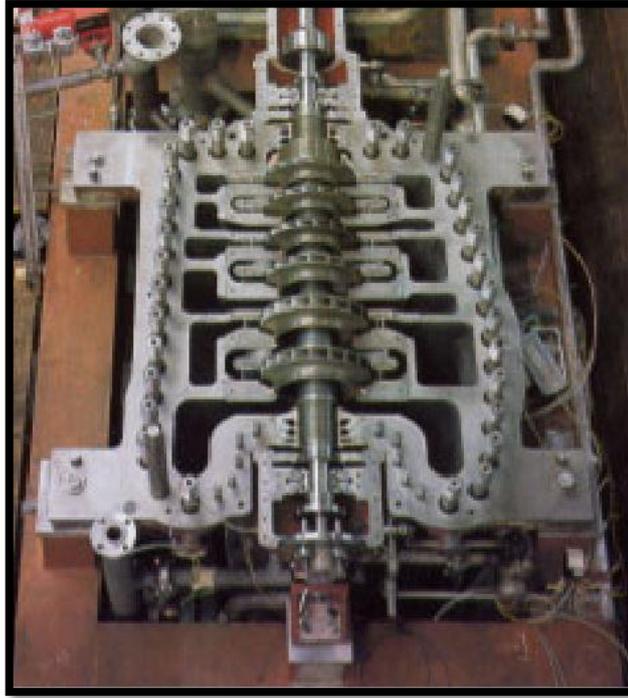


Figure II.1.6 : Stator à plan de joint horizontal [13]

2° Stator à plan de joint vertical (« barrel »)

Il est utilisé pour des pressions élevées. (Figures II.1.7 - II.1.4)

Cette configuration est adoptée pour les compresseurs centrifuges haute-pression



Figure II.1.7 : Stator à plan de joint vertical [11]

II.1.4.1.3 Le rotor

Le rotor, entraîné par un accouplement, est guidé en rotation par deux paliers placés généralement à ses deux extrémités. (Figure II.1.8)

Ces paliers peuvent être équipés de coussinets lisses ou de coussinets à patins mieux adaptés aux vitesses de rotation et charge élevées.

Plus rarement, mais en développement les paliers magnétiques font leurs apparitions

Le positionnement axial du rotor est assuré par une butée placée à une extrémité du rotor (généralement côté opposé à l'accouplement (COA)). Le plus souvent cette butée est constituée de patins venant s'appuyer sur un collet solide de l'arbre. (Figure II.1.9)

L'effort axial appliqué à la butée provient de la différence de pression sur chaque roue et d'éventuelles poussées dues à l'accouplement.

Pour permettre un équilibrage convenable du mobile dans le stator, il peut exister un collecteur appelé ligne d'équilibrage

Il peut être considérablement diminué par une disposition judicieuse des roues (roues doubles flux ou roues dos à dos) ou par l'utilisation d'un piston ou tambour d'équilibrage



Figure II.1.8 : Rotor avec roues [11]

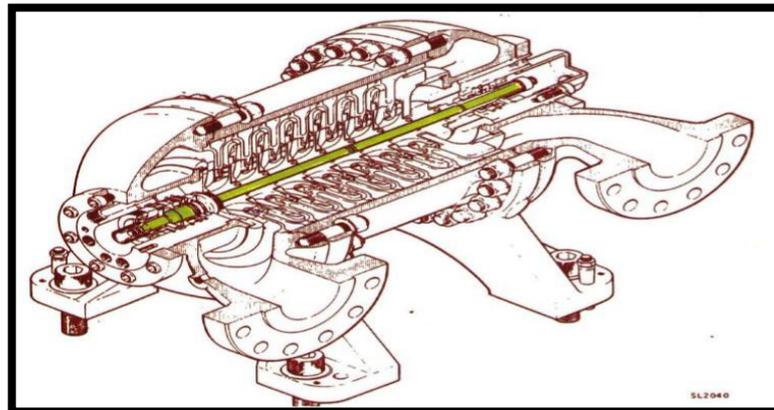


Figure II.1.9 : Positionnement du rotor [13]

II.1.4.1.4 Les roues centrifuges

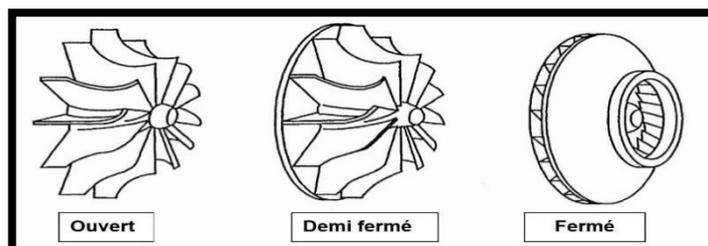


Figure II.1.10 : Les différents types de roues [11]

- La roue ouverte est utilisée pour les débits moyens et les hautes pressions de refoulement, elle est seulement utilisée dans les compresseurs à un étage.
- La roue demie fermée est utilisée pour les grands débits. Ce type de roue peut aussi être utilisé pour équiper les compresseurs multi étages ou simple étage.
- La roue fermée est utilisée principalement dans les compresseurs multi étages.

Les roues permettent de comprimer la quantité voulue de gaz aux conditions de pression d'opération. Ces roues sont montées sur un arbre, l'ensemble constituant le rotor dont la vitesse de rotation peut dépasser 20 000 t/min [11].

II.1.4.2 Fonctionnement d'un compresseur centrifuge

Augmentation de pression et taux de compression créés par une cellule :

L'augmentation de pression est assurée par les roues, les diffuseurs et les canaux de retour. La vitesse de rotation de la roue soumet le gaz à une force centrifuge qui se traduit par une augmentation de vitesse, de pression et de température dans la roue. Le diffuseur puis le canal de retour permettent de ramener le gaz dans la roue suivante en gagnant encore de la pression par rapport à celle de sortie de roue par ralentissement de la vitesse du gaz [11]. (**Figure II.1.11**)

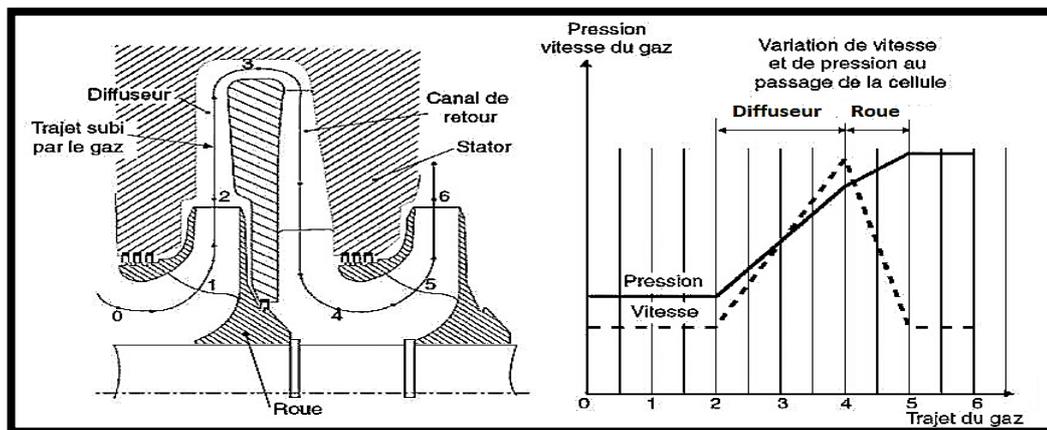


Figure II.1.11 : Passage du gaz et augmentation de pression à travers une cellule. [13]

Le taux de compression par cellule est toujours assez faible. Il augmente lorsque :

- La vitesse de rotation augmente
- La masse molaire du gaz augmente
- La caractéristique thermique du gaz (k) augmente
- La température d'aspiration diminue
- Le rendement de la machine augmente.

Pour comprimer un gaz à un taux de compression donné, il y a toujours intérêt à avoir une vitesse périphérique élevée :

$$V_p = \frac{\pi D N}{60}$$

Où :

V_p : vitesse périphérique (m/s)

D : diamètre de roue (mm)

N : vitesse de rotation en (tr/min)

Afin de réduire le nombre de cellules et donc le coût.

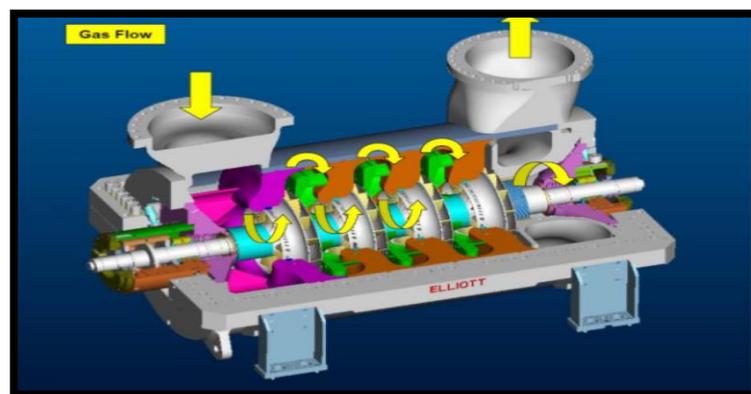


Figure II.1.12 : écoulement de gaz dans un compresseur centrifuge

II.1.5 Le compresseur THERMODYN RC5S [14]

Le compresseur RC5S est un compresseur du type "split" à un seul étage de compression, avec corps ouverts horizontalement, (**Figure II.1.13**)

Les corps ouverts horizontalement, constituent évidemment des corps unis sur le plan de joint horizontal. Ils sont utilisés pour des pressions de fonctionnement restant au-dessous de 60 bars. Les tubulures d'aspiration et de refoulement et celles intermédiaires, ainsi que, les tuyauteries de l'huile de graissage et tous les autres raccords du compresseur avec le reste de l'installation se font normalement moyennant le demi-corps inférieur. Grâce à ce système il suffit d'enlever les boulons de liaisons le long du plan de joint horizontal pour pouvoir soulever le demi-corps supérieur et accéder facilement à tous les organes internes du compresseur tels que rotor, diaphragmes et joints à labyrinthe, les différents dessins techniques sont dans les annexes A.



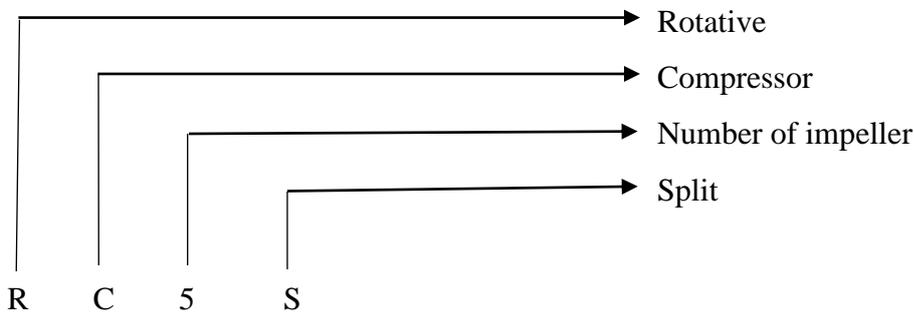
Figure II.1.13 : Compresseur RC5S

II.1.5.1 Identification des modèles

En matière d’identification des équipements au niveau de l’entreprise où s’est déroulé notre stage, la nomenclature adoptée pour les équipements en place est la suivante :

- Compresseur RC5S de type split pour basse pression.

La signification de symbole de code du compresseur RC5S est la suivante :



II.1.5.2 Tableau de performance de compresseur THERMODYN RC5S

Tab II.1.1 performance de compresseur

Type	RC5S (5 roues)
Puissance	4075 kw
Vitesse nominale	9701tr/mn
Vitesse critique	4400tr/mn
Pression d’aspiration	3.6bar
Pression de refoulement	21bar
Débit d’aspiration	16500m ³ /h
Densité de gaz	0.834

II.1.5.3 Constitution du compresseur centrifuge THERMODYN (RC5S)

II.1.5.3.1 Corps ouverts horizontalement :

La coquille est obtenue par forgeage afin de rendre le matériau plus homogène et donc plus résistant, à la considération des pressions élevées auxquelles ces compresseurs travaillent. Les deux corps et les brides d'aspiration et de refoulement sont traditionnellement obtenus par fusion. Le choix du matériau dépend de la pression et de la température de fonctionnement, des diminutions du gaz à traiter et des limites imposées par les normes IFP (institut français de pétrolier) (**Figure II.1.14**).



Figure II.1.14 : demi-corps inférieure de compresseur RC5S

II.1.5.3.2 Diaphragme :

L'ensemble des diaphragmes, monté au tour de l'ensemble du rotor, constitue le composant statorique des étages de compression.

Les enceintes de diffusion sont constituées par des passages annulaires, c'est à travers les diaphragmes que l'énergie cinétique à la sortie des roues ou impulseurs est convertie en pression.

Les passages annulaires forment également les canaux des rotors qui acheminent efficacement, le gaz dans l'œil des roues ou impulseurs.

Les diaphragmes sont divisés selon un plan médian horizontal et sont montés à l'intérieur d'une demi-coquille, la coquille lui-même divisé selon un plan médian horizontal formant ainsi deux paquets séparés. (**Figure II.1.15**)

Pour de très hautes pressions, il est nécessaire de raidir la structure de l'ensemble des diaphragmes ; on a recours alors à une double caisse en acier forgé.

La position des demi- diaphragmes supérieurs dans la moitié supérieure du demi- coquille est effectuée au moyen de vis de blocage.

Les étanchéités à labyrinthe sont installées dans les diaphragmes à proximité de tous les points internes de dégagement dans le but de minimiser les fuites de gaz provenant des zones de refoulement et d'aspiration des roues ou impulseurs.



Figure II.1.15 : Diaphragme

II.1.5.3.3 Rotor :

Le rotor se compose d'un arbre sur lequel sont installés les impulseurs et les bagues d'écartement. Ces deniers sont montés à chaud sur l'arbre. Elles positionnent les impulseurs en direction axiale et protègent les sections de l'arbre, qui se trouvent entre les impulseurs, du contact avec le gaz. (**Figure II.1.16**)

L'impulseur est la partie du compresseur centrifuge destinée à faire augmenter la vitesse du gaz. Les impulseurs sont du type fermé avec les aubages tournés vers l'arrière. Ils sont montés à chaud et clavetés à l'arbre. Avant d'être monté sur l'arbre, chaque impulseur est soumis à un équilibrage dynamique et à un essai de vitesse 15 % supérieure à la vitesse maximale continue. Pendant le fonctionnement du compresseur, le rotor est soumis à une poussée axiale dirigée vers le côté aspiration cette poussée est produite par la différent pression agissant sur le couvercle et le disque des impulseurs. La poussé est presque totalement équilibrée par le tambour d'équilibrage.



Figure II.1.16 : Rotor

1° Arbre :

L'arbre est constitué d'une partie centrale, à diamètre constant, où sont montées les roues et les douilles intermédiaires et de deux extrémités aux diamètres opportunément réduits où travaillent les paliers et les étanchéités d'extrémités. (Figure II.1.17)

L'arbre est dimensionné de manière à avoir la plus grande rigidité possible (en réduisant l'entraxe et en augmentant le diamètre) pour obtenir un meilleur comportement à la flexion.

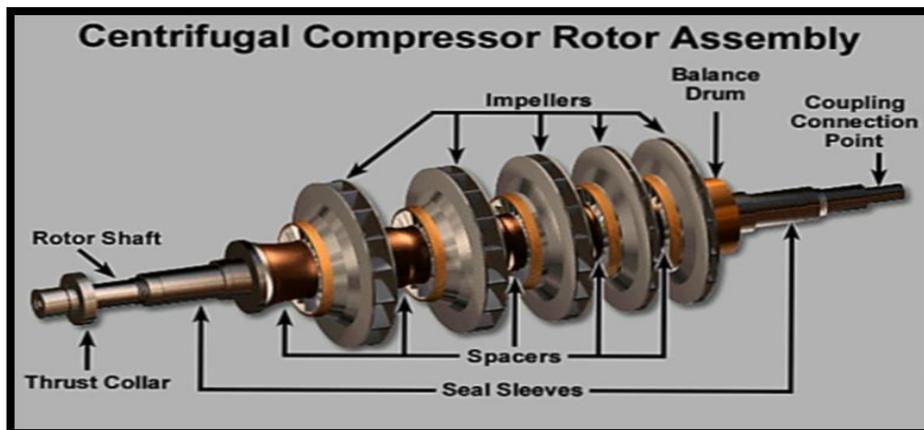


Figure II.1.17: Partie rotor inclue l'arbre (Rotor Shaft) [10]

2° Roue :

Les roues sont frettées sur l'arbre, des languettes ayant la fonction de transmettre le couple sont prévues sous les roues. (Figure II.1.18)

Pour leur construction, il faut un acier ayant des propriétés mécaniques élevées mais à faible pourcentage de carbone pour obtenir une soudure de bonne qualité des aubes

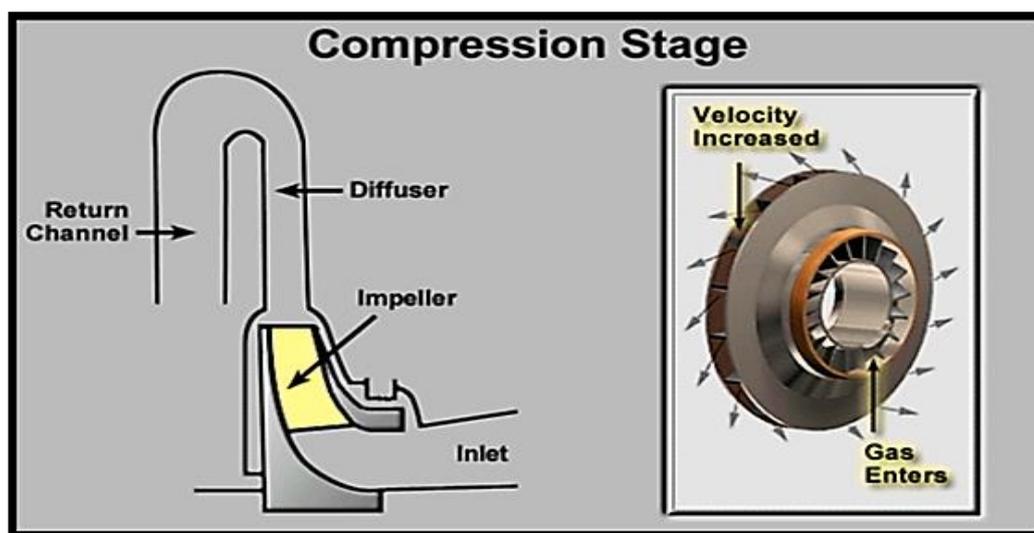


Figure II.1.18 : Roue [10]

3° Tambour d'équilibrage (RC5S) :

Le rotor du compresseur centrifuge est soumis à une poussée axiale dirigée du côté de l'aspiration, imputable aux différents efforts agissant sur les surfaces externes du couvercle et du moyeu de chaque roue. (Figure II.1.19)

La poussée est en grande partie équilibrée par le tambour d'équilibrage qui est un disque gabarié monté sur l'extrémité de l'arbre adjacent à la roue du dernier étage. Le tambour d'équilibrage et son étanchéité à labyrinthe forment, avec l'étanchéité à labyrinthe en bout d'arbre, la chambre d'équilibrage.

Soumettant la chambre d'équilibrage à une pression plus basse (approximativement égale à la pression d'aspiration), on crée un différentiel de pression en sens opposé aux roues. Ceci est obtenu en reliant cette chambre à l'aspiration du compresseur au moyen d'une tuyauterie de gaz d'équilibrage.

Le tambour a été conçu de façon à réduire considérablement la poussée axiale sans pour autant l'équilibrer entièrement. La poussée résiduelle est absorbée par assurant ainsi l'immobilité du rotor en direction axiale, Le tambour d'équilibrage est fixe l'arbre. L'ensemble des roues, entretoises et tambour est fixé sur l'arbre au moyen d'un collier de serrage. Après avoir monté le tambour, le rotor sera à nouveau soumis à l'équilibrage dynamique.



Figure II.1.19 : Tambour d'équilibrage

4° Accouplement d'entraînement

L'accouplement sert à transmettre la puissance de la machine motrice au compresseur. L'accouplement peut être direct ou bien au moyen d'un multiplicateur de vitesse et cela suivant le type d'entraînement. En général, on emploie des accouplements dentés qui peuvent être à graissage continu ou à remplissage. Dans la transmission d'un couple, un accouplement denté peut produire une poussée axiale. (**Figure II.1.20**)

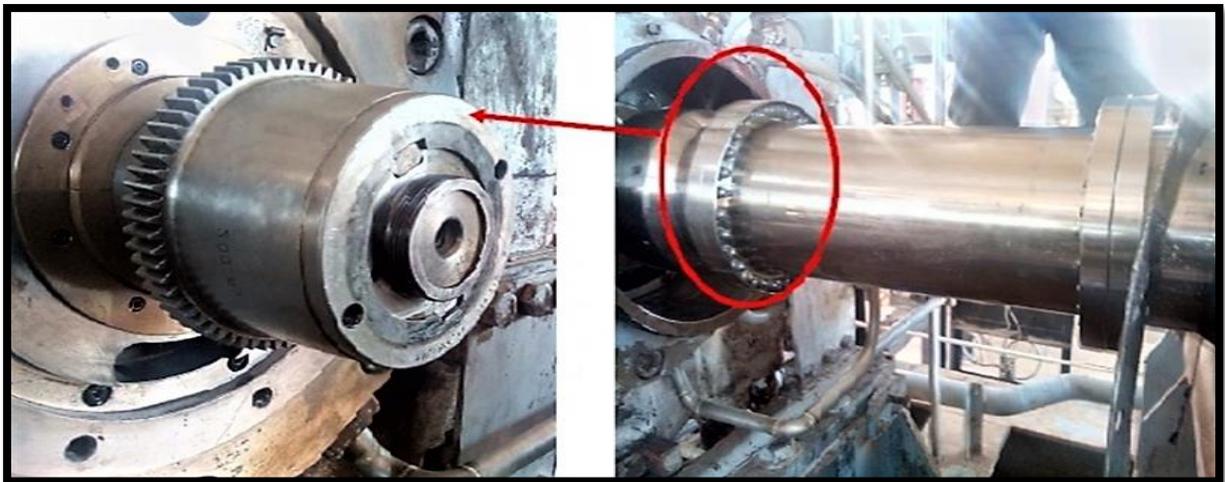


Figure II.1.20 : Accouplement d'entraînement

5° Collet du palier de butée :

Le collet est fait en acier au carbone type C40, il est monté hydrauliquement par ajustement forcé. (**Figure II.1.21**)

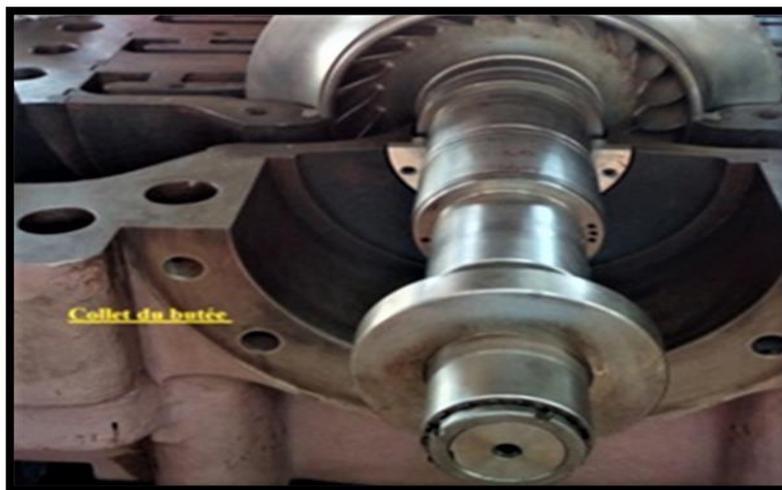


Figure II.1.21 : Collet de butée

6° Douilles intermédiaires :

Les douilles intermédiaires sont des manchons positionnés entre les roues ; elles ont un double but : le premier est celui de protéger l'arbre contre les fluides corrosifs, l'autre est celui de fixer la position relative d'une roue par rapport à l'autre.

7° Douilles sous les garnitures d'étanchéités à huile :

Les douilles sous les garnitures d'étanchéité à huile sont en acier au carbone revêtu de matériau de dureté élevée. Les douilles sont employées pour protéger l'arbre contre la corrosion et les rayures éventuelles et en outre, elles peuvent être remplacées facilement.

II.1.5.3.4 Palier :

1° Palier a butée :

Le palier a butée, monté sur l'une des extrémités du corps, est à double action. Il est logé sur les deux côtés du collet de butée du rotor. (**Figure II.1.22**). Il est conçu de façon à absorber la poussée axiale agissant sur le rotor qui n'est pas entièrement équilibrée par le tambour d'équilibrage.

Il est muni d'une bande élastique de raclage d'huile. A l'extérieur du palier est montée une bague ayant un trou calibré dont le but est de régler la qualité d'huile pour le graissage. Les limites dans le choix du palier à employer sont imposées par la vitesse périphérique du collet qui ne doit pas dépasser 90m/s et par la charge sur le palier, qui ne peut pas dépasser 50 % de la valeur maximal déclarée par le constructeur.

Du réservoir, l'huile est ensuite réintroduite dans le système ; celle sortie du coté haute pression est purgée par des purgeurs automatiques Les garnitures d'étanchéité à huile sont

constituées d'une mince couche de métal blanc, ou de métal blanc sans cuivre lorsque ce dernier est incompatible avec le gaz comprimé.

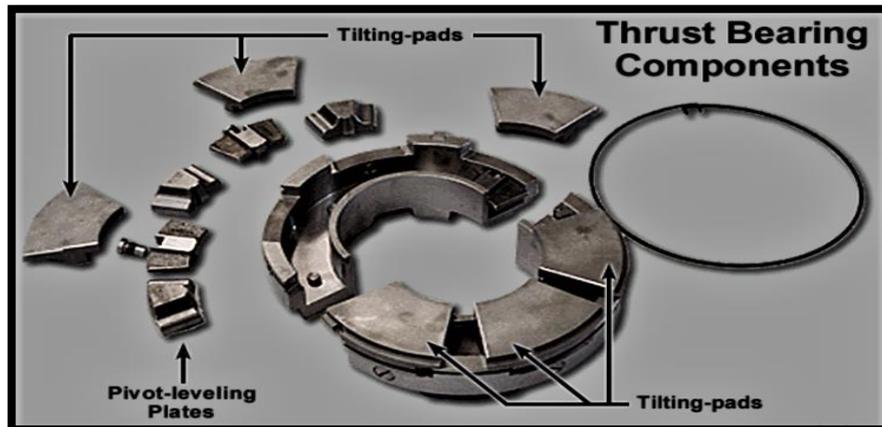


Figure II.1.22 : Palier à butée [10]

2° Paliers porteurs :

Les paliers porteurs sont du type à patin oscillants et à lubrification forcée. L'huile sous pression arrive aux paliers radialement et passe à travers des orifices pour lubrifier les patins et les taquets. L'huile est ensuite évacuée latéralement. Les patins porteurs sont réalisés en acier revêtu de métal blanc. Ils sont solidaires des taquets en acier et sont en place dans des logements formés par le carter et par deux bagues d'étanchéité d'huile. (**Figure II.1.23**). Les patins peuvent osciller dans le carter aussi bien dans le sens radial que dans le sens axial afin d'atténuer au maximum les vibrations radiales du rotor. La rotation des patins dans le carter est bloquée par des goujons qui dépassent des vis fixées sur le carter.

Le palier est axialement positionné sur la bride de tête, ou sur le corps du compresseur grâce à des vis.



Figure II.1.23 : Palier porteur

II.1.5.3.5 Étanchéités :

Les étanchéités situées aux deux extrémités de l'arbre, ont pour but d'éviter ou de réduire au minimum la sortie du gaz comprimé ou l'entrée de l'air dans le corps du compresseur. Cette étanchéité peut être de trois types : à labyrinthe, à film d'huile ou mécanique.

1° Garniture a labyrinthe :

La réduction au minimum des fuites vers l'extérieur est obtenue par des garnitures à labyrinthe, qui sont construites en alliage léger ou matériau résistant à la corrosion, de dureté inférieure à celle de l'arbre pour éviter des endommagements de ce dernier en cas de contacts accidentels. Les garnitures peuvent être extraites aisément. Le nombre des lames et le jeu, dépendent des conditions de fonctionnement. (**Figure II.1.24**). Les garnitures à labyrinthe sont en alliage d'aluminium recuit (70-80 BRINELL). Si l'aluminium n'est pas compatible avec la corrosivité du gaz, on utilise des aciers inoxydables de la série 18% Cr - 8 % Ni. De toute les manières il n'y pas de limites à l'emploi d'autres matériaux tels que le bronze, etc.

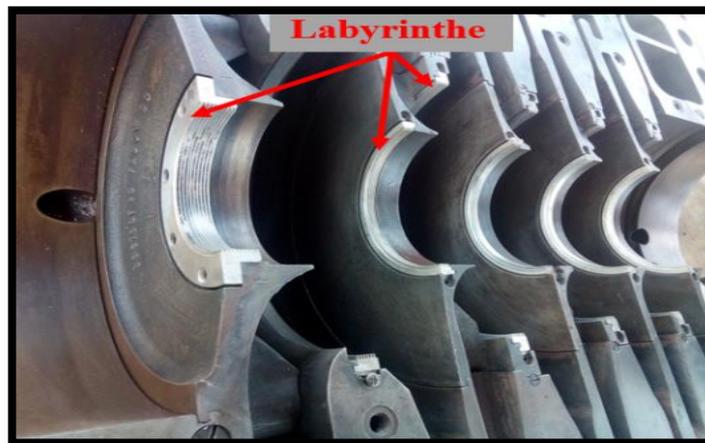


Figure II.1.24 : Garniture a labyrinthe

2° Garnitures d'étanchéités d'huile :

Les garnitures d'étanchéité à huile sont constituées de deux anneaux flottants l'un du côté haute pression (H.P) et l'autre du côté basse pression (B.P), revêtus à l'intérieur de métal anti frottement. L'huile d'étanchéité, ayant une pression légèrement supérieure à celle du gaz, arrive dans l'espace annulaire compris entre les deux bagues et passe dans l'espace annulaire laissé par le jeu entre les bagues et l'arbre.

II.1.5.3.6 Autres éléments :

1° Détecteurs de mouvement axial :

Des sondes électroniques de proximité peuvent être utilisées pour détecter et indiquer un mouvement axial de l'arbre. Calibrés correctement, les composants du détecteur et afficheur peuvent indiquer des mouvements axiaux de l'ordre de (0.025mm). La partie affichage peut être connectée à une alarme ou à un système d'arrêt d'urgence (ou aux deux) pour prévenir un possible affaiblissement des coussinets. L'alarme doit être réglée à partir de sa position en poussée à un mouvement de rotor de (0.127mm) vers le détecteur. La coupure d'urgence doit être réglée pour un mouvement de (0.254mm).

2° Détecteurs de vibrations :

Des sondes électroniques de proximité peuvent être aussi utilisées pour détecter les vibrations radiales de l'arbre. Le point de déclenchement de la coupure est fixé à une valeur donnant une grande marge de sécurité contre un possible endommagement. Un système retardateur de déclenchement est généralement incorporé afin d'éviter des coupures intempestives lors du démarrage. Lorsque le rotor accélère, en passant par des vitesses critiques, pour atteindre sa vitesse nominale.

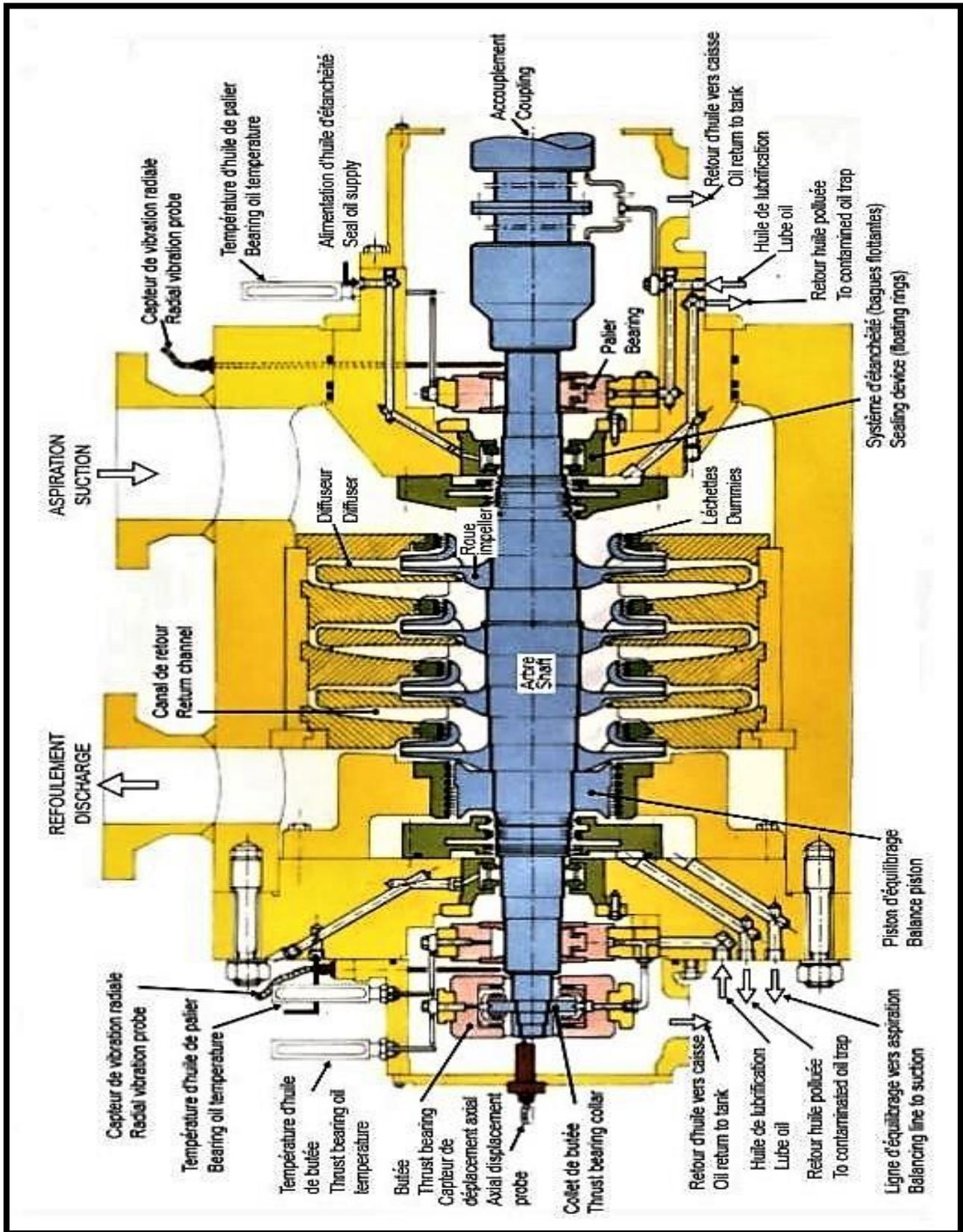


Figure II.1.25 : coupe longitudinale d'un compresseur centrifuge [13]

II.1.6 Système de lubrification et d'étanchéité

II.1.6.1 Circuit de l'huile de graissage :

Le bon fonctionnement du compresseur nécessite l'apport d'une quantité d'huile suffisante pour évacuer la chaleur dégagée par frottement et pour éviter le contact métal, dont le but d'éviter l'usure des paliers et de la butée.

Le système d'huile de lubrification est composé d'un réservoir, d'un filtre, d'un aérorefrigérant, d'une vanne de régulation de pression et d'autres accessoires de sécurité et de régulation.

(Figure II.1.26)

L'huile est aspirée du réservoir et envoyée dans le circuit de lubrification par deux pompes, une est principale et l'autre auxiliaire montées en parallèle, avec une soupape de surpression, et entraînées par des moteurs électriques. L'huile refoulée est refroidie par un aérorefrigérant équipé d'une vanne régulatrice de température qui a pour rôle de maintenir la température d'huile en aval de l'aérorefrigérant à 60°C.

A la sortie de l'aérorefrigérant l'huile passe par un filtre (pour ne maintenir en circulation que l'huile propre) puis par une vanne autorégulatrice de pression qui sert pour contrôler la pression d'huile de lubrification des paliers de l'ensemble (moteur- compresseur), et de la maintenir à une pression de l'ordre de 2,5 bars.

A la sortie de compresseur, l'huile est évacuée par gravité jusqu'au réservoir d'huile de lubrification dans une position loin de l'aspiration des pompes.

Un réservoir de secours en cas d'urgence est monté à trois (03) mètres au-dessus de l'axe du compresseur, dont sa taille est calculée pour assurer l'alimentation d'huile suffisante en cas de défaillance dans le système principal d'huile de lubrification ou en cas de coupure de courant électrique.

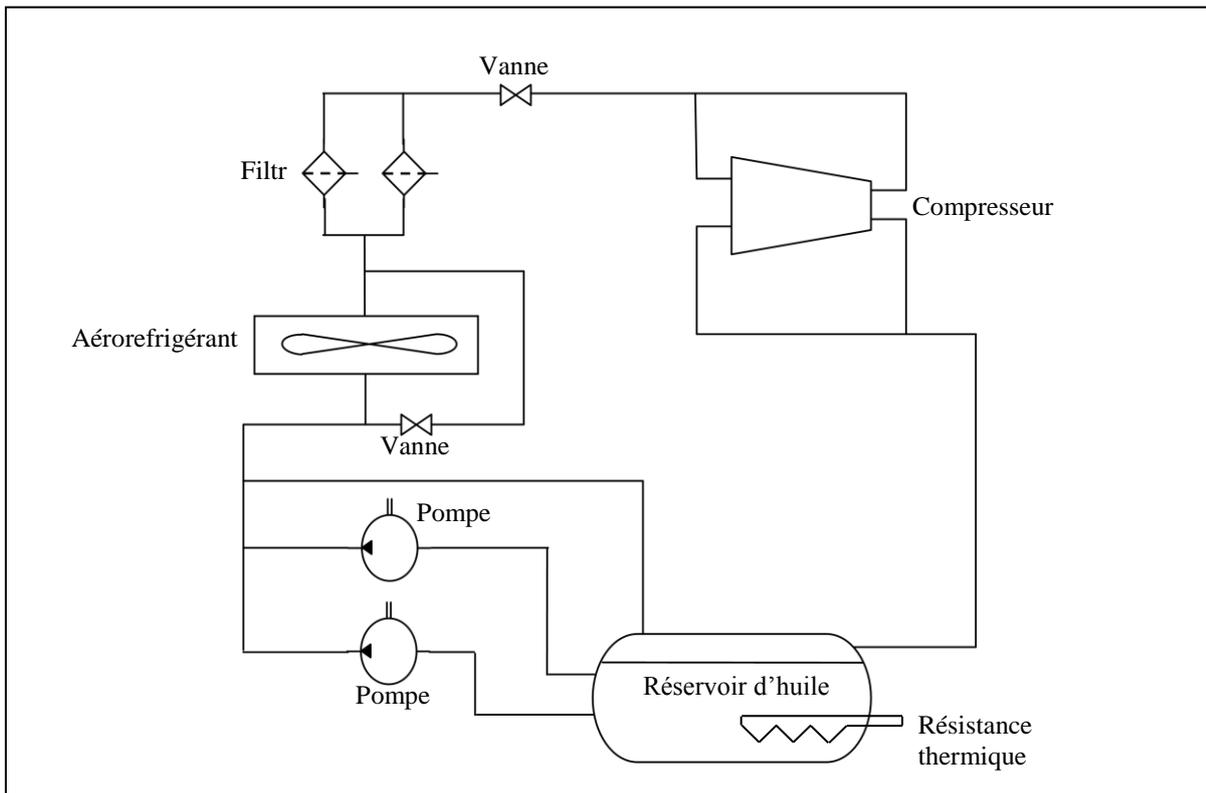


Figure II.1.26 : Circuit de lubrification d'un compresseur centrifuge

II.1.6.2 Système d'étanchéités en bout d'arbre du compresseur :

Les étanchéités placées aux deux extrémités de l'arbre (rotor) empêchent la sortie du gaz du corps du compresseur. L'étanchéité est assurée par une série d'étanchéité à labyrinthe (étanchéité interne) et une étanchéité à barrage d'huile (étanchéité externe).

II.1.6.2.1 Etanchéité interne :

Pour empêcher le retour du gaz entre les divers étages ainsi que le retour de gaz se trouvant au refoulement de chaque roue vers l'aspiration de celle-ci, on utilise des dispositifs d'étanchéité à labyrinthe, constitué par des anneaux composés de deux parties comprenant des lchettes (lames) en forme de couteau et qui sont positionnées très près de la périphérie du rotor.

Les anneaux d'étanchéité sont en alliage léger, résistant à la corrosion, de dureté inférieure à celle de l'arbre et des roues afin d'éviter d'endommager ceux-ci en cas de contact accidentel.

(Figure II.1.27)

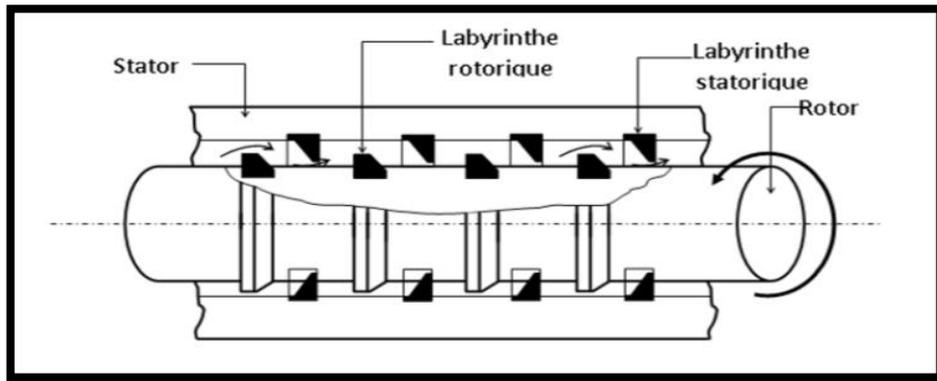


Figure II.1.27 : Etanchéité à labyrinthe en bout d'arbre [10]

II.1.6.2.2 Etanchéité externe :

Pour empêcher la sortie du gaz vers l'extérieur à travers les deux extrémités du compresseur, on dispose d'un système d'étanchéité à barrage d'huile. L'étanchéité à barrage d'huile est constituée par deux ou plusieurs bagues en acier dont la partie intérieure est un métal antifricction, montées avec un jeu minimum sur l'arbre. Les bagues flottent dans leurs logements et sont libres de suivre les mouvements en sens radial de l'arbre. Les deux bagues extérieures placées, l'une en face de l'autre, sont maintenues écartées par une série de ressorts plats de façon à fermer une chambre annulaire dans laquelle l'huile d'étanchéité est injectée légèrement supérieure à celle du gaz de la chambre immédiatement en amont de la bague interne. L'huile destinée aux étanchéités du compresseur est prélevée soit du collecteur d'huile de lubrification, soit d'un système d'huile indépendant dit système d'huile d'étanchéité. (Figure II.1.28)

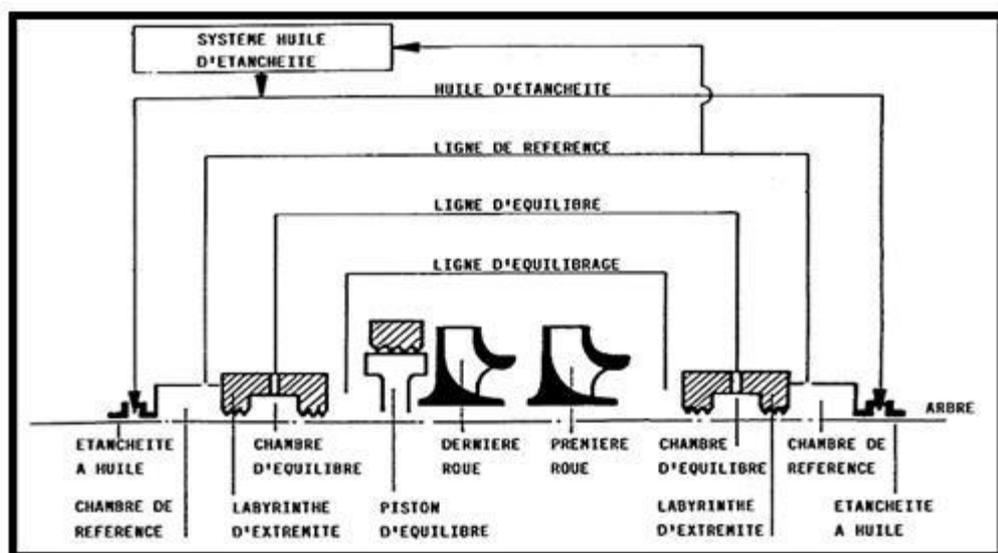


Figure II.1.28 : système d'huile d'étanchéité [10]

II.2 MAINTENANCE DE COMPRESSEUR CENTRIFUGE THERMODYN RC5S

II.2.1 Introduction

Sachant que le compresseur THERMODYN RC5S figure parmi les équipements les plus critiques dans l'unité de compression, il nécessite une politique de maintenance rigoureuse pour assurer une production continue. Dans ce qui suit, en va présenter un rappel sur la maintenance dans une entreprise industrielle et ses objectives. Ensuite on fera appel à la méthode sélection multicritères pour décider sur la politique à adopter pour la maintenance du compresseur. En fin, un panorama sera donné sur les différentes activités appliquées au compresseur.

II.2.2 La maintenance dans l'entreprise

Pendant longtemps, la maintenance est considérée par les gestionnaires plus comme une fatalité qu'un ensemble d'activités ayant pour but d'accomplir toutes les tâches nécessaires pour que l'équipement soit maintenu ou rétabli dans un état spécifié ou en mesure de [15-16] :

- Permettre une exécution normale des opérations dans les meilleures conditions de coûts, de sécurité et de qualité (le cas de la production).
- Obtenir un service dans les meilleures conditions de confort et de coût (c'est le cas des services vendus en général mais surtout des transports, des hôpitaux...)

Auparavant, maintenir consistait à dépanner, réparer, réaliser des opérations préventives dont le but principal est d'assurer le fonctionnement de l'outil de production. D'une manière globale maintenir c'est subir.

Outre cela, le progrès technologique ainsi que l'évolution de la conception de la gestion des entreprises ont fait que la maintenance soit devenue de nos jours une fonction importante de l'entreprise dont la direction exige l'utilisation de technique précise et dont le rôle dans l'atteinte des objectifs de l'entreprise est loin d'être négligeable.

Dans le secteur hydrocarbures, la fonction maintenance est l'affaire de tous et doit être omniprésente parallèlement dans tous les services de production. Elle est devenue un enjeu économique considérable pour tous les pays qui souhaitent disposer d'outils de production disponibles, performants. Les statistiques fournies par IFP (Figure II.2.1) montrent que la maintenance représente plus de 20% des coûts opératoires d'une installation (2^{ème} dépense après l'énergie).

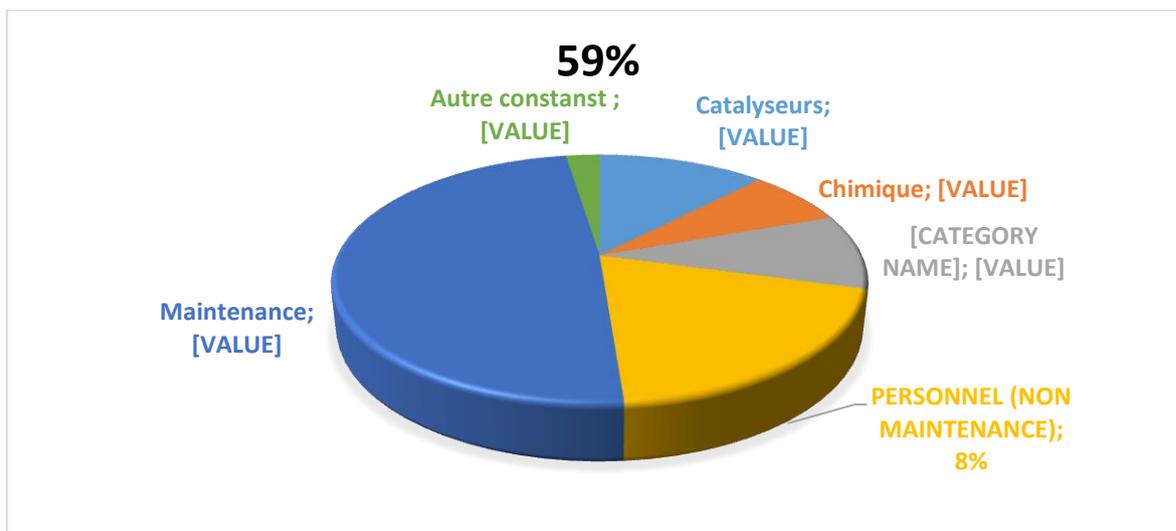


Figure II.2.1 : Répartition des coûts opérationnels d'une usine pétrochimique

II.2.3 Objectifs de la maintenance dans l'entreprise

La fonction maintenance jouée un rôle de plus en plus centrale dans l'entreprise, elle contribue à augmenter la productivité et diminue les coûts engendrés par les arrêts de production causés par les pannes, assurer un bon état des équipements et des installations elles tendent à occuper une place prépondérante dans l'entreprise grâce à ses objectifs qui sont [9] :

- Assurer de la production prévue
- Respecter les délais prévus
- Maintenir la qualité du produit fabriqué
- Rechercher le coût optimum
- Améliorer la sécurité du travail

II.2.4 Equipements critiques dans une entreprise

Pour une entreprise industrielle, les équipements critiques sont généralement sélectionnés à la base des points suivants :

- Leurs défaillances affectent la sécurité de l'installation.
- Leur défaillance entrave le processus de production. Equipements indispensables à la transformation,
- Equipements à forte valeur ajoutée, leurs réparations sont longues et coûteuses. Train de machines inséparables et train de machines à grandes puissances.
- Equipements dont les opérations économise l'énergie ou améliore la production

- On installe à plein temps une instrumentation pour une surveillance permanente des vibrations. Cette surveillance peut être simultanément multi-voies (ou multi-canaux) de telle sorte que l'évaluation de l'état du train de machine est possible.
- Maintenance adoptée: Maintenance proactive et prédictive appropriées.

II.2.5 La surveillance permanente d'un équipement critique

II.2.5.1 Principe

Pour ce mode de surveillance, appelé aussi monitoring ou surveillance on line, des capteurs sont installés sur l'équipement en place. Initialement destiné à assurer la sécurité d'un équipement par son arrêt immédiat en cas de dépassement du seuil de danger par la valeur d'un indicateur, ce mode de surveillance évolue de plus en plus, en parallèle avec les évolutions techniques des systèmes d'acquisition multivoies, de la micro-informatique et la réduction des coûts des capteurs et de transmission de données, vers une forme de surveillance adaptée aux concepts de maintenance conditionnelle, voire de maintenance prévisionnelle. Du fait de la multiplicité du nombre de capteurs utilisés, ce mode de surveillance, qui nécessite un investissement initial important, était historiquement réservé aux machines stratégiques ou dangereuses :

- Dont on connaît bien le processus de dégradation et pour lequel on a pu définir un indicateur parfaitement représentatif du défaut et un seuil bien connu. Le meilleur exemple étant le suivi du balourd dû à l'encrassement du panier d'une centrifugeuse ou de la turbine d'un ventilateur.
- Dont la vitesse de dégradation peut être très rapide et incompatible avec une surveillance périodique. C'est notamment le cas des turbomachines, dont la vitesse de rotation est élevée et pour lesquelles une rupture de film d'huile ou l'apparition d'une instabilité de palier ou d'un balourd thermique risquent de détruire quasi instantanément le rotor.

Pour des raisons économiques, cette surveillance permanente, essentiellement axée sur la sécurité, a été longtemps limitée au suivi d'évolution d'un seul indicateur large bande ou bande étroite, issu souvent d'un seul capteur par palier.

Avec la chute des prix des capteurs et des cartes d'acquisition et la forte diminution des coûts de câblage grâce à la numérisation du signal le plus près possible du capteur, voire à l'intérieur même de ce dernier, et au transfert des données par réseau interne, la surveillance permanente en temps réel ou par multiplexage va avoir vraisemblablement tendance à fortement se développer dans les années à venir.

Les possibilités offertes par ces produits, basés sur de nouveaux concepts qui intègrent à la fois les exigences de la sécurité, de la maintenance prévisionnelle et une meilleure maîtrise de la conduite du procédé par la prise en compte des interactions électromécaniques avec ce dernier, deviennent de plus en plus étendues, tant dans le domaine du traitement des signaux et de la définition d'indicateurs de surveillance élaborés que dans celui du transfert de données et du pilotage d'acquisition à distance. Rappelons cependant que, depuis plus de deux décennies, des systèmes assurent déjà, dans le monde entier, la surveillance selon ces principes d'un grand nombre de machines à papier ou de laminoirs à partir de signaux délivrés par plusieurs centaines de capteurs (accéléromètres, capteurs de pression, capteurs de courant, jauges d'épaisseur, de grammage...). Cette surveillance sert néanmoins généralement plus à assurer la qualité de la production que la fiabilité de la machine [17].

II.2.5.2 Avantages et inconvénients de la surveillance permanente

En termes d'avantages, la surveillance permanente reconnaît :

- Un suivi permanent des valeurs des indicateurs choisis,
- Une détection possible des défauts à évolution rapide,
- Une association possible et facile avec d'autres paramètres procédés: température, vitesse, charge, intensité absorbée, pression...
- Un arrêt automatique de l'installation, envisageable sur alarme,
- La possibilité de centraliser les données visualisées en salle de contrôle.

Cependant, les principaux inconvénients, indépendamment du coût de l'investissement initial, concernent principalement les systèmes de surveillance peu évolués destinés beaucoup plus à assurer la sécurité de l'équipement que sa maintenance prévisionnelle :

- La méconnaissance de l'origine exacte du défaut ayant déclenché une alarme ou l'arrêt si l'indicateur scalaire ou les indicateurs choisis sont des indicateurs larges bandes,
- La difficulté de recherche de(s) indicateur(s) réellement significatif(s) du défaut surveillé,
- Une obsolescence rapide des systèmes on-line liée à la vitesse des évolutions techniques dans ce domaine,
- La génération fréquente de fausses alarmes qui décrédibilisent rapidement le système de surveillance auprès de l'exploitant, qui le met souvent hors service ou élève sensiblement les seuils, et pour tout système quel que soit son degré de sophistication : le coût de sa maintenance et surtout celui du remplacement des connecteurs, qui supportent souvent très mal le manque de soin de la part des équipes qui assurent la maintenance et les réparations, souvent sous la contrainte de l'urgence [17].

II.2.6 Système de supervision

Le système de supervision permet tout à la fois la conduite d'une installation et la détection d'aléas de fonctionnement. Les informations sont reçues à travers les capteurs et transmises à une centrale de surveillance qui enregistre les alarmes et les paramètres. Grâce au tableau synoptique qui visualise la localisation de ces informations, l'agent de surveillance réagit en conséquence dès l'apparition d'un défaut ou d'une variation anormale d'un paramètre. Ce système, équivalent à une ronde, est utilisé pour surveiller un ensemble d'équipements dont la localisation est dispersée d'une part, et dont l'accès est difficile et parfois dangereux d'autre part [18].

Au niveau de l'entreprise où s'est déroulé notre stage, le système de télémaintenance est entièrement automatisé. La gestion des actions, de type conditionnel, est réalisée à l'aide de modules de progiciel tel que **Delta.V**.

II.2.6.1 Progiciel Delta.V

Delta V comporte une seule base de données, données des entrées/sorties, données IHM, historique, donc un seul environnement. Cette caractéristique permet à Delta V de minimiser le temps de communication et d'intervention. Cette base de données est divisée en catégories [19] :

- Stratégie de contrôle,
- Stratégie de sécurité,
- Graphiques de procédés,
- Historique,
- Evénements et alarmes,
- Gestions de modifications.

II.2.6.2 Instrumentation

II.2.6.2.1 Chaîne d'acquisition

Dans le cas du compresseur THERMODYN RC5S, l'instrumentation est assurée par une chaîne d'acquisition gérée par le système informatisé Delta.V dont les premiers éléments sont des capteurs de déplacement ou proximètres (ou encore appelés capteurs de proximité,) (**Figure II.2.2**). Ces derniers mesurent la distance comprise entre la surface surveillée (généralement celle d'un arbre tournant) et l'élément détecteur du capteur (appelée sonde). Ce sont des capteurs dits relatifs, par opposition aux capteurs de vitesse (Vélocimètre) ou d'accélération (Accéléromètres) qui sont dits absolus.

Une chaîne d'acquisition recueille les informations nécessaires à la connaissance et au contrôle d'un processus ; elle délivre ces informations sous une forme appropriée à leur exploitation

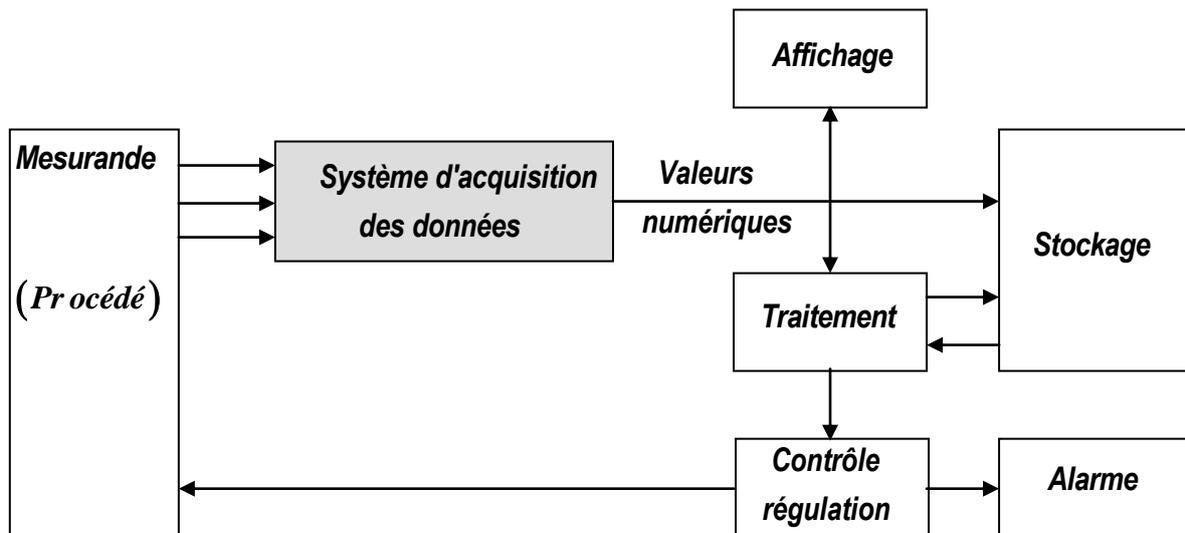


Figure II.2.2 : Place de la chaîne d'acquisition de données

Pour le cas du système informatisé Delta V, la chaîne d'acquisition implantée au niveau de l'installation d'expédition du GNL, est une chaîne qui comprend : (Figure II.2.3)

- Des **capteurs** pour les grandeurs physiques;
- Une **centrale de mesure** qui intègre les divers conditionnements.

Elle communique par données numériques et protocole de haut niveau avec le PC (voir annexes B)

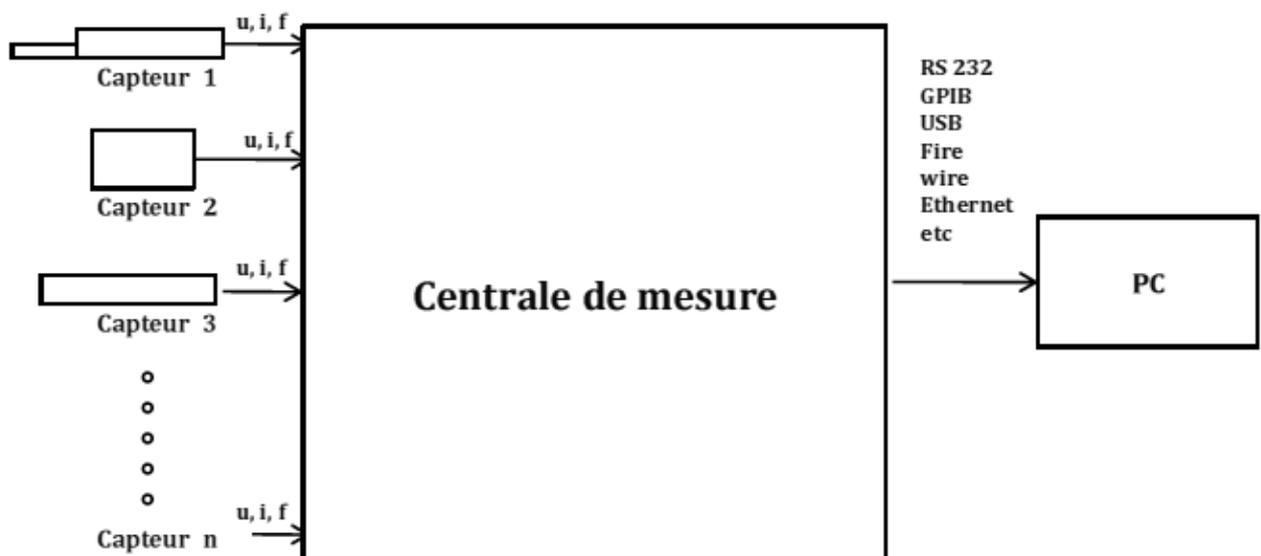


Figure II.2.3 : Chaîne d'acquisition avec centrale de mesure

II.2.6.2 Capteurs proximités

Un proximètre est un capteur de déplacement à courants de Foucault mesure le mouvement relatif de l'arbre par rapport au support sur lequel il est fixé (généralement le corps du palier) alors qu'un vélocimètre ou un accéléromètre mesurent le mouvement vibratoire de ce support consécutif à la vibration du rotor [17]. **(Figure II.2.4)**

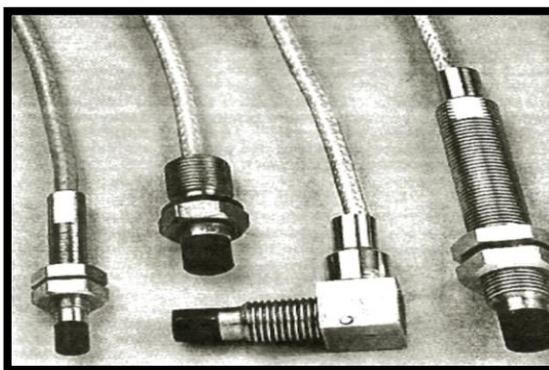


Figure II.2.4 : exemple des proximités [17]

Ces capteurs sont le plus souvent fixés à demeure dans les paliers et leur mise en place nécessite beaucoup de soin. En effet, ils sont sensibles non seulement au déplacement réel de l'arbre, mais également à des phénomènes parasites. Ces phénomènes parasites appelés erreurs de run-out ou erreurs de faux rond peuvent avoir deux origines :

- Une origine mécanique due à un défaut de concentricité de l'arbre, à une déformation du rotor, à des irrégularités ou des rugosités de surface ou encore à des défauts d'usinage;
- Une origine électrique consécutive à des défauts d'homogénéité des propriétés magnétiques de l'arbre.

Aujourd'hui, le proximètre le plus utilisé pour la surveillance de machines est le capteur inductif à courants de Foucault. Ce capteur, représenté en figure?, est relié à un émetteur-démodulateur- conditionneur. Il est constitué d'une bobine parcourue par un courant électrique « hautes fréquences ». Le champ magnétique ainsi créé induit, à la surface de l'arbre, des courants appelés courants de Foucault qui modifient l'impédance de la bobine. **(Figure II.2.5)**

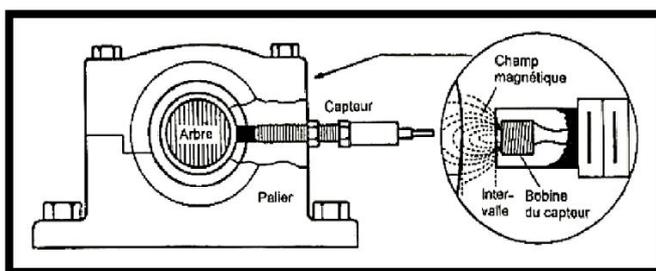


Figure II.2.5 Principe du capteur inductif à courants de Foucault [17]

Ces variations d'impédance sont transformées en :

- Une tension continue proportionnelle à la distance moyenne entre l'arbre et le capteur (composante statique),
- Une tension alternative proportionnelle aux écarts de distance par rapport à la distance moyenne (composante dynamique), qui renseigne donc sur les déplacements relatifs de l'arbre par rapport à la sonde du capteur.

II.2.6.3 Intérêts et limites d'utilisation des proximètres

L'utilisation privilégiée de ces capteurs est la surveillance des machines à paliers à film d'huile, soit pour surveiller le déplacement axial de l'arbre, soit pour mesurer son mouvement radial relatif et déterminer la position de son axe de rotation par rapport au centre du palier

D'autre part, à partir de la connaissance des jeux radiaux réels d'un palier ou des jeux axiaux rotor-stator, il est beaucoup plus facile de déterminer des seuils d'alerte et de déclenchement en terme de déplacement relatif d'arbres qu'en terme de déplacement, vitesse ou accélération absolus de paliers. C'est pourquoi ce type de capteur a été initialement utilisé et continue de l'être non seulement pour détecter l'apparition de défauts à un stade précoce dans le cadre d'une maintenance conditionnelle des installations mises sous surveillance, mais surtout pour en assurer la sécurité.

Quelle qu'en soit l'utilisation, ces capteurs mesurent le déplacement et leur emploi est de ce fait limité à la surveillance des défauts se manifestant aux basses fréquences, c'est-à-dire dont la fréquence des composantes vibratoires induites n'excède généralement pas l'ordre 4 de la fréquence de rotation. Ces capteurs sont généralement soit placés axialement en bout d'arbre pour mesurer le déplacement latéral de cet arbre (dû par exemple à une dilatation thermique), soit montés par paires, placés à 90° (**Figure II.2.6**) sur les paliers de façon à pouvoir déterminer l'orbite de déplacement de l'arbre dans son palier [17].

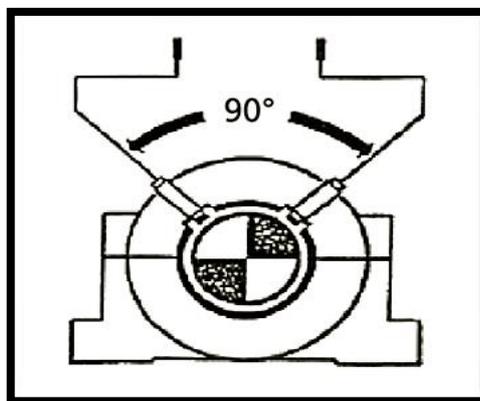


Figure II.2.6 : Positionnement des capteurs de déplacement par paire à 90° [17].

II.2.8 Politique de maintenance pour le compresseur THERMODYN RC5S

Vu le rôle important joué par le compresseur de type RC5S en tant qu'équipement critique il doit être assujéti à une politique de maintenance adéquate dans le but d'augmenter sa disponibilité et sa durée de vie. Généralement pour ce type d'équipement on met en œuvre une maintenance préventive sous ses deux formes à savoir :

- La maintenance préventive systématique
- La maintenance préventive conditionnelle

Ce type de maintenance nous permettra de diminuer la probabilité de défaillance en service et de supprimer les causes d'accident graves.

II.2.9 Sélection multicritère

Il est évident que les coûts d'entretien d'un compresseur de centrale de compression, par exemple sont très élevés. Il faudra donc inclure ce compresseur dans le programme d'entretien préventif. Mais que se passe-t-il lorsque des machines auxiliaires, comme les pompes ou des soufflantes tombent en panne ? Il est judicieux de prendre en compte tous les composants d'une installation. Il ne faut pas pour autant mettre en place un système non sélectif, qui pourrait avoir pour effet de remplacer le gain escompté par une dépense supérieure à celle engendrée par la maintenance classique des machines. Il est courant, au sein d'une même usine ou d'une même unité de production, de panacher les différents types de maintenances. Il faut donc recourir à des critères de choix objectifs pour classifier les machines. Ces critères qualifient les risques de pannes et sont pondérés par les conséquences possibles de ces pannes.

II.2.9.1 Critères influant sur les risques de panne (RP) :

- Technologie.
- Durée de vie calculée.
- Élément de variation d'utilisation.
- Conditions d'utilisation.
- Environnement, possibilité de maintenance.

II.2.9.2 Critères influant sur les conséquences de panne (CP) :

- Coût indirect sur la production.
- Coût direct sur le matériel.
- Sécurité.

La classe de maintenance (CM) est définie par le produit des deux types de critères :

$$CM = RP \cdot CP$$

Tab II.2.1 Critères évaluation des risques de panne

Evaluation des risques de panne	RP _i
1. Nature de la machine <ul style="list-style-type: none"> • Standard • Petite série • Rares exemplaires, nouvelle technique • Prototype 	<u>1</u> 2 3 4
2. Complexité de la machine (nombre d'éléments (moteur, coupleur, réducteurs, etc.)) <ul style="list-style-type: none"> • N = 1 • N = 2 • N = 3 • N ≥ 4 	1 2 3 <u>4</u>
3. Régime moteur <ul style="list-style-type: none"> • Constant variation par plages (maxi / min) <ul style="list-style-type: none"> • < 50 % • ≥ 50% • Variation continue 	<u>1</u> 2 3 4
4. Vitesse maximale <ul style="list-style-type: none"> • <600 tr/min • 600 à 1200 tr/min • 1200 à 3000 tr/min • > 3000 tr/min 	1 2 3 <u>4</u>
5. Atmosphère ambiante <ul style="list-style-type: none"> • Neutre, filtrée • Peu chargée • Chargée • Très chargée 	1 <u>2</u> 3 4
6. Fluide véhiculé <ul style="list-style-type: none"> • Neutre • Défavorable • Abrasif • Très agressif 	<u>1</u> 2 3 4
7. Température de fluide <ul style="list-style-type: none"> • < 50 °C • 50 à 100°C • 100 à 200 °C • > 200°C 	1 <u>2</u> 3 4

Evaluation des risques de panne	RP _i
8. Variation de température de fluide <ul style="list-style-type: none"> • t = constante • Δt = ±20°k • Δt = ±50°k • Δt ≥ ±100°k 	1 2 <u>3</u> 4
9. Charge, débit <ul style="list-style-type: none"> • Constant • Peu variable (±10%) • Variable (±30%) • Très variable 	<u>1</u> 2 3 4
10. Surveillance permanente <ul style="list-style-type: none"> • 3 niveaux et plus • 2 niveaux et plus • 1 niveau • Aucune 	1 <u>2</u> 3 4

$$RP = \frac{\sum RP_i}{\text{Nombre de critères qualifiés}} = \frac{22}{10} = 2,2$$

D'où :

$$RP = 2,2$$

Tab II.2.2 Critères évaluation des conséquences de panne

Evaluation des conséquences de panne	CP _i
1. Conséquence sur la production <ul style="list-style-type: none"> • Aucune influence directe sur le produit, réparation possible en marche • Machine doublée, circuit de dépannage • Marche possible en cadence et productivité réduite • Arrêt de production total 	2 4 6 <u>8</u>
2. Temps de maintenance <ul style="list-style-type: none"> • Moins de 1 poste • De 1 à 2 postes • De 2 à 3 postes • Plus de 3 postes 1 postes = 8 heures de travail	1 2 3 <u>4</u>
3. Conséquence sur les machines voisines <ul style="list-style-type: none"> • Aucune • Faibles • Importantes • Très importantes 	1 2 3 <u>4</u>
4. Toxicité, dangers liés aux produits utilisés <ul style="list-style-type: none"> • Nulle • Faible • Elevée • Très élevée 	2 <u>4</u> 6 8

$$CP = \frac{\sum CP_i}{\text{Nombre de critères qualifiés}} = \frac{20}{4} \longrightarrow CP = 5$$

$$CM = RP \cdot CP$$

$$CM = 2,2 \cdot 5 \longrightarrow CM = 11$$

CM	[1 ; 2]	[3 ; 5]	[6 ; 9]] 10 ; 24]
Mode de maintenance	MC	MC	MS	MO
Conséquences	Faible	Modérées	Importantes	Très importantes

M
C :
Maintenanc

e Corrective

MS : Maintenance préventive systématique

MO : Maintenance conditionnelle

CM = \Rightarrow **MO** Très Importantes

Le résultat obtenue par cette méthode est confirmée par la maintenance suggérée par le constructeur ce qui définit une méthode simple et rapide ; mais dans cette technique un poste important est volontairement négligé : le coût de réparation il peut cependant être utilisé, on l'exprimera par exemple en unité coût de la journée, mais il ne peut être défini rapidement sans étude précise et complète.

II.2.10 Cycle de révision

Tous les équipements sont accompagnés d'un cycle de réparation établi par le constructeur, mais les conditions d'exploitation locales permettent de déterminer au mieux les intervalles préétablis. Pour le compresseur RC5S. Le cycle appliqué [14]:

Révision partielle	8000 heures
Révision générale	16000 heures

II.2.10.1 Révision partielle

- Démontage des paliers des deux côtés aspiration et refoulement ainsi que les paliers de butée.
- Vérification de l'usure des patins, en mesurant les jeux de diamètre et en les comparant aux cotes nominales nécessaire.
- Démontage des boites d'étanchéités, contrôle de l'usure des bagues

- Contrôle et nettoyage du système d'huile d'étanchéités et graissage
- Etalonnage des instruments si nécessaire.
- Contrôle des systèmes d'alarme et déclanchement.

II.2.10.2 Révision générale

La révision générale du compresseur consiste en l'ouverture complète du compresseur et la réalisation des tâches suivantes :

- Nettoyage complet du compresseur, les accessoires, des conduites d'aspiration et refoulement
- Déposer de l'aérodynamique
- Relevé de l'ensemble des jeux de labyrinthe sur deux demi-coquilles.
- Comparaison avec les tolérances données par le constructeur.
- Changement des labyrinthes si nécessaire
- Changement des pièces d'usure des sous-ensembles paliers porteurs et la butée, ainsi que la boîte d'étanchéité de refoulement et d'aspiration.
- Changement des joints plats et toriques.
- Vérification de l'équilibrage statique et dynamique du rotor.

II.2.10.3 Surveillance en marche

- Circuits graissage et étanchéité
- Niveaux caisses à huile
- Pression
- Température
- DP sur les filtres

II.2.10.4 Circuit procédé

- Niveaux ballons de garde
- Pressions aspiration et refoulement
- Température aspiration et refoulement
- Débit de gaz, stabilité

II.2.11 TROUBLESHOOTING (Dépannage)

II.2.11.1 Causes possibles de mauvais fonctionnement :

Augmentation des fuites internes due à :

- La destruction des labyrinthes inter-étage

- Encrassement des canaux et des roues d'un compresseur centrifuge.
- Début de grippage au niveau d'une garniture d'étanchéité d'un palier de butée.

Le suivi des performances d'une machine, en particulier le suivi des rendements, permet de suivre en marche l'état des pièces internes de cette machine. Il est évident que d'autres mesures ou enseignements sont également indispensables (niveau vibratoire, déplacements axial, échauffement de l'huile, résultat des analyses d'huile etc.) pour déterminer l'état mécanique du compresseur

Attention les fuites supposées internes peuvent en fait être causés par la mauvaise étanchéité des vannes process ou le mauvais positionnement [14].

II.2.11.2 Recherche des pannes :

Toutefois, lorsqu'on remarque des inconvénients, la connaissance des causes éventuelles (et des remèdes à porter) devient extrêmement importante.

Le tableau suivant contient les défauts les plus communs pour les compresseurs centrifuges, les causes possibles de ces défauts et les remèdes recommandés [14].

II.2.11.2.1 Vibrations ou bruit anormaux du compresseur :

Cause possibles	Remèdes
Désalignement	Retirer l'accouplement. Faire fonctionner le dispositif d'entraînement tout seul. S'il tourne sans produire des vibrations, la cause serait à rechercher dans le mauvais alignement. Pour le contrôle de l'alignement voir la section relative dans le livret d'instruction.
Endommagement de l'accouplement	Vérifier les conditions de l'accouplement.
Déséquilibre du rotor du compresseur	Contrôler le rotor et s'assurer qu'il ne soit pas déséquilibré à cause de l'encastrement. Équilibrer à nouveau si nécessaire.
Paliers usés par l'encrassement présent dans l'huile	Contrôler les paliers et substituer si nécessaire.
Efforts transmises au corps par les tuyauteries du gaz provoquant un mauvais alignement	Les tuyauteries devraient être bien ancrées de manière à prévenir des efforts excessifs sur le corps du compresseur, il faut que les tuyauteries soient suffisamment élastiques pour permettre les dilatations thermiques.
Déséquilibre de l'accouplement	Démonter l'accouplement et vérifier son équilibre
Pompage	Ecarter les conditions de marche du compresseur des conditions de pompage.
Machines fonctionnant à proximité du compresseur	Isoler les fondations des machines respectives et augmenter l'élasticité des tuyauteries de jonction éventuelles.

II.2.11.2.2 Endommagement des paliers porteurs :

Mauvais graissage	S'assurer que l'huile utilisée soit du type recommandé. Vérifier régulièrement l'absence d'eau et d'encrassement dans l'huile.
-------------------	---

Désalignement	Vérifier l'alignement et le corriger s'il y a lieu.
Jeu des paliers hors cotes	Vérifier le jeu et le corriger s'il y a lieu.

II.2.11.2.3 Endommagement du palier de la butée :

Poussée axiale excessive	S'assurer que l'accouplement soit propre et qu'il soit monté de manière à ne pas transmettre une poussée excessive sur le compresseur.
Mauvais graissage	S'assurer que l'huile utilisée soit du type recommandé. Vérifier régulièrement l'absence d'eau et d'encrassement dans l'huile.

II.2.11.2.4 Endommagement des bagues d'étanchéité à huile :

Désalignement et vibrations	Chercher les causes et le corriger.
Encrassement de l'huile	Contrôler l'état des filtres et remplacer les cartouches encrassées. Vérifier l'état de propreté des canalisations.
Jeu des bagues hors cotes	Contrôler le jeu et le corriger s'il y a lieu
Pression de l'huile insuffisante	S'assurer que la pression d'huile ne baisse au-dessous de la valeur minimale préconisée.

Chapitre III

Fiabilité et diagnostic du compresseur

III.1 ANALYSE DE FIABILITE

III.1.1 Introduction

Dans le but de connaître l'état du compresseur centrifuge THERMODYN RC5S lors de son exploitation, l'analyse de fiabilité permet d'affirmer que le fonctionnement de cet équipement est compatible avec le cycle d'intervention systématique recommandé par le constructeur. A cet effet tout d'abord nous présentons des généralités sur la fiabilité et ces lois pour pouvoir les appliquer en suite pour le cas du compresseur et en fin en termine avec une interprétation des résultats.

III.1.2 Couple fiabilité-défaillance

III.1.2.1 Notion de durée de vie

La durée de vie représente le TBF (Temps de Bon Fonctionnement) pendant lequel un bien a accompli ou accomplira la fonction qui lui a été assignée. La durée de vie d'un bien s'exprime en unité de temps (années, heures, cycle, ...)

À tout produit choisi au hasard dans sa population, on fait associer sa durée de vie avant une défaillance à une variable temporelle aléatoire T , Tel que [20] :

- T : Représente l'instant où apparaît une défaillance à partir de l'instant $t_0 = 0$
- T : Variable aléatoire continue qui prend les valeurs $[0, + \infty]$;
- T : Possède une densité de probabilité

Hypothèses:

- On s'intéresse à un produit choisi au hasard dans une population constituée des produits du même type.
- $t_0 = 1$, l'instant où le produit choisi est mis en marche, soit pour la 1^{ère} fois (mise en service) soit après une réparation (remise en état).

III.1.2.2 Fiabilité

L'analyse de la fiabilité constitue une phase indispensable dans toute étude de sûreté de fonctionnement d'un système technique [21].

III.1.2.2.1 Définition au sens commun

Au sens commun, la notion de fiabilité correspond à la confiance accordée par un utilisateur à un produit industriel de consommation ou d'équipement qu'il utilise.

III.1.2.2.2 Définition au sens large

Au sens large, la fiabilité est définie comme la science des défaillances qui traite leur connaissance, leur évaluation, leur

Prévision leur mesure ainsi que leur maîtrise. Elle trouve son application dans les domaines d'activités suivants : l'analyse de défaillance des systèmes, la fiabilité opérationnelle, les banques de données de fiabilité, les essais de fiabilité, la fiabilité prévisionnelle, les méthodes prévisionnelles de fiabilité et de sécurité, l'assurance de la fiabilité et de la qualité.

La notion de fiabilité s'applique à :

- Des entités réparables (équipements industriels ou domestiques),
- Des entités non réparables (composants électroniques ou électrotechniques, lampes, etc....)

III.1.2.2.3 Définition au sens strict

Selon la norme NF EN 13306, la fiabilité représente "l'aptitude d'un bien à accomplir une fonction requise dans des conditions données pendant un temps donné". C'est une caractéristique d'un bien exprimée par la probabilité qu'il accomplisse une fonction requise dans des conditions données, pendant une période donnée. Tel que la notion de temps ou de période peut prendre la forme :

- De nombre de cycles effectués, cas des machines automatiques
- De distance parcourue, cas du matériel roulant
- De tonnage produit, cas des équipements de production

La période donnée est limitée par deux situations:

- Avant l'avènement de la défaillance ;
- Après élimination de la défaillance

Dans chaque situation, il faut :

1. Etudier comment une telle probabilité peut être obtenue ;
2. Quelles sont les informations qu'elle peut apporter ?

III.1.2.3 Fonction de fiabilité

" En terme de fiabilité, la fonction de répartition de la variable aléatoire T , est la probabilité qu'un produit prélevé au hasard dans la population considérée n'ait pas de défaillance avant l'instant t ".

On définit mathématiquement la fonction de fiabilité par le nombre $R(t)$ associée à celle de la défaillance, tel que pour tout $t \geq 0$ [22]:

$$R(t) = P(T \geq t) = \int_t^{\infty} f(t)dt \quad [3.1]$$

- $R(t)$: Fonction de répartition de la fiabilité du système
- $f(t)$: Densité de probabilité de la variable aléatoire T

III.1.2.3.1 Fiabilité opérationnelle (ou fiabilité observée)

- C'est la fiabilité quantifiée ou mesurée sur un matériel en exploitation normale.
- Elle résulte de l'observation et de l'analyse dans des conditions opérationnelles des comportements d'équipements et matériels identiques.
- C'est un moyen pour obtenir des résultats sur la fiabilité de l'équipement dans des conditions opérationnelles.
- Elle dépend des conditions réelles d'utilisation du matériel et du support logistique associé.

Elle permet de:

- Affirmer la fiabilité obtenue lors des essais;
- Etablir la corrélation entre les résultats obtenus en fiabilité expérimentale et le retour clientèle;
- Mettre à jour les profils de mission;
- Capitaliser le retour d'expérience;

Elle se déroule en 4 étapes:

1. Analyser le retour clientèle : vérifier la fiabilité et le retour de la garantie.
2. Réaliser une analyse par la fiabilité opérationnelle (arbre de défaillance, loi de Weibull, ...).
3. Comparer la fiabilité opérationnelle et expérimentale.
4. Capitaliser le retour d'expérience pour les nouveaux produits.

III.1.2.4 Concept de défaillance

Le long de son cycle de fonctionnement, tout composant, sous-système ou système technique que l'on peut considérer individuellement ou tester et essayer séparément, subit toujours par la force de la nature une dégradation d'une ou plusieurs de ses caractéristiques, qui le conduit

inexorablement à perdre partiellement ou totalement l'aptitude d'accomplir une fonction de service requise pour son fonctionnement et son exploitation [23].

III.1.2.5 Défaillance

III.1.2.5.1 Définition

C'est la cessation de l'aptitude d'une entité à accomplir une fonction requise (Norme CEI-271-1974). Cette cessation peut être complète (l'entité ne remplit plus sa fonction) ou partielle (la fonction est assurée dans certaines limites, on parle alors de mode dégradé). Les défaillances peuvent être momentanées (indisponibilité du composant à remplir sa fonction pendant un temps donné. Le composant redevient disponible sans répartition) ou permanentes (la défaillance du composant est irréversible, une maintenance est nécessaire pour remettre le composant en service) [24].

En fonction du temps, deux types de défaillances d'un composant peuvent survenir: cataleptiques et par usure ou fatigue.

1° Les défaillances cataleptiques.

Elles sont complètes et soudaines, sans dégradation observable, et il est difficile de mettre en place une maintenance prédictive.

Lorsque la probabilité qu'un système puisse subir une défaillance cataleptique est élevée, ou lorsque l'importance de ce système quant aux conséquences qui résultent d'une défaillance est élevée, alors il est nécessaire d'imposer une redondance pour ce composant ou un système dit de "by-pass" qui permette de court-circuiter ce composant lorsqu'il est défaillant [25].

2° Les défaillances par usure ou fatigue.

Les phénomènes de dégradation se traduisent par des valeurs paramétrables mesurables.

Les défaillances de mise en circulation caractérisées par un taux de défaillances variable en fonction du temps [25].

III.1.2.5.2 Fonction défaillance [22]

" En terme de défaillance, la fonction de répartition de la variable aléatoire T , est la probabilité qu'un produit prélevé au hasard dans la population considérée ait une défaillance avant l'instant t ". On définit mathématiquement la fonction de défaillance par le nombre $F(t)$, tel que pour $t \geq 0$

$$F(t) = P(T \leq t) = \int_0^t f(t) dt \quad [3.2]$$

$$F'(t) = f(t) \quad 0 \leq F(t) \leq 1 \quad [3.3]$$

- $F(t)$: Fonction de répartition de la défaillance du système
- $f(t)$: Densité de probabilité de la variable aléatoire T

Sachant que $T \geq t$ est l'événement contraire de $T \leq t$, on peut écrire:

$$P(T \geq t) = 1 - P(T \leq t) \quad [3.4]$$

Puisque $P(T \leq t) = F(t)$ et $P(T \geq t) = R(t)$, alors on a:

$$R(t) = 1 - F(t) \quad [3.5]$$

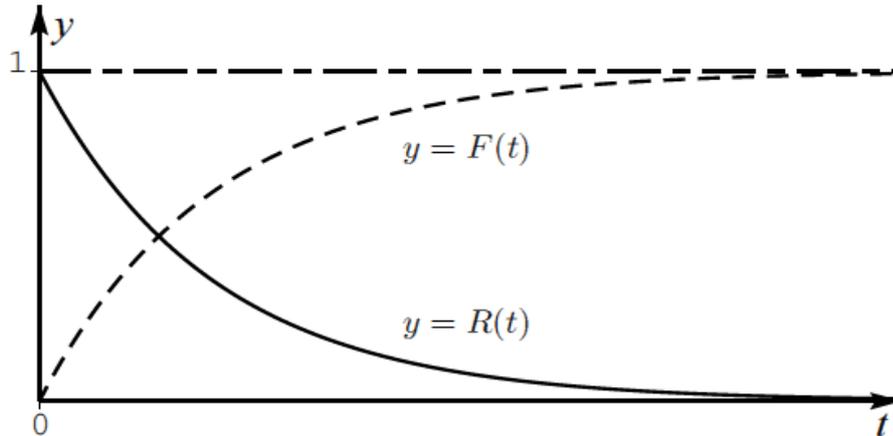


Figure III.1.1: Fonction fiabilité et fonction défaillance [22]

III.1.2.6 Taux de défaillance $\lambda(t)$

III.1.2.6.1 l'expression mathématique

Pour un système ayant servi pendant une durée t et encore en fonctionnement, la probabilité qu'il ait une défaillance entre l'instant t et l'instant $t+dt$ est représentée par la probabilité conditionnelle qu'il subit une défaillance entre l'instant t et l'instant $t+dt$, sachant qu'il a survécu jusqu'à l'instant t . D'après le théorème des probabilités conditionnelles, cette probabilité est égale à [23] :

$$\frac{f(t)dt}{R(t)} = \lambda(t)dt \quad [3.6]$$

Avec $\lambda(t)$ taux de défaillance du système à l'instant t .

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{F'(t)}{R(t)} = -\frac{R'(t)}{R(t)} = \frac{f(t)}{1-F(t)} \quad [3.7]$$

On peut trouver $\lambda(t)$ si l'on connaît $F(t)$ ou $R(t)$. Inversement, si l'on connaît $\lambda(t)$, on peut obtenir $R(t)$ et respectivement $F(t)$ comme solution de l'équation différentielle du premier ordre :

$$\lambda(t) = -\frac{1}{R(t)} \frac{dR(t)}{dt} \quad [3.8]$$

La relation [3.8] montre que le taux de défaillance est, au signe près, la dérivée logarithmique de la fiabilité :

$$\lambda(t) = -\frac{d[\ln R(t)]}{dt} \quad [3.9]$$

D'où

$$\ln R(t) = -\int_0^t \lambda(t) dt \quad [3.10]$$

Alors

$$R(t) = \text{Exp} \left[-\int_0^t \lambda(t) dt \right] \quad \text{et} \quad F(t) = 1 - \text{Exp} \left[-\int_0^t \lambda(t) dt \right] \quad [3.11]$$

III.1.2.6.2 l'expression physique [25]

Précédemment le taux de défaillance λ a été défini par des expressions mathématiques à travers un calcul de probabilité. On peut également l'exprimer par une expression physique. Il caractérise la vitesse de variation de la fiabilité au cours du temps. La durée de bon fonctionnement est égale à la durée totale en service moins la durée des défaillances.

$$\lambda(t) = \frac{\text{nombre de défaillance pendant le service}}{\text{durée de bon fonctionnement}}$$

$\lambda(t)$ est une probabilité de défaillance dont l'allure graphique est donnée par la **figure III.1.2**

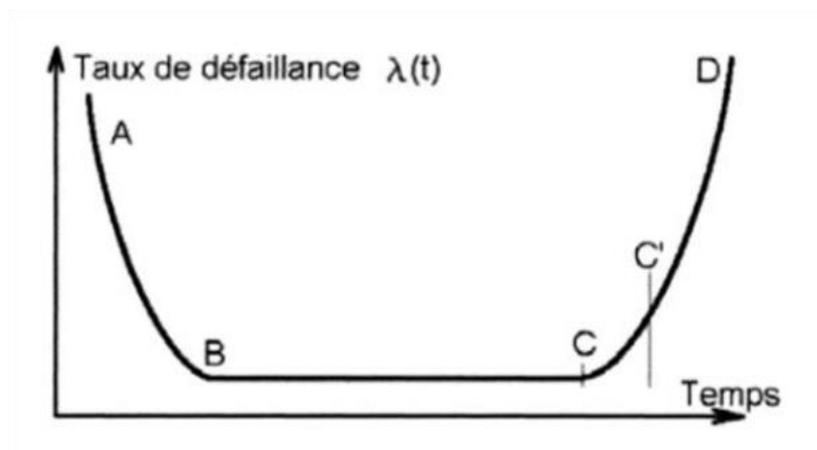


Figure III.1.2: Courbe d'évolution du taux de défaillance [25]

Expérimentalement, pour la plupart des produits, la courbe représentative du taux de défaillance quand $t \rightarrow \lambda(t)$, possède la forme donnée par la **figure III.1.2**. Elle est appelée courbe en baignoire et comporte 3 parties distinctes :

- **Zone AB** → *Période de défaillance précoce ou période de jeunesse.*

Période de début de fonctionnement,

Les défaillances sont dues à des défauts de fabrication ou de conception.

- Le taux de défaillance décroît avec le temps du A à B, car les défaillances deviennent de moins en moins nombreuses.
- Cette période a une durée variable suivant le produit.
- Elle s'échelonne entre quelques heures et quelques centaines d'heures

- **Zone BC** → *Période de défaillance à taux constant ou zone de maturité*

Les défaillances de maturité dont le taux de défaillances est indépendant du temps (BC)

- Période de maturité, ou vie utile
- Elle correspond à l'apparition de défaillances provenant de causes très diverses.
- Les défaillances qui ont eu lieu sont dues au hasard..
- Le taux de défaillance reste à peu près constant.
- Sa durée s'étend de quelques milliers d'heures pour les pièces mécaniques à plusieurs centaines de milliers d'heures pour les composants électroniques.
- **Zone CD** → *Période de défaillance par vieillissement ou période de fin de vie ou zone d'usure*

Les défaillances de vieillissement dont le taux croît avec le temps (CD), CC': domaine de la maintenance prédictive, C'D: domaine des pannes. En C', il est trop tard pour étendre la vie de la machine.

Cette zone est caractérisé par :

- Période d'usure.
- Les défaillances sont dues à l'usure croissante ou à la fatigue (fin de vie).
- Le taux de défaillance augmente avec le temps.

III.1.2 Cas des systèmes dont la maintenance est prévisionnel [25]

Lorsque le système est réparable et subit des opérations régulières de maintenance (cas général des moteurs à combustion interne), après la première phase de fonctionnement des défauts peuvent apparaître (défauts de jeunesse), le taux de défaillances $\lambda(t)$ devient constant et indépendant du

temps. Chaque panne peut être considérée comme un évènement aléatoire. Dans ces conditions, les fonctions ci-dessus sont simplifiées comme suit:

L'intégrale $-\int_0^t \lambda(t). dt$ avec : $\lambda = \text{constant}$ s'écrit :

$$-\int_0^t (\lambda). dt = -\lambda. t$$

Alors la fonction cumulée de défaillance a pour expression

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t}$$

La fonction cumulée de défaillance est nulle pour le temps $t = 0$ et tend vers 1 lorsque le temps augmente indéfiniment.

Dans les mêmes conditions, la fonction « fiabilité » $R(t)$ devient :

$$R(t) = 1 - F(t) = e^{-\lambda t}$$

La fonction de fiabilité $R(t)$ est égale à 1 pour $t = 0$, elle décroît constamment et tend vers zéro lorsque le temps tend vers l'infini.

La fonction de densité des défaillances $f(t)$ s'écrit

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$$

Le paramètre « Moyenne des temps de bon fonctionnement » MTBF a pour valeur :

$$MTBF = \int_0^{\infty} R(t). dt = \int_0^{\infty} t. f(t). dt = \frac{1}{\lambda}$$

Il est constant et égal à l'inverse du taux constant de défaillance λ qui représente la probabilité d'une défaillance à l'instant t , sous la condition qu'il n'y ait pas eu de défaillance avant l'instant t .

III.1.3 Evaluation de la fiabilité du compresseur THERMODYN RC5S

Dans le cas du compresseur RC5S il a été constaté qu'à chaque révision programmée (maintenance systématique) le service maintenance fait état d'une anomalie pouvant annoncer une défaillance précoce. A cet effet, on peut supposer comme hypothèse que chaque révision est assimilée à une défaillance probable. Le traitement des données brutes de l'historique de compresseur (**voir annexes C**) passe par :

- Le calcul des heures d'arrêt suite à des pannes qui résultent des différences entre les dates d'arrêt et de démarrage.

- Le calcul des heures de temps technique de réparation (TTR).
- Le calcul des heures de bon fonctionnement (TBF), qui résultent des différences entre deux pannes successives.
- Le calcul des taux de défaillance

Tab III.1.1 l'historique de compresseur

Année	Temps de suivi	Nombre des arrêts	Temps d'arrêt	TTR	TBF	$\lambda(t) \times 10^{-4}$
1997	4224	-	-	-	4224	0
1998	8760	1	144	60	8616	1,160
1999	8760	1	480	120	8280	1,120
2000	8784	2	336	140	8448	2,367
2001	8760	1	552	230	8208	1,218
2002	8760	1	144	60	8616	1,160
2003	8760	1	528	220	8232	1,214
2004	8784	1	168	70	8616	1,160
2005	8760	2	504	210	8256	2,422
2006	8760	1	600	250	8160	1,225
2007	8760	1	144	60	8616	1,160
2008	8784	1	552	230	8232	1,214
2009	8760	2	336	140	8424	2,374
2010	8760	1	480	120	8280	1,207
2011	8760	1	120	50	8640	1,157
2012	8784	1	504	210	8280	1,207
2013	8760	2	768	320	7992	2,502
2014	8760	1	168	70	8592	1,163
2015	8760	1	480	120	8280	1,207
2016	8784	1	576	240	8208	1,218
2017	8760	2	624	260	8136	2,458
2018	8760	1	144	60	8616	1,160

Courbe de taux de défaillance

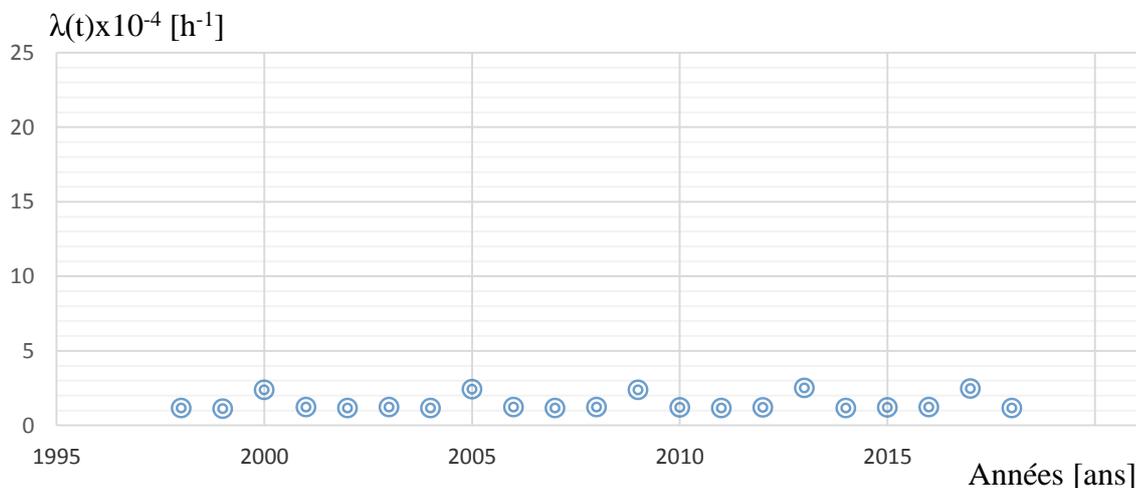


Figure III.1.3 : Courbe de taux de défaillance

Le nuage des points étant allongé, il peut être ajusté par une droite (régression linéaire). Ce qui montre que le taux de défaillance est presque constant, (c'est-à-dire pour tout $t \geq 0$ on a $\lambda(t) = \lambda$ constante strictement positive). Donc, la loi suivie par la variable aléatoire T est une loi exponentielle.

III.1.3.1 La loi exponentielle

Pour caractériser la durée de vie. On montre en particulier l'utilité pratique de la loi exponentielle pour approcher la distribution des temps de panne. La distribution exponentielle s'exprime ainsi :

Fiabilité : $R(t) = e^{-\lambda t}$

La fonction de répartition $F(t) = 1 - e^{-\lambda t}$

Temps moyen de bon fonctionnement :

Le MTBF (Mean Time Between Failure) est souvent traduit comme étant la moyenne des temps de bon fonctionnement mais représente la moyenne des temps entre deux défaillances. En d'autres termes, Il correspond à l'espérance de la durée de vie t [22].

$$MTBF = \int_0^{\infty} R(t) dt$$

Physiquement le MTBF peut être exprimé par le rapport des temps

$$MTBF = \frac{\text{somme des temps de fonctionnement entr les (n) defaillanc}}{\text{nombre d'interventi en de maintenance avec immobilisation}}$$

Si λ est constant : $MTBF = \frac{1}{\lambda}$

Par définition la MTBF représente la durée de vie moyenne du système

Dans notre cas, la MTBF et λ sont donnés par :

$$MTBF = \frac{179119}{26} = 6889.19 \text{ h}$$

$$\lambda = \frac{1}{MTBF} = \frac{1}{6889.19} = 1.451 \times 10^{-4} \text{ h}^{-1}$$

III.1.3.2 Evolution de la fiabilité du compresseur

Dans le but de faire une intervention systématique sous forme d'une révision générale et montrer que la durée prédéterminée par dossier technique du constructeur est compatible avec

l'évolution du couple fiabilité- défaillance ; on a dressé le **Tab III.1.2** qui quantifie les fonctions fiabilité $R(t)$ et défaillance $F(t)$.

Tab III.1.2 Evolution de la fiabilité du compresseur

Temps	2000	4000	6000	8000	10000	12000	14000	16000
R(t)	0.7487	0.5596	0.4186	0.3132	0.2343	0.1753	0.1311	0.0981
F(t)	0.2513	0.4404	0.5814	0.6868	0.7657	0.8247	0.8689	0.9019

Une fois les fonctions $R(t)$ et $F(t)$ calculées, l'ensemble des valeurs obtenues sont portées sur un graphique afin d'obtenir leur répartition (**Figure III.1.2**)

Probabilité

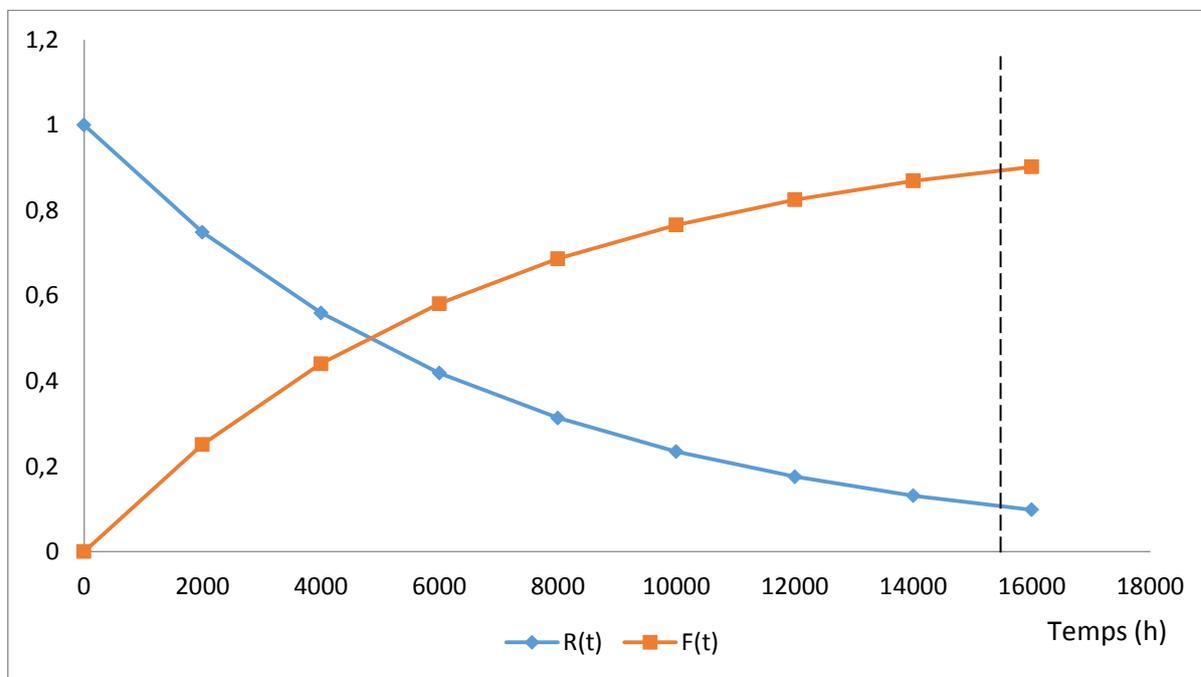


Figure III.1.4 : Les courbes de fiabilité et la fonction

III.1.3.3 Interprétation des courbes

La **Figure III.1.4**, montre qu'à l'instant $t=16000$ h, la courbe de la fonction fiabilité $R(t)$ décroît avec le temps jusqu'à la valeur de 9% tandis que la fonction défaillance $F(t)$ croît avec le temps jusqu'à prendre la valeur 90%. Ce qui prouve et valide le fait que le compresseur nécessite une révision générale dans l'immédiat.

III.2 LA METHODE D'ARBRE DE DEFAILLANCE

III.2.1 Introduction

Il est évident que l'apparition des anomalies sur un équipement critique comme le compresseur de GNL nuit à sa rentabilité, ce qui nécessite des procédures rigoureuses. Cette partie consiste à diagnostiquer l'occurrence des anomalies sur le compresseur centrifuge RC5S par la méthode déductive arbre de défaillance, qui a pour but de trouver les solutions pour minimiser au maximum l'indisponibilité du compresseur. On présentera des suggestions pour limiter les effets dus à des causes externes au compresseur. Les résultats qualitatifs et quantitatifs issus de l'analyse par arbre de défaillance, ont été synthétisés dans une table appelées table de décision. Cette dernière est vue comme un outil d'aide destiné aux responsables de maintenance à prendre la décision adéquate selon l'anomalie constatée.

III.2.2 Définition

L'arbre de défaillance est une méthode qui consiste à représenter graphiquement les combinaisons possibles d'événements qui permettent la réalisation d'un événement indésirable prédéfini. Une telle représentation graphique met donc en évidence les relations de cause à effet. Cette méthode est complétée par un traitement mathématique qui permet la combinaison de défaillances simples ainsi que de leur probabilité d'apparition. Elle permet ainsi de quantifier la probabilité d'occurrence d'un événement indésirable, également appelé « événement redouté : ER» [26-27].

III.2.3 Représentation

Un arbre de défaillance est présenté généralement de haut en bas comme suit [26] :

- La ligne la plus haute ne comporte que l'évènement dont on cherche à décrire comment il peut se produire.
- Chaque ligne détaille la ligne supérieure en présentant les combinaisons susceptibles de produire l'évènement de la ligne supérieure auquel elles sont rattachées.
- Les relations sont représentées par des liens logiques, dont la plupart sont des « portes OU » et des « portes ET ».

III.2.4 Outils pour la construction de l'arbre défaillance

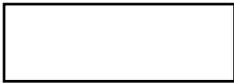
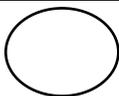
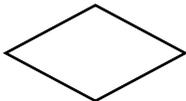
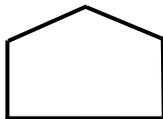
Les symboles de base utilisés dans les arbres de défaillance sont classés en deux types [16] :

- Evènements ;
- Portes ;

1° Evènements :

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

Tab III.2.1 : 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 :

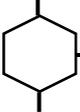
Les connecteurs logiques (ou portes logiques) sont les liaisons entre les différents branches et/ou évènements. Les plus classiques sont ET et OU.

Les connecteurs 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 III.2.2 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
	Porte Si (IF)	Sortie générée si l'évènement entrée est présent et si la condition X est réalisée	=1

III.2.5 Méthodologie de la méthode arbre de défaillances :

III.2.5.1 Démarche:

L'arbre de défaillance est une méthode déductive, qui fournit une démarche systématique pour identifier les causes d'un évènement unique intitulé évènement redouté.

Le point de départ de la construction de l'arbre est l'évènement redouté lui-même (également appelé évènement du sommet). Il est essentiel qu'il soit unique et bien identifier. A partir de là, le principe est de définir des niveaux successifs d'évènements tels que chacun est une conséquence d'un ou plusieurs évènements du niveau inférieur [26-27].

La démarche est la suivante :

- Pour chaque évènement d'un niveau donné, le but est d'identifier l'ensemble des évènements immédiats nécessaires et suffisants à sa réalisation. Des opérateurs logiques (portes) permettent de définir précisément les liens entre les évènements des différents niveaux.
- 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). Notons que :
 - Il est nécessaire que les évènements 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).
 - 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.

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.

III.2.5.2 Analyse qualitative :

L'arbre de défaillance étant construit, deux types d'exploitation qualitative peuvent être réalisés [26]:

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

L'objectif ici est de donner une vue claire et structurée des évènements et des enchainements

III.2.5.3 Analyse quantitative :

L'objectif de l'étude probabiliste est l'évaluation rigoureuse de la probabilité d'occurrence de l'évènement redouté. Ces calculs ne peuvent se concevoir que si chaque évènement élémentaire peut être probabilisé à partir d'une loi soigneusement paramétrée et de la connaissance du temps de mission associé à l'évènement redouté et / ou à l'aide de données issues du retour d'expérience [26], les lois utilisées sont :

1° Probabilité d'occurrence annuelle (POA) [8] :

La fréquence est le paramètre de la loi exponentielle définissant l'intervalle de temps entre deux observations de l'évènement : Si on note f la fréquence, l'espérance mathématique de la période de retour vaut alors :

$$E(X) = \frac{1}{f} \quad [3.1]$$

La probabilité que l'évènement se produise sur une durée T vaut alors :

$$P = 1 - e^{-f \cdot T} \quad [3.2]$$

Pour des valeurs très faibles on peut approximer la relation [3.2] par :

$$P = f \cdot T \quad [3.3]$$

Pour une période de un an, et une fréquence inférieure ou égale à 10^{-1} on considérera que la probabilité est égale à la fréquence annuelle. En pratique, la fréquence sera à exprimer en an^{-1} (ou POA) pour le système considéré.

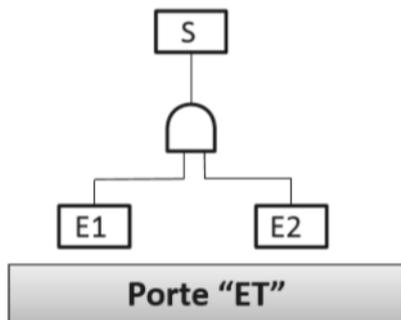
À titre d'exemple :

- si la probabilité de l'évènement E est de 10^{-3} par heure, étant donné qu'il y a 8760 heures dans une année, la POA de E peut être estimée par la relation $P = 1 - e^{-0.001 \times 8760}$ soit environ 0,999 ;

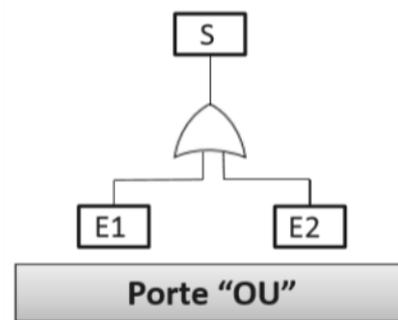
- si la probabilité de l'événement E est de 10^{-1} par an, la POA de E peut être estimée par la relation $P = 1 - e^{-0.1}$ soit environ 0,1 (0,095).

2° Probabilité de sortie porte logique [16]

Les lois de probabilité de sortie porte logique sont comme suit :



$$P(S) = P(E1).P(E2)$$



$$P(S) = 1 - (1 - P(E1)).(1 - P(E2)) = P(E1) + P(E2) -$$

$$P(E1).P(E2)$$

$$\approx P(E1) + P(E2) \text{ si } P(E1).P(E2) \ll$$

III.2.5.4 Résumé des règles importantes de la construction de l'arbre de défaillance :

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.2.6 Avantages et Inconvénients

En tant que méthode déductive, l'arbre des défaillances possède d'une part 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 [16].

III.2.6.1 Avantages:

- ADD combine des évènements qualitatifs et une méthode mathématique rigoureuse basée sur des calculs de probabilités. L'analyse donne des résultats quantitatifs précis et fiables.
- Fait apparaître 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

III.2.6.2 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.2.7 Mise en œuvre de l'arbre des défaillances

III.2.7.1 Traitement qualitatif du système :

III.2.7.1.1 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 industrielle environnemental ou économique. Il peut s'avérer nécessaire parfois de caractériser l'évènement redouté pour chacune des missions du système étudié.

Dans notre cas, l'évènement à analyser est le suivant : « **Occurrence d'anomalie sur le compresseur RC5S** ».

III.2.7.1.2 Reconnaissance des causes (évènements) probables possible :

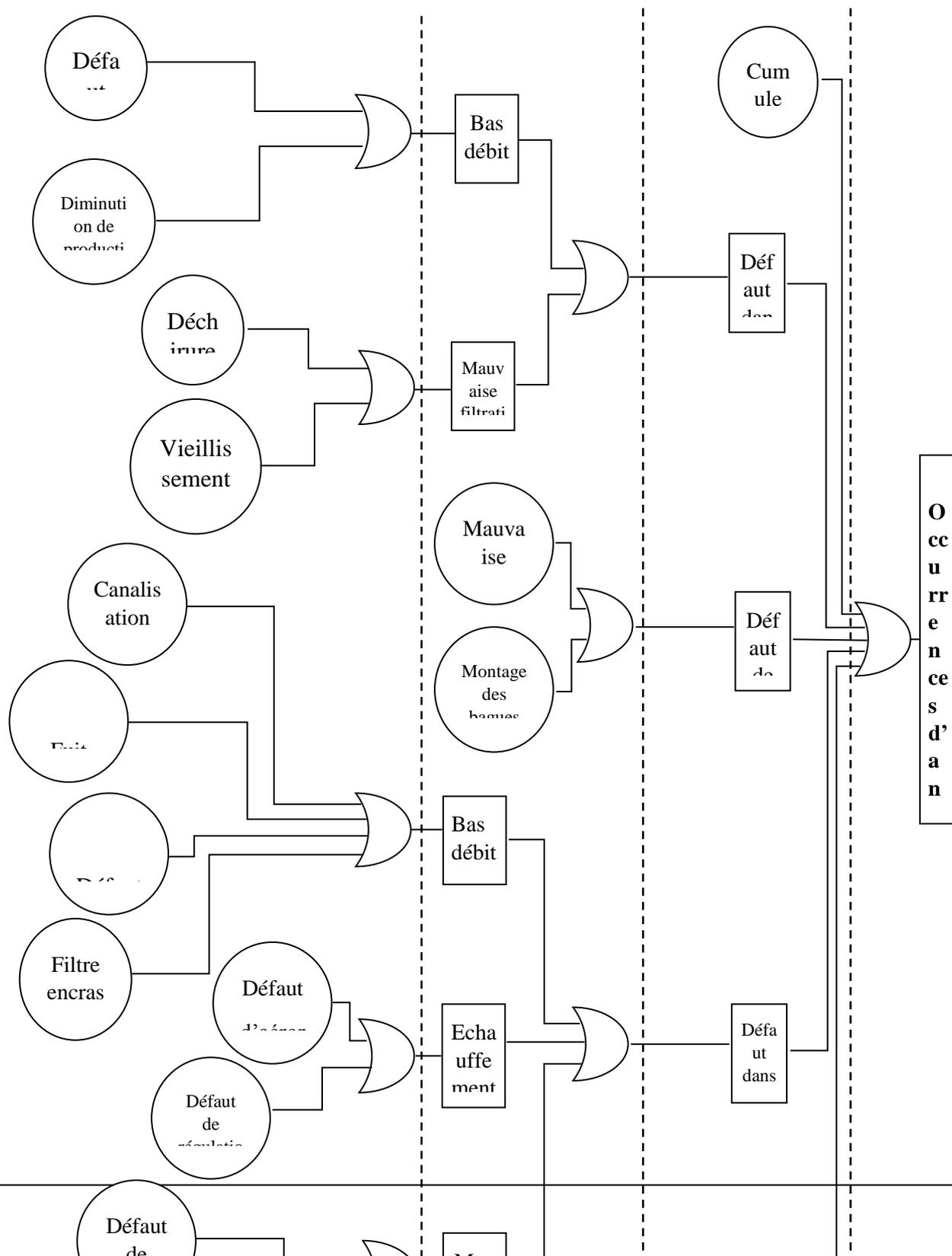
Afin d'identifier tous les évènements possibles et probables générateurs de l'évènement redouté, nous avons adopté une démarche déductive. Chaque évènement de rang (n-1) est déduit d'une manière logique de l'évènement (n) jusqu'à la fin de l'opération et au dernier évènement dit « évènement de base ». Donc les différents évènements recensés sur notre système d'étude "Compresseur centrifuge THERMODYN RC5S " sont regroupés dans le **Tab III.2.3**:

Tab III.2.3 : Liste des évènements probables

N°	Evènements probables
1	Cumule de nombre de démarrage
2	Défaut séparation sur champ
3	Diminution de production sur champ
4	Déchirure des chicanes
5	Vieillessement des chicanes ballon d'aspiration
6	Mauvaise serrage d'accouplement
7	Montage des bagues d'étanchéité hors cote
8	Canalisation d'huile encrassée
9	Fuit dans le circuit
10	Défaut des pompes
11	Filtre encrassé
12	Défaut d'aéroréfrigérant

13	Défaut de régulation température caisse a huile
14	Défaut de centrifugeuse
15	Vieillessement des filtres
16	Défaut des sondes

III.2.7.1.3 Construction de l'arbre de défaillance



III.2.7.2 Traitement quantitatif :

III.2.7.2.1 Codage de l'arbre de défaillance :

On auscultant le système du compresseur centrifuge RC5S, on a pu recenser les évènements probabilistes consignés dans le tableau suivant :

Tab III.2.4 Codes des évènements

Codes évènements	Désignations des Evènements
ER	Occurrence d'anomalie sur le compresseur
A	Défaut dans le circuit de gaz
B	Bas débit de gaz
C	Défaut séparation sur champ
D	Diminution de production sur champ
E	Mauvaise filtration de gaz
F	Déchirure des chicanes
G	Vieillessement des chicanes ballon d'aspiration
H	Défaut de montage de compresseur
I	Mauvaise serrage d'accouplement
J	Montage des bagues d'étanchéité hors cote
K	Défaut dans le circuit d'huile
L	Bas débit d'huile
M	Canalisation d'huile encrassée
N	Fuit dans le circuit
O	Défaut des pompes
P	Filtre encrassé
Q	Echauffement d'huile
R	Défaut d'aéroréfrigérant
S	Défaut de régulation température caisse a huile
T	Mauvaise filtration d'huile
U	Défaut de centrifugeuse
V	Vieillessement des filtres
W	Cumule de nombre de démarrage
X	Défaut des sondes

III.2.7.2.2 Tableau d'apparition des évènements :

Les fréquences d'apparition des évènements nous donnent une idée sur le degré d'importance de l'évènement. De ce fait, le service de maintenance doit essayer d'éradiquer cet évènement par des solutions technologiques ou une prise en charge particulière afin de l'étouffer. D'après les lois situées dans la deuxième partie du premier chapitre, la fréquence est calculée comme suit :

$$fréquence = \frac{\text{nombre d'observations}}{\text{temps total d'observation}}$$

Tab III.2.5 Tableau d'apparition des évènements

Code d'évènement probable	Nombre d'apparition	Fréquence d'apparition
J	4	2.13 x 10 ⁻⁴
O	4	2.13 x 10 ⁻⁴
V	4	2.13 x 10 ⁻⁴
F	3	1.59 x 10 ⁻⁴
W	3	1.59 x 10 ⁻⁴
G	2	1.06 x 10 ⁻⁴
U	2	1.06 x 10 ⁻⁴
C	1	0.53 x 10 ⁻⁴
D	1	0.53 x 10 ⁻⁴
I	1	0.53 x 10 ⁻⁴
M	1	0.53 x 10 ⁻⁴
N	1	0.53 x 10 ⁻⁴
P	1	0.53 x 10 ⁻⁴
R	1	0.53 x 10 ⁻⁴
S	1	0.53 x 10 ⁻⁴
X	1	0.53 x 10 ⁻⁴

III.2.7.2.3 Probabilités des évènements de base

D'après la loi POA, les résultats de calculs sont donnés dans le **Tab III.2.6**

Tab III.2.6 probabilités des évènements de base

Evènements	C	D	F	G	I	J	M	N
POA	0.0428	0.0428	0.1330	0.0902	0.0428	0.1731	0.0428	0.0428
Evènements	O	P	R	S	U	V	W	X
POA	0.1731	0.0428	0.0428	0.0428	0.0902	0.1731	0.1330	0.0428

III.2.7.2.4 Probabilités d'évènement redouté

1°. Calcule du niveau n° 3

$$P(B) = P(C) + P(D) - P(C) \times P(D)$$

$$= 0,0428 + 0,428 - (0,0428 \times 0,0428)$$

$$P(B) = 0,0837$$

$$P(E) = P(F) + P(G) - P(F) \times P(G)$$

$$= 0,1330 + 0,0902 - 0,1330 \times 0,0902 =$$

$$P(E) = 0,2112$$

$$P(L) = P(M) + P(N) + P(O) + P(P) - P(M) \times P(N) \times P(O) \times P(P)$$

$$= 0,0428 + 0,0428 + 0,1731 + 0,0428 - 0,0428 \times 0,0428 \times 0,1731 \times 0,0428 = 0,3014$$

$$P(L) = 0,3014$$

$$P(Q) = P(R) + P(S) - P(R) \times P(S)$$

$$= 0,0428 + 0,0428 - 0,0428 \times 0,0428$$

$$P(Q) = 0,0837$$

$$P(T) = P(U) + P(V) - P(U) \times P(V)$$

$$= 0,0902 + 0,1731 - 0,0902 \times 0,1731$$

$$P(T) = 0,2476$$

2°. Calcule du niveau n° 2

$$P(A) = P(B) + P(E) - P(B) \times P(E)$$

$$= 0,0837 + 0,2112 - 0,0837 \times 0,2112$$

$$P(A) = 0,2772$$

$$P(H) = P(I) + P(J) - P(I) \times P(J)$$

$$= 0,0428 + 0,1731 - 0,0428 \times 0,1731$$

$$P(H) = 0,2084$$

$$P(K) = P(L) + P(Q) + P(T) - P(L) \times P(Q) \times P(T)$$

$$= 0,3014 + 0,0837 + 0,2476 - 0,3014 \times 0,0837 \times 0,2476$$

$$P(K) = 0,3764$$

3°. Calcule de niveau n° 1

$$P(ER) = P(W) + P(A) + P(H) + P(K) + P(X) - P(W) \times P(A) \times P(H) \times P(K) \times P(X)$$

$$= 0,1330 + 0,2772 + 0,2084 + 0,3264 + 0,0428 - 0,1330 \times 0,2772 \times 0,2084 \times 0,3264 \times 0,0428$$

$$P(ER) = 0,9939$$

III.2.7.3 Interprétation des résultats

Au terme des deux analyses, qualitative et quantitative, les principales constatations qui se dégagent sont :

- l'analyse qualitative montre que la plupart des causes d'occurrence d'anomalies qui surviennent sur le compresseur sont d'origine externe.
- l'analyse quantitative montre que le résultat du calcul de la probabilité d'occurrence de l'évènement redouté est évalué à 99 %. Cette valeur indique que l'occurrence d'anomalie sur le compresseur est un évènement presque certain.

III.2.7.4 Suggestions

En se basant d'une part sur le retour d'expérience des hommes de maintenance côtoyé durant notre stage et d'autre part sur les résultats du diagnostic fourni par l'ADD ; nous recommandons les suggestions suivantes dans le but de diminuer ou d'éviter toute occurrence d'anomalies sur cet équipement critique :

- Assurer la qualité de séparation du gaz brut sur champs.
- Assurer une réserve de gaz GNL afin d'éviter le phénomène de pompage provoquée par diminution de production du gisement.
- Laisser les tâches de maintenance à des opérateurs qualifiés afin d'éviter les défauts de montage, serrage, alignement ...etc.
- Procéder au changement des filtres d'huile et chicanes de ballon d'aspiration avant d'attendre la phase de vieillissement.
- Assurer une chaîne d'instrumentation performante et de bonne qualité pour éviter les fausses lectures concernant les informations de contrôle.

III.2.8 Analyse des anomalies

D'après le fichier historique (**voir annexes C**), les anomalies qui apparaissent sur le compresseur sont comme suit :

- Usure des patins de palier porteur
- Usure des patins de palier de butée
- Usure des bagues d'étanchéité
- Usure des labyrinthes
- Usure des roues
- Usure d'arbre
- Usure de collet de butée
- Colmatage de diffuseur d'entrée et premières roues coté aspiration
- Usure très important des roues et des diaphragmes dans les deux premiers étages
- Détérioration des cages des patins paliers
- Détérioration des sondes de vibration

Pour classifier les priorités des causes pour chaque anomalie on quantifie le nombre d'apparition d'anomalie pour chaque cause, et on calcule le prorata. Les résultats obtenus sont combinés avec ceux issus de l'ADD pour dresser la table de décision.

III.2.9 Table de décision

Conclusion générale

Conclusion

Au terme de ce mémoire, 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, le fait de traiter une problématique issue du milieu professionnel et industriel nous a donné l'occasion d'acquérir et de renforcer nos connaissances sur les réalités économiques et techniques du pays. En outre, le thème traité par notre projet de fin d'études nous a facilités en tant qu'étudiant l'intégration progressive dans notre future cadre de travail.

Dans ce modeste mémoire, nous avons traité un sujet d'une grande importance pour le secteur énergétique, particulièrement la production et l'expédition de gaz naturel par les unités de compression.

L'étude concerne essentiellement l'amélioration du diagnostic des anomalies, qui apparaissent sur les compresseurs centrifuges a basse pression THERMODYN RC5S à l'aide de la théorie des probabilités. Cette dernière peut donner des pourcentages approximatifs pour la prévision de la causalité de dégradation d'un élément de compresseur. Elle a pour but aussi, d'aider les ingénieurs de maintenance à prendre la décision correcte au court de la recherche des origines d'anomalies, pendant les révisions.

Cette méthode de diagnostic probabiliste, permet d'éliminer partiellement la nécessité d'attendre l'expérience résultant de l'ancienneté de l'ingénieur maintenancier, en l'intégrant dans un système expert qui se développe avec le temps en se basant sur les données qualitatives et quantitatives contenues dans le fichier historique de l'unité.

En ce qui concerne les résultats obtenus, nous espérons que cette démarche peut être applicable à tout équipement industriel critique pour minimiser le temps d'intervention et par suite le coût de maintenance, augmentant ainsi, la disponibilité opérationnelle et la rentabilité.

Bibliographie

- [1] **G. ZWINGELSTEIN.** “Diagnostic des défaillances : théorie et pratique pour les systèmes industriels”. Ed. Hermes, Paris, 1995.
- [2] **R. TOSCANO.** “Commande et diagnostic des systèmes dynamiques”. Ed. Ellipses, 2005.
- [3] **F. VANDERHAEGEN, D. JOUGLET, S. DURIEZ.** “E-diagnostic”.
- [4] **COMITE DE NORMALISATION DES MOYENS DE PRODUCTION.** “Moyens de production METHODE AMDEC ”. Juin 1994.
- [5] **H.VENTSEL,** "Théorie des probabilités", Editions Mir Moscou, 1987.
- [6] **C. REISCHER, R. LEBLANC, B.RÉMILLARD, D.LAROCQUE,** " Théorie des probabilités –problèmes et solutions", Presses de l’Université du Québec, 2002.
- [7] **D. RUMSEY,** "Probability for dummies", Wiley Publishing Inc., 2006.
- [8] **M. DEMEESTERE, F. MASSE, F. PRATS.** “Probabilité dans les études de sécurité et études de dangers”. INERIS, 2018.
- [9] **D. NOUREDDINE, B. ADIL.** “Étude et maintenance du compresseur centrifuge «BCL305» ”. Mémoire fin d’études, Université de Boumerdes, 2008.
- [10] **I. BERRACHEB,** “Étude technologique d'un compresseur centrifuge type BCL. 305/A”. Mémoire fin d’études, Institut national spécialisé de la formation professionnelle I.N.S.F.P de Bordj el bahri, 2010.
- [11] **TOTAL,** “le process « LA COMPRESSION » ”. Manuel de formation, cours EXP-PR-PR080 Révision 0.1, 2007.
- [12] **TOTAL,** “les équipements « LES COMPRESSEURS » ”. Manuel de formation, cours EXP-PR-EQ130 Révision 0.3, 2007.
- [13] **C.CASTELNAU,** “Ingénieurs Maintenance « Technologie, opération, maintenance des compresseurs centrifuges » ”, formation professionnalisant IFP Training, Hassi Messaoud / Base 24, 09 -- 14 mai 2015.
- [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] **S. BENZAADA, D. FELIACHI,** “ La maintenance industrielle”, Office des publications universitaires/Alger, 2002.

- [16] **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.
- [17] **A. BOULENGER, C. PACHAUD**, " Aide-mémoire « Surveillance des machines par analyse des vibrations »", Paris, Dunod, 2009.
- [18] **J. HENG**, " Pratique de la maintenance préventive", Paris, Dunod, 2002.
- [19] **DELTA V**, " Système d'automatisation numérique DeltaVTM ", Présentation du système, Emerson Process Management, 2009.
- [20] **P. CHAPOUILLE**, "Fiabilité. Maintenabilité", Technique de l'ingénieur, Vol T 4 300, Traité de l'entreprise industrielle, 1997.
- [21] **M. HOUHOU**, "Evaluation de la fiabilité et de la disponibilité des systèmes mécaniques par la méthode ArdBayes", mémoire de Magister, Université M'hamed Bouguerra-Boumerdes, 2012.
- [22] **A. BELLAOUAR, S. BELEULMI**, "Fiabilité-Maintenabilité-Disponibilité", Polycopié, Université Constantine 1, 2013.
- [23] **O. TEBBI**, "Estimation des lois de fiabilité en mécanique par les essais accélérés", Thèse de doctorat, université d'Angers, 2005
- [24] **X. ZWINGMANN**, "Modèle d'évaluation de la fiabilité et de la Maintenabilité au stade de la conception", Thèse de doctorat en cotutelle entre université Laval Québec (Canada) et université Louis-Pasteur Strasbourg, (France), 2005
- [25] **P. ARQUES**, " Diagnostic prédictif et défaillances des machines: théorie, traitement, analyse, reconnaissance, prédiction ", Editions TECHNIP, 2009.
- [26] **W.E. VESELY, F.F. GOLDBERG, N.H. ROBERTS, D.F. HAASL**, "Fault tree handbook", NUREG report 0492, 1981.
- [27] **R. COOKE**, " Probabilistic Risk Analysis: Foundation and Methods Tim Bedford", Cambridge University, 2001

Résumé

La nécessité permanente des industries du secteur des hydrocarbures de fournir les énergies à leurs utilisateurs, les poussent à garantir la disponibilité de leurs systèmes de production, à travers la mise en place efficace du concept de la sûreté de fonctionnement. Dans ce travail, nous avons traité un sujet d'une grande importance pour le secteur énergétique, particulièrement la production et l'expédition de gaz naturel par les unités de compression. La thématique abordée dans ce mémoire, traite l'un des aspects des activités techniques de la maintenance industrielle, à savoir le diagnostic industriel. Etant une démarche qui traite les événements aléatoires, il ne peut être dissocié de l'utilisation de la théorie des probabilités. Dans ce contexte, 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 ainsi que les tables de décision. Comme conclusion, on peut affirmer que cette méthode de diagnostic probabiliste, permet d'éliminer partiellement la nécessité d'attendre l'expérience résultant de l'ancienneté de l'ingénieur maintenancier, en l'intégrant dans un système expert qui se développe avec le temps en se basant sur les données qualitatives et quantitatives contenues dans le fichier historique de l'unité.

Mots clé : *anomalie, diagnostic, fiabilité, probabilité, arbre de défaillance*

المخلص

إن استمرار حاجة الصناعات في قطاع المحروقات لتوفير الطاقة لمستخدميها، يدفعهم إلى ضمان توافر أنظمة الإنتاج الخاصة بهم ، من خلال التنفيذ الفعال لمفهوم موثوقية سير التشغيل. في هذا العمل ، تناولنا موضوعاً ذا أهمية كبيرة لقطاع الطاقة ، وخاصة إنتاج و شحن الغاز الطبيعي بواسطة وحدات الضغط. يتناول موضوع هذه الأطروحة أحد جوانب الأنشطة الفنية للصيانة الصناعية ، وهي التشخيص الصناعي. كونه نهج يتعامل مع الأحداث العشوائية ، فإنه لا يمكن فصله عن استخدام نظرية الاحتمالات. في هذا السياق ، نرى كحل لتحسين توافر المرافق عن طريق العزل السريع لأسباب الفشل بواسطة استخدام شجرة الأعطال وكذلك جداول القرارات. في الختام ، يمكن القول أن طريقة التشخيص الاحتمالي هذه تجعل من الممكن القضاء جزئياً على الحاجة إلى انتظار تحصيل الخبرة الناتجة عن أقدمية مهندس الصيانة ، من خلال دمجها في نظام خبير يتطور مع الوقت بناءً على البيانات النوعية والكمية الموجودة في الملف التاريخي للوحدة.

الكلمات المفتاحية: الشذوذ ، التشخيص ، الموثوقية ، الاحتمال ، شجرة الفشل

Abstract

The continuing need of hydrocarbon sector industries to provide energy to their potential users drives them to ensure the availability of their production systems, through the effective implementation of the concept of dependability. In this work, we covered a topic of great importance to the energy sector, particularly the production and shipping of natural gas by compression units. The theme addressed in this thesis deals with one of the aspects of the technical activities of industrial maintenance, namely the industrial diagnosis. Being an approach that deals with random events, it can not be dissociated from the use of probability theory. In this context, he saw as a solution to improve the availability of the facilities by a fast isolation of failures causes by using the fault tree as well as the decision tables. As a conclusion, it can be said that this method of probabilistic diagnosis makes it possible to partially eliminate the need to wait for the experience resulting from the seniority of the maintenance engineer, by integrating it into an expert system that develops with the time based on the qualitative and quantitative data contained in the historical file of the unit.

Keywords: anomaly, diagnosis, reliability, probability, failure tree