

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR - ANNABA  
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار – عنابة

Faculté : TECHNOLOGIE  
Département : GENIE MECANIQUE  
Domaine : SCIENCES ET TECHNOLOGIES  
Filière : GENIE MECANIQUE  
Spécialité : INGENIERIE DE MAINTENANCE

## Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master  
Thème:

**Etude des principales défaillances survenues sur le 101BJT**

Présenté par : *BOUMAHDAR KAHINA*

Encadrant : *KHELIF RABIA*  
UBMA

*Professeur*

### Jury de Soutenance :

KALLOUCH ABDELKADER	MAITRE DE CONFERENCES / B	<i>UBMA</i>	Président
KHELIF RABIA	PROFESSEUR	<i>UBMA</i>	Encadrant
BENAMIRA MOHAMED	MAITRE DE CONFERENCES / B	<i>UBMA</i>	Co-encadrant
LAISSAOUI RACHID	MAITRE ASSISTANT / A	<i>UBMA</i>	Examineur

Année Universitaire : 2022/2023

**REMERCIEMENTS**

Par la présente, je tiens à exprimer mes sincères remerciements à tous ceux qui ont joué un rôle essentiel dans la réalisation de ce mémoire.

Tout d'abord, ma mère, je souhaite te remercier du fond du cœur. En tant que mon premier modèle, tu as été présente à chaque étape de mon parcours. Ta confiance en moi, tes encouragements constants et tes sacrifices indéniables m'ont procuré la force et la motivation nécessaires pour surmonter les défis et réaliser mes rêves.

À mes frères, je souhaite exprimer ma gratitude pour notre relation unique. Vous avez été mes compagnons de route. Les moments partagés. Vous m'avez inspiré, poussé à me dépasser et m'avez montré que la famille est un soutien inestimable dans tous les aspects de la vie.

J'aimerais également exprimer ma profonde reconnaissance envers mon directeur de mémoire, le Pr. KHELIF. Son encadrement, ses conseils éclairés et sa disponibilité. De plus, je tiens à remercier chaleureusement toute l'équipe de maintenance de l'entreprise FERTIAL pour leur aide précieuse. Leur disponibilité qui ont facilité la collecte de données et la compréhension des enjeux liés à mon sujet d'étude.

Je suis également reconnaissant envers mes collègues et camarades de classe pour leur soutien et leur collaboration durant cette période de recherche.

Enfin, mes remerciements s'étendent à tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce mémoire. Votre soutien, vos conseils et vos encouragements ont été d'une valeur inestimable et ont contribué à mon cheminement académique.

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

## Chapitre I : Etude du fonctionnement du Ventilateur 101BJT.....2

1. Historique de l'entreprise .....	3
2. Situation géographique .....	3
3. Directions principales.....	4
4. Présentation de l'entreprise.....	5
5. Présentation de plateforme Annaba.....	6
5.1 Zone sud (engrais phosphatés) .....	5
5.2 Zone nord (engrais azotés) .....	6
6. Objectif de l'entreprise .....	6
7. Principales activités.....	6
8. Organigramme de FERTIAL.....	7
9. Objectif du procédé.....	8
9.1 Description du procédé. ....	8
A. Préparation des matières premières.....	8
B. Purification du gaz de synthèse.....	8
C. Synthèse de l'ammoniac.....	8
10. Diagramme de fabrication et de contrôle.....	8
11. Description générale des installations .....	9
11.1 Unité de production d'acide nitrique (HNO <sub>3</sub> ) .....	9
11.2 Unité de production du nitrate d'ammonium .....	9
11.3 Unité de production du NPK .....	10
11.4 Unité centrale utilité (Cu il) .....	11
11.5 Unité de production d'ammoniac (NH <sub>3</sub> ) .....	11
12. Description de l'installation. ....	13
12.1 Introduction. ....	13
12.2 Rôle du ventilateur dans le process .....	14
12.3 Principe de fonctionnement du système turbo ventilateur.....	15
A. Turbines.....	16
B. Réducteur... ..	18
C. Ventilateur. ....	19
• La roue. ....	19
• Enveloppe-pavillon.....	20
D. Palier.....	20
E. L'arbre.....	21
F. Moteur électrique. ....	21

## Chapitre II : Historique des défaillances survenus sur 101BJT .....23

1. Introduction .....	24
2. Historique des défaillances .....	24
3. Types de défaillances en maintenance industrielle .....	25
3.1 Défaillances mécaniques.....	26
4. Les conséquences des défaillances en maintenance industrielle .....	28
5. La gestion des défaillances en maintenance industrielle .....	28
6. Les avantages de l'étude de l'historique des défaillances en maintenance industrielle.....	29
7. L'importance de l'étude de l'histoire de la maintenance .....	31
8. Préparation de l'étude d'historiques des défaillances du Ventilateur .....	31

8.1 Résumé de l'incident .....	31
8.2 Les conséquences de l'incident.....	31
• Chronologies des évènements.....	33
8.3 Les témoignages .....	33
8.4 Relation des faits de l'incident .....	34

### Chapitre III : Diagnostic technique et vérification de la résistance .....36

1. Introduction .....	37
2. Buts de la résistance des matériaux .....	37
3. Le choix critique d'un matériau.....	38
4. Description d'arbre.....	39
5. Conception d'arbres.....	40
6. Modèle de calcul et modélisation de l'arbre.....	41
7. Etude de la résistance de l'arbre.....	41
7.1 Sollicitations simples et composées.....	41
7.2 Diagrammes de l'effort tranchant T et du moment fléchissant $M_f$ .....	43
8. Etude de la flexion .....	44
8.1 Contrainte Normale .....	45
8.2 Contrainte tangentielle du Flexion .....	45
9. Etude de la torsion .....	46
9.1 Contrainte tangentielle de la torsion .....	47
10. Conclusion.....	48

### Chapitre IV : Diagramme Cause à Effet .....49

1. Introduction .....	50
2. Définition de diagramme d'ISHIKAWA.....	50
3. La réalisation du diagramme d'Ishikawa .....	51
4. But de diagramme d'Ishikawa.....	51
5. Les causes .....	52
6. Proposition pour les véritables causes parmi celles qui étaient potentielles ..	55

Conclusion.....	57
-----------------	----

## LISTE DES FIGURES

### Chapitre I : Etude du fonctionnement du Ventilateur 101BJT

Figure I.1 : Photo satellite de l'entreprise FERTIAL – Annaba .....	3
Figure I.2 : Les différents engrais.....	5
Figure I.3 : Organigramme de l'entreprise.....	6
Figure I.4 : Diagramme de fabrication et de contrôle.....	7
Figure I.5 : Schéma de production de la NH <sub>3</sub> .....	11
Figure I.6 : L'unité d'ammoniac.....	12
Figure I.7 : Four de l'unité ammoniac.....	14
Figure I.8 : Schéma cinématique de 101 BJT.....	15
Figure I.9 : Les tuyères de la turbine.....	16
Figure I.10 : Réducteur Woodward.....	17
Figure I.11 : Roue du ventilateur.....	18
Figure I.12 : L'enveloppe de ventilateur.....	19
Figure I.13 : Les paliers.....	20
Figure I.14 : Schéma de l'arbre.....	20
Figure I.15 : Le moteur électrique.....	21

### Chapitre II : Historique des défaillances survenues sur 101BJT

Figure II .1 : L'arbre endommagé.....	31
Figure II .2 : La courbe illustrant l'arrêt complet du ventilateur.....	34

### Chapitre III : Diagnostic technique et vérification de la résistance

Figure III .1 : Schéma fournissant une représentation plus détaillée de l'ensemble de l'arbre du turboventilateur.....	38
Figure III .2 : Le schéma représentant l'arbre avec plus de détails, en se concentrant spécifiquement sur la partie entre les paliers 9 et 10, qui correspond à la section reliée au ventilateur.....	39
Figure III .3 : La combinaison des forces et des moments du torseur des efforts internes de l'arbre.....	42
Figure III .4 : Diagramme de l'effort tranchant "T".....	43
Figure III .5 : Diagramme du moment fléchissant "Mf".....	43

### Chapitre IV : Diagramme Cause à Effet

Figure IV .1 : <i>Diagramme en Poisson</i> .....	49
Figure IV .2 : Le diagramme de classification d'Ishikawa.....	53
Figure IV.3 : <i>Les véritables causes détectées</i> .....	54

## LISTE DES TABLEAUX

### Chapitre I : Etude de fonctionnement du Ventilateur 101BJT

Tableau I.1 : Effectifs personnels de FERTIAL.....	4
Tableau I.2 : Les pays destinataires des produits exportés.....	6
Tableau I.3 : Caractéristiques techniques de la turbine à vapeur.....	16
Tableau I.4 : Caractéristiques techniques du réducteur.....	17
Tableau I.5 : Caractéristiques techniques du ventilateur.....	18
Tableau I.6 : Caractéristiques techniques du moteur électrique.....	21

### Chapitre II : Historique des défaillances survenues sur 101BJT

Tableau II.1 : Chronologie des évènements.....	32
--	----

### Chapitre III Diagnostic technique et vérification de la résistance

Tableau III.1 : Les actions nécessaires pour la fabrication et l'évaluation d'une pièce, ainsi que les données nécessaires pour prendre ces actions.....	36
Tableau III.2 : Caractéristiques mécaniques du matériau de l'arbre.....	40
Tableau III.3 : Récapitulatif des sollicitations simples les plus courantes.....	41

### Chapitre IV : Diagramme Cause à Effet

Tableau IV.1 : Classification des causes.....	53
Tableau IV.2 : <i>Proposition</i> pour remédier aux causes identifiées.....	56

## **Introduction générale :**

La rupture de l'arbre dans le domaine de la maintenance industrielle est une problématique significative qui peut entraîner des perturbations majeures dans les opérations de production. L'arbre joue un rôle crucial dans de nombreux équipements industriels, tels que les machines tournantes, les moteurs, les pompes et les compresseurs. Sa défaillance peut entraîner des arrêts imprévus, des coûts de réparation élevés et des retards dans la production.

Ce mémoire se concentre sur l'analyse et la prévention de la rupture de l'arbre en maintenance industrielle. Le chapitre 1 présentera une vue d'ensemble du rôle de l'arbre dans les équipements industriels, en mettant en évidence son importance et les contraintes auxquelles il est soumis pendant son fonctionnement. Une compréhension approfondie du rôle de l'arbre dans les systèmes industriels est essentielle pour une analyse précise des défaillances potentielles.

Le chapitre 2 se focalisera sur l'analyse de défaillance de l'arbre, en identifiant les différents facteurs qui peuvent contribuer à sa rupture. Cela peut inclure des charges excessives, des contraintes mécaniques, des vibrations, des phénomènes de fatigue. L'objectif sera d'identifier les principaux contributeurs de la défaillance de l'arbre afin de mettre en place des mesures préventives appropriées.

Le chapitre 3 abordera le calcul de Résistance des Matériaux (RDM) appliqué à l'arbre du turboventilateur. Nous utiliserons des méthodes de calcul et des modèles pour évaluer la résistance structurelle de l'arbre face aux charges et aux contraintes auxquelles il est soumis pendant son fonctionnement.

Enfin, le dernier chapitre se concentrera sur l'utilisation du diagramme d'Ishikawa, également connu sous le nom de diagramme de causes et effets, pour analyser de manière systématique les différentes causes potentielles de la rupture de l'arbre. Ce diagramme nous aidera à identifier les causes racines et à proposer des recommandations pour réduire les risques de défaillance.

En résumé, ce mémoire se concentre sur la rupture de l'arbre dans le contexte de la maintenance industrielle. En analysant les défaillances potentielles, en mettant en place des techniques de surveillance et d'inspection, ainsi qu'en adoptant des méthodes de prévention appropriées, il est possible de minimiser les risques de rupture d'arbre et d'assurer un fonctionnement fiable et sûr des équipements industriels.

# CHAPITRE I :

## ETUDE DE FONCTIONNEMENT DU VENTILATEUR 101BJT

## **1) Historique de l'entreprise :**

FERTIAL, Société des Fertilisants d'Algérie, a été créée en 1972 par SONATRACH. C'est une entreprise nationale majeure dans l'industrie pétrochimique, spécialisée dans la production d'engrais phosphatés et azotés. Le choix de l'emplacement du complexe a été basé sur plusieurs considérations économiques :

- La proximité d'infrastructures importantes, notamment les installations portuaires à seulement trois kilomètres et les moyens de communication rapides.
- La disponibilité d'utilités à proximité telles que l'eau de mer et l'eau des barrages.
- La présence des centrales thermiques d'ELHADJAR d'ANNABA qui fournissent de l'énergie électrique.
- La proximité des gisements de minerais de phosphate situés à 300 km au sud d'ANNABA (DJEBEL ONK).

En 1985, ASMIDAL a pris en charge la production, la commercialisation et le développement des activités d'engrais suite à SONATRACH. L'exportation d'ammoniac a débuté en 1986 vers les pays arabes, les pays africains et les pays méditerranéens.

En 1996, ASMIDAL est devenue une entreprise publique économique (EPE) avec un capital de 2,275 milliards de dinars. En 2001, elle a réalisé un chiffre d'affaires de 12 milliards de dinars dans l'exportation des engrais, soit l'équivalent de 64 millions de dollars. Elle est devenue l'une des sociétés les plus cotées nationalement et internationalement, se classant au 7<sup>e</sup> rang mondial dans la production d'ammoniac.

En août 2005, la société a été issue d'un partenariat entre le Groupe algérien ASMIDAL et le Groupe espagnol Grupo Villar Mir. Ils détiennent respectivement 34% et 66% du capital. L'outil de production, installé sur les sites industriels d'Annaba et d'Arzew, a une capacité annuelle d'un million de tonnes d'ammoniac.

Grâce à un investissement de plus de 170 millions de dollars pour moderniser l'outil industriel, FERTIAL a gagné une part de marché considérable, tant à l'exportation que sur le marché intérieur. Environ 74% de sa production est exportée, ce qui positionne FERTIAL comme un leader dans le bassin méditerranéen et le deuxième dans le monde arabe, derrière l'Arabie Saoudite. Elle occupe également une position confortable au septième rang mondial.

## **2) Situation géographique :**

L'usine est implantée à l'est de la ville d'Annaba, et elle est délimitée par l'oued Seybouse et la cité Sidi Salem à l'est, la cité Seybouse à l'ouest, la mer Méditerranée au nord, la route nationale n°44 et la plaine d'Annaba au sud.

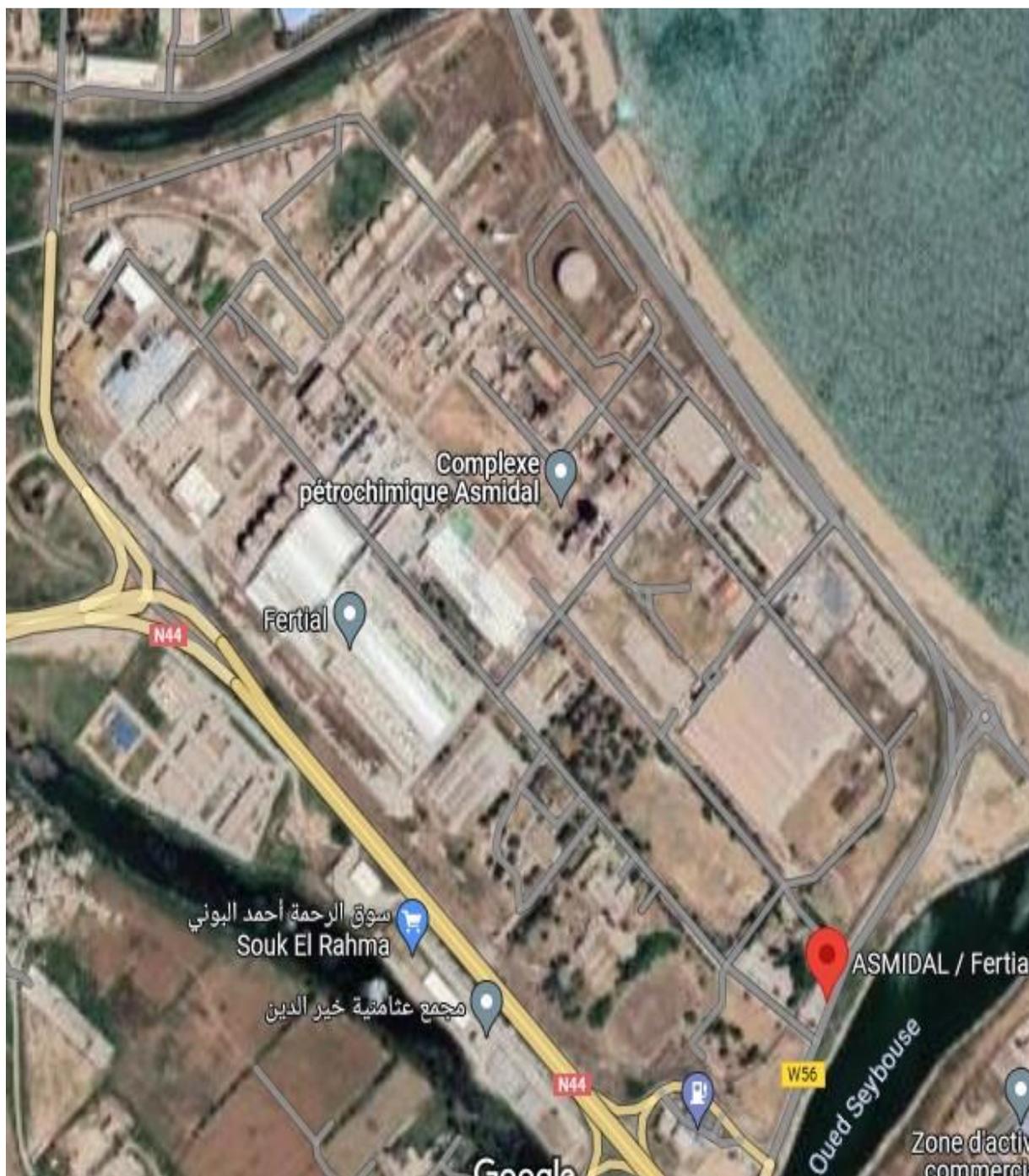


Figure I.1 : Photo satellite de l'entreprise FERTIAL – Annaba --

### **3) Directions principales :**

Il y a deux pôles industriels :

- **Plateforme ANNABA** : complexe fabriquant des engrais phosphatés, azotés et de l'ammoniac.
- **Plateforme Arzew (ALZOFERT)** : complexe fabriquant des engrais azotés et de l'ammoniac avec des capacités installés de 2000T/J d'NH<sub>3</sub> et 1500T/J de nitrate d'NH<sub>3</sub>.

#### 4) Présentation de l'entreprise :

Les différents centres utilisés

**SMIDAL** est organisée sous la forme de groupes dont le siège social est sis à Annaba. Elle comprend :

- **FERTIAL** : Complexe fabriquant des engrais phosphatés, azotés et de l'ammoniac.
- **ALZOFERT** : Complexe fabricant des engrais azotés et de l'ammoniac.
- **KIMIAL** : Entreprise fabriquant de la tripoli phosphate de sodium.
- **ALCHEMTRAD** : Importation et exportation des produits du groupe ASMIDAL.
- **CAJAS** : Gestion et développement des activités à caractère social.
- **SOMIAS** : Groupe Maintenance industrielle.
- **ASFERTRADE** : Entité autonome de disposition et de commercialisation des engrais.
- **I.S.G.A**: Institut supérieur de gestion d'Annaba.
- **S.G.S** : Social de gardiennage et de surveillance.

#### 5) Présentation de plateforme Annaba :

FERTIAL en tant que EPE/SPA, filiale du groupe ASMIDAL, a été créée le 01/03/2001.

Elle est dirigée par un président directeur général (PDG), et elle emploie environ 438 travailleurs répartis comme suit :

CSP	Cadres supérieurs	Cadres gestionnaire	Exécution	Cadres	Maitrises	Apprentis
Effectif Permanent FERTIAL Usine Annaba	10	35	143	72	224	31

Tableau I.1 : Effectifs personnels de FERTIAL (Mars 2023)

#### **Dans le complexe, il y a lieu de distinguer deux zones :**

La zone sud qui comprend les anciens ateliers dont le démarrage remonte à 1972. (Engrais phosphatés) et la zone nord (engrais azotés) qui comprend les ateliers « dits nouveaux » et le démarrage remonte à 1982.

**5.1) Zone sud (engrais phosphatés) :** elle est composée de trois ateliers principaux.

- Un atelier d'engrais : NPK et UAN liquide ;
- Un atelier super simple phosphate : SSP ;
- Une centrale utilités (centrale 1).

**5.2) Zone nord (engrais azotés)** : Cette zone comprend également cinq ensembles.

- Un atelier acide nitrique (NI) ;
- Un atelier nitrate d'ammoniac (NA) ;
- Un atelier d'ammoniac (NH<sub>3</sub>) ;
- L'installation de manutention et de stockage ;
- Centrale utilités (centrale 2).

### **6) Objectifs de l'entreprise :**

Dans le contexte du développement économique et social du pays, l'entreprise a pour mission de :

- Promouvoir et développer l'industrie des engrais et des produits phytosanitaires.
- Exploiter, gérer et rentabiliser les ressources humaines, matérielles et financières dont elle dispose afin de répondre aux besoins du marché national et international.
- Encourager la créativité et l'initiative et faire appel aux ressources locales.

### **7) Principales activités :**

FERTIAL d'Annaba se consacre à plusieurs activités, parmi lesquelles les plus importantes sont :

- La production d'ammoniac (NH<sub>3</sub>) avec une capacité de 1000 tonnes par jour.
- La production d'ammonium avec 2 lignes de production de 500 tonnes par jour.
- La production d'acide nitrique avec 2 lignes de production de 400 tonnes par jour.
- La production d'engrais phosphatés avec 2 lignes de production de 1000 tonnes par jour chacune.
- La production de SSP (superphosphate simple) avec une capacité de 1200 tonnes par jour.
- La production d'UAN (urée acide nitrique) avec une capacité de 600 tonnes par jour.
- La production d'engrais azotés, notamment le nitrate d'ammonium, l'UAN 32/100, l'urée 46/100 (importée) et le sulfate d'ammonium (importé).



Figure I.2 : Les différents engrais

Une partie du nitrate et de l'ammoniac produits est utilisée en interne par FERTIAL pour la fabrication d'autres produits. Le tableau ci-dessous résume les pays concernés par l'exportation des produits de FERTIAL.

Production	Pays
NH <sub>3</sub>	Espagne, France, Italie, Grèce, Belgique, Cuba
Nitrate	Tunisie, Maroc
UAN	France, Espagne, USA
SSP	Maroc, Grèce, France, Italie, Brésil

Tableau 02 : Les pays destinataires des produits exportés.

**8) Organigramme de FERTIAL :**

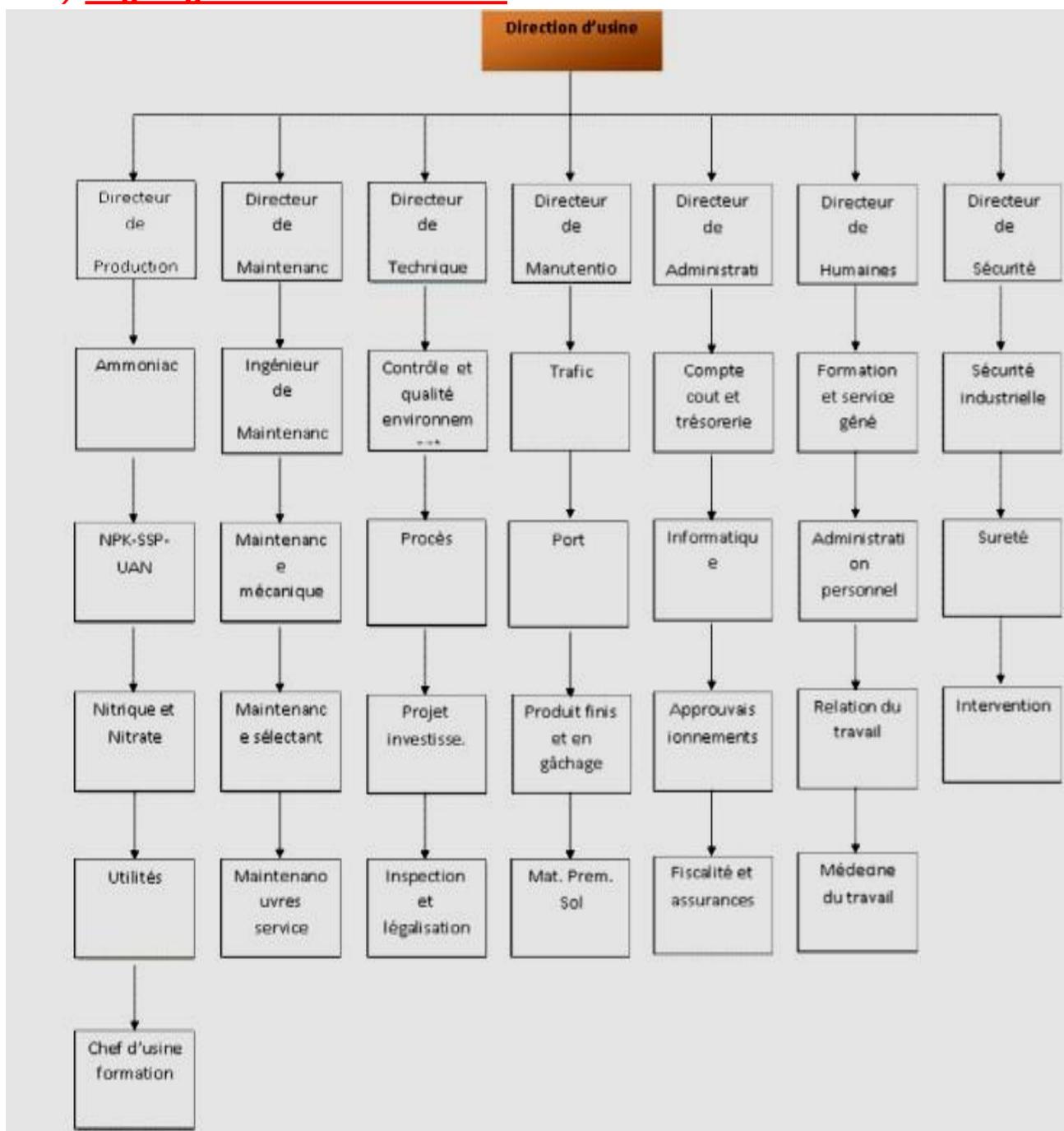


Figure I.4 : Organigramme de l'entreprise

### 9) Objectif du procédé :

L'usine est conçue pour produire 1000 tonnes d'ammoniac liquide par jour, en utilisant des matières premières préliminaires telles que le gaz naturel, la vapeur d'eau et l'air. Ce processus est réalisé selon la méthode de reformage de KELLOG, en suivant l'ordre des étapes suivantes

#### 9.1) Description du procédé:

##### A) Préparation des matières premières :

- Compression et désulfuration du gaz naturel.
- Reformage primaire et secondaire.
- Conversion du CO et CO<sub>2</sub>.

##### B) Purification du gaz de synthèse :

- Extraction du dioxyde de carbone.
- Méthanisation.

##### C) Synthèse de l'ammoniac :

- Compression du gaz de synthèse purifié.
- Réaction et refroidissement de l'ammoniac.
- Stockage et distribution du produit.

### 10) Diagramme de fabrication et de contrôle :

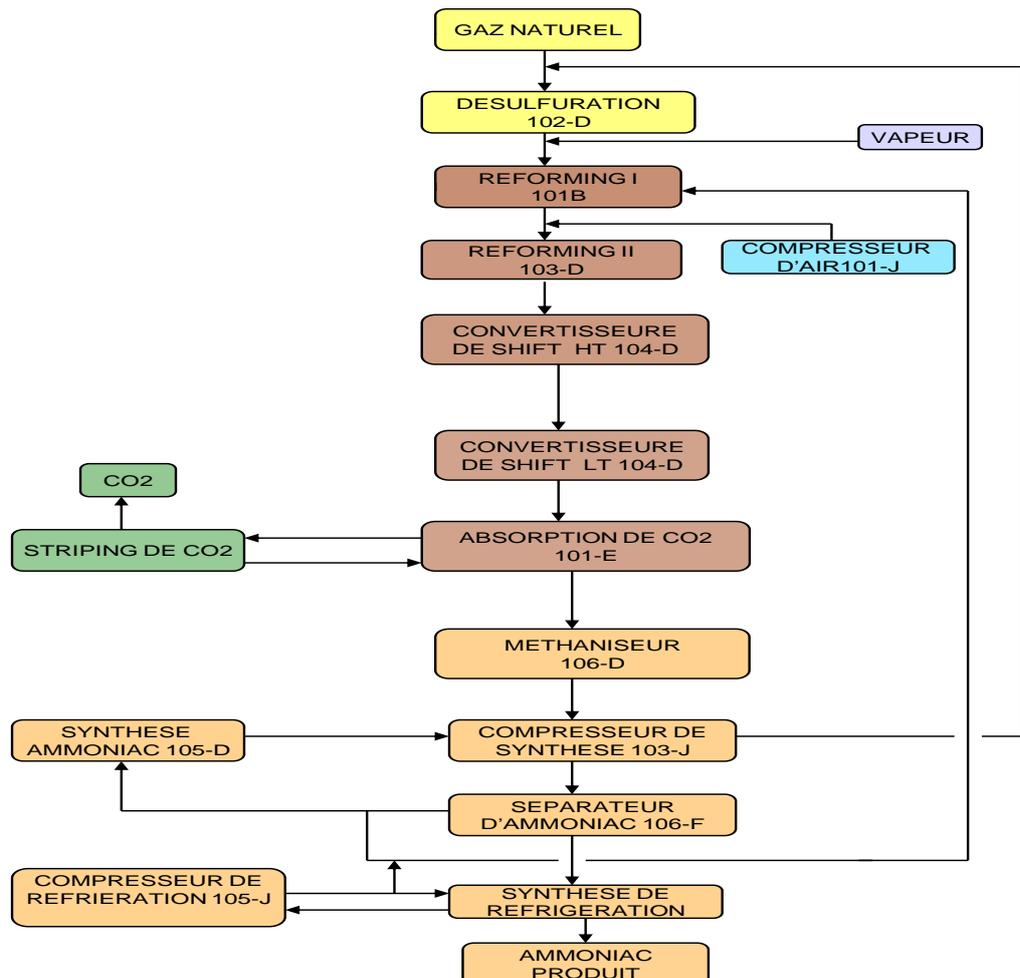


Figure I.4 : Diagramme de fabrication et de contrôle

### **11) Description générale des installations :**

Les installations opérationnelles réparties sur le site d'ANNABA sont :

#### **11.1) Unité de production d'acide nitrique(HNO<sub>3</sub>) :**

Il y a deux unités égales, NITRIQUE-1 et NITRIQUE-2, conçues pour produire chacune 400 tonnes métriques par jour d'acide nitrique à 100%. Ces unités fonctionnent selon le procédé de haute pression et sont de type de ligne simple. Elles se composent des blocs de production suivants :

- Compression d'air, évaporation d'ammoniac et mélange des deux : L'air est filtré puis comprimé dans un compresseur centrifuge. Il est ensuite mélangé avec le gaz ammoniac avant d'entrer dans le réacteur NR-1042/NR-2042. Dans ce réacteur, en présence de l'oxygène de l'air, l'azote ammoniacal s'oxyde catalytiquement de manière sélective en NO.
- Oxydation de l'ammoniac et train d'échange : Les gaz provenant du réacteur passent par un train de refroidissement avant d'entrer dans la colonne d'absorption NC-1050/NC-2050.
- Refroidissement des gaz d'oxydation : Cette étape vise à refroidir les gaz d'oxydation avant de passer à l'étape suivante.
- Refroidissement et absorption des gaz d'oxydation avec de l'eau : Les gaz d'oxydation passent à travers la tour d'absorption NC-1050/NC-2050. Le NO est oxydé en NO<sub>2</sub> dans la partie inférieure de la tour et est ensuite absorbé par l'eau qui circule à travers des plateaux perforés, se transformant ainsi en HNO<sub>3</sub>.
- Combustion catalytique du gaz de queue : Le gaz de queue subit une combustion catalytique pour éliminer les composés indésirables avant d'être rejeté.
- Stockage final, Consommation et Expédition : L'acide nitrique produit est stocké dans trois réservoirs avant d'être utilisé dans l'unité de Nitrates ou chargé dans des citernes pour son expédition.

Il est important de suivre ces étapes de manière précise pour assurer une production efficace et de qualité de l'acide nitrique.

#### **11.2) Unité de production du nitrate d'ammonium :**

La capacité de production est de 1000 tonnes métriques par jour d'ammonitrate granulé, et le processus de production se déroule en plusieurs étapes :

1. Évaporation de l'ammoniac et conditionnement de l'air : L'ammoniac est évaporé et l'air est préparé avant d'entrer dans le processus de production.
2. Neutralisation et premier étage d'évaporation : L'acide nitrique et une petite quantité d'acide sulfurique sont ajoutés à l'ammoniac gazeux préalablement chauffé. La neutralisation se produit sous une pression de 4 bars et à une température de 180°C, ce qui donne lieu à la réaction chimique suivante :  $\text{NH}_3 + \text{HNO}_3 \rightarrow \text{NH}_4\text{NO}_3$ . La solution de nitrate d'ammonium est concentrée jusqu'à un certain point en utilisant la chaleur de neutralisation. La vapeur produite est utilisée pour chauffer le premier étage d'évaporation. La solution de nitrate

d'ammonium obtenue, avec une concentration de 77%, est stockée dans un réservoir intermédiaire.

3. Deuxième évaporation et granulation : La solution de nitrate d'ammonium provenant du réservoir intermédiaire est introduite dans un évaporateur où elle est concentrée à environ 95%. Ensuite, elle passe dans un évaporateur descendant où le nitrate d'ammonium atteint une concentration de 99,8%. Dans ce processus, la matière de charge est ajoutée pour atteindre la concentration souhaitée.
4. Refroidissement et préparation du produit fini : Les granulés de nitrate d'ammonium formés descendent par gravité dans une tour de granulation où ils se solidifient. Ensuite, les granulés sont transportés vers un système de refroidissement où ils passent à travers un crible et sont ensuite envoyés à un enrobeur. Avant d'être stocké dans un silo, un anti-mottant est ajouté au produit fini.
5. Lavage de l'air de refroidissement de la granulation : L'air utilisé pour solidifier et refroidir le nitrate d'ammonium passe par une unité de refroidissement et de lavage avant de retourner à la tour de granulation. L'excès d'air est traité dans un autre laveur avant d'être rejeté dans l'atmosphère.

Il est important de suivre ces étapes de manière rigoureuse pour assurer la production efficace et de qualité de l'ammonitrate granulé.

### **11.3) Unité de production du NPK :**

L'unité de production d'engrais se compose de plusieurs sections essentielles :

1. Préparation de la matière première : Cette section est responsable de la préparation initiale des matières premières nécessaires à la fabrication des engrais.
2. Préparation de la Bouillie : Dans cette section, les matières premières sont mélangées et transformées en une bouillie homogène, prête à être utilisée dans le processus de fabrication.
3. Granulation : Les bouillies obtenues sont transformées en granulés solides grâce à des procédés spécifiques. Cette étape permet de former les granules d'engrais avec les propriétés souhaitées.
4. Séchage du produit : Après la granulation, les granulés d'engrais sont séchés pour éliminer l'excès d'humidité et obtenir une teneur en eau appropriée.
5. Classification et broyage du produit : Les granulés séchés sont classés et triés en fonction de leur taille pour garantir une qualité homogène du produit final. Si nécessaire, le produit peut également être broyé pour obtenir la taille de granulés souhaitée.
6. Refroidissement du produit : Après le broyage, le produit est refroidi pour atteindre une température ambiante et faciliter son stockage et sa manipulation ultérieurs.
7. Assainissement et lavage des gaz : Cette section est chargée de purifier les gaz générés pendant le processus de production d'engrais, en utilisant des méthodes appropriées pour minimiser les émissions polluantes.

### **11.4) Unité centrale utilité (Cu II) :**

La centrale 2, située dans le complexe, dispose des équipements suivants :

- Deux turboalternateurs d'une capacité de 10 et 18 MVA.
- Deux transformateurs de 25 MVA, raccordés au réseau SONALGAZ, avec une tension de 63 kV/5,5 kV, ainsi qu'un groupe de secours de 750 kVA.
- Elle peut être couplée avec la centrale 1 lorsque le nombre de sources disponibles n'est pas suffisant, afin de garantir l'alimentation en énergie électrique.
- La distribution de l'énergie électrique vers les différentes unités est assurée par un tableau à double jeu de barres.
- Cette centrale a pour rôle d'alimenter les ateliers de la plate-forme en énergie électrique, en vapeur d'eau, en eau dessalée et en eau déminéralisée.
- Elle regroupe les éléments suivants :
  - Deux chaudières d'une capacité nominale de 70 tonnes/heure.
  - Deux groupes turboalternateurs de 10 et 18 MVA.
  - Une station de pompage.
  - Trois lignes de dessalement d'eau de mer.
- La centrale est une unité essentielle pour l'ensemble du complexe de production. Son rôle principal est de répondre aux besoins en utilités du complexe, tels que l'eau, la vapeur et l'électricité.
- Elle est composée des sections suivantes :
  - Section de pompage de l'eau de mer.
  - Section de dessalement de l'eau de mer.
  - Section de déminéralisation.
  - Section de chaudière.
  - Section de turboalternateurs :
    - Turbine à contre-pression.
    - Turbine à condensateur.
  - Section des compresseurs d'air.

### **11.5) Unité de production d'ammoniac (NH<sub>3</sub>) :**

L'unité d'ammoniac est composée de plusieurs sections qui jouent chacune un rôle spécifique dans le processus de production. Les sections sont les suivantes :

- Compression & Désulfuration : Cette section est responsable de la compression de gaz d'alimentation et de l'élimination des composés soufrés indésirables.
- Reforming primaire : Cette étape implique la réaction chimique du gaz d'alimentation avec la vapeur d'eau pour former un mélange de gaz de synthèse.
- Reforming secondaire : Dans cette section, le gaz de synthèse est davantage transformé pour augmenter la teneur en hydrogène.
- Conversion de CO : Cette étape vise à convertir le monoxyde de carbone (CO) en dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), afin d'optimiser le rendement de la réaction d'ammoniac ultérieure.





Figure I.6 : L'unité d'ammoniac

## **12) Description de l'installation :**

### **12.1) Introduction :**

L'unité d'ammoniac de FERTIAL à Annaba possède un système crucial appelé turboventilateur 101 BJT, qui joue un rôle essentiel dans le processus de fabrication. Ce système nécessite une surveillance constante pour assurer son bon fonctionnement.

Le turboventilateur se compose d'un ventilateur de refroidissement, qui est l'élément central de l'installation. Il comprend un moteur, une turbine, un réducteur et d'autres accessoires. En raison de sa spécificité, le service de maintenance accorde une attention particulière à la surveillance et à la maintenance de ce système afin de minimiser les temps d'intervention et de révision sur les différents composants.

La méthode de maintenance préventive conditionnelle est adoptée pour cet équipement, en se basant sur l'analyse des vibrations. Pendant notre stage d'un mois dans l'unité d'ammoniac, nous avons pris en compte tous les composants du turboventilateur 101 BJT.

Cette installation requiert une surveillance périodique (hors ligne) des dix paliers dans toutes les directions (verticale, horizontale et axiale), en utilisant des instruments spécifiques tels que des capteurs (accéléromètre) et un appareil de mesure hors ligne (vibrotest60). Des mesures discrètes sont obtenues dans différents points de mesure des paliers, dans les deux bandes de fréquences (0-200 Hz) et (0-5000 Hz), sous forme d'un diagramme appelé "spectre de vitesse".

L'interprétation de ces résultats consiste à recueillir périodiquement les mesures, à tracer la courbe de tendance et à comparer ces valeurs à des seuils prédéfinis (normes, recommandations du constructeur de la machine, mesures de référence) afin

d'évaluer l'état général de la machine. Cette méthode, appelée "mesure du niveau global", est le premier indicateur de l'état de santé de la machine, permettant de détecter les anomalies à un stade précoce et d'avoir une première idée des types de défauts affectant le système. Cependant, elle ne permet pas d'établir un diagnostic précis, mais sert d'outil d'orientation pour le diagnostic.

Pour effectuer un diagnostic plus précis et approfondi, et afin d'identifier l'origine des défauts et de suivre leur évolution, ainsi que pour déterminer avec précision la nature et la gravité de ces défauts, il est nécessaire d'utiliser une méthode plus avancée appelée "analyse spectrale".

### **12.2) Rôle du ventilateur dans le process :**

Le four joue un rôle essentiel dans le processus de l'unité ammoniac en produisant de l'hydrogène, l'un des deux réactifs nécessaires pour la réaction de synthèse. Le four est composé des éléments suivants, comme illustré dans le schéma ci-dessus :

- Zone de radiation : C'est dans cette zone que se produit la réaction de vapocraquage du méthane, qui est une réaction endothermique nécessitant une source d'énergie. Cette énergie est fournie par 200 brûleurs répartis sur 10 rangées de 20 brûleurs, orientés vers le bas. En bas de la zone de radiation, on trouve 10 brûleurs tunnel en position horizontale, utilisés pour chauffer davantage les gaz de Carnot si nécessaire.
- Zone de convection : Les fumées ou les gaz de Carnot produits par les brûleurs de la zone de radiation transportent une quantité importante d'énergie. Selon la température de ces fumées, on distingue une zone de convection haute température et une zone de convection basse température. Dans la zone de convection haute température, on trouve 18 brûleurs en position horizontale utilisés pour augmenter la température des fumées. Juste à l'entrée de cette zone, une chaudière est connectée pour produire de la vapeur haute pression, alimentée par 5 brûleurs en position horizontale.
- Ventilateur 101BJT : L'architecture du four de l'unité ammoniac repose sur ce ventilateur. L'arrêt de ce ventilateur entraîne l'arrêt immédiat du four, ce qui entraîne l'arrêt total de l'unité. Le rôle du ventilateur est multiple : il aspire l'air nécessaire à la combustion du gaz au niveau des 233 brûleurs placés à différentes distances, crée une dépression le long du four et de la chaudière pour maintenir les flammes dans leur position normale, et assure une circulation forcée des fumées dans la direction souhaitée afin d'exploiter au maximum leur énergie. Le ventilateur est entraîné soit par une turbine à vapeur, soit par un moteur de 5,5 kW via un système d'embrayage.
- Cheminée : Les gaz de Carnot, dont l'énergie est maximisée par le processus, sont rejetés dans l'atmosphère par le biais d'une cheminée située juste derrière le ventilateur.

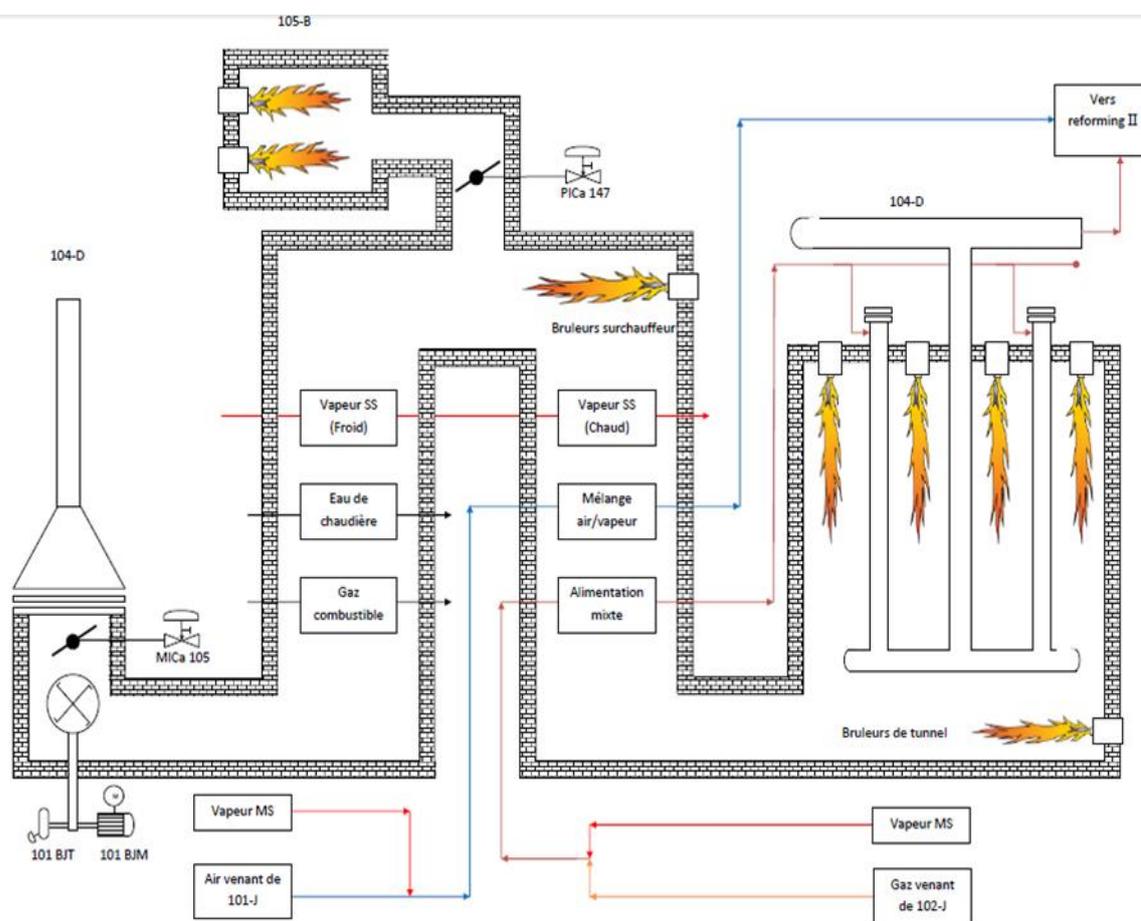


Figure I.7: Four de l'unité ammoniac

### 12.3) Principe de fonctionnement du système turbo ventilateur :

Le ventilateur du système est équipé de deux dispositifs d'entraînement : un entraînement principal utilisant une turbine et un entraînement de secours utilisant un moteur électrique. Les deux entraînements sont reliés au système à travers des accouplements. La turbine est connectée au ventilateur via un embrayage monté sur le réducteur de vitesse. Cet embrayage se débraye automatiquement lorsque la vitesse de la turbine chute en dessous de la vitesse de l'arbre de transmission du ventilateur, par exemple en cas de panne de la turbine.

L'arbre de transmission du ventilateur est équipé d'un dispositif de déblocage mécanique qui permet d'effectuer des travaux d'entretien sur la turbine. Ce dispositif permet de désengager l'arbre de transmission du ventilateur, ce qui facilite les opérations de maintenance et d'entretien sur la turbine sans perturber le fonctionnement global du système.

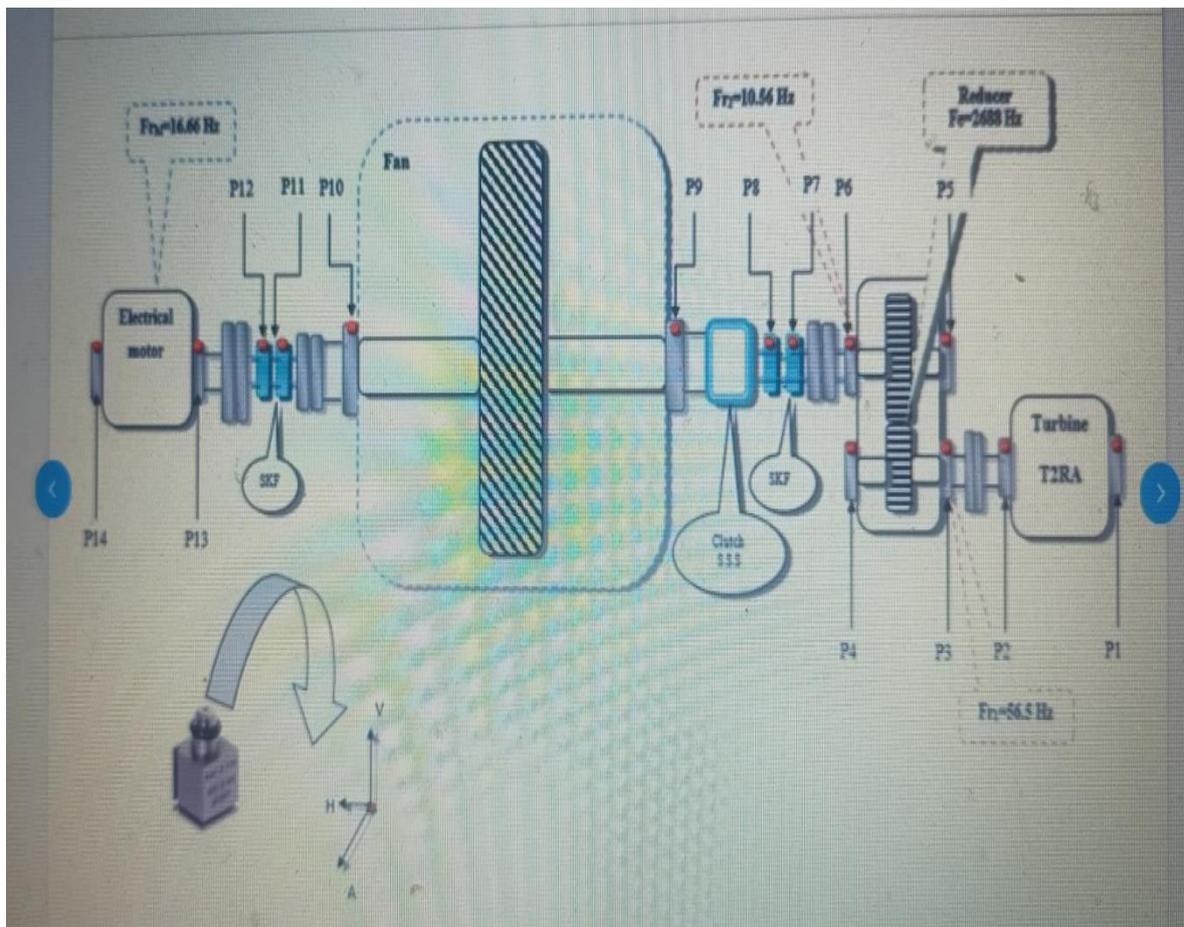


Figure I.8 : Schéma cinématique de 101 BJT

### A- Turbines :

La vapeur circule à travers les tuyères et pénètre dans la turbine, où les jets de vapeur sont dirigés vers l'intérieur de l'enveloppe de la turbine. La première roue à action dilate la vapeur, augmentant ainsi sa vitesse. Ensuite, la vapeur traverse le redresseur qui guide son trajet vers la deuxième roue. La vapeur se dilate davantage, augmentant encore sa vitesse, puis elle s'écoule vers les autres roues qui font tourner l'arbre de la turbine sur lequel elles sont montées, ainsi que les ailettes et les roues de la turbine. Lorsque la vapeur se dilate, sa température diminue, entraînant une diminution de son énergie interne. Cette diminution de l'énergie interne est compensée par une augmentation de l'énergie cinétique, sous forme de particules de vapeur accélérées. La turbine génère une poussée axiale grâce à la chute de pression à travers les roues. Cette poussée est généralement équilibrée par l'utilisation d'un piston d'équilibrage. À la sortie de la turbine, au niveau de l'échappement, la vapeur se transforme en eau grâce au refroidissement dans le condenseur, puis elle est récupérée dans le réservoir d'eau par la pompe d'extraction des condensats. Dans le condenseur, il y a généralement un vide presque complet, avec une pression inférieure à 0,1 bar.

Type	T2RA
Série	B-104 3835
Nombre d'étages	Curtis 1
Nature fluide	Vapeur
Fournisseur	Worthington
Points turbine	1450kg
Hauteur d'axe	482.5mm
Diamètre bout d'arbre	66.5mm
Bride admission	600ASA $\varnothing$ 8 trous
Bride d'échappement	150ASA $\varnothing$ 12 trous
Puissance normale	258kw
Puissance	907kw
Puissance mini	69kw
Pression admission nominale	38.2 bars
Pression admission max	43.5 bars
Vitesse maxi	5250 tr/min
Vitesse nominale	3517 tr/min
Vitesse mini	2170 tr/min
TC° max	399 C°
TC° normale	323C°
Nombre de roue	2 roues
Nombre des laites	162*2

Tableau I.3 : Caractéristiques techniques de la turbine à vapeur

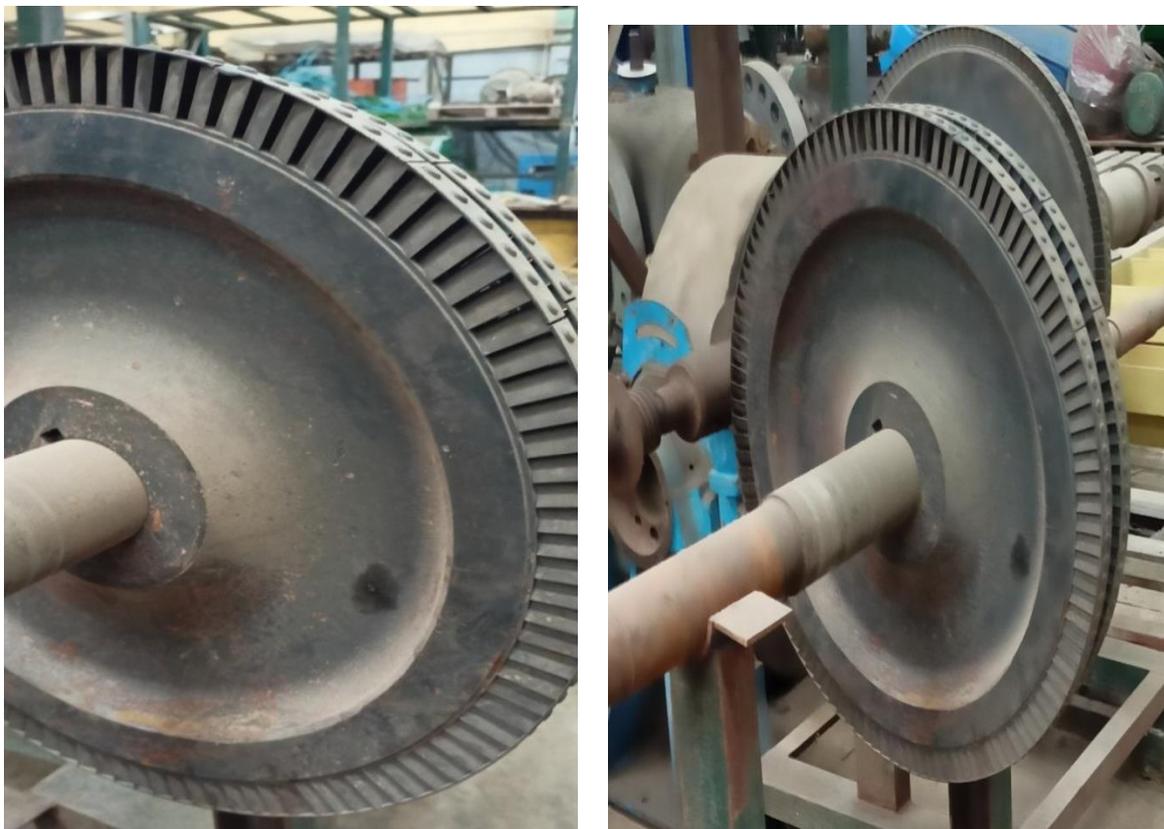


Figure I.9 : les tuyères de la turbine

**B- Réducteur :**

Le dispositif de réduction de vitesse, composé du réducteur GVAB420, permet de diminuer la vitesse de rotation entre la turbine et le ventilateur. Ce réducteur est constitué des éléments principaux suivants : un pignon à 47 dents et une roue à 252 dents, tous deux de type hélicoïdal.

Modèle/dimension	GVAB420
Puissance nominale	889 kW
Rendement transmission	0.98 A PLEN
Vitesse entrée	3520 tours/minute
Vitesse sortie	656 tours/minute
Nombre de dents du pignon	47
Nombre de dents de la roue	252
Vitesse continue maximum	1000
Rapport de transmission	5.36

Tableau I.4 : Caractéristiques techniques du réducteur

**Calculs Cinématique :**

Le rapport de transmission  $u = F2 / F1 = N1 / N2 = 252 / 47 = 5.36$

La fréquence d'engrènement  $F_e$

$$F1 = N1 / 60 = 5250 / 60 = 87.5 \text{ Hz}$$

$$F2 = N2 / 60 = (5250 / 5.36) / 60 = 980 / 60 = 16.32 \text{ Hz}$$

$$F_e = F1 * N1 = F2 * N2$$

$$F_e = 87.5 * 47 = 16.32 * 252 = 4112.5 \text{ Hz}$$

$$F_e = 4112.5 \text{ Hz}$$

La fréquence de coïncidence  $F_c$

$$F_c = F_e / \text{PPCM}(N1, N2)$$

$$F_c = 4112.5 / \text{PPCM}(252, 47)$$

$$F_c = 4112.5 / 11844$$

$$F_c = 0.34 \text{ Hz}$$



Figure I.10 : Réducteur Woodward

**C- Ventilateur :**

Le rôle de ce ventilateur est d'aspirer les gaz fumés émis par le fourneau, puis de les expulser dans l'atmosphère.

	Maxi	Standard	De réserve
Volume	485,4	293,3	100,00
Pression	270	140	75
Température	283	267	267
Densité d'huile	0,6K/M	0,62KG/M	0,62KG/M
Vitesse	1100	656	405
Puissance	1070	316	60

Tableau I.5 : Caractéristique techniques du ventilateur

La vitesse maximale du ventilateur est de 1100 tours par minute (t/min), ce qui est réglé en fonction de la turbine. La température maximale des gaz de combustion à l'entrée du ventilateur est de 325 degrés Celsius. Le ventilateur est composé des éléments essentiels suivants :

- **La roue :**

Les différents éléments constitutifs de la roue du ventilateur sont assemblés par soudage, en utilisant des aciers spéciaux à faible teneur en carbone et à haute limite élastique. Ces aciers ont été soigneusement sélectionnés en fonction de leur capacité de soudage et de leur adaptation aux conditions spécifiques auxquelles le ventilateur sera soumis lors de son fonctionnement.



Figure I.11 : Roue du ventilateur

- Enveloppe-pavillon :

L'enveloppe du ventilateur est construite à partir de tôles, tandis que des raidisseurs sont utilisés pour prévenir le gonflement ou la rétraction des tôles en cas de variations de pression. Ces raidisseurs renforcent la structure de l'enveloppe, assurant ainsi sa stabilité face aux fluctuations de pression.

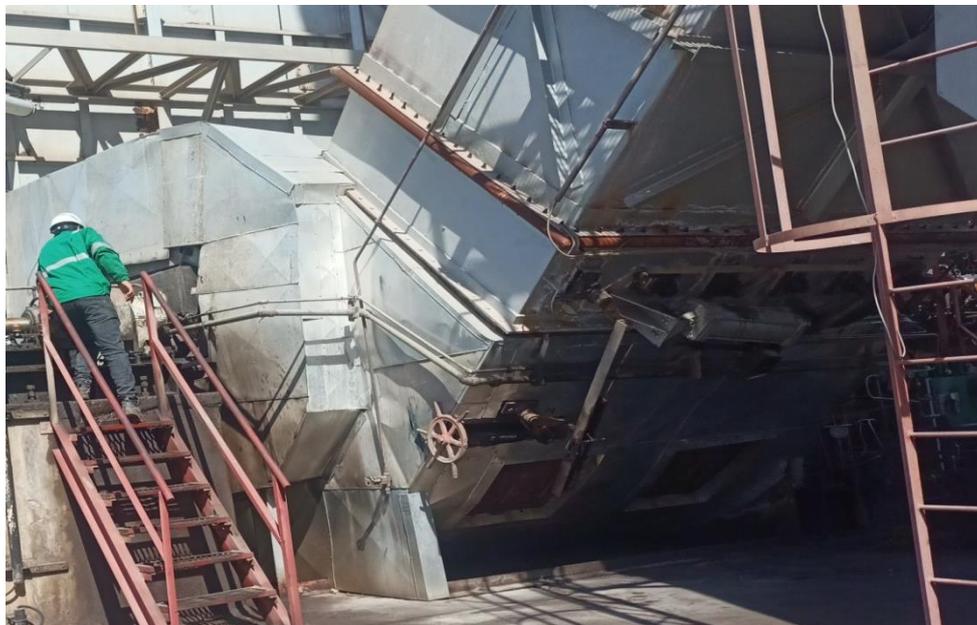


Figure I.12 : L'enveloppe de ventilateur

### D- Paliers :

Les paliers utilisés dans l'installation sont de différents types, y compris des paliers lisses, des paliers à siège sphérique et des paliers à joint horizontal. Ces paliers sont conçus pour assurer un fonctionnement fluide et réduire les frottements. Les coussinets utilisés dans ces paliers sont fabriqués en fonte ou en acier moulé et sont revêtus d'un matériau antifriction de haute qualité. Ils sont conçus pour être raccordés à un système de lubrification qui fonctionne par gravité depuis un réservoir de lubrifiant. Chaque palier est fixé et comprend également une butée pour résister aux charges axiales. Les corps de palier sont fabriqués en fonte pour la partie intérieure et en aluminium coulé pour la partie supérieure. La fonte utilisée pour la partie intérieure du palier est de qualité standard, c'est-à-dire une fonte à grain fin qui offre de bonnes propriétés mécaniques et une résistance adéquate.

Ces choix de matériaux et de conception sont faits en fonction des exigences spécifiques de l'installation afin d'assurer une performance fiable et durable des paliers dans les conditions de fonctionnement prévues.



Figure I.13 : les paliers

### E- L 'arbre

Les dimensions de l'arbre sont soigneusement calculées pour s'assurer que sa première vitesse critique est bien supérieure à sa vitesse de rotation normale, tout en répartissant judicieusement les contraintes mécaniques. L'arbre est fabriqué en acier, un matériau choisi pour ses propriétés mécaniques appropriées. Le coefficient de dilatation thermique de l'acier utilisé est  $\alpha=12.6 \cdot 10^{-6}$ , ce qui est pris en compte pour les calculs et la conception de l'arbre afin de garantir un fonctionnement optimal dans différentes conditions de température.

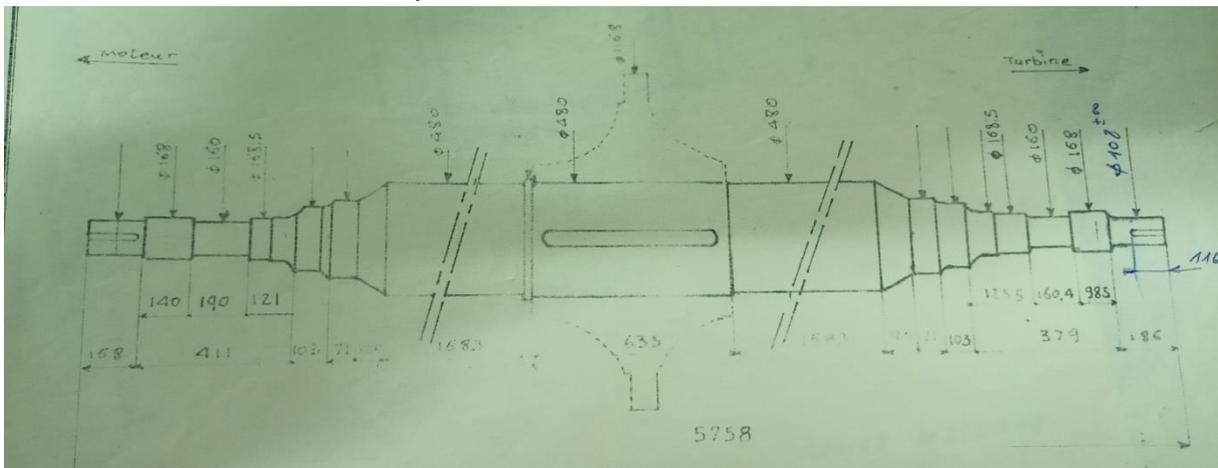


Figure I.14 : Schéma de l'arbre

### 4- Moteur électrique :

Le moteur utilisé dans cette installation est un moteur électrique à courant alternatif de type asynchrone, également connu sous le nom de moteur à induction. Il s'agit du type de moteur le plus couramment utilisé dans de nombreuses entreprises en raison de son coût économique. Ce moteur est équipé d'une cage d'écurie, qui est une conception standard pour les moteurs asynchrones.



Figure I.15 : Le moteur électrique

Fabrication	38057
Type	TAC8769.6
Puissance	878 KW
Vitesse	1000 tr/min
Tension	3500 V
Courant nominal	110 A
Com plan	Y
Fréquence	50 Hz
Forme de protection	IP.54
Echauffement	80 c
Phase	3
Masse de la machine	7325 Kg
Classe isolation stator	B
Service	Continu
Type de rotors	A cage

Tableau I.6 : Caractéristique technique du moteur électrique

# CHAPITRE II :

## HISTORIQUE DES DÉFAILLANCES SURVENUES SUR 101BJT

### **1) Introduction :**

Les machines industrielles sont souvent soumises à des conditions de travail extrêmes et à des contraintes mécaniques considérables. Malgré des conceptions robustes et des processus de fabrication avancés, il arrive parfois qu'une défaillance survienne, mettant en péril la fiabilité et la performance de ces machines. L'une des défaillances les plus critiques qui peuvent se produire est la rupture de l'arbre, un événement préoccupant pour les opérations industrielles.

Ce chapitre se penche sur l'historique des défaillances liées à la rupture de l'arbre survenue sur une machine industrielle spécifique. L'objectif est d'explorer les incidents passés, d'analyser les causes profondes de ces défaillances et d'étudier les mesures préventives et correctives mises en place pour prévenir de tels événements à l'avenir. La rupture de l'arbre est une défaillance critique qui peut entraîner des conséquences graves, telles que des arrêts de production coûteux, des dommages matériels importants et même des blessures pour les travailleurs. Comprendre les raisons derrière ces défaillances est essentiel pour renforcer la sécurité, améliorer la fiabilité des machines et minimiser les risques opérationnels.

Au cours de ce chapitre, nous examinerons les défaillances notables qui se sont produites sur cette machine industrielle, en analysant les données historiques et les témoignages, les rapports d'incident et les études de cas pertinents. Pour avoir étudié les différentes variables qui pourraient avoir contribué à la rupture de l'arbre, telles que les contraintes mécaniques, la fatigue des matériaux au suivant. En fin de compte, ce chapitre vise à fournir des informations essentielles pour comprendre et prévenir les défaillances liées à la rupture de l'arbre sur cette machine industrielle. Il s'agit d'une étape cruciale pour renforcer la fiabilité des équipements, minimiser les temps d'arrêt non planifiés et améliorer la sécurité des opérations industrielles.

### **2) Historique des défaillances :**

L'historique des défaillances fait référence à la documentation et à l'analyse des incidents de défaillance qui se sont produits dans le passé. Il englobe un ensemble d'informations sur les problèmes, les incidents et les dysfonctionnements rencontrés dans un domaine spécifique, qu'il s'agisse de machines, de systèmes, de produits ou d'autres composants techniques.

L'historique des défaillances vise à recueillir des données et des faits sur les défaillances passées, afin de comprendre les causes sous-jacentes, les schémas récurrents et les leçons apprises. Il permet d'identifier les vulnérabilités, les points faibles et les risques potentiels dans un système ou un processus, et contribue ainsi à l'amélioration continue, à la prévention des défaillances futures et à l'optimisation des performances.

L'historique des défaillances peut inclure des informations telles que les types de défaillances rencontrées, les facteurs contributifs, les conséquences (financières,

opérationnelles, de sécurité, etc.), les mesures correctives et préventives prises, ainsi que les évolutions des pratiques et des normes dans le domaine concerné.

En résumé, l'historique des défaillances permet d'examiner les expériences passées en matière de défaillance, d'identifier les problèmes récurrents et les tendances, et de fournir des informations précieuses pour améliorer la fiabilité, la sécurité et les performances des systèmes et des processus. [1]

### **3) Types de défaillance en maintenance industrielle :**

En maintenance industrielle, plusieurs types de défaillances peuvent survenir. Voici quelques-uns des types de défaillances les plus courants :

1. Défaillance mécanique : C'est le type de défaillance le plus fréquent en maintenance industrielle. Il peut inclure des problèmes tels que la rupture, l'usure excessive, la corrosion, la déformation, le desserrage, les fuites, les grippages, les vibrations excessives, etc.
2. Défaillance électrique : Ce type de défaillance concerne les composants électriques et électroniques. Il peut s'agir de courts-circuits, de surtensions, de surintensités, de pannes de circuits, de dysfonctionnements des capteurs, des actionneurs ou des systèmes de contrôle, etc.
3. Défaillance thermique : Elle se produit lorsque les composants ou les systèmes ne parviennent pas à maintenir une température appropriée. Cela peut entraîner une surchauffe, une déformation, une rupture des matériaux, une diminution de l'efficacité thermique, etc.
4. Défaillance chimique : Ce type de défaillance est lié à des réactions chimiques indésirables ou à la corrosion des matériaux. Il peut être causé par des produits chimiques agressifs, des contaminants, une mauvaise compatibilité des matériaux, etc.
5. Défaillance structurelle : Elle concerne l'intégrité et la stabilité des structures telles que les bâtiments, les ponts, les réservoirs, etc. Les défaillances structurelles peuvent être causées par une fatigue des matériaux, des charges excessives, une mauvaise conception, des dommages dus aux intempéries, etc.
6. Défaillance humaine : Les erreurs humaines peuvent également entraîner des défaillances en maintenance industrielle. Cela peut inclure des erreurs de manipulation, des erreurs de diagnostic, des erreurs d'installation, des erreurs de maintenance, etc.

Il est important de noter que ces types de défaillances peuvent être interdépendants et qu'une défaillance dans un domaine peut avoir un impact sur d'autres domaines. Une approche holistique de la maintenance industrielle est nécessaire pour prévenir ces défaillances, en mettant en œuvre des stratégies de maintenance préventive, des inspections régulières, des tests de performance, des réparations rapides et des améliorations de conception. [1]

### 3.1) Défaillance mécanique :

La défaillance mécanique est l'un des types les plus courants de défaillances en maintenance industrielle. Elle se produit lorsque les composants mécaniques d'un équipement ou d'une machine ne fonctionnent plus comme prévu, entraînant une perte de performance, des arrêts de production ou des dommages matériels.

Voici quelques exemples de défaillances mécaniques :

1. Rupture : C'est le cas où un composant se brise complètement sous l'effet de contraintes mécaniques excessives. Cela peut se produire en raison de charges anormalement élevées, d'une mauvaise qualité des matériaux, de défauts de fabrication ou d'une usure excessive.
2. Usure : L'usure est un phénomène naturel qui se produit au fil du temps lorsque les surfaces en contact subissent une détérioration progressive. L'usure peut être causée par la friction, la corrosion, l'abrasion, l'érosion, etc., et peut entraîner un mauvais fonctionnement des pièces et une perte d'efficacité.
3. Fatigue : La fatigue des matériaux se produit lorsqu'un composant est soumis à des charges cycliques répétées. Au fil du temps, cela peut provoquer la formation de fissures et finalement la rupture du matériau. La fatigue peut être accélérée par des charges excessives, des défauts de conception, des vibrations, etc.
4. Jeu excessif : Le jeu excessif se produit lorsque les pièces mobiles d'un système mécanique présentent un jeu ou un jeu anormal. Cela peut entraîner un mauvais alignement, des vibrations, une instabilité et une usure prématurée des composants.
5. Grippage : Le grippage se produit lorsque les surfaces de glissement ou les pièces mobiles restent bloquées ou se coincent. Cela peut être causé par une lubrification inadéquate, des contaminants, une corrosion, des tolérances inappropriées, etc.
6. Désalignement : Le désalignement se produit lorsque les composants d'un système mécanique ne sont pas correctement alignés. Cela peut entraîner une usure inégale, une surcharge sur certaines parties, des vibrations et une dégradation des performances.

Pour prévenir les défaillances mécaniques, des activités de maintenance préventive telles que la lubrification, l'inspection régulière des composants, le remplacement des pièces usées, le contrôle des tolérances et l'alignement correct sont essentielles. De plus, une conception robuste, l'utilisation de matériaux de qualité et une utilisation appropriée des machines contribuent également à réduire les risques de défaillance mécanique [1].

#### 4) Les conséquences des défaillances en maintenance industrielle :

Les défaillances en maintenance industrielle peuvent entraîner diverses conséquences, tant sur le plan opérationnel que financier. Voici quelques conséquences courantes des défaillances en maintenance industrielle :

1. Arrêt de production : L'une des conséquences les plus significatives d'une défaillance est l'arrêt de la production. Lorsque des équipements ou des machines essentiels tombent en panne, cela peut interrompre la chaîne de production, entraînant une diminution de la productivité et des retards dans la livraison des produits ou services.
2. Pertes financières : Les défaillances en maintenance industrielle peuvent engendrer des pertes financières importantes. Les coûts associés à la réparation ou au remplacement des équipements défaillants, les arrêts de production, les retards dans les délais de livraison, les coûts de main-d'œuvre supplémentaires et les pertes de revenus peuvent tous contribuer à des pertes financières significatives pour l'entreprise.
3. Augmentation des coûts de maintenance : Les défaillances fréquentes peuvent entraîner une augmentation des coûts de maintenance. La nécessité de réparer ou de remplacer fréquemment des composants défaillants peut entraîner des dépenses accrues en termes de pièces de rechange, de main-d'œuvre, d'outils et d'équipements de maintenance.
4. Dommages matériels : Les défaillances en maintenance industrielle peuvent également causer des dommages matériels importants. Par exemple, une défaillance mécanique peut entraîner des ruptures, des fuites, des déformations ou des dommages structurels, nécessitant des réparations coûteuses ou même le remplacement complet de l'équipement endommagé.
5. Impact sur la sécurité : Certaines défaillances peuvent avoir un impact direct sur la sécurité des travailleurs et de l'environnement. Par exemple, une défaillance électrique peut entraîner des risques d'incendie ou d'électrocution, tandis qu'une défaillance mécanique peut entraîner des accidents de travail, des blessures ou des dommages corporels.
6. Réputation de l'entreprise : Les défaillances en maintenance peuvent également affecter la réputation de l'entreprise. Des défaillances fréquentes peuvent donner l'impression d'une mauvaise gestion, d'un manque de fiabilité ou d'un manque de professionnalisme, ce qui peut nuire à la confiance des clients, des partenaires commerciaux et des investisseurs.

Il est donc essentiel de mettre en place des stratégies de maintenance préventive efficaces pour réduire les risques de défaillance et leurs conséquences. Cela inclut des activités telles que l'entretien régulier, la surveillance de l'état des équipements, la formation du personnel, l'utilisation de pièces de rechange de qualité et l'adoption de meilleures pratiques en matière de maintenance. [2]

### **5) La gestion des défaillances en maintenance industrielle :**

La gestion des défaillances en maintenance industrielle vise à minimiser les impacts négatifs des défaillances sur la production, les coûts et la sécurité. Voici quelques aspects clés de la gestion des défaillances en maintenance industrielle :

1. **Planification de la maintenance préventive :** La maintenance préventive joue un rôle essentiel dans la gestion des défaillances. Il s'agit de mettre en place un plan de maintenance régulier qui comprend des activités telles que l'inspection, la lubrification, le remplacement des pièces usées, le nettoyage, etc. Cela permet d'identifier les problèmes potentiels avant qu'ils ne se transforment en défaillances majeures.
2. **Surveillance de l'état des équipements :** La surveillance régulière de l'état des équipements peut aider à détecter les signes avant-coureurs de défaillance. Cela peut inclure l'utilisation de capteurs, de systèmes de surveillance en ligne, d'analyses de vibrations, de contrôles non destructifs, etc. Ces techniques permettent d'identifier les anomalies et d'intervenir avant qu'une défaillance ne survienne.
3. **Maintenance prédictive :** La maintenance prédictive utilise des techniques d'analyse et de suivi pour prédire la probabilité de défaillance d'un équipement. Cela permet de planifier des interventions de maintenance avant que la défaillance ne survienne. La maintenance prédictive utilise des méthodes telles que l'analyse des données de performance, les modèles statistiques, les algorithmes d'apprentissage automatique, etc.
4. **Gestion des stocks et approvisionnement en pièces de rechange :** Une gestion efficace des stocks de pièces de rechange est importante pour minimiser les temps d'arrêt en cas de défaillance. Il est essentiel d'avoir un inventaire adéquat de pièces critiques, de maintenir des relations avec des fournisseurs fiables et d'établir des procédures d'approvisionnement efficaces.
5. **Réactivité et interventions rapides :** Lorsqu'une défaillance survient malgré les mesures préventives, il est important d'avoir des procédures d'intervention rapides et efficaces. Cela peut inclure des équipes de maintenance d'urgence, des protocoles de dépannage, des plans d'urgence, etc., pour minimiser les temps d'arrêt et les impacts sur la production.
6. **Analyse des défaillances :** Après une défaillance, il est important de mener une analyse approfondie pour comprendre les causes profondes et les facteurs contributifs. Cela permet d'identifier les mesures correctives à prendre pour éviter des défaillances similaires à l'avenir.
7. **Amélioration continue :** La gestion des défaillances en maintenance industrielle doit être un processus d'amélioration continue. Cela implique de surveiller et d'évaluer régulièrement les performances, d'impliquer les opérateurs et les techniciens dans les processus de maintenance, de recueillir des retours d'expérience, de mettre en œuvre des leçons apprises, etc.

En mettant en œuvre une gestion proactive des défaillances, les entreprises peuvent réduire les coûts de maintenance, améliorer la fiabilité. [2]

### **6) Les avantages de l'étude de l'historique des défaillances en maintenance industrielle :**

L'étude de l'historique des défaillances en maintenance industrielle présente plusieurs avantages importants pour les entreprises. Voici quelques-uns des avantages clés :

1. Identification des tendances et des motifs : L'analyse de l'historique des défaillances permet de détecter des tendances et des motifs récurrents. En examinant les données sur les défaillances passées, on peut identifier les équipements ou les composants qui sont plus sujets aux défaillances, les types spécifiques de défaillances qui se produisent fréquemment, les facteurs contributifs communs, etc. Cela permet d'orienter les efforts de maintenance préventive et de prendre des mesures proactives pour éviter les défaillances futures.
2. Amélioration de la planification de la maintenance : En comprenant l'historique des défaillances, il est possible de planifier la maintenance de manière plus efficace. On peut déterminer les intervalles optimaux pour les inspections, les remplacements de pièces, les révisions ou les réparations, en se basant sur la fréquence des défaillances passées. Cela permet d'optimiser les ressources et de minimiser les temps d'arrêt non planifiés.
3. Optimisation des stocks de pièces de rechange : En analysant l'historique des défaillances, on peut identifier les pièces de rechange les plus couramment utilisées ou celles qui ont une tendance à défaillir. Cela permet de maintenir un inventaire adéquat de pièces de rechange pour les équipements critiques, réduisant ainsi les délais d'approvisionnement et les temps d'arrêt en cas de défaillance.
4. Prise de décisions éclairées : L'étude de l'historique des défaillances fournit des données factuelles pour prendre des décisions éclairées en matière de maintenance. En utilisant des données quantitatives sur les défaillances passées, les décideurs peuvent évaluer l'efficacité des stratégies de maintenance existantes, déterminer les domaines nécessitant une amélioration et allouer efficacement les ressources.
5. Amélioration de la fiabilité des équipements : En analysant l'historique des défaillances, on peut identifier les principaux facteurs contributifs aux défaillances et prendre des mesures correctives. Cela peut impliquer des modifications de conception, des mises à niveau de composants, des améliorations des procédures de maintenance, etc. Ces actions visent à améliorer la fiabilité des équipements et à réduire le risque de défaillance future.
6. Réduction des coûts de maintenance : L'étude de l'historique des défaillances permet d'identifier les défaillances coûteuses en termes de réparations, de remplacements ou de pertes de production. En prenant des mesures préventives ciblées, les entreprises peuvent réduire les coûts de maintenance à long terme en évitant les défaillances coûteuses et les temps d'arrêt imprévus.

[2]

En résumé, l'étude de l'historique des défaillances en maintenance industrielle offre des avantages significatifs en termes d'optimisation des ressources, d'amélioration de la fiabilité des équipements et de réduction des coûts de maintenance. Cela permet aux entreprises d'adopter une approche plus proactive et préventive de la maintenance, ce qui se traduit par une meilleure performance opérationnelle et une augmentation de la disponibilité des équipements.

### **7) L'importance de l'étude de l'histoire de la maintenance :**

L'étude de l'histoire de la maintenance revêt une grande importance pour les entreprises. Voici quelques raisons qui soulignent son importance :

1. **Apprentissage des leçons passées :** L'étude de l'histoire de la maintenance permet aux entreprises d'apprendre des erreurs et des succès passés. En analysant les pratiques de maintenance antérieures, les entreprises peuvent identifier ce qui a fonctionné et ce qui n'a pas fonctionné. Cela permet d'adopter des approches plus efficaces et d'éviter de répéter les erreurs passées.
2. **Amélioration continue :** En étudiant l'histoire de la maintenance, les entreprises peuvent identifier les domaines où des améliorations sont nécessaires. Cela peut inclure des processus de maintenance inefficaces, des équipements sujets à des défaillances récurrentes, des lacunes dans la formation du personnel, etc. En identifiant ces problèmes, les entreprises peuvent prendre des mesures correctives et mettre en place des initiatives d'amélioration continue.
3. **Prise de décisions éclairées :** L'étude de l'histoire de la maintenance fournit des données et des informations précieuses pour prendre des décisions éclairées. En analysant les données sur les performances passées des équipements, les coûts de maintenance, les temps d'arrêt, etc., les décideurs peuvent prendre des décisions basées sur des faits plutôt que sur des suppositions. Cela permet d'allouer efficacement les ressources, de planifier la maintenance de manière stratégique et de maximiser la disponibilité des équipements.
4. **Planification de la maintenance préventive :** L'histoire de la maintenance fournit des informations sur les cycles de vie des équipements, les intervalles de maintenance recommandés, les pièces de rechange les plus couramment utilisées, etc. Cela permet de planifier la maintenance préventive de manière plus efficace, en évitant les défaillances coûteuses et les temps d'arrêt imprévus. Une planification de la maintenance préventive adéquate peut également contribuer à prolonger la durée de vie des équipements.
5. **Optimisation des coûts :** En étudiant l'histoire de la maintenance, les entreprises peuvent identifier les coûts de maintenance les plus élevés, les types de défaillances les plus fréquents, les activités de maintenance les plus chronophages, etc. Cela permet d'optimiser les coûts de maintenance en se concentrant sur les domaines les plus critiques, en améliorant l'efficacité des processus de maintenance et en adoptant des stratégies de maintenance préventive plus efficaces.

6. Fiabilité et disponibilité accrues des équipements : En tirant des enseignements de l'histoire de la maintenance, les entreprises peuvent mettre en œuvre des améliorations qui contribuent à accroître la fiabilité et la disponibilité des équipements. Cela peut inclure des modifications de conception, l'utilisation de pièces de rechange de meilleure qualité, l'amélioration des procédures de maintenance, etc. Une meilleure fiabilité et disponibilité des équipements se traduisent par une productivité accrue et des performances opérationnelles améliorées.

En conclusion, l'étude de l'histoire de la maintenance permet aux entreprises de tirer des leçons passées, de prendre des décisions éclairées, d'améliorer la fiabilité des équipements et d'optimiser les coûts de maintenance. Cela contribue à une meilleure gestion des actifs, à une productivité accrue et à une performance opérationnelle optimale. [2]

## **8) Préparation de l'étude d'historiques des défaillances du Ventilateur :**

### **8.1) Résumé de l'incident :**

Le 06 février 2023 à 00h50, une panne de courant généralisée du réseau SONELGAZ a entraîné l'arrêt complet des unités port et usine. Le groupe de secours turbo générateur de 10 MVA n'a pas pu fournir l'énergie nécessaire aux installations en raison de l'absence de refroidissement causée par l'arrêt du pompage d'eau de mer au port.

En conséquence de la pénurie d'électricité et d'air instrument, le système de sécurité de l'unité NH3 a réagi en déclenchant une procédure d'arrêt total. Le gaz présent dans l'unité NH3 a été évacué vers l'évent SP7.

À 1h20, l'alimentation électrique a été rétablie et une décision a été prise de relancer l'unité en suivant un contrôle opérationnel des phases de démarrage.

Vers 6h45, une explosion s'est produite suivie d'un incendie gras au niveau du ventilateur de tirage 101BJT.

### **8.2) Les conséquences de cet incident sont :**

- Aucun individu n'a été blessé lors de l'incident.
- Aucun impact environnemental n'a été constaté.
- L'unité de production d'ammoniac a connu un arrêt de production pendant une période de 35 jours.
- L'arbre du ventilateur a été endommagé, avec une rupture au niveau du palier côté embrayage, de l'embrayage lui-même, de la filerie électrique et des accessoires.

On Sélectionne la rupture du l'arbre du ventilateur :

Figure II.1 : L'arbre endommagé

L'historique des défaillances de cette machine lors de l'incident est résumé dans le tableau ci-dessous. Ce tableau présente la chronologie de l'incident obtenue à partir des différentes investigations menées lors de l'enquête. Il récapitule les faits essentiels rapportés ou analysés, en respectant l'ordre chronologique des événements.

• **Chronologies des évènements:**

00 h 45 :	Coupe générale de l'électricité
00 h 46 :	Chute de pression d'eau de mer de refroidissement
01 h 00 :	Unité vers évent
01h 00 :	Four éteint, arrêt total de l'unité
01 h 15 :	Coupure volontaire gaz sur l'unité
01 h 20 :	Rétablissement du courant électrique
02 h 30 :	Début allumage four
05 h 20 :	Déclenchement turbine 101BJT par survitesse
05h20 :	Entraînement systématique du ventilateur par le moteur électrique
06h 45 :	Déflagration suivie d'un feu au niveau du palier 09 et caisson de l'embrayage
06h 46 :	Arrêt volontaire du moteur électrique
06 h 50 :	Arrivée sur les lieux des pompiers (01 contremaitre, 02 pompiers, camions de lutte anti-incendie)
06 h 51 :	Début de l'extinction du feu par deux extincteurs à mousse tractables de 50 kg
06 h 55 :	Hauteur du feu gras 03 m, établissement de la mousse à partir du camion
07 h 00 :	Extinction du feu, ronde de vérification
07h10 :	Confirmation de fin d'opération de lutte

Tableau II.1 : Chronologie des évènements

**8.3) Les témoignages :**

Les différents témoignages ont permis de vérifier la cohérence entre l'analyse des faits et le scénario de l'événement. Les informations principales recueillies sont les suivantes :

Selon les témoignages, l'unité fonctionnait de manière stable jusqu'à ce qu'elle se déclenche vers 00h45 en raison d'une coupure électrique générale, suivie de la coupure d'eau de mer et d'air instrument. L'intervention de l'équipe a été nécessaire pour rétablir la situation et prendre la décision de redémarrer l'unité. À 01h30, l'attention de l'équipe était principalement axée sur la correction de la circulation inverse sur le 101C, un problème qu'ils n'arrivaient pas à maîtriser et à rétablir.

Les témoins ont confirmé qu'ils n'ont pas immédiatement réalisé que la turbine s'était déclenchée en raison d'une survitesse vers 05h20. Cette inattention était due à leur concentration sur les séquences de démarrage qui n'étaient pas encore terminées à ce moment-là. De plus, ils ont mentionné que l'alarme de la turbine n'a pas fonctionné à l'arrêt et que le moteur s'est automatiquement enclenché, contribuant ainsi à l'incident.

Aux alentours de 06h40, une déflagration intense a été entendue dans la salle de contrôle. Les premiers intervenants sur les lieux ont observé initialement des étincelles sur le 101BJT au niveau du palier N° 9 et du casing, suivies immédiatement par un

incendie de grande ampleur. L'un des opérateurs a arrêté le moteur du ventilateur pour éviter la propagation des flammes.

Les témoins ont également confirmé qu'aucun contrôle visuel de l'ensemble du train du ventilateur n'avait été effectué cette nuit-là et qu'aucun événement notable n'avait attiré leur attention.

***Parmi les écarts signalés par les témoins, on note :***

- L'absence de l'opérateur de la section accidentée cette nuit-là.
- L'absence d'alarme à l'arrêt de la turbine.
- L'absence d'affichage de la température des paliers sur le système de contrôle distribué (DCS), bien qu'une température soit affichée sur un ancien tableau synoptique.

**8.4) Relation des faits de l'incident :**

Ce récit des événements de l'incident résume les informations factuelles recueillies lors de la première phase de l'enquête menée entre le 27/07 et le 25/08/2021.

Les informations utilisées proviennent de différentes sources, notamment :

- Témoignages obtenus par des entretiens,
- Photographies des lieux de l'incident,
- Documents écrits et enregistrements,
- Rapports préliminaires d'enquête,
- Données extraites du système de contrôle distribué (DCS) de l'unité,
- Analyses techniques et diagnostics réalisés sur le procédé ainsi que les dommages observés sur les différentes parties du ventilateur et du train de commande après l'incident.

Les faits exposés dans cette première partie du rapport identifient les éléments directement liés à l'incident et certaines de ses causes immédiates.

Le premier chapitre a pour objectif de recenser de manière exhaustive les faits accidentels, tandis que le deuxième chapitre vise à comprendre les causes profondes de cet incident.

La courbe représente ci-dessous l'arrêt total du ventilateur

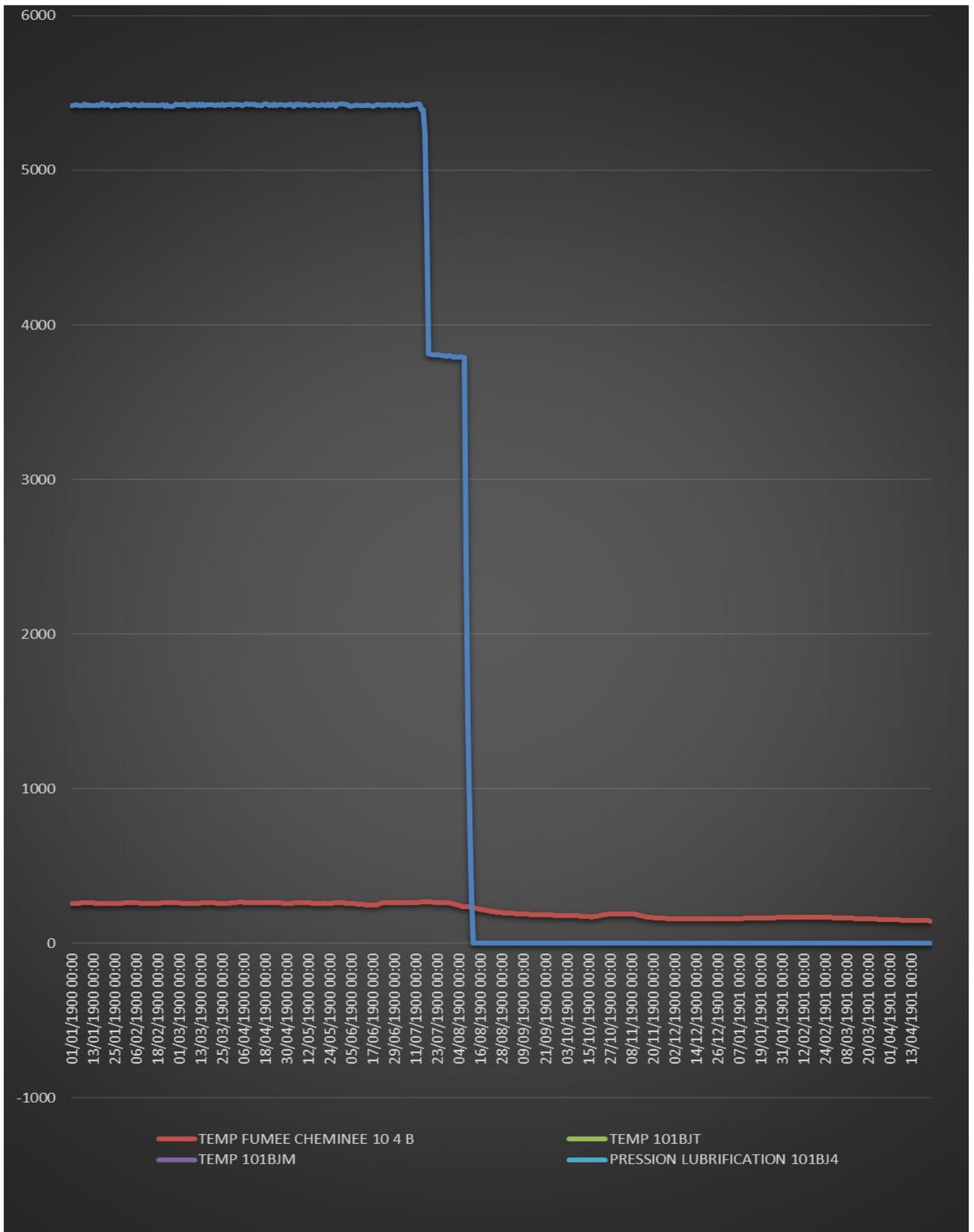


Figure II.2 : La courbe illustre l'arrêt complet du ventilateur.

# CHAPITRE III :

## DIAGNOSTIC TECHNIQUE ET VÉRIFICATION DE LA RÉSISTANCE

### 1) Introduction :

La résistance des matériaux (RDM) est une branche de la mécanique des milieux continus qui se focalise sur les déformations des structures, que ce soit dans le domaine du génie mécanique pour les machines ou du génie civil pour les bâtiments. Elle repose sur une approche expérimentale et concerne les solides réels. Son objectif est d'étudier la résistance des pièces mécaniques, les forces qui agissent sur elles et leur déformation. Pour ce faire, il est essentiel de modéliser avec précision les différentes liaisons mécaniques possibles et les forces externes qui influent sur le système.

La statique, quant à elle, est une branche de la mécanique qui se consacre à l'étude des conditions dans lesquelles un corps est en équilibre, en prenant en compte les forces exercées par son environnement extérieur.

Dans ce chapitre, nous nous penchons sur l'étude de la résistance et de la déformation des solides, plus spécifiquement des arbres de transmission. L'objectif est de déterminer ou de vérifier leurs dimensions de manière à ce qu'ils puissent supporter les charges en garantissant des conditions de sécurité optimales et un coût minimal. Cela implique l'optimisation des formes, des dimensions et des matériaux. Cependant, il est important de souligner que cette vérification repose sur des hypothèses et donne une approximation [1].

### 2) Buts de la résistance des matériaux :

Le but de la résistance des matériaux est d'étudier le comportement des structures et des matériaux soumis à des charges et des contraintes. Cela comprend l'analyse de la résistance, des déformations, de la stabilité et de la durabilité des éléments structuraux tels que les poutres, les colonnes, les plaques et les coques. L'objectif ultime est de garantir que les structures soient conçues de manière sûre et efficace, en optimisant les dimensions, les formes et les matériaux utilisés, afin de résister aux sollicitations auxquelles elles seront soumises pendant leur utilisation. La résistance des matériaux est donc essentielle dans les domaines de l'ingénierie civile, mécanique et structurale [3].

Actions	Données nécessaires
Déterminer les dimensions fonctionnelles de la pièce	Les Actions Mécaniques La nature du matériau
Choisir le matériau constituant la pièce	Les Actions Mécaniques Les dimensions de la pièce Le type de vérification
Vérifier la résistance à la "casse" de la pièce : Dépassement de la limite à la résistance	Les Actions Mécaniques Les dimensions de la pièce La nature du matériau

élastique $R_e$ ou à la rupture $R_r$ du matériau	
Vérifier la résistance à la "déformation" de la pièce : Dépassement de la valeur maximale imposée par le C.D.C.F. pour les différentes déformations de la pièce	Les Actions Mécaniques Les dimensions de la pièce La nature du matériau Le C.D.C.F.
Vérifier la résistance à la "fatigue" de la pièce : Rupture après un certain nombre de cycles de déformation imposée par le C.D.C.F.	Les Actions Mécaniques Les dimensions de la pièce La nature du matériau
Vérifier la résistance au "fluage" de la pièce : Déformation continue de la pièce, dans le temps, sous l'action d'actions mécaniques constantes qui amène à la rupture de la pièce	Les Actions Mécaniques Les dimensions de la pièce La nature du matériau Le C.D.C.F.
Optimiser le coût de la pièce par changement des formes, des dimensions, des matériaux, ...	Les Actions Mécaniques Les dimensions de la pièce La nature du matériau Le C.D.C.F.

Tableau III.1 : les actions nécessaires pour la fabrication et l'évaluation d'une pièce, ainsi que les données nécessaires pour prendre ces actions.

### 3) Le choix critique d'un matériau :

L'objectif principal d'un arbre est de transmettre de la puissance de manière fiable et économique sur une longue période. Par conséquent, lors du choix d'un matériau pour l'arbre, plusieurs critères doivent être pris en compte :

1. Propriétés mécaniques : Le matériau doit posséder des propriétés telles que la résistance à la traction, la dureté et la résistance à la fatigue, afin de supporter les charges et les contraintes auxquelles l'arbre sera soumis.
2. Coût : Le matériau choisi doit être économiquement viable, en prenant en compte son coût d'achat et de fabrication.
3. Usinabilité : La facilité avec laquelle le matériau peut être usiné pour obtenir la forme et les dimensions requises est également un critère important.
4. Disponibilité : La disponibilité du matériau sur le marché est un facteur à considérer pour assurer une production et une maintenance efficaces.
5. Résistance à la corrosion : Si l'arbre sera exposé à des environnements corrosifs, il est essentiel de choisir un matériau qui résiste à la corrosion.

6. Autres critères spécifiques : Selon les exigences de l'application, d'autres critères peuvent être pris en compte, tels que la conductivité thermique, la conductivité électrique ou les propriétés d'isolation électrique.

En fonction du rôle qui lui est assigné, l'arbre peut être soumis à des contraintes de flexion, de torsion ou à une combinaison complexe de torsion, de flexion et de charge axiale. Dans ce chapitre, notre contribution consiste à réaliser la conception et la vérification de l'arbre, en tenant compte de ces différentes contraintes, afin de garantir sa fiabilité et sa performance [4].

#### **4) Description De l'arbre :**

Dans notre machine, nous avons un arbre de transmission qui joue le rôle de transmetteur de puissance entre un moteur et une turbine, pour alimenter un ventilateur situé au milieu. L'arbre est un élément mécanique qui transmet cette puissance grâce à un couple et à un mouvement de rotation. Sa forme cylindrique lui donne son nom. Les arbres de machines sont généralement fabriqués à partir de bruts forgés qui sont ensuite usinés par tournage. L'extrusion est également une méthode couramment utilisée pour produire ce type de pièce. En raison de leur résistance mécanique insuffisante, les arbres sont rarement fabriqués à partir de bruts moulés. Ils sont souvent utilisés comme support pour des engrenages, des poulies, des volants, des manivelles, des pignons de chaîne ou d'autres éléments qui transmettent une position angulaire ou une puissance. Par conséquent, les arbres sont parmi les composants mécaniques les plus fréquemment utilisés [4].

Présentation d'arbre dans la machine dans la figure suivante :

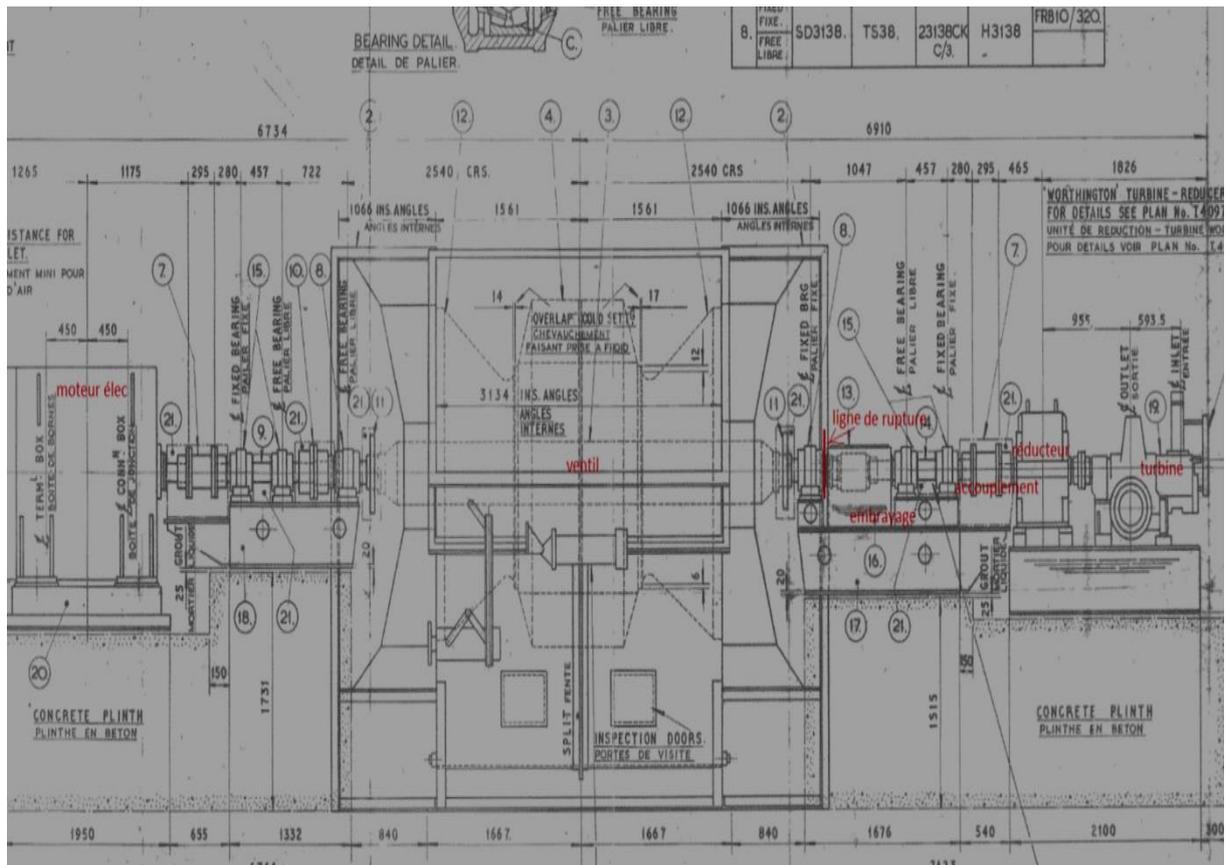


Figure III.1 : Schéma fournit une représentation plus détaillée de l'ensemble de l'arbre du turboventilateur.

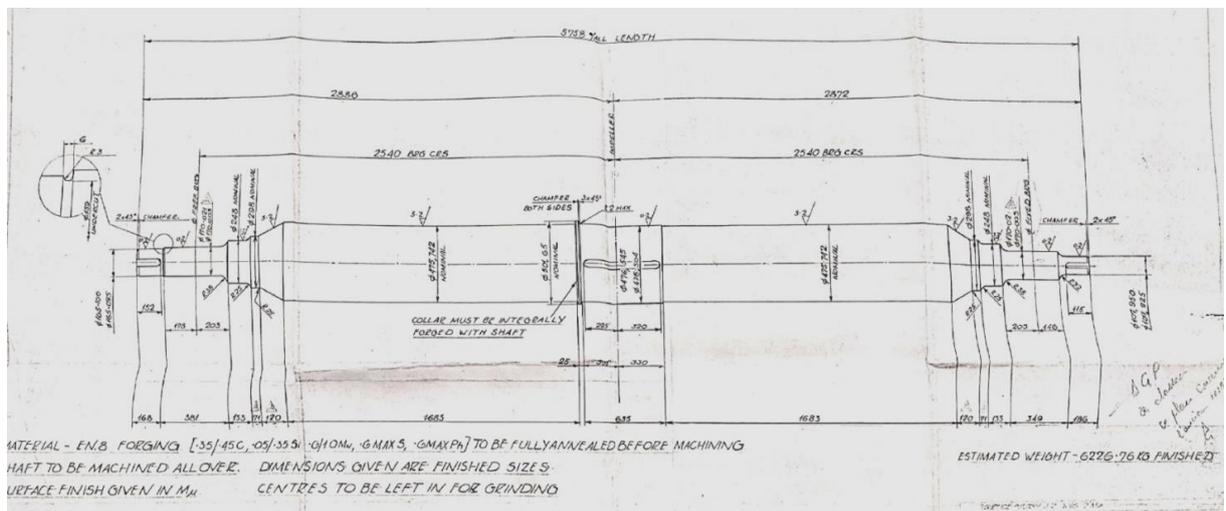


Figure III.2 : Le schéma représente l'arbre avec plus de détails, en se concentrant spécifiquement sur la partie entre les paliers 9 et 10, qui correspond à la section reliée au ventilateur.

### 5) Conception d'arbres :

La conception d'arbres implique l'étude et la création d'éléments mécaniques capables de transmettre de la puissance de manière efficace et fiable. Voici les principales étapes de la conception d'un arbre :

1. Spécifications : Définir les exigences de performance de l'arbre, telles que la puissance à transmettre, la vitesse de rotation, les charges et les contraintes auxquelles il sera soumis, ainsi que les paramètres géométriques comme la longueur, le diamètre et les tolérances.
2. Analyse des charges : Évaluer les charges et les forces qui s'exerceront sur l'arbre pendant son fonctionnement. Cela peut inclure des calculs de couple, de flexion, de torsion et d'autres contraintes pour déterminer les dimensions appropriées.
3. Sélection des matériaux : Choisir un matériau adapté à l'application spécifique de l'arbre, en prenant en compte des facteurs tels que la résistance, la rigidité, la ductilité, la résistance à la corrosion et la fatigue.
4. Modélisation et simulation : Utiliser des logiciels de modélisation et de simulation pour créer un modèle virtuel de l'arbre et effectuer des analyses numériques afin d'évaluer sa performance et d'optimiser sa conception.
5. Dimensionnement et optimisation : Déterminer les dimensions appropriées de l'arbre en fonction des contraintes calculées, en tenant compte des facteurs de sécurité et des contraintes de fabrication. Optimiser la forme, les dimensions et les caractéristiques de l'arbre pour atteindre les performances souhaitées tout en minimisant les coûts.
6. Intégration des éléments de transmission : Prendre en compte les engrenages, les poulies, les roulements et autres composants qui seront montés sur l'arbre et s'assurer de leur compatibilité et de leur bon fonctionnement.
7. Vérification et validation : Effectuer des tests et des analyses pour valider la conception de l'arbre, en simulant les conditions réelles d'utilisation et en vérifiant sa résistance, sa durabilité et sa performance.

La conception d'arbres est une discipline complexe qui nécessite une compréhension approfondie des principes de la mécanique des matériaux, de la résistance des matériaux et de la dynamique des machines. Elle joue un rôle essentiel dans de nombreux domaines tels que l'ingénierie mécanique, l'automobile, l'aérospatiale et bien d'autres.

### 6) Modèle de calcul, modélisation de l'arbre :

Les propriétés mécaniques du matériau de l'arbre sont les suivantes :

Matière	Acier	
Nuance	EN.8 FORGING	35/45C, 05/-355 0/10M, GMAX 5, GMAX PH
La dureté / Masse volumique	HB	7800Kg/mm
La résistance à la rupture/ Limite élastique	Re	430 MPa
Limite élastiqué max	Rmax	700-850MPa
Module de Yong	E	190000 MPa
Poids avec mayeu	P	7630 Kg
Poids sans mayeu	P	6226,76 Kg
Longueur	L	7306mm
Diamètre	D	80mm (au rupture)

Tableau III.2 : Caractéristiques mécaniques du matériau de l'arbre

- **Remarque :**

Limite élastiquée, le module de Young et la masse volumique d'après "SMITHS métal EN8 "

### **7) Etude de la résistance de l'arbre :**

#### **7.1) Sollicitations simples et composées :**

Les sollicitations simples et composées sont des termes utilisés dans le domaine de l'ingénierie et de la mécanique des matériaux pour décrire les différents types de charges appliquées à une structure ou à un matériau.

Une sollicitation simple fait référence à une charge unique appliquée à une structure, telle qu'une traction, une compression, une flexion, une torsion ou un cisaillement. Par exemple, si une poutre est soumise à une force de traction, la sollicitation est considérée comme simple car elle exerce uniquement une force de traction sur la poutre.

En revanche, une sollicitation composée se produit lorsque plusieurs charges simples agissent simultanément sur une structure. Par exemple, une poutre peut être soumise à la fois à une force de traction et à une force de flexion. Dans ce cas, la sollicitation est composée car elle combine plusieurs types de charges.

L'analyse des sollicitations simples et composées est essentielle pour évaluer la capacité d'une structure ou d'un matériau à résister à ces charges et à éviter les défaillances ou les déformations excessives. Elle permet de déterminer les contraintes et les déformations induites, ce qui permet de concevoir et de dimensionner les structures de manière adéquate pour assurer leur sécurité et leur durabilité.

Il convient de noter que les sollicitations simples et composées peuvent varier en fonction du type de matériau, de la géométrie de la structure et des conditions de charge spécifiques. Par conséquent, une analyse détaillée des sollicitations est

## Chapitre III : Diagnostic technique et vérification de la résistance

nécessaire pour chaque cas particulier afin de garantir une conception et une performance optimales.

Un tableau est généralement utilisé pour regrouper les sollicitations simples les plus courantes, permettant de visualiser les différentes sollicitations et leurs caractéristiques spécifiques. [4]

Sollicitations	Effort normal	Effort tranchant	Moment de torsion	Moment de flexion
Traction/compression	N	T =0	Mt =0	Mf =0
Cisaillement	N =0	T	Mt =0	Mf =0
Torsion	N =0	T	Mt	Mf =0
Flexion pure	N	T =0	Mt =0	Mf

Tableau III.3 : récapitulatif des sollicitations simples les plus courantes [4]

L'arbre auquel nous faisons référence est soumis à une sollicitation composée, ce qui signifie qu'il est soumis à une combinaison de flexion et de torsion. Cette combinaison de forces et de moments se manifeste dans le torseur des efforts internes de l'arbre, qui présente la configuration suivante.

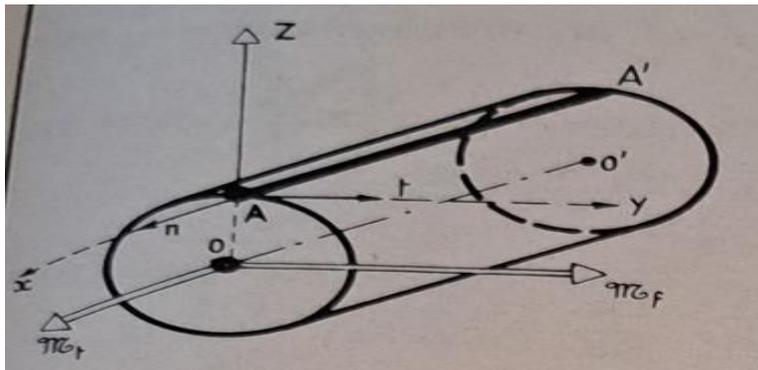


Figure III.3 : La combinaison des forces et des moments du torseur des efforts internes de l'arbre. [3]

En B :

Effort	$T = F$
Moment de torsion	$Mt = F \times \rho$

En un point O entre A et A' :

Effort	$T = F$
Moment de torsion	$Mt = F \times \rho$
Moment de flexion	$Mf = F(1-x)$

En A :

Effort	$T = F$
Moment de torsion	$Mt = F \times l$
Moment de flexion	$Mf = Mf_{max} = F \times l$

De A a A' :

Moment de torsion	$Mt = (1-x)F$
Moment de flexion	$Mf = Mf_{max} = l \times F$

**7.2) Diagrammes de l'effort tranchant T et le moment fléchissant Mf**

Les diagrammes de l'effort tranchant "T" et du moment fléchissant "Mf" peuvent être générés à l'aide d'un logiciel tel que RDM6. Ce logiciel couramment utilisé pour l'analyse des structures et la réalisation d'études de flexion. Il permet de calculer les déformations, les contraintes et les forces internes d'un élément structural soumis à des charges de flexion.

Une fois les propriétés de la structure, les conditions aux limites et les charges appliquées entrées dans le logiciel RDM6, celui-ci effectue les calculs nécessaires pour déterminer les forces internes le long de la structure. Ces forces internes, y compris l'effort tranchant et le moment fléchissant, peuvent ensuite être représentées graphiquement à l'aide de diagrammes.

Le diagramme de l'effort tranchant T représente les variations de l'effort tranchant le long de la structure. Il montre les valeurs de l'effort tranchant à différents points de la structure et permet de visualiser les variations de cette force.

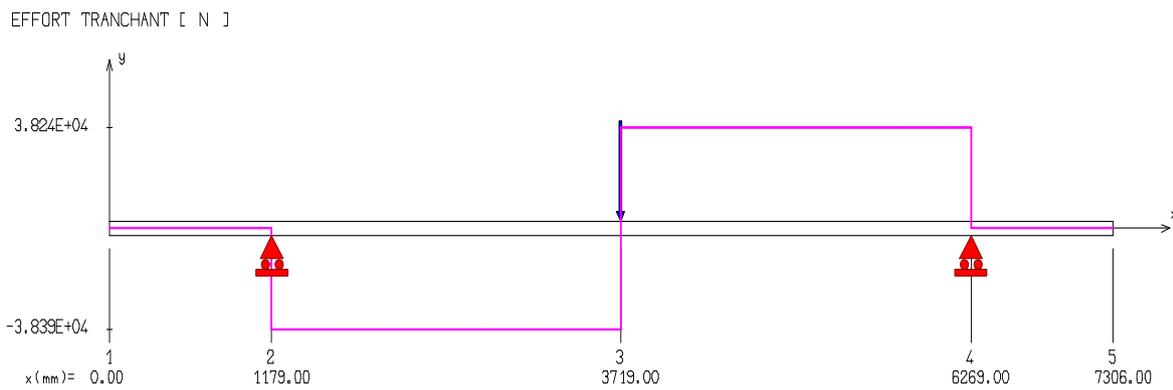


Figure III.4 : Diagramme de l'effort tranchant "T"

Le diagramme du moment fléchissant Mf représente les variations du moment fléchissant le long de la structure. Il montre les valeurs du moment fléchissant à différents points de la structure et permet de visualiser les variations de ce moment.

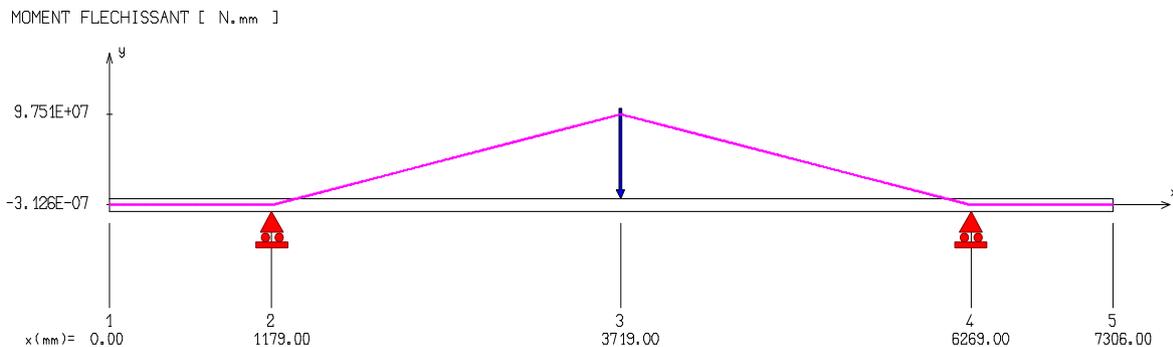


Figure III.5 : Diagramme du moment fléchissant "Mf"

Les diagrammes de l'effort tranchant et du moment fléchissant jouent un rôle essentiel dans la compréhension de la répartition des forces internes et du comportement d'une structure sous l'effet de charges. Ils fournissent des informations précieuses pour l'analyse et la conception de structures en permettant d'identifier les zones critiques, de dimensionner les éléments structurels et d'assurer la sécurité et la stabilité de la structure.

L'utilisation d'un logiciel tel que RDM6 simplifie la génération automatique de ces diagrammes en effectuant les calculs complexes et en fournissant des résultats précis et fiables pour l'effort tranchant et le moment fléchissant

### **8) Etude de la flexion :**

L'étude de flexion consiste à analyser le comportement d'un matériau ou d'une structure soumise à des charges qui induisent une courbure. Cette analyse permet de comprendre la réponse de la structure en termes de déformations, de contraintes et de contraintes maximales.

Lors de l'étude de flexion, on examine généralement les éléments suivants :

1. Moment fléchissant et forces internes : L'étude de flexion permet de déterminer les variations des moments fléchissant et des forces internes le long de la structure. Ces informations sont utiles pour comprendre comment la structure résiste à la flexion et pour concevoir des éléments de renforcement si nécessaire.
2. Déformations : Lors de la flexion, la structure subit des déformations qui peuvent être mesurées et analysées. Cela inclut la déformation en flexion, qui est la courbure de la structure, ainsi que les déformations latérales et les déformations longitudinales.
3. Contraintes : Les contraintes induites par la flexion sont déterminées en fonction de la géométrie de la structure, des charges appliquées et des propriétés du matériau. Les contraintes maximales peuvent être utilisées pour évaluer la résistance de la structure et assurer sa sécurité.

L'étude de flexion est largement utilisée dans de nombreux domaines de l'ingénierie, tels que la conception de poutres, de structures de bâtiments, de pièces mécaniques et de composants structurels. Elle permet d'évaluer la capacité d'une structure à résister aux charges de flexion et de prendre des décisions de conception éclairées pour garantir la sécurité et la performance optimale de la structure.

on obtient l'effort tranchant et le moment fléchissant (on obtient en fait respectivement  $T=F$  et  $MF$  [4])

**8.1) Contrainte Normale :**

$$\sigma_{\max} = \frac{M_f}{I} \times Y_{\max}$$

Avec :

-  $\sigma_{\max}$  : norme du vecteur contrainte normale en un point M d'une section droite

-  $M_f$  : moment de flexion

le moment fléchissant ( $M_f$ ) au point de rupture à une distance  $D= 5556$  mm en utilisant le logiciel RDM6

$$M_f = 2,172 \times 10^7 \text{ N.mm}$$

-  $I_{Gz}$  moment quadratique.

$$I_{GZ} = \frac{\pi}{64} \times D^4$$

-  $Y_{\max}$  distance entre A et B

$$Y_{\max} = \frac{D}{2}$$

Application Numérique du contrainte normale due a la flexion a l'équation 1

$$\sigma_{\max} = 432.1056 \text{ MPa}$$

**8.2) Contrainte tangentielle de la Flexion :**

La contrainte tangentielle en flexion, également appelée contrainte de cisaillement en flexion, est une contrainte qui se produit le long de la section transversale d'une poutre ou d'un élément soumis à une flexion. Elle est causée par les déformations de cisaillement qui se produisent lorsque la poutre fléchit sous l'effet d'un moment fléchissant.

Cette contrainte tangentielle de cisaillement  $\tau$  est donnée par :

$$\tau_1 = \frac{F}{S} \dots \dots \dots (2)$$

$\tau$  : représente la contrainte tangentielle

F : l'effort tranchant T

L'effort tranchant (F) au point de rupture à une distance  $D= 5556$  mm en utilisant le logiciel RDM6

$$F = 3,3839 \times 10^4 \text{ N.m}$$

S : la section droite

$$S = \frac{\pi}{4} D^2$$

Application Numérique du contrainte tangentielle due a la flexion a l'équation 2

$$\tau_1 = 610 \text{MPa}$$

### **9) Etude de la torsion :**

L'étude de la torsion concerne l'analyse du comportement d'une structure soumise à des forces de torsion, c'est-à-dire des forces qui tendent à faire tourner la structure autour d'un axe central. Cette étude est importante pour comprendre la résistance d'une structure aux moments de torsion et pour dimensionner les éléments structurels en conséquence.

Lorsqu'une structure est soumise à des forces de torsion, elle subit des déformations qui peuvent provoquer des contraintes et des contraintes de cisaillement le long de sa longueur. L'objectif de l'étude de la torsion est de déterminer les distributions de ces contraintes et déformations, afin d'évaluer la capacité de la structure à résister aux charges appliquées [5].

Pour réaliser une étude de la torsion, plusieurs étapes peuvent être suivies :

1. Modélisation de la structure : Créez un modèle de la structure dans un logiciel d'analyse des structures, en définissant les dimensions, les matériaux et les conditions aux limites appropriées.
2. Appliquer les forces de torsion : Spécifiez les forces de torsion appliquées sur la structure, en indiquant leur magnitude, leur direction et leur point d'application.
3. Calcul des déformations et des contraintes : Effectuez les calculs pour déterminer les déformations, les contraintes et les contraintes de cisaillement le long de la structure en réponse aux forces de torsion appliquées.
4. Analyse des résultats : Analysez les résultats obtenus, en examinant les distributions de contraintes et de déformations le long de la structure. Identifiez les zones critiques où les contraintes sont maximales et évaluez la capacité de la structure à résister à ces charges de torsion.
5. Dimensionnement des éléments structurels : Utilisez les résultats de l'étude de la torsion pour dimensionner les éléments structurels de manière à garantir la sécurité et la stabilité de la structure.

#### **9.1) Contrainte tangentielle de la torsion :**

On définit la contrainte de torsion  $\tau$  en M par la relation

$$T_2 = \frac{M_t}{I_0} \times Y_{\max} \dots \dots \dots (3)$$

$\tau$  : contrainte tangentielle

$Y_{\max}$  : distance du point M du plan neutre

$I$  : moment quadratique polaire de la section (S)

$$I = \frac{\pi}{32} \times D^4$$

Remarque :  $D=80$  diamètres du l'arbre au point du rupture

$M_t$  : moment de torsion

$$M_t = \frac{P}{\omega}$$

A partir de livre,,,,

$P$  : Puissance

$\omega$  : Vitesse angulaire

$$\omega = \frac{2\pi N}{60}$$

Application Numérique

$$M_t = 8489,3246 \text{ N.mm}$$

On appliqué dans l'équations (3)

$$T_2 = 0,0844 \text{ MPa}$$

On définit une contrainte équivalente idéal  $\sigma_e$  :

$$\sigma_i = \sqrt{T_1^2 + 4T_2^2}$$

Par application numérique on trouve,

$$\sigma_i = 610 \text{ MPa}$$

Limite élastiqué  $R_{\max} = 700-850 \text{ MPa}$

Alors Condition de résistance :

la contrainte idéale doit rester inférieure à la valeur de la contrainte pratique au glissement

### **10. Conclusion :**

En conclusion de ce chapitre, nous avons exploré le concept de contrainte équivalente idéale joue un rôle crucial dans l'évaluation de la résistance d'un matériau face aux charges appliquées. Elle permet de déterminer si le matériau peut résister sans subir de déformation permanente ou de rupture. Dans le domaine de l'ingénierie, son utilisation est essentielle pour concevoir et vérifier la sécurité et la fiabilité des structures. Cependant, il est important de noter que le calcul précis de la contrainte équivalente idéale nécessite une analyse approfondie des contraintes et des propriétés du matériau, ainsi que l'utilisation d'outils de calcul appropriés tels que des logiciels spécialisés.

En conclusion, la contrainte équivalente inférieure à la limite élastique est un critère fondamental dans la conception et l'analyse des structures. En respectant cette condition, nous assurons la sécurité et la fiabilité des matériaux utilisés, en évitant les déformations permanentes ou les ruptures potentielles. Cela garantit la stabilité et la durabilité des structures, contribuant ainsi à des environnements sûrs et fiables pour leur utilisation.

# CHAPITRE IV :

# DIAGRAMME CAUSE À EFFET

### 1. Introduction :

Dans ce chapitre, nous explorerons en détail le diagramme de Ishikawa, ses composants, son utilisation pratique et les étapes clés pour créer et interpréter ce type de diagramme. Nous examinerons également des exemples concrets d'application du diagramme de Ishikawa dans différents contextes industriels, mettant en évidence ses avantages et son impact sur la résolution de problèmes et l'amélioration continue.

Que ce soit pour analyser les problèmes de qualité, les défauts de production, les dysfonctionnements des machines ou toute autre situation où une analyse des causes et effets est nécessaire, le diagramme de Ishikawa est un outil puissant et efficace. En comprenant ses principes fondamentaux et en maîtrisant son utilisation, les professionnels peuvent prendre des décisions éclairées et mettre en œuvre des améliorations significatives dans leurs opérations.

Dans les sections suivantes, nous explorerons les différentes facettes du diagramme de Ishikawa, en fournissant des conseils pratiques, des exemples concrets et des études de cas pour illustrer son utilisation dans divers domaines industriels.

### 10) Définition du diagramme d'ISHIKAWA

Le diagramme d'Ishikawa, également connu sous le nom de diagramme de causes et effets ou diagramme en arête de poisson, est un outil de qualité largement utilisé pour analyser les causes d'un problème ou d'un effet spécifique. Il a été développé par le statisticien japonais Kaoru Ishikawa dans les années 1960 [8].

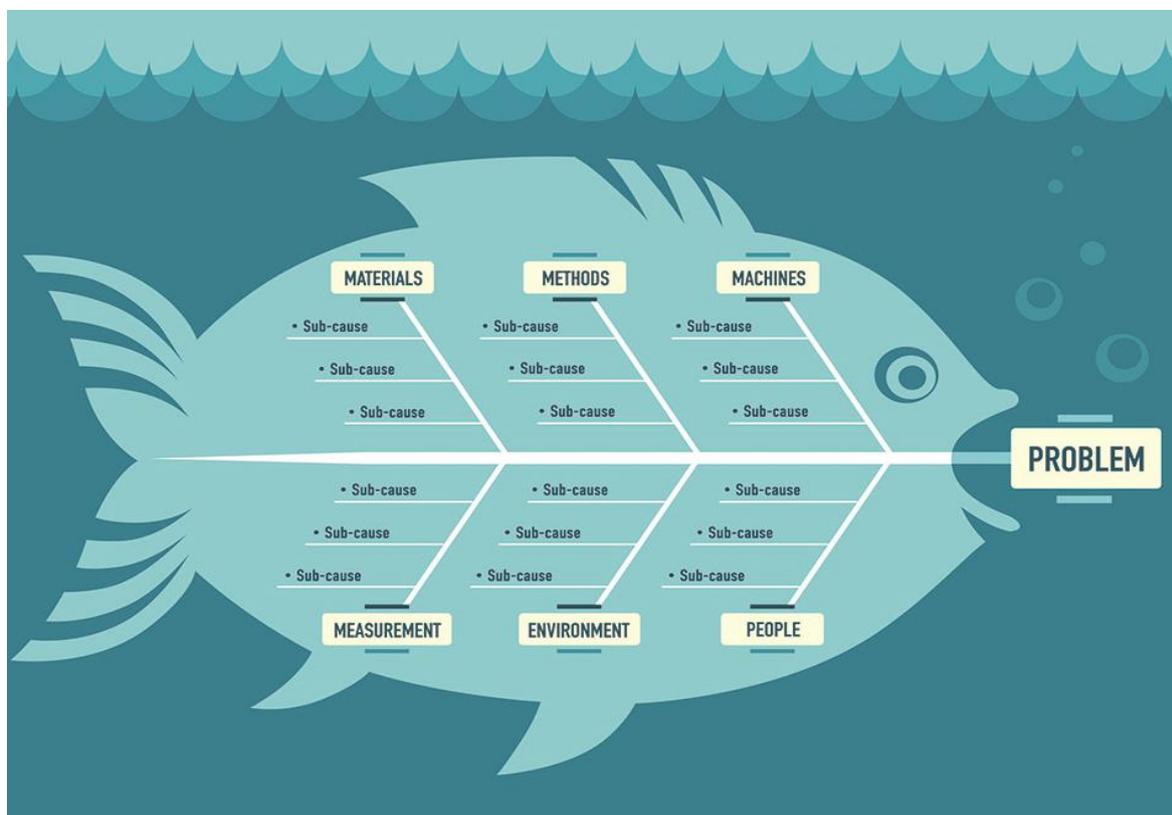


Figure IV.01 : Arrêtes en Diagramme de Poisson (d'ISHIKAWA) [9]

### 11) La réalisation du diagramme d'Ishikawa :

Voici comment construire un diagramme d'Ishikawa :

1. Définir le problème ou l'effet indésirable : Commencez par définir clairement le problème ou l'effet que vous souhaitez analyser. Par exemple, si vous travaillez dans une usine de fabrication et que vous rencontrez des défauts de qualité, vous pouvez définir le problème comme "défauts de qualité des produits".
2. Identifier les principales catégories de causes : Dessinez une ligne horizontale au milieu d'une feuille de papier ou d'un tableau blanc et écrivez le problème ou l'effet indésirable au bout de la ligne à droite. Ensuite, identifiez les principales catégories de causes qui pourraient contribuer au problème. Ces catégories sont généralement regroupées en cinq M : Main d'œuvre, Méthodes, Matériaux, Machines, Milieu et .
3. Dessiner les arêtes principales : Dessinez des lignes obliques partant de la ligne horizontale centrale pour représenter chaque catégorie de causes. Étiquetez chaque arête avec le nom de la catégorie correspondante. Par exemple, si vous choisissez les catégories Main d'œuvre, Méthodes et Machines, vous aurez trois arêtes principales partant de la ligne centrale.
4. Identifier les causes potentielles : Pour chaque catégorie de causes, identifiez les causes potentielles qui pourraient contribuer au problème. Ce sont les facteurs spécifiques que vous souhaitez examiner. Par exemple, sous la catégorie Main d'œuvre, vous pourriez identifier des causes potentielles telles que le manque de formation ou le manque de compétences.
5. Ajouter les arêtes secondaires : Pour chaque cause potentielle identifiée, dessinez des lignes obliques partant de l'arête principale correspondante et étiquetez-les avec les causes spécifiques. Par exemple, si vous avez identifié le manque de formation comme une cause potentielle sous la catégorie Main d'œuvre, vous pouvez ajouter une arête secondaire avec l'étiquette "Manque de formation" qui part de l'arête principale Main d'œuvre.
6. Analyser les causes : Une fois que vous avez terminé de détailler les causes potentielles, vous pouvez passer à l'analyse des causes et déterminer les relations entre elles. Par exemple, vous pouvez identifier des causes racines qui semblent contribuer à plusieurs catégories de causes. [10]

### 4) But du diagramme d'Ishikawa :

Diagramme en arêtes de poisson, est utilisé dans le but d'identifier et d'analyser les causes potentielles d'un problème ou d'une situation indésirable. Le principal objectif de ce diagramme est de faciliter la compréhension des causes sous-jacentes d'un problème, en mettant en évidence les différentes catégories de causes qui peuvent contribuer à son apparition.

Le diagramme d'Ishikawa est représenté sous la forme d'un graphique qui ressemble à l'arête d'un poisson, d'où son nom. La tête du poisson représente le problème ou l'effet indésirable que l'on souhaite analyser, tandis que les arêtes du poisson représentent les différentes catégories de causes qui peuvent contribuer à ce problème [10].

Voici quelques exemples de catégories de causes spécifiques adaptées aux machines industrielles :

**Matière : M1.** Recense les causes ayant pour origine les supports techniques et les produits utilisés (nature, quantité, approvisionnement).

**Main d'œuvre : M2.** Problème de compétence, d'organisation, de Management (aptitudes, niveau de formation, motivation ).

**Matériel : M3.** Causes relatives aux Matériels, aux équipements et Moyens concernés (nouveaux, vétustes , mal entretenus ).

**Méthode : M4.** Procédures ou modes opératoires utilisés (standards, consignes, tolérance, information).

**Milieu : M5.** Environnement physique : (lumière, bruit, poussière, localisation, signalétique, distance, obstacle).

Le diagramme d'Ishikawa est également utilisé dans le contexte des machines industrielles pour analyser les causes des problèmes ou des défauts qui peuvent survenir. Dans ce cas, les catégories de causes spécifiques sont adaptées pour s'aligner avec les aspects pertinents des machines industrielles. Voici un exemple de diagramme de Ishikawa pour la machine industrielle :

### 5) Les causes :

1. Fatigue des matériaux
2. Surcharge
3. Mauvaise lubrification
4. Conditions climatiques défavorable
5. Erreurs de mesure de la vibration
6. Problèmes d'usure
7. Manque de formation,
8. Pannes de composants.
9. Contaminations des équipements
10. Tension électrique
11. Mauvais entretien.
12. Corrosion
13. Délitiation ou déplacement de la turbine
14. Traitement spécifique de l'arbre

- 15. Niveau de sécurité nuance de métal
- 16. La température élevée de palier
- 17. L'utilisation d'un roulement non-recommandé par le constructeur
- 18. Erreurs d'installation ou de montage : désalignement
- 19. Niveaux d'humidité élevés
- 20. Manque de compétences
- 21. Défauts de processus.
- 22. Problème de palier

Tableau ci-dessous : Regrouper les causes potentielles en familles, appelées Communément les cinq M.

	Matière	Main-d'œuvre	Milieu	Matériels	Méthodes
Surcharge				x	
Mauvaise lubrification		x			
Manque de formation					x
Conditions climatiques défavorable			x		
Erreurs de mesure du vibration		x			
Problèmes d'usure	x				
Pannes de composants				x	
Fatigue des matériaux	x				
Contaminations des équipements			x		
Tension électrique				x	
Mauvais entretien		x			
Corrosion	x				
Délimitation ou déplacement du turbine				x	
Traitement spécifique de l'arbre		x			
Niveau de sécurité nuance de métal	x				
La température élevée de palier				x	
L'utilisation d'un roulement non-recommandé par le constructeur		x			
Erreurs d'installation ou de montage : désalignement		x			
Niveaux d'humidité élevés			x		
Manque de compétences					x
Défauts de processus.		x			
Problème de palier				x	

Tableau IV.1 : Classification des causes

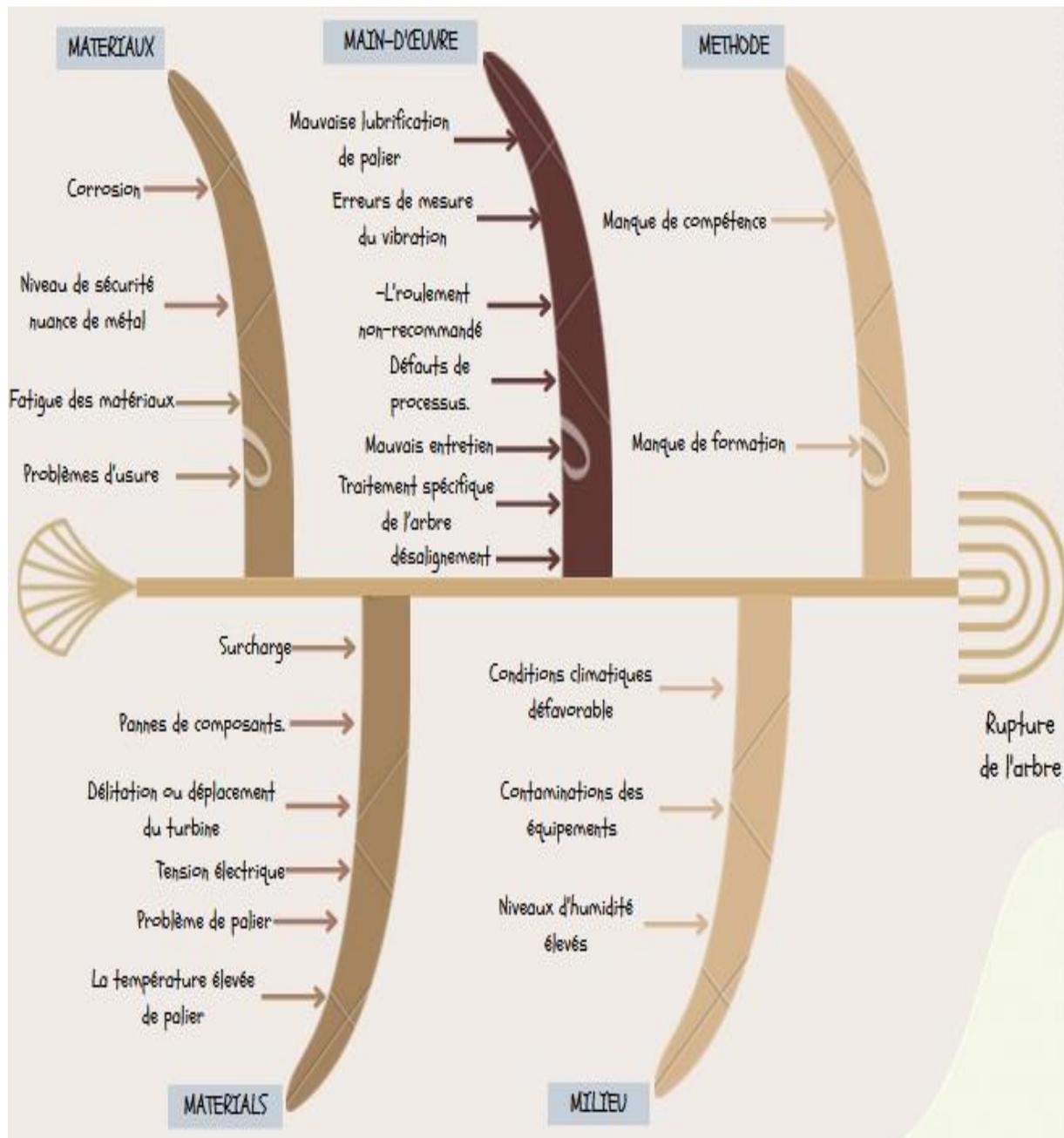


Figure IV.2 : Le diagramme de classification d'Ishikawa

Après avoir effectué la vérification de la résistance des matériaux dans le chapitre précédent, aucun problème de matériaux n'a été détecté. Cependant, afin de mieux comprendre la situation, nous avons organisé une réunion avec quelques techniciens afin d'analyser les véritables causes parmi celles qui étaient potentielles.

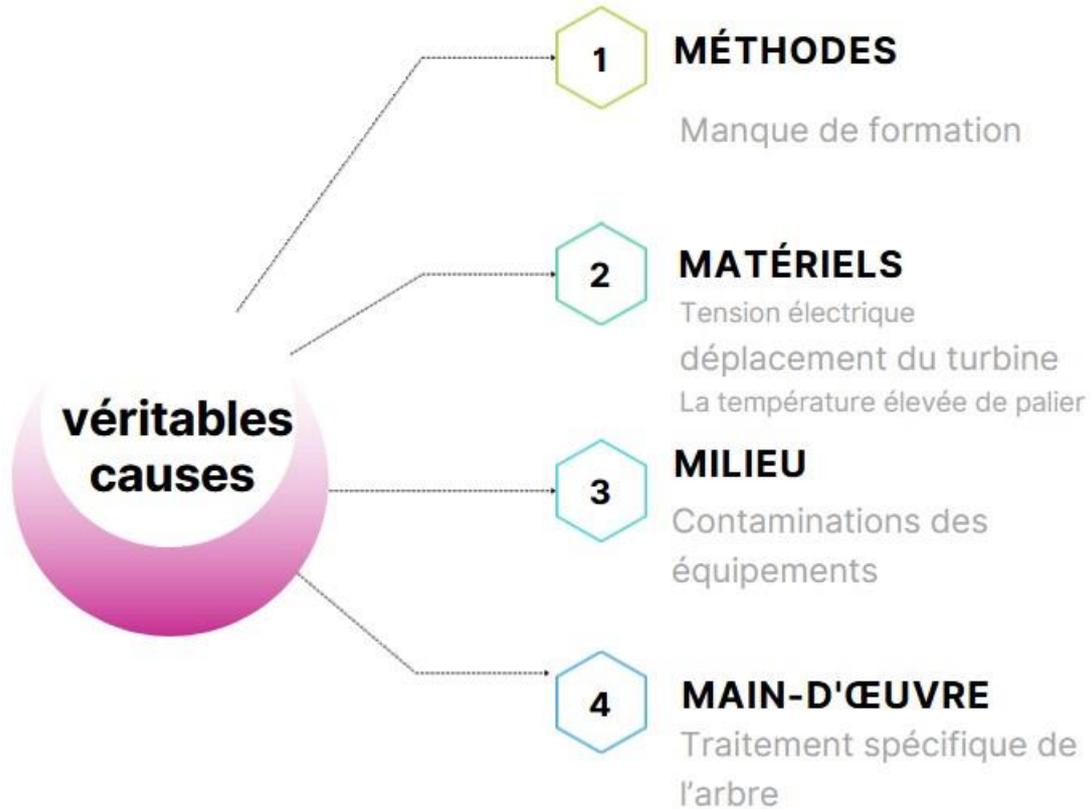


Figure IV.3 : Les véritables causes détectées

**6) Proposition pour les véritables causes parmi celles qui étaient potentielles :**

	Causes	Proposition
<b>Méthodes</b>	Manque de formation	1-Suivi et évaluation : Mettre en place un système de suivi et d'évaluation pour mesurer l'efficacité de la formation.  2- Utilisation de technologies de formation innovantes : Explorer l'utilisation de technologies de formation avancées telles que l'apprentissage en ligne.
<b>Matériels</b>	<i>Tension électrique</i>	1-Utilisation de dispositifs de protection contre les surtensions.  2-Installation d'un système de régulation de tension.
	<i>Déplacement de la turbine</i>	1-Utilisation de dispositifs de fixation : Utiliser des dispositifs de fixation supplémentaires tels que des boulons d'ancrage, des plaques de retenue ou des supports pour maintenir la turbine en place et prévenir les déplacements indésirables.  2- Contrôle des conditions de fonctionnement : Surveiller et contrôler les conditions de fonctionnement

		de la machine, notamment la température, la pression et les vibrations.  3- Maintenance préventive : la vérification de l'alignement, le remplacement des pièces usées ou endommagées, et la lubrification appropriée des éléments mobiles.
	<i>Température élevée du palier</i>	1-Lubrification appropriée : S'assurer que le palier est correctement lubrifié.  2- Vérification de l'alignement et de l'équilibrage : S'assurer que l'arbre et le palier sont correctement alignés et équilibrés.
<i>Milieu</i>	<i>Contamination des équipements</i>	1- Maintenance préventive : Mettre en place un programme de maintenance préventive régulier pour inspecter et nettoyer les équipements de la machine.  2- Analyse des causes profondes : Identifier les sources potentielles de contamination, telles que les fuites, les mauvaises pratiques de manipulation, les défaillances des filtres ou des séparateurs.
<i>Main-d'œuvre</i>	<i>Traitement spécifique d'arbre</i>	1-Contrôle de la qualité et de la maintenance : Mettre en place des processus de contrôle de la qualité pour surveiller les caractéristiques critiques de l'arbre et effectuer des inspections régulières pour détecter tout signe de défaillance imminente.

Tableau IV.2 : Proposition pour remédier aux causes identifiées

**Conclusion :**

Ce mémoire a examiné en détail les véritables causes de la rupture de l'arbre dans une machine industrielle. Grâce à une analyse approfondie, plusieurs facteurs ont été identifiés comme contribuant à cette défaillance. Parmi les causes principales figurent le traitement spécifique de l'arbre, le manque de formation, la tension électrique, le déplacement de la turbine, une température élevée du palier, la contamination des équipements

Pour remédier à ces causes, plusieurs solutions ont été proposées. Il est essentiel d'effectuer une analyse approfondie de la défaillance pour comprendre les modes de rupture spécifiques et les zones de contraintes élevées.

Enfin, dans ce mémoire, on a contribué à une meilleure compréhension des causes de la rupture de l'arbre dans une machine à l'unité d'ammoniac à l'entreprise FERTIAL, et on a proposé des solutions pour prévenir de telles défaillances à l'avenir. Ces résultats fournissent des orientations précieuses pour l'amélioration de la conception, de la fabrication et de la maintenance des machines industrielles, contribuant ainsi à accroître leur fiabilité et leur durabilité.

## REFERENCES

[1] <https://www.appvizer.fr/magazine/operations/gestion-maintenance/les-types-de-maintenance>

[2] <https://www.google.com/search?client=firefox-b-d&q=5%29+La+gestion+des+d%C3%A9faillances+en+maintenance+industrielle+>

[3] Livre "62 Art d'ingénieur BORDAS Encyclopedie 1974

[4] <https://www.univ-biskra.dz/enseignant/bensaada/RDM.pdf>

[5] [https://dspace.univ-ouargla.dz/jspui/bitstream/123456789/13123/1/Calcul-des-arbres-Application-au-cas-de-l\\_arbre-tambour-du-Treuil-oil-well-840E.pdf](https://dspace.univ-ouargla.dz/jspui/bitstream/123456789/13123/1/Calcul-des-arbres-Application-au-cas-de-l_arbre-tambour-du-Treuil-oil-well-840E.pdf)

[6] <https://www.cours-et-exercices.com/2016/03/criteres-de-conception-darbres.html>

[http://www.lyrfac.com/soutiens/knbase/pdf/arbre%20\(mecanique\).pdf](http://www.lyrfac.com/soutiens/knbase/pdf/arbre%20(mecanique).pdf)

[7] [https://www.zpag.net/Machines\\_Simples/images16/machin4.gif](https://www.zpag.net/Machines_Simples/images16/machin4.gif)

[8] <https://www.leblogdudirigeant.com/diagramme-ishikawa/>

[9] [https://www.google.com/search?q=poisson+d%27ishikawa&client=firefox-b-d&source=Inms&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUKEwir1Ov4vsH\\_AhXiR\\_EDHVVY0D28QOpQJegQIBBAC&biw=1366&bih=615&dpr=1#imgrc=ZkIStBsOqs7ENM](https://www.google.com/search?q=poisson+d%27ishikawa&client=firefox-b-d&source=Inms&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUKEwir1Ov4vsH_AhXiR_EDHVVY0D28QOpQJegQIBBAC&biw=1366&bih=615&dpr=1#imgrc=ZkIStBsOqs7ENM)

[10] <https://www.manager-go.com/gestion-de-projet/dossiers-methodes/ishikawa-5m>

Site web de FERTIAL 'www.FERTIAL.DZ'

Document interne de FERTIAL

