

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR-ANNABA



جامعة باجي مختار – عنابة

Année 2014

Faculté des Sciences de l'Ingéniorat
Département Génie Mécanique

MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de Master

**Etude de la fiabilité et de l'évolution de la fatigue
de l'aube de la turbine à vapeur 60ce 55-11-11.**

Domaine : SCIENCES ET TECHNOLOGIES

Filière : GENIE MECANIQUE

Spécialité : MAINTENANCE INDUSTRIELLE ET FIABILITE MECANIQUE

PAR : MERABET Ahcène

DIRECTEUR DU MEMOIRE : Rabia KHELEIF MCAU.B.M- Annaba

DEVANT LE JURY



Remerciements

Tous d'abord on remercie Allah le tous puissant qui m'a donné la volonté et la patience pour élaborer ce travail.

On tient avant tout, à adresser mon sincère remerciement à Mr : KHELIF Rabia qui a accepté de m'encadrer et qui n'a jamais ménagé son temps et ses efforts pour m'avoir prodigué ses précieux conseils.

On tient à remercier beaucoup Mr : AMIAR Adel pour m'avoir assisté et orienter et toutes les personnes de la Raffinerie de Skikda RA1k.

On tient à remercier tout les personnes qui ont contribuées à la réalisation de ce modeste travail de prés ou de loin et aussi, toute mon gratitude et respects à tous les enseignants de département de mécanique qui on contribué à l'établissement de notre projet de fin d'études.

MERABET Ahcène





Dédicace

*Un travail que je dédie aux deux êtres les plus chers
pour moi :*

*Mes parents, qui sont la source de lumière qui
M'éclairait depuis ma naissance et a qui j'exprime ma
sincère et éternelle gratitude pour leur attention,
l'éducation et les principes qu'ils m'ont Inculqué ainsi
que leur solution.*

A mes frères (Billel, Younes et Ahmed)

A mes sœurs (Zaineb, Rokaia et Marwa)

*Sans oublier toutes les personnes qui me sont et qui me
seront toujours chères.*

A tous mes amis

Qui m'ont aidé de près

Ou de loin à mener a bien ce travail.

MERABET Ahcène



Résumé :

Le rendement thermique de la turbine à vapeur dépend de l'augmentation de la température au niveau de l'entrer de la turbine. Cette augmentation de la température suite par une augmentation de la pression peut provoquer des déformations au niveau des aubes de la turbine, dont la nécessité de la maintenance afin de les protéger, donc, augmenter leurs durées de vie. La fatigue par chargement cyclique permanant est l'un des causes le plus rencontré à la défaillance des aubes.

Ce travail concerne l'étude des technologies et des performances des turbines à vapeur. Ainsi que l'influence des paramètres de fonctionnement sur l'évolution de fatigue des aubes. Le modèle de l'aube utilisée dans ce travail est une aube à action de la turbine

60 ce 55-11-11.

Le code de calcul utilisé dans cette étude est le Solidworks qui est basé sur les méthodes numériques pour la résolution des équations de maillage, le calcul des contraintes et du nombre de cycles.

Cette étude est présentée sous la forme de cinq chapitres, le premier consiste en une présentation de l'entreprise, des généralités sur les turbomachines, ainsi les constituants qui influent sur son efficacité de fonctionnement. Le deuxième chapitre est consacré à la description des turbines à vapeur, leurs technologies et leurs performances.

Le troisième chapitre montre l'étude et l'analyse de la fiabilité de la turbine étudiée.

Une introduction sur la fatigue et l'inspection des aubes de la turbine, fait l'objet du quatrième chapitre.

Le dernier chapitre est consacré à l'étude et l'analyse du comportement en fatigue de l'aube de la turbine par la simulation numérique.

Mots clés : aube, turbine à vapeur, fatigue des matériaux, fiabilité, simulation numérique.

Table des matières:

Remerciements

Dédicace

Résumé

Introduction générale..... 01

Problématique..... 02

CHAPITRE I : GENERALITES TURBOMACHINE

I.1. PRESENTATION DE L'ENTREPRISE..... 04

I.1.1. Introduction..... 04

I.1.2. Présentation de l'organisme d'accueil : SONATRACH 04

I.1.2.1. Historique..... 04

I.1.2.2. la dimension internationale de la SONATRACH..... 04

I.1.3. Historique de l'entreprise NAFTEC..... 05

I.1.4. Présentation du complexe RA1k..... 06

I.1.5. Organisation du complexe..... 08

I.1.6. Présentation générale des unités de procédés..... 08

I.1.7. Unités annexe et utilités..... 09

I.2. GENERALITES SUR LES TURBOMACHINES..... 12

I.2.1. Définition..... 12

I.2.2. Fonction et domaines d'utilisation des turbomachines..... 12

I.2.3. Notion d'étage, échange d'énergie..... 14

I.2.3.1. Géométrie des turbomachines..... 14

I.2.3.2. Notion d'étage..... 15

I.2.4. Classification..... 16

CHAPITRE II : TECHNOLOGIE ET PERFORMANCE DE TAV

II.1. TECHNOLOGIES DES TURBINES A VAPEUR.....	19
II.1.1. Introduction.....	19
II.1.2. Définition et principe généraux de fonctionnement.....	19
II.1.3. Principe de fonctionnement de la turbine à vapeur.....	20
II.1.4. Différent types de turbines à vapeur.....	21
II.1.4.1. Turbine à action.....	23
II.1.4.2. Turbine à réaction.....	24
II.1.4.3. Turbine mixte.....	25
II.1.5. Description de la turbine à vapeur.....	26
II.1.5.1. Enveloppe de la turbine.....	26
II.1.5.2. L'arbre de la turbine.....	26
II.1.5.3. L'ailettage.....	27
II.1.5.4. Palier et coussinets.....	27
II.1.5.5. Vireur d'arbre.....	28
II.1.5.6. Etanchéité vapeur.....	29
II.2. PERFORMANCES DES TURBINES A VAPEUR.....	31
II.2.1. Cycle de Rankine.....	31
II.2.2. L'équation d'énergie.....	31
II.2.3. Les travaux effectués.....	32
II.2.4. La puissance délivrée.....	32
II.2.5. Diagramme T-S.....	32
II.2.6. Le rendement de la turbine.....	33
II.2.7. Rendement effectif.....	33
II.2.8. Le triangle de vitesse.....	33

CHAPITRE III : ETUDE DE LA FIABILITE

III.1. HISTORIQUE DES PANNES.....	36
III.2. ETUDE DE LA FIABILITE DE LA TURBINE.....	37
III.2.1. Détermination et exploitation des paramètres de Weibull.....	73
A tracé de la droite de Weibull.....	37
B Détermination des paramètres de Weibull.....	37
C Validation du model choisi.....	38
D Calcul de la MTBF.....	39
E Calcul de l'écart-type.....	39
III.3. AMELIORATION DE FIABILITE (DIAGRAMME D'ISHIKAWA).....	45
III.3.1. Définition de l'effet.....	45
III.3.2. Identification des causes.....	45
III.3.3. classification des causes.....	45
III.3.4. Construction du diagramme.....	46
III.3.5. Proposition d'action en maintenance.....	47

CHAPITRE VI : INSPECTION D'UNE TV SUITE A UN INCIDENT D'AILETTES

VI.1. NOTIONS DE BASE SUR LA FATIGUE DES MATERIAUX.....	50
VI.1.1. Introduction.....	50
VI.1.2. Définition de la fatigue.....	50
VI.1.3. Mécanisme de fatigue.....	50
VI.1.4 Diagramme d'endurance.....	51
VI.1.5. Facteurs influant sur la résistance à la fatigue.....	52
VI.1.6. Paramètres d'ordre métallurgique.....	52
VI.2. INSPECTION D'UNE TV SUITE A UN INCIDENT D'AILETTES.....	53
VI.2.1. Introduction.....	53
VI.2.2. Phase de démontage.....	53
VI.2.3. Phase inspection.....	54

VI.2.3.1. Inspection de rotor.....	54
VI.2.3.2. Inspection du stator.....	55
VI.2.4. Expertise des ailettes cassées.....	55
VI.2.5. La corrosion des ailettes.....	57
VI.2.6. Conséquences de rupture d'ailettes.....	57

CHAPITRE V : SIMULATION DE FATIGUE SUR L'AUBE

V.1. SIMULATION DE FATIGUE SUR L'AUBE.....	59
V.1.1. Introduction.....	59
V.1.2. Outils informatique utilisée (Solidworks).....	59
V.1.3. Propriétés physiques du matériau de l'aube.....	60
V.1.4. Caractéristiques de la turbine.....	60
V.1.5. Charge et motage.....	61
V.1.6. Le maillage.....	62
V.2. RESULTATS DE LA SIMULATION.....	63
V.2.1. L'étude statique.....	63
a) Les contraintes	63
b) Les déformations	63
c) Analyse des résultats	63
d) Les déplacements	64
e) Analyse des résultats	65
V.2.2. l'étude de fatigue.....	65
a. Pourcentage d'endommagement.....	65
b. Analyse des résultats	66
V.2.3. L'initiation de la fissure.....	66
a. Le tableau de $N = f(\sigma)$	66
b. La courbe de $N = f(\sigma)$	67
c. Analyse de la courbe	68

V.2.4. Propagation de la fissure.....	69
a. Les contraintes et les déformations.....	69
b. les déplacements.....	71
c. le nombre de cycle.....	71
d. le tableau de $N = f(\sigma)$	72
e. la courbe $N = f(\sigma)$	72
f. Discussion	73
 Conclusion générale.....	 74
Bibliographie.....	75

Introduction générale :

La production industrielle a connu un développement considérable grâce à l'amélioration de la technologie, de la maintenance et de la sécurité de fonctionnement des machines et des équipements industriels, ce progrès a pour but essentiellement :

- L'augmentation de productivité
- L'utilisation de la machine de manière optimale en réduisant les durées et les coûts de la maintenance.

Parmi ces machines les turbines à vapeurs qui sont plus sensibles dans le domaine des hydrocarbures.

Ces turbines représentent un investissement considérable pour les unités de raffinage et les trains de liquéfaction, de plus les défaillances d'arrêts de ces équipements entraînent la plus part de temps, des grandes perturbations ou même l'arrêt de production.

Il est donc essentiel d'empêcher la défaillance des turbines, en assurant leur fiabilité d'où la nécessité d'un programme de maintenance adéquat, et un entretien rigoureux.

Notre étude est consacrée à l'étude des turbines à vapeur utilisées à l'unité de raffinage RA1k de Skikda.

Cette étude a pour but de connaître les différentes technologies et performances de la turbine à vapeur, ainsi que l'évaluation de l'évolution de la fatigue des aubes de notre turbine étudiée 60 ce 50-11-11. Une simulation de fatigue nous permettra de connaître la distribution des charges et les zones les plus sensibles à la fatigue sur notre structure qui nous aidera de bien suivre l'état de l'aube et d'augmenter leur durée de vie.

Problématique :

Le thème de ce mémoire de fin d'études du Master en Maintenance Industrielle et Fiabilité Mécanique a été élaboré dans le but de contribuer à la résolution d'un problème technique rencontré au niveau de la turbine à vapeur située au niveau du complexe de raffinage de pétrole RA1k, Skikda.

C'est suite à un stage de fin d'études de 3 mois effectué au sein du département de maintenance service mécanique qui était une opportunité pour moi de percevoir le domaine de raffinage et de contrôler les turbines à vapeur 60 ce 55-11-11.

L'entraînement des pompes des produits pétrolières se fait par les turbines à vapeur pour la plus part des unités du complexe. Ces derniers représentent un investissement considérable pour les unités de raffinage, de plus les défaillances d'arrêts de l'une de ces turbines 60 ce 55-11-11 entraînent plusieurs fois, des grandes perturbations ou même l'arrêt de production. Nous avons découvert les facteurs qui influent de manière prépondérante sur le comportement de fatigue dans les aubes suite à une analyse de l'équipement qui montre une insuffisance considérable en termes de fiabilité, elle est due aux contraintes internes liées aux conditions d'exploitation.

D'où la définition de notre thème «Etude de la fiabilité et de l'évolution de la fatigue de l'aube de la turbine à vapeur 60ce 55-11-11» dans le but de prévenir et de maintenir de meilleures conditions de fonctionnement et sécurité en phase d'exploitation de ces équipements.

I.1 Présentation du complexe RA1k :

I .1.1 Introduction :

Grâce à des techniques de plus en plus perfectionnées, l'homme a découvert et exploiter l'une après l'autre, les richesses de la nature telles que l'énergie (les gisements de charbon, de pétrole et du gaz).

Incontestablement, le pétrole et le gaz sont les richesses naturelles les plus importantes de notre pays, la matière de base connu sous le terme pétrole brut constitue non seulement une source d'énergie, mais aussi une matière première pour plusieurs industries en pleine expansion.

Le pétrole brut dont le marché mondial connaît une forte croissance, sont devenus de nos jours parfaitement intégrés en tant que source d'énergie inévitable.

I .1.2 Présentation de l'organisme d'accueil SONATRACH :

I.1.2.1 Historique :

L'état a créé par décret du 31 décembre 1963, complété par celui du 21 septembre 1966, la société nationale pour la recherche, la production, le transport, la transformation et la commercialisation des hydrocarbures liquides et gazeux SONATRACH : (**S**ociété **N**ational de **T**ransport et **C**ommercialisation des **H**ydrocarbures)

Instrument actif du recouvrement de la souveraineté économique dans un domaine vital pour l'avenir de pays. Ce que lui a permis de se frayer un chemin parmi les plus grandes compagnies du monde.

I.1. 2.2 La dimension internationale de la SONATRACH :

Grâce à la situation géographique privilégiée du pays, la SONATRACH a dû développer son action commerciale vers les états unis et l'Europe de l'ouest et évidemment les pays de Maghreb.

La SONATRACH occupe une place capitale dans l'économie du pays, elle emploie 3700 agents tous cors de métiers confondus, elle est gérée par un directeur général avec collaboration de 4 directeurs adjoints.

I.1.3. Historique de l'entreprise « NAFTEC » :

Avant janvier 1982 le complexe de raffinage de pétrole de SKIKDA était géré par la société nationale SONATRACH.

A partir du 02 janvier 1982 la société SONATRACH a été restructurée en 13 entreprises, parmi ces entreprises, l'Entreprise nationale de raffinage et de distribution de produits pétroliers l'E.R.D.P créée par décret 80-101 du 06 avril et mise en place le 02 janvier 1982.

L'E.R.D.P est placée sous tutelle du ministère de l'énergie et des industries pétrochimiques.

A partir du 02 février 1985 l'E.R.D.P a été transformée sous le nom commercial NAFTAL.

Cette dernière est subdivisée en quatre unités à savoir :

- Unité NAFTAL de raffinage.
- Unité NAFTAL de distribution.
- Unité NAFTAL portuaire.
- Unité NAFTAL de maintenance.

A compter du 25 août 1987 et par décret 87-190 fut créée l'Entreprise nationale NAFTEC qui a pris en charge une des activités dévolues initialement à NAFTAL en l'occurrence la promotion, le développement, la gestion et l'organisation de l'industrie du raffinage par notamment le traitement du pétrole brut et du condensât ainsi que du brut réduit importé en vue d'obtenir des produits raffinés destinés à la consommation nationale et à l'exportation.

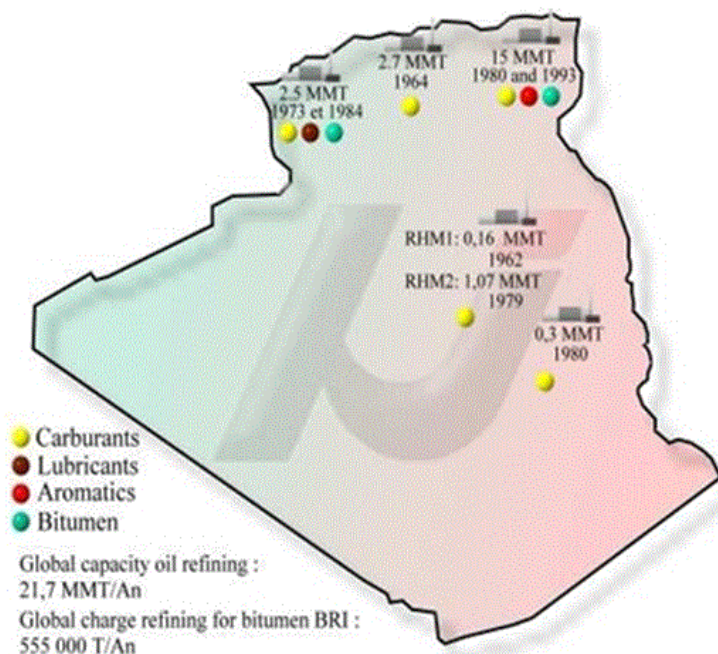


Figure 1 : L'industrie de Raffinage en Algérie

I.1.4. Présentation de la raffinerie de Skikda :

Le Complexe de raffinage de pétrole de Skikda baptisé RA.1K a pour mission de transformer le pétrole brut provenant de Hassi Messaoud avec une capacité de traitement (15 millions t/an) ainsi que le brut réduit importé (271100 t/an).

Cette raffinerie est située dans la zone industrielle à 7 km à l'est de Skikda et à 2 km de la mer, et est aménagée sur une superficie de 183 hectares environ.

Elle emploie à l'heure actuelle 1400 travailleurs. La raffinerie de Skikda a été construite en janvier 1976 à la suite d'un contrat signé le 30 avril 1974 entre le gouvernement algérien et le constructeur italien SNAM PROGETTI et SAIPEM. Le coût total de cette réalisation s'est élevé à 3.402.872.000 DA.

Il faut noter qu'en 1989 d'autres nouvelles unités ont été réalisées par la société Japonaise J.G.C corporation, en l'occurrence l'unité de prétraitement et de Reforming catalytique II (platforming U. 101/103) et l'unité de traitement et de séparation des gaz (U. 104), ces deux unités ont démarrées en Octobre 1993 ainsi que leurs unités d'Utilités (Chaudière : « G4 », Turbo alternateur : « U1050 » et l'unité Blinder : « U600 »).



Figure 2 : Vue aérienne de la Zone Industrielle de Skikda



Figure 3 : Vue du Satellite de la Raffinerie de Skikda

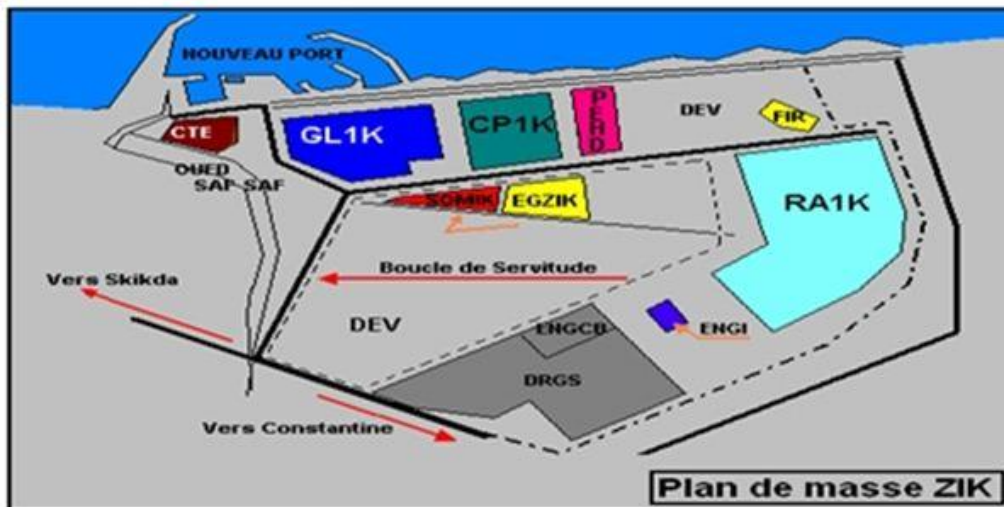


Figure 4 : Plan général de la zone industrielle de Skikda

I.1.5. Organigramme du complexe de raffinage de pétrole de Skikda :

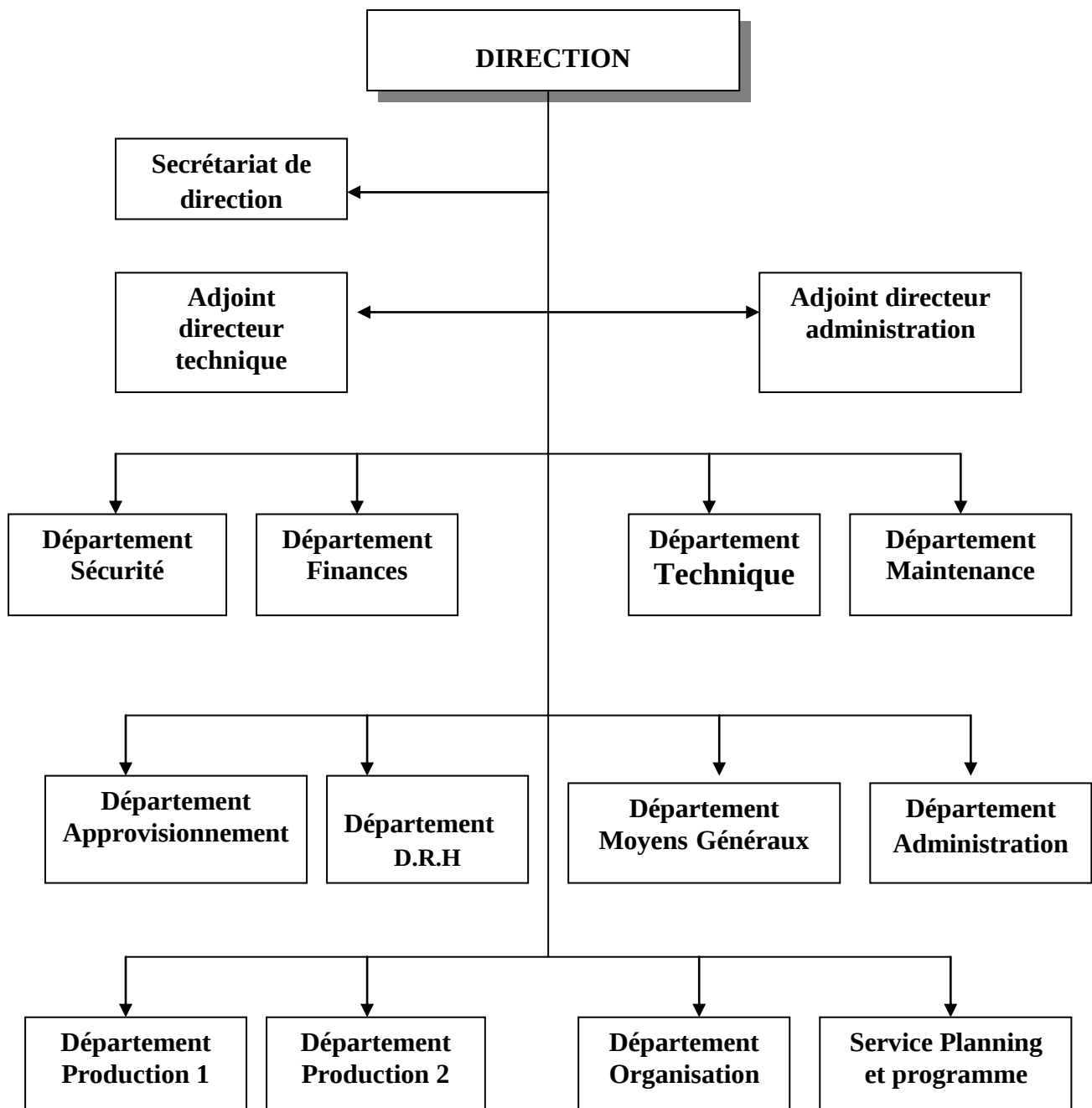


Figure 5 : Organigramme du complexe de raffinage de pétrole de Skikda

I.1.6. Présentation générale des unités de procédés :

La raffinerie est divisée en différentes zones et en outre elle comprend 09 unités de production :

- Unité 10/11 de distillation atmosphérique (Topping).

- Unité 100 de pré traitement et de reforming catalytique (magnaforming).
- Unité 101.103 de pré traitement et de reforming catalytique (platforming).
- Unité 30/31 et 104 de traitement et séparation des gaz (GPL).
- Unité 200 d'extraction des aromatiques.
- Unité 400 de cristallisation et séparation du para xylène.
- Unité 70 de distillation sous vide (production du bitume).

I.1.7. Unités annexe et utilités :

- Unité 600 de stockage, mélange et expédition (melex).
- Unité 1050 : centrale thermique électrique et utilités (C.T.E)

❖ Présentation succincte de ces unités :

1. Topping (Unités 10/11) :

Le topping ou distillation atmosphérique a pour but de fractionner le brut en différentes coupes stabilisées, pouvant être utilisées pour l'obtention de produits finis (Naphta / Gaz oil / Fuel oil...) ou pour alimenter d'autres unités situées en aval (magnaforming, platforming, gaz-plant).

2. Magnaforming - Platforming (unités 100 et 103) :

Le magnaforming et le platforming ont pour but de transformer le naphta moyen et lourde obtenue à partir du topping en un produit reformât utilisé comme charge pour les unités d'aromatiques (unité 200 et 400).

Cette transformation qui a pour conséquence une augmentation de l'indice d'octane de 45 à 99 permet aussi d'utiliser le réformât obtenu pour la fabrication des essences.

3. G.P.L (unités 30/31 et 104) :

Ces unités ont pour but de séparer à partir des GPL obtenus des unités topping et magnaforming ainsi que platforming, le butane et le propane commercial, le reste est utilisé comme fuel gaz.

4. Extraction des aromatiques (unité 200) :

Cette unité utilise une charge obtenue à partir de l'unité de magnaforming par extraction au sulfone, elle permet de séparer le benzène et toluène des autres familles d'hydrocarbures.

Le mélange benzène-toluène est ensuite fractionné en vue de l'obtention de produits à très haute pureté.

5. Cristallisation du para-xylène (unité 400) :

Cette unité utilise une charge venant de l'unité de magnaforming, elle permet par cristallisation de séparer le para-xylène des autres xylènes (méta, ortho) et éthyle benzène le para-xylène est commercialisé comme telle, le reste peut être utilisé comme base pour obtention des essences ou commercialisé sous forme de mélange xylène pouvant être utilisé comme solvant pour la fabrication de peintures etc.

6. Production et conditionnement bitumes (unité 70) :

Cette unité est constituée de deux sections :

- La section bitume routier : elle produit du bitume routier par distillation sous vide d'un brut réduit importé.
- La section bitume oxydé : cette section utilise comme charge une partie du bitume et du slop wax produit par l'unité de bitume routier. Par oxydation avec de l'air dans un réacteur elle permet d'obtenir le bitume oxydé, qui après conditionnement (mis en sachet) peut être utilisé pour les revêtements d'étanchéité etc.

7. Centrale thermoélectrique et utilités C.T.E (unité 1050) :

La centrale thermique est utilisée et conçue par la production, le conditionnement et la distribution au sein de la raffinerie des utilités suivantes :

- Air comprimé
- Vapeur basse, moyenne et haute pression.
- Eaux de refroidissement, eaux potable et anti-incendie.
- Azote (gaz inerte).
- Fuel gaz et gaz naturel.
- Électricité

8. Unité de stockage, mélange et expédition des produits finis (unité 600) :

La raffinerie possède une capacité de stockage de 2.500.000 m³ environ. L'unité comprend les équipements nécessaires au mouvement blending et exportation des produits finis.

L'évacuation des produits finis se fait par un réseau de canalisation vers les deux ports de Skikda, les dépôts GPL et carburants de Skikda ainsi que le centre de distribution du Khroub (Constantine).

L'évacuation du bitume routier se fait quant à elle par camions et par pipeline vers l'ancien port.

La raffinerie de Skikda est conçue pour permettre la production de carburant, aromatique, bitumes et gaz selon les répartitions suivantes :

- Propane butane : utilisation domestique.
- Essence normale – essence super : utilisation automobile.
- Naphta « a »-« b »-« c » : industrie pétrochimique.
- Kérosène Jet A1 : Transport aérien.
- Gaz oil M1 – gaz oil B.P gaz oil N.P : véhicule lourd utilisation domestique.
- Aromatiques : benzène – toluène – para xylène – mélange xylène – éthyle
- Benzène : utilisation peinture, plastique, pharmaceutique.
- Bitumes routiers – bitumes oxydes : pour le pavage et revêtement d'étanchéité.
- Bunker fuel oil fuel – oil lourd: transport maritime plus chaudière.

La raffinerie de Skikda de par l'ampleur de la complexité de ses installations et les énormes investissements qu'elle a exigés, joue un rôle important et stratégique dans la vie économique du pays et nécessite de ce fait une prise en charge effective des contraintes techniques imposées par aussi bien son exploitation courante que par l'évolution des technologies de par le monde.

Nous présenterons dans le deuxième chapitre l'unité de récupération de gaz « U 104 » dont la section traitement de GPL rencontre une contrainte technique durant la phase de régénération nécessitant une réflexion approfondie notamment dans le domaine de la régulation automatique.

I.2. Généralités turbomachines : [4]

I .2.1. Définition :

- Une turbomachine est une machine tournante qui réalise un transfert d'énergie entre son arbre propre, et un fluide en mouvement. Ce transfert peut s'effectuer dans les deux sens :
 - ✓ Une récupération de l'énergie du fluide sur l'arbre de la machine (fonction réalisée par les machines de type turbine)
 - ✓ Une augmentation de l'énergie du fluide par fourniture d'énergie mécanique sur l'arbre de la machine (fonction réalisée par les machines de type compresseur, ventilateur, pompe...).



Figure 6: Turbine à vapeur industrielle.

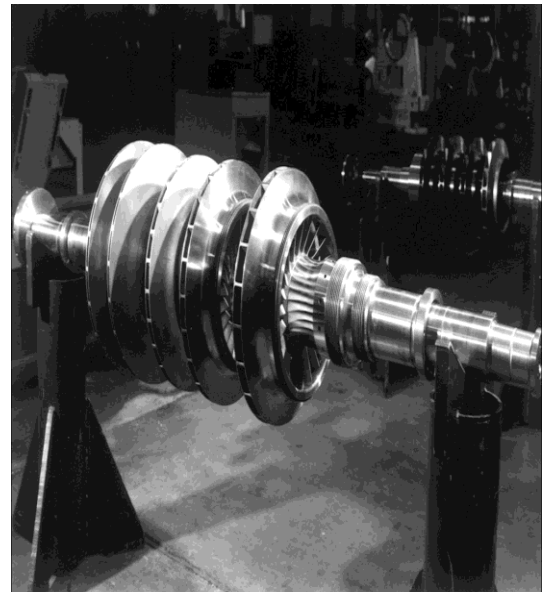


Figure 7 : Rotor de compresseur centrifuge.

I. 2.2. Fonctions et domaines des turbomachines :

A. Récupération de l'énergie d'un fluide (turbines) :

- _ liquide : récupération d'énergie potentielle hydraulique (barrages,...)
- _ Gaz : turbines à gaz, turbocompresseurs, turbopompes, ...
- _ turbines associées à d'autres éléments (compresseurs, chambres de combustion,...) pour la production d'énergie mécanique, ou pour la propulsion en aéronautique.

B. Compression de gaz (compresseurs) :

_ Fonction qui se présente dans des domaines très diversifiés : industrie chimique (pression de réaction), industrie pétrolière (extraction du pétrole), ou simplement création d'air comprimé.

_ Compresseurs associés à d'autres éléments (turbines, chambres de combustion,...) pour la production d'énergie mécanique, ou pour la propulsion en aéronautique.

C. Transport de fluide :

_ Élévation : fournir une énergie pour vaincre le champ gravitationnel (pompes).

_ Transport horizontal : apport périodique d'énergie au fluide pour vaincre les pertes de charges (boosters).

D. Ventilation :

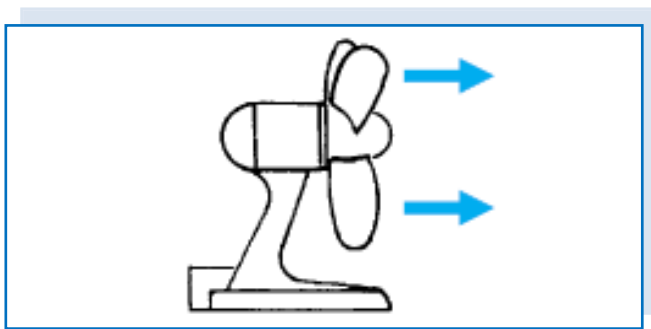


Figure 8 : Ventilateur de table.

E. Production d'énergie mécanique à partir d'une source de chaleur :

_ Production réalisée par des turbines à gaz ou des turbines à vapeur. Ces machines associent dans un cycle thermodynamique turbines, compresseurs, sources de chaleur, refroidisseurs,... Puissance variant de quelques kW à plusieurs dizaines de MW.

_ Production d'énergie électrique (aérospatiale, avions, chars, réseau nationale,...)

_ Production d'énergie mécanique : entraînement d'hélice de bateau, d'avion (turbopropulseur), de rotor d'hélicoptère ...

_ Turbines à vapeur essentiellement destinées à la production de forte puissance d'énergie électrique dans les centrales thermiques.

F. Propulsion par réaction :

Ces machines associent dans un cycle thermodynamique turbines, compresseurs, chambres de combustions, tuyères...

- ✓ Turboréacteurs.
- ✓ Turbofans (multiflux).

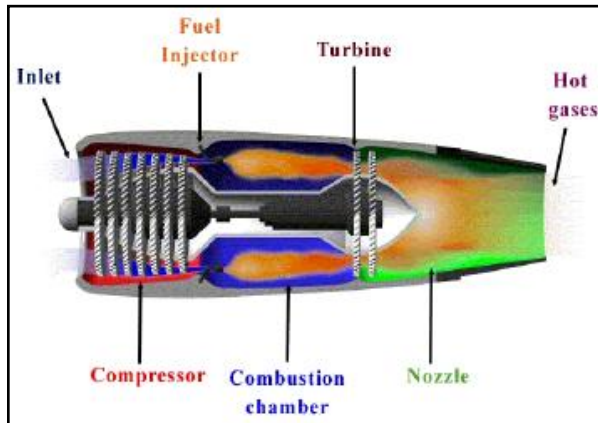


Figure 9 : Turboréacteur.

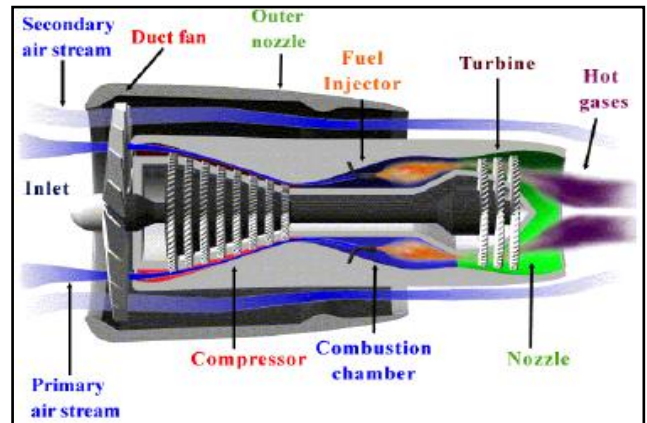


Figure 10 : Turbofans.

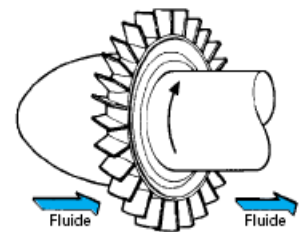
I.2. 3. Notion d'étage _ Échanges d'énergies :

I.2.3.1. Géométries des turbomachines :

Les géométries sont très diverses (de l'éolienne à la Pelton), mais une majorité des turbomachines peut être répertoriée en 3 catégories :

- Les machines axiales :

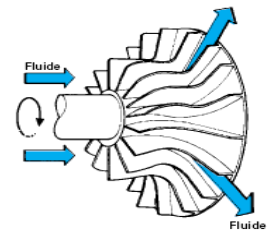
Le fluide entre et sort avec une vitesse débitante approximativement axiale. Machines caractérisées par des débits importants, mais des taux de pression limités (de l'ordre de 1,4 pour un compresseur transsonique et de 2 pour un compresseur supersonique).



Axiale

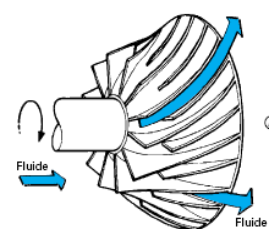
- Les machines centrifuges :

Le fluide sort approximativement dans un plan radial, l'entrée pouvant ne pas être radiale. Machines caractérisées par des débits limités et des taux de pression importants (pouvant atteindre 10 grâce au travail de la force de Coriolis et à l'augmentation de la pression statique liée à l'action de la force centrifuge).



Centrifuge

- Les machines hélico centrifuges



Hélico centrifuges

I.2.3.2. Notion d'étage :

Un étage de turbomachine se compose d'une partie mobile appelée rotor (ou roue) et d'une partie fixe appelée stator (ou selon le cas : redresseur, distributeur, diffuseur,...).

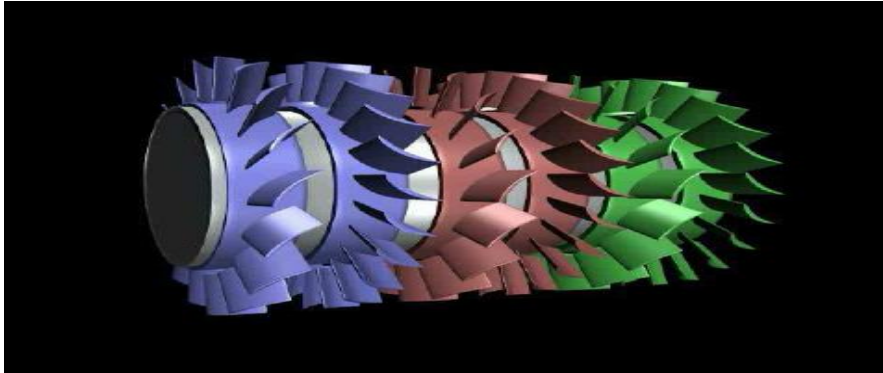


Figure 6 : Un étage de turbomachine.

1) Le stator :

➤ Rôle :

- Modifier la forme d'énergie (énergie cinétique en pression, ou inversement).
- Il existe comme pour la roue mobile une force exercée par le fluide sur les aubages, liée à la déflexion de l'écoulement.
- Par contre l'aubage étant fixe, il n'y a pas de déplacement du point d'application de la force. Donc pas de travail => pas d'échange d'énergie
 - Redresseur de compresseur axial :
 - Situé en aval de la roue mobile
 - Rôle : redresser l'écoulement vers la direction axial, transformant ainsi l'énergie cinétique de la composante giratoire de vitesse en pression statique. « Orienter » le fluide dans une direction compatible avec le prochain étage.
 - Distributeur de turbine axiale :
 - Situé en amont de la roue mobile
 - Rôle : provoquer une giration de l'écoulement, transformant ainsi une partie de l'énergie de pression statique disponible sous forme d'énergie cinétique. Cette énergie est ensuite récupérée au niveau de la roue mobile.
 - Diffuseur de compresseur centrifuge :
 - Récupération de pression statique avec l'augmentation de la section de passage (rayon).

2) Le rotor :

➤ Rôle

- Assurer le transfert d'énergie entre l'arbre de la machine et le fluide en mouvement.
- L'écoulement étant défléchi au passage de la roue, il existe donc une force exercée par le fluide sur les aubages.
- Le point d'application de la force se déplace du fait de la rotation des aubages, il y a donc travail => échange d'énergie.

➤ Énergie de pression

Une turbomachine échange nécessairement de l'énergie de pression avec le fluide (même si cela ne doit pas être sa fonction principale).

- Cas compresseur : augmentation de la pression pour compenser les pertes de charge du circuit.
- Cas turbine : une partie de l'énergie récupérée l'est toujours sous forme de pression.

➤ Énergie cinétique

Une turbomachine échange nécessairement de l'énergie cinétique avec le fluide du fait de la giration de l'écoulement au passage de la roue mobile.

➤ Énergie calorifique

Il n'y a pas d'énergie calorifique directement échangée entre le fluide et la roue.

- Cependant le fluide peut recevoir de la chaleur naissant de la dégradation d'une partie de l'énergie cinétique => travail des forces de frottement liées à la nature visqueuse du fluide.
- Phénomène de dissipation principalement localisé près des parois = transformation de la forme d'énergie et non transfert de l'énergie (« pertes » => rendement).
- Faible surface des parois en rapport avec les grands débits rendent les échanges de chaleur avec l'extérieur négligeable => parois considérées comme adiabatiques [9].

I.2.4. Classification : [3]

Les turbines à vapeur peuvent être classées selon :

▪ **Mode d'action de la vapeur :**

- Turbine à réaction: La détente de la vapeur s'effectue uniquement dans les canaux fixes.

- Turbine à action: La détente de la vapeur s'effectue dans les canaux fixes et mobiles.
- **Mode d'injection de la vapeur :**
 - Injection totale: Les tuyères sont réparties sur toute la circonférence.
 - Injection partielle: Les tuyères sont réparties sur une portion de circonférence.
- **Mode de construction :**
 - Turbines à disques: Roues à disques construites séparément et calées sur un arbre.
 - Turbines à tambour: Les aubes sont calées sur un tambour rapporté sur l'arbre.
- **Mode de circulation de la vapeur :**
 - Turbines axiales: La vapeur se déplace parallèlement à l'axe de la turbine (turbines à disques et turbines, à tambour).
 - Turbines radiales: La direction de la vapeur est radiale. (Turbine Stal)
- **Mode d'échappement de la vapeur :**
 - À condensation: la vapeur est complètement détendue jusqu'à une pression voisine de 0,02 à 0,04 bar.
 - à contre pression: la vapeur est détendue de la pression HP (> 40 bars) jusqu'à une pression BP (de l'ordre de 4 bars).
 - À soutirage ou prélèvement: la vapeur s'échappe à basse pression dans un réseau BP au lieu d'être condensée.

II.1. Technologie des turbines à vapeur : [3]

II .1. 1. Introduction :

La turbine à vapeur est le fruit du travail de nombreux chercheurs et ingénieurs à la fin du XIXe siècle. Parmi les contributions notoires au développement de ce type de turbine, on peut mentionner celles du Britannique Charles Algernon Parsons et celles du Suédois Carl Gustaf Patrik de Laval. Parsons fut à l'origine du principe de la séparation des étages, selon lequel la vapeur se dilate dans un certain nombre d'étages, produisant à chaque fois de l'énergie. De Laval fut le premier à concevoir des jets et des augets adaptés à une utilisation efficace de la vapeur en expansion.

Une turbine est un dispositif rotatif destiné à utiliser la force d'un fluide (eau, vapeur, air, gaz de combustion), dont le couple est transmis au moyen d'un arbre.

L'énergie du fluide, caractérisée par sa vitesse et son enthalpie, est partiellement convertie en énergie mécanique pour entraîner un alternateur, une pompe ou tout autre récepteur mécanique rotatif.

II. 1.2. Définition et principes généraux de fonctionnement :

La turbine à vapeur est un moteur thermique à combustion externe, fonctionnant selon le cycle thermodynamique dit de Clausius-Rankine. Ce cycle se distingue par le changement d'état affectant le fluide moteur qui est en général de la vapeur d'eau.

Ce cycle comprend au moins les étapes suivantes :

- L'eau liquide est mise en pression par une pompe et envoyée vers la chaudière,
- L'eau est chauffée, vaporisée et surchauffée,
- La vapeur se détend et refroidit dans la turbine en fournissant de l'énergie mécanique,
- La vapeur détendue est condensée au contact de la source froide sous vide partiel.

Le principe est donc le même que celui de la machine à vapeur à pistons. La turbine en constitue une évolution exploitant les principaux avantages des turbomachines à savoir :

- Puissance_massique et puissance_volumique élevée,
- Rendement amélioré par la multiplication des étages de détente [8].

II.1.3. Principe de fonctionnement de la turbine à vapeur :

La vapeur admise dans la turbine par la vanne d'admission est détendue dans une tuyère ou sur une rangée de tuyères en parallèle (appelée distributeur ou aubages fixes).

A la sortie de la tuyère la vapeur est animée d'une très grande vitesse (quelquefois supérieure à la vitesse du son). Elle vient alors frapper les ailettes d'une roue qu'elle entraîne en rotation en lui cédant une partie de l'énergie cinétique qu'elle possède. A la sortie de l'ensemble mobile la vapeur est évacuée par la tubulure d'échappement.

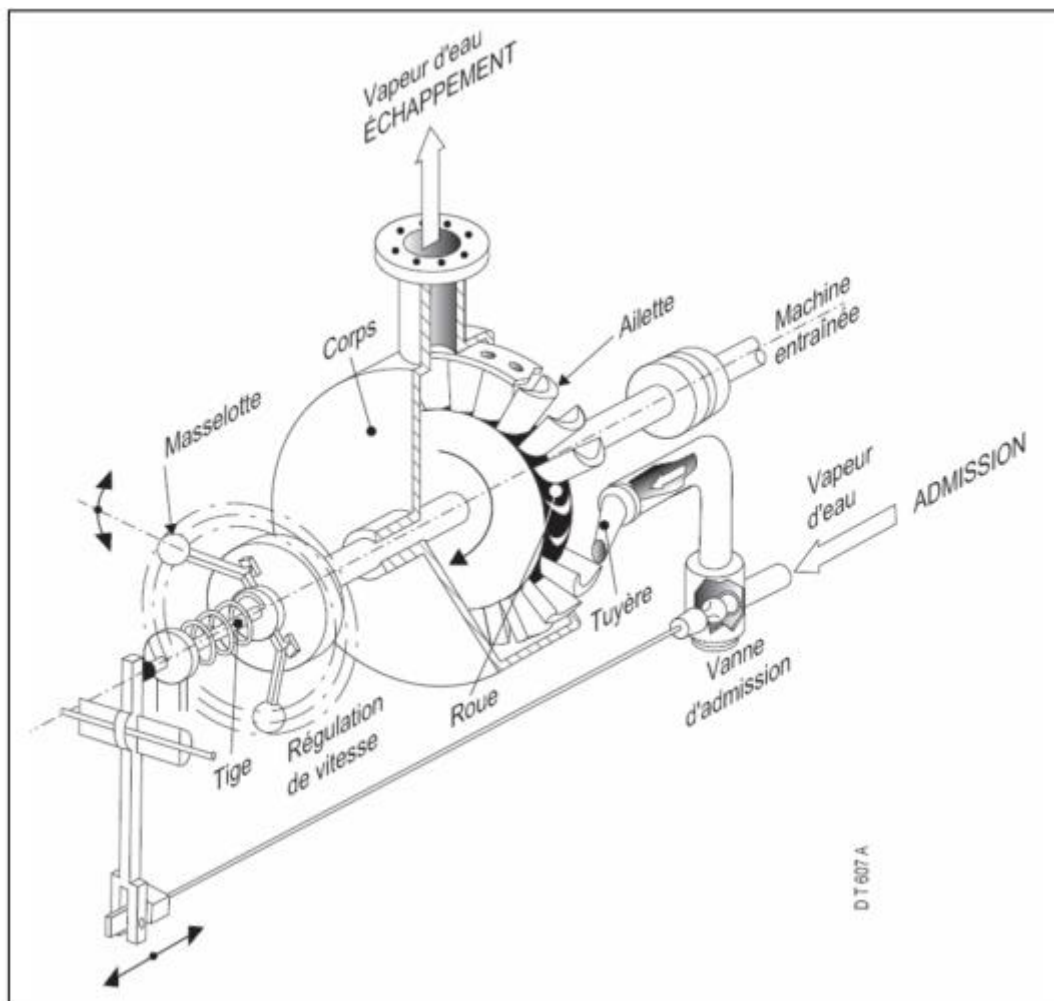


Figure 1 : Principe de fonctionnement d'une turbine à vapeur.

À vitesse constante la puissance fournie par la turbine est égale à celle consommée par la machine entraînée.

Toute variation de la puissance consommée, entraîne une variation de la vitesse de rotation si l'on ne modifie pas la puissance motrice de la turbine.

On se rend compte que la turbine n'a pas de vitesse propre, elle peut très bien ralentir ou accélérer selon la puissance à transmettre.

❖ **Un système de régulation de vitesse de la turbine :**

- détectant la vitesse de rotation
- corrigeant la puissance motrice par action sur le débit de vapeur pour stabiliser la vitesse et, éventuellement, la ramener à sa valeur initiale.

Dans les turbines les plus simples, la régulation de vitesse est assurée par un dispositif à masselottes articulées sur un couteau et qui repoussent une tige contre un ressort antagoniste. La position des masselottes, et donc de la tige, est fonction de la vitesse de rotation.

La tige commande par un jeu de leviers la vanne de régulation qui s'oppose plus ou moins au passage de la vapeur, ce qui permet de régler la puissance motrice de la turbine.

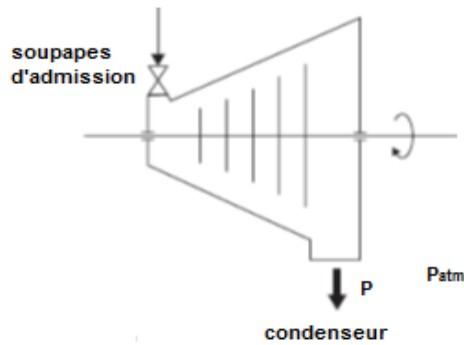
❖ **Un système de sécurité contre une survitesse :**

En cas de dysfonctionnement du régulateur ou d'une brusque variation de charge, la vitesse de la turbine change. Si le ralentissement ne pose qu'un problème de production, une accélération pose un problème de sécurité très important car la résistance mécanique de la turbine ne lui permet pas de tourner beaucoup plus vite que sa vitesse nominale. À vitesse trop élevée, des éléments de la turbine se cassent et sont projetés sous l'effet de la force centrifuge contre le corps de la turbine. Si celui-ci ne résiste pas, des morceaux de métal peuvent être projetés aux alentours.

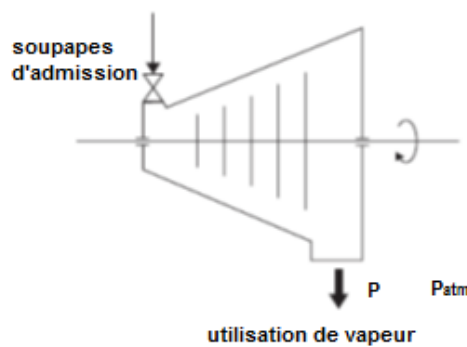
Un système d'arrêt de la turbine par fermeture d'une vanne d'arrêt rapide est prévu en cas de dépassement de la vitesse limite (protection contre la survitesse) [8].

II.1.4. Différents types des turbines à vapeur : [8]

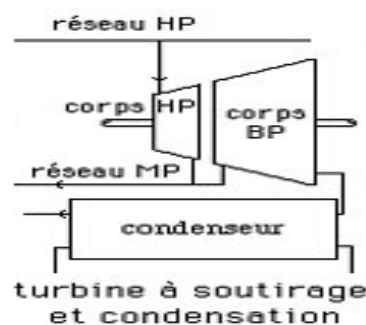
- En fonction de leur utilisation, on distingue 4 grandes catégories de turbines à vapeur :
- **les turbines à condensation**, dans lesquelles la vapeur est complètement détendue jusqu'à une pression voisine de 0,02 à 0,04 bars, puis liquéfiée dans un condenseur refroidi soit par l'air ambiant, soit par de l'eau. Ce type de turbine est surtout utilisé dans les installations de production de force motrice ;



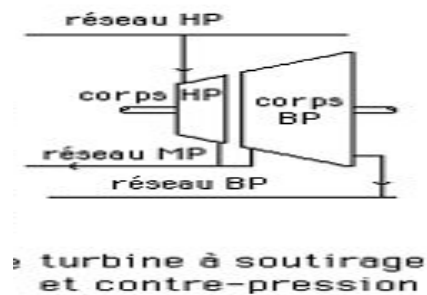
- **les turbines à contre-pression**, dans lesquelles la vapeur est détendue de la pression HP (> 40 bars) jusqu'à une pression BP (de l'ordre de 4 bars). Ce type de turbine permet de produire de la puissance mécanique ou de l'électricité grâce aux hautes températures et pression que l'on peut obtenir dans une chaudière, tout en utilisant l'enthalpie résiduelle pour des procédés divers ;



- **les turbines à soutirage et condensation**, dans lesquelles la vapeur subit une détente partielle jusqu'à une moyenne pression (environ 20 bars) dans un corps haute pression. Une partie est dirigée vers un réseau d'utilisation, tandis que le reste de la vapeur est détendu dans un corps basse pression, comme dans une turbine à condensation. Ce type de turbine trouve un champ d'application important dans les usines de cogénération dont les demandes de chaleur sont susceptibles de varier fortement au cours du temps.



- **les turbines à soutirage et contre-pression**, dont la vapeur s'échappe à basse pression dans un réseau BP au lieu d'être condensée.



➤ Les turbines à vapeur se classent en deux grandes catégories souvent combinées dans une même machine:

- Les turbines à vapeur à action
- Les turbines à vapeur à réaction
- Les turbines à vapeur mixte

A. Les turbines à vapeur à action :

La forme la plus simple de turbine à vapeur est la turbine à action, dans laquelle les jets sont fixés sur la partie intérieure de l'enveloppe de la turbine, et les ailettes placées sur le bord des roues tournantes montées sur un arbre central. La vapeur se déplaçant dans une tuyère fixe passe sur les ailettes incurvées, qui absorbent une partie de l'énergie cinétique de la vapeur dilatée, faisant ainsi tourner la roue et l'arbre sur lesquels elles sont montées. Cette turbine est conçue de manière à ce que la vapeur entrant par une extrémité de la turbine se dilate à travers une succession de tuyères jusqu'à ce qu'elle ait perdu la majeure partie de son énergie interne.

- Les turbines à action dans lesquelles la détente se fait uniquement dans les aubages fixes. Elles sont bien adaptées aux étages à forte pression et se prêtent mieux à la régulation de débit. Leur construction est plus coûteuse et réserve leur emploi aux premiers étages de la turbine.

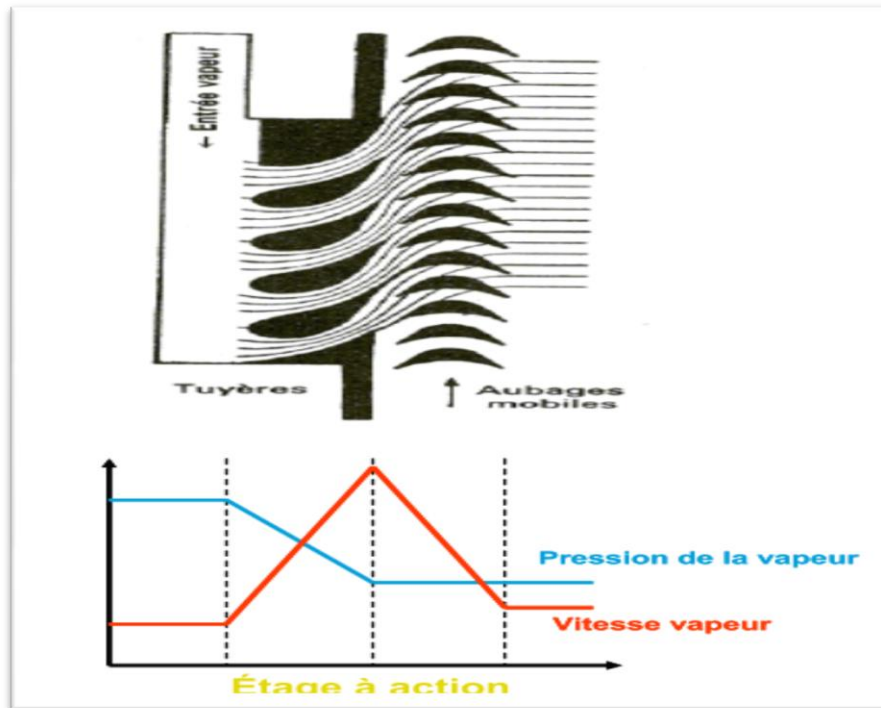


Figure 2 : la turbine à vapeur à action.

Dans le cas d'une turbine à vapeur à un seul étage avec deux rangés d'ailettes, on distingue :

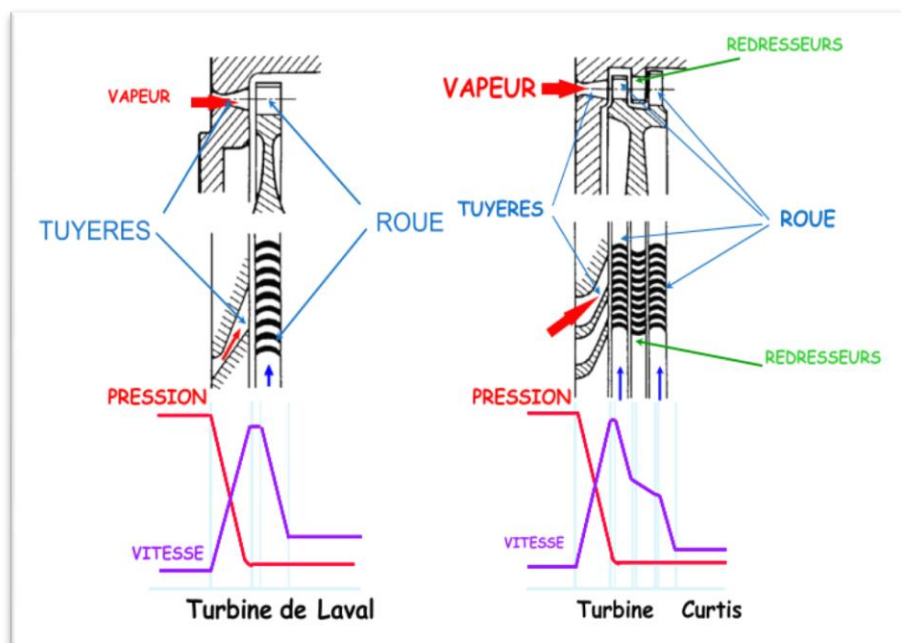


Figure 3 : la turbine à vapeur à un seul étage avec deux rangés d'ailettes.

B. Les turbines à vapeurs à réactions :

Une partie seulement de la détente s'effectue dans les tuyères avant l'entrée dans la roue.
Le reste de la détente s'effectue pendant la traversée de la couronne d'aubes.

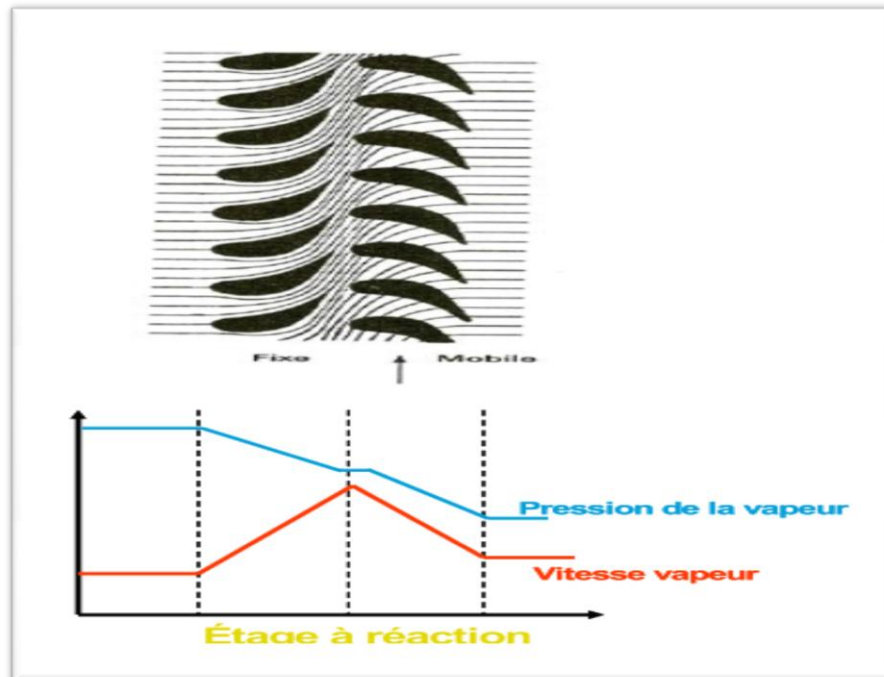


Figure 4 : turbine à vapeur à réaction.

C. Turbine mixte :

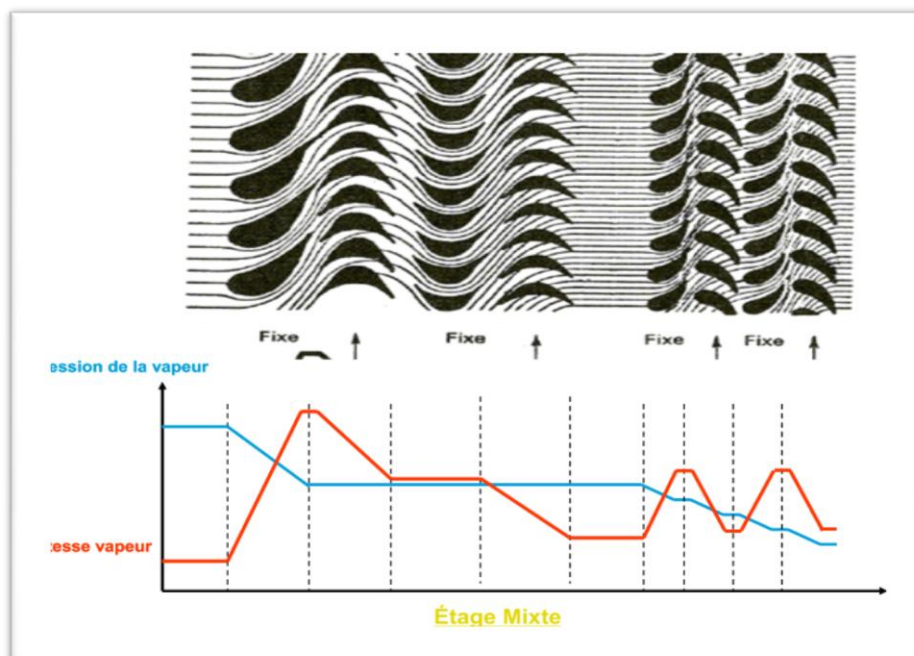


Figure 5 : turbine mixte.

II. 1.5. Description de la turbine à vapeur :

La turbine est un groupe monobloc. Elle est construite suivant le procédé Brown Boveri,

Son ailettage est du type combiné à action et à réaction. Elle se compose essentiellement des pièces suivantes:

II. 1.5.1. Enveloppe de la turbine :

Composé de 2 parties démontables assemblées suivant un plan horizontal passant par l'axe de la machine. L'étanchéité entre les deux demis-cylindres étant assurée, sans garnitures par un contact métal sur métal des brides au moyen de goujons, en acier spécial. Chacune des deux parties supérieure et inférieure du cylindre est elle-même constituée d'une partie HP en acier, coulé soudable et d'une partie BP en fonte, les parties HP et BP étant assemblées suivant un plan vertical par des brides boulonnées.

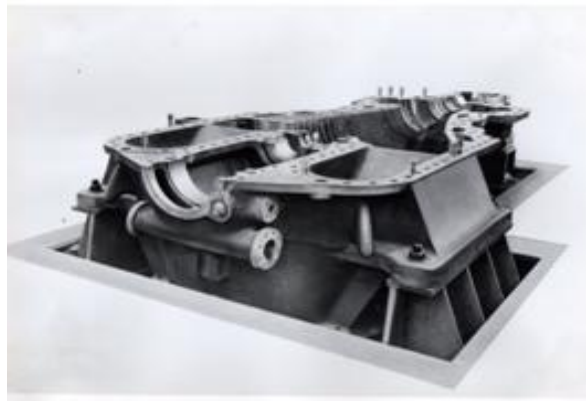


Figure 6 : Enveloppe de la turbine.

II. 1.5.2. L'arbre de la turbine :

Constitué d'un arbre en acier forgé supporté par des paliers. Cet arbre porte un disque métallique et à sa périphérie sont fixées des ailettes.

Il assure le transfert d'énergie entre l'arbre de la machine et le fluide en mouvement, bien que le travail de la turbine.

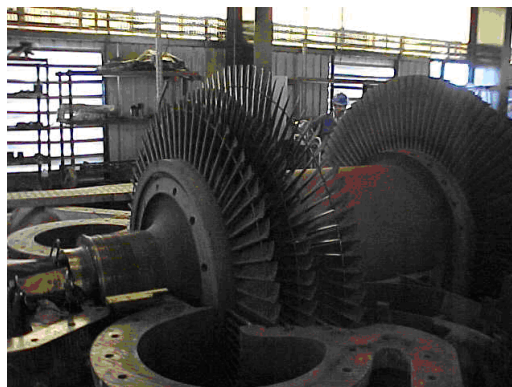


Figure 7 : L'arbre de la turbine.

II. 1.5.3. L'ailettage :

II se compose de :

- Tuyères HP;
- Ailettage action HP (constitué par 2 rangés d'ailettes mobiles et un rangé d'ailettes fixes)
- Ailettage réaction HP
- Ailettage réaction BP.

II. 1.5.4. Paliers et coussinets :

La turbine comporte 2 paliers:

- ❖ Un palier AV N°I côté échappement. Il renferme le mécanisme du vireur et porte la distribution.
- ❖ palier de butée N°2. côté compresseur. Il enferme la butée et porte l'appareil de mesure de déplacement de l'arbre.

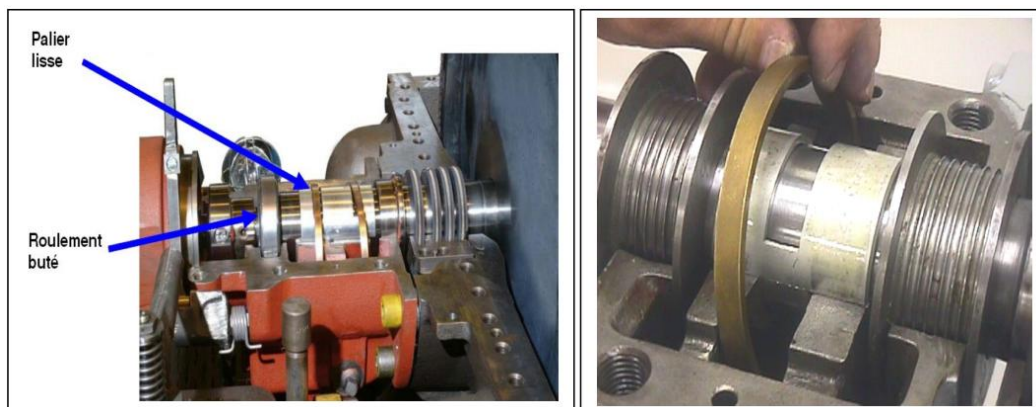
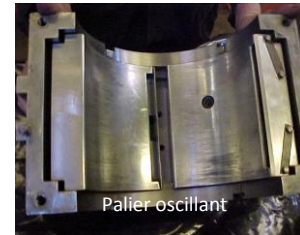


Figure 8 : Paliers et coussinets de la turbine.

L'arbre turbine repose sur 2 coussinets à poches à graissage par huile sous pression;

- Le coussinet I: est situé dans le palier I est simplement porteur du type à poches.
- Le coussinet II: est situé dans le palier II est du même type que le précédent.
- Le coussinet III: situé également dans le palier II, est un coussinet de butés.



Palier de buté

II. 1.5.5. Vireur d'arbre :

Pour parer aux inconvénients d'une répartition inégale de la température à l'arrêt de la turbine, et de ce fait à une déformation de l'arbre et du cylindre, il faut vireur l'arbre d'une vitesse de 20 à 100 tours/min jusqu'à la prochaine mise en service, ou jusqu'à ce que la turbine soit froide (température inférieure à 150°C).

L'emploi du vireur d'arbre lors de la mise en service présente un certain avantage, car pour éviter l'air du condenseur, il faut donner de la vapeur de barrage aux boîtes étanches. L'arbre en tournant permet d'éviter un échauffement irrégulier des parties situées aux boîtes étanches et de ce fait, élimine toute excentricité.



Figure 9 : vireur d'arbre.

II. 1.5.6. Étanchéité vapeur :

Il est nécessaire d'étancher les fuites de vapeur qui risquent de se produire le long de l'arbre à la traversée du corps de turbine. En effet, outre les dangers pour le personnel d'exploitation de fuites trop importantes (risques de brûlures), on risque d'introduire de la vapeur d'eau dans les corps de paliers et de provoquer une détérioration rapide des paliers et de la butée.

Sur les turbines monocellulaires, le dispositif d'étanchéité utilise des anneaux d'étanchéité en carbone. Ces anneaux sont formés de 3 ou 6 segments maintenus par un ressort.

Le nombre d'anneaux nécessaire dépend de la pression du réseau échappement. Des orifices de purge munis généralement d'une tuyauterie sont prévus sur les boîtes étanches pour permettre l'évacuation continue des condensats. La présence d'un peu de vapeur est normale. On donne parfois le nom de "buée" à cette fuite de vapeur.

Des bagues déflectrices limitent l'entrée de vapeur à l'intérieur des corps de palier aux traversées de l'arbre. Ceci n'évite pas d'avoir à purger régulièrement les corps de palier.

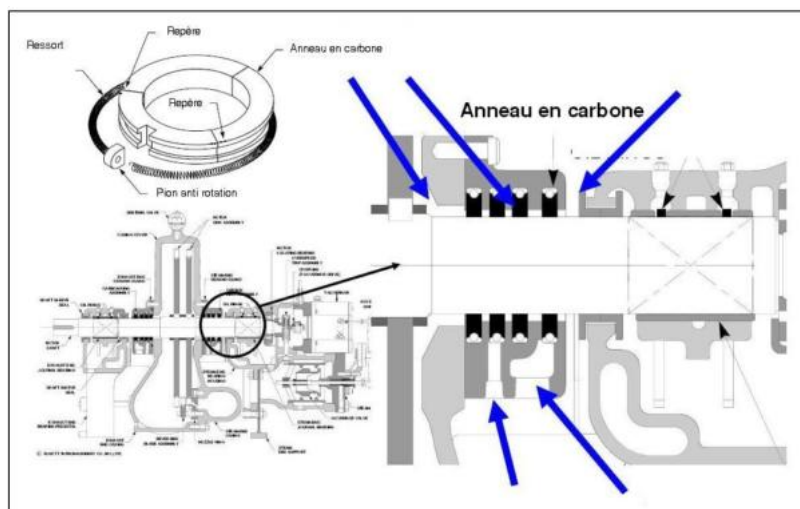


Figure 10 : Anneau d'étanchéité en carbone.

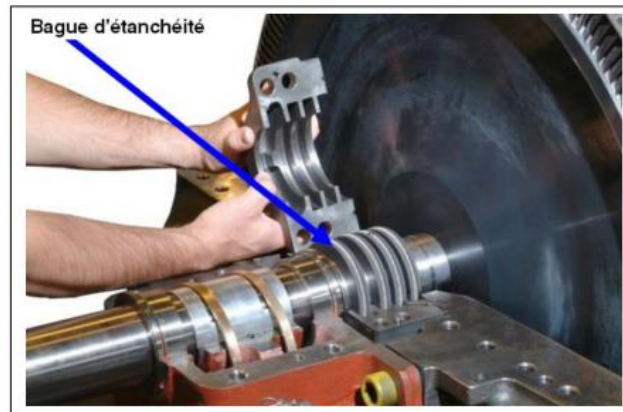
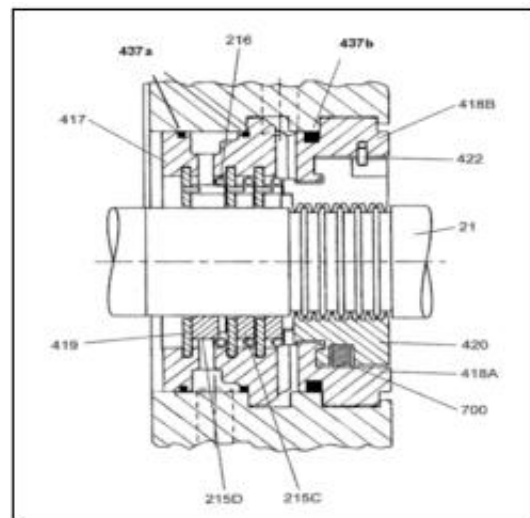


Figure 11 : Boîte d'étanchéité.

Dans le cas où la pression d'échappement de la turbine à vapeur a un étage est importante (entre 5 et 12 bars), l'étanchéité est assurée par une combinaison entre des anneaux en carbone et labyrinthe.



Pour des turbines à vapeur multi étages et haute puissance, l'étanchéité est assurée par des bagues en labyrinthes [8].

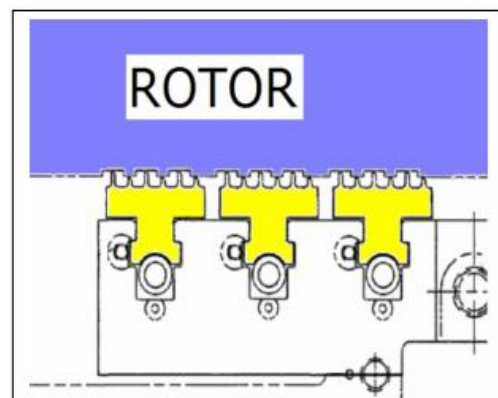
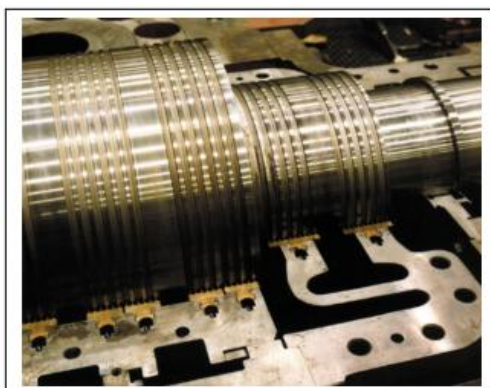


Figure 12 : Etanchéité par des bagues en labyrinthes.

II. 2. Performance des turbines à vapeur : [3]

II. 2.1. Cycle de Rankine :

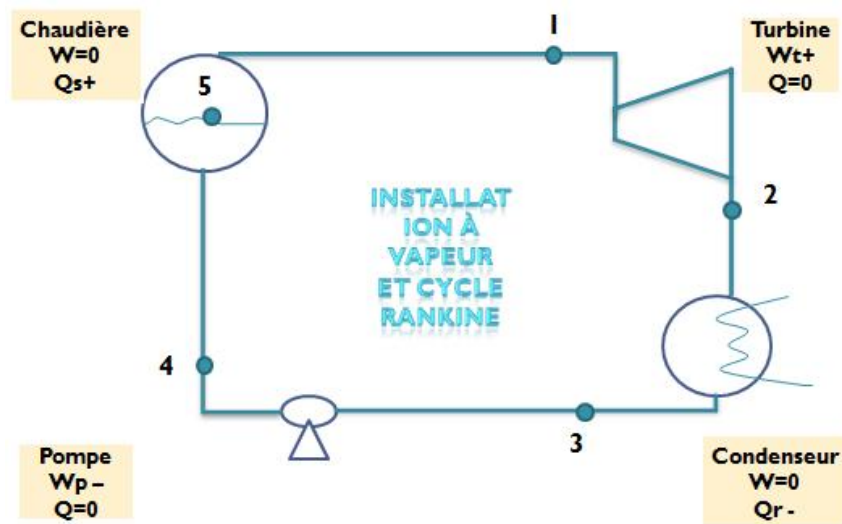


Figure 12 : cycle de Rankine (cycle vapeur).

Où :

3-4 : il faut que soit liquide saturé.

4-5 : échauffement à pression constante.

5 : point d'ébullition.

5-1 : vaporisation à température constante.

1-2 : il faut que soit vapeur saturé.

2-3 : récupération de vapeur.

II. 2.2. L'équation d'énergie :

Equation d'énergie pour un système ouvert dont le fluide est compressible (SFEE)

$$Q - W = m \left[\left(\frac{C_2^2}{2} - \frac{C_1^2}{2} \right) + (Z_2 - Z_1) - (h_2 - h_1) \right]$$

(Équation d'Euler)

Où:

m : débit massique.

h : enthalpie.

Q : quantité de chaleur.

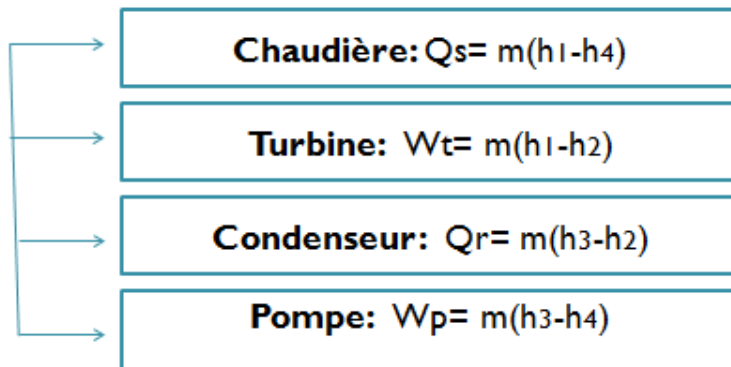
W : travail effectué.

C : vitesse.

Z : hauteur.

II. 2.3. Les travaux effectués :

SFEE:



Où :

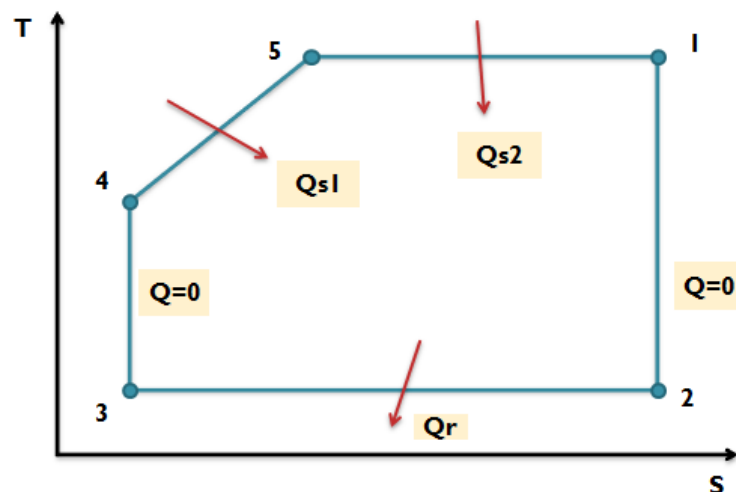
Qs : quantité de chaleur absorbée.

Qr : quantité de chaleur rejetée.

II. 2.4. La puissance délivrée :

$$P = m * W$$

II. 2.5. Diagramme T-S :



II. 2.6. Le rendement de la turbine :

$$\eta = W_{\text{cycle}} / Q_s$$

$$W_{\text{cycle}} = I_{QsI} - I_{QrI} = I_{WtI} - I_{WpI}$$

$$I_{QsI} + I_{WpI} = I_{QrI} + I_{WtI}$$

$$I_{QsI} - I_{QrI} = I_{WtI} - I_{WpI}$$

$$\eta = (I_{WtI} - I_{WpI}) / Q_s$$

$$= [m(h_1 - h_2) - m(h_4 - h_3)] / m(h_1 - h_4)$$

$$\eta = [(h_1 - h_2) - (h_4 - h_3)] / (h_1 - h_4)$$

$$\eta = [(h_1 - h_2) - (h_4 - h_3)] / [(h_1 - h_3) - (h_4 - h_3)]$$

$$\eta_{\text{cycle}} = (h_1 - h_2) / (h_1 - h_3)$$

II. 2.7. Rendement effectif :

Où il y a:

- Des pertes thermiques dues aux frottements.
- Des pertes volumiques dues aux fuites.
- Des pertes mécaniques dues aux frottements.

Le rendement effectif est:

$$\eta_{\text{eff}} = \eta_{\text{ther}} + \eta_{\text{vol}} + \eta_{\text{méc}}$$

Où :

η_{ther} : le rendement thermique.

η_{vol} : le rendement volumique.

$\eta_{\text{méc}}$: le rendement mécanique.

II. 2.8. Le triangle de vitesse : [1]

A l'intérieur de la turbine (dans un canal de la roue) une particule vapeur (M) est mise en mouvement sous l'action de deux forces, qui sont :

1. action de l'aube, qui lui communique un mouvement de rotation avec une vitesse tangentielle de rotation (U). Avec $U = \omega r$.

2. action de la force centrifuge, qui lui communique une vitesse tangentielle à l'aube (W), puisque la particule ne peut que glisser le long de cette aube.

Soumise à l'action de deux mouvements, la particule suit une trajectoire absolue définie par la direction de la vitesse absolue (V), qui est :

$$\vec{V} = \vec{U} + \vec{W}$$

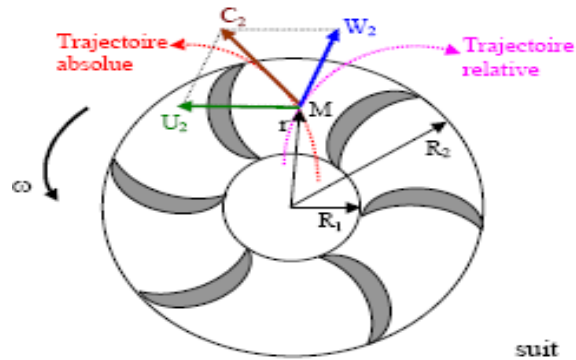


Figure 13 : l'évolution de triangle de vitesse sure la roue.

- U :vecteur de la vitesse tangentielle ωR .
 - W :vecteur de la vitesse relative.
 - V :vecteur de vitesse absolue.
-
- **Le travail :** $W_{12} = [(P_1 + P_2)/\rho] + 0.5 (C_1 + C_2)$
 - **La variation de pression :** $P_1 - P_2 = (\rho/2) (W_1^2 - W_2^2)$

III. ETUDE ET ANALYSE DE LA FIABILITE :**III.1. Historique des pannes :**

Ordre	Date d'arrêt	Travaux	Temps d'arrêt
01	10/10/2011	ELIMINATION FUITE VAPeur SUR CONDUITE ECHAPement	3
02	05/02/2012	REMISE EN ETAT PI-HTH	4
03	07/03/2012	VERIFICATION DU FONCTIONNEMENT DE COMPTEUR DE VITESSE ET D'INDICATION	3
04	15/03/2012	INSPECTION REGULATEURE DE VITESSE	7
05	27/04/2012	MISE EN PLACE UN TACHYMETRES ET THI-PI	5
06	04/06/2012	PRESENCE D'EAU PLUS DEGRADATION D'HUILE AU NIVEAU DU PALIER NORD DE TURBINE, VERIFIER L'ETENCHITE DE PALIER	3
07	04/07/2012	CHANGEMENT TRESSE VANNE ECHAPement	2
08	24/07/2012	CHANGEMENT TRESSE ADMISSION	3
09	04/09/2012	REVISION CLAPET ADMISSION	6
10	06/10/2012	CHANGEMENT JOINT BRIDE ADMISSION	5
11	10/12/2012	VERIFIER L'ETENCHITE DE PALIER NORD DE LA TURBINE	7
12	20/12/2012	ELIMINATION FUITE SUR GARNITURE	2
13	29/12/2012	CHANGEMENT DE FILTRE	3
14	06/01/2013	ELIMINE LA FUITE DE VAPEUR ENTRE LES DEUX ELEMENTS DU CORPS DE LA TURBINE	10
15	16/02/2013	VERIFIER LE FONCTIONNEMENT DU COMPTEUR DE VITESSE/INDICATEUR DE FONCTIONNEMENT	4
16	05/04/2013	CHANGEMENT MANOMETRE POUR LA TURBINE	1
17	05/05/2013	CHANGEMENT TURBINE	5
18	27/07/2013	REVISION TURBINE	260
19	25/08/2013	REVISION TURBINE	280
20	19/01/2014	CHANGEMENT JOINT CLAPET ADMISSION TURBINE	7

III.2. Etude de la Fiabilité de la turbine :

III.2.1. Détermination et exploitation des paramètres de Weibull :

A. tracé de la droite de Weibull :

Les valeurs qui nous permettent de tracer $[F_e(t), TBF]$ sur le papier d'Allen Plait, sont récapitulées dans le tableau N°2:

N°	TBF croissant en heure	TBF %	n_i	$\sum n_i$	$F_e = \sum n_i - 0.3 / N + 0.4$	$F_e(t)\%$
01	213	6.51	2	2	0.0876	8.76
02	238	7.27	1	3	0.1392	13.92
03	257	7.85	1	4	0.1907	19.07
04	460	14.06	1	5	0.2423	24.22
05	502	15.34	1	6	0.2938	29.38
06	741	22.65	1	7	0.3454	34.54
07	743	22.70	1	8	0.3969	39.69
08	764	23.35	1	9	0.4484	44.84
09	786	24.02	1	10	0.5	50
10	931	28.45	1	11	0.5515	55.15
11	998	30.50	1	12	0.6031	60.31
12	1029	31.45	1	13	0.6546	65.46
13	1049	32.06	1	14	0.7062	70.62
14	1172	35.82	1	15	0.7577	75.77
15	1579	48.26	1	16	0.8073	80.73
16	2011	61.46	1	17	0.8608	86.08
17	2853	87.19	1	18	0.9124	91.24
18	3272	100	1	19	0.9639	96.39

Avec N : nombre total des pannes

n_i : fréquence des pannes

B-Détermination des paramètres de Weibull :

Après avoir le résultat des valeurs (TBF%, $F_e(t)\%$) on utilise le papier d'Allen plait (de Weibull) pour détermine γ , η , β .

-on a obtenu une traite (voir le graphe)

- $\gamma=0$ (parce que on à une droite)
- $\eta=35$ sur le graphe mais on a travaillé avec l'échelle de 100% $\longrightarrow$ 3272 h
35 $\longrightarrow$ η

$$\eta = (35 \times 3272) / 100 = 1145.2 \text{ h}$$

- $\beta = 1.1$ est obtenue par le traçage d'une droite qui passe par le point 1 sur l'axe horizontal et parallèle par rapport à la droite qui réalise par le compas sur l'axe verticale de β on lit la valeur de point d'intersection.

Donc nous avons : $\gamma = 0$

$$\eta = 1145.2 \text{ h}$$

$$\beta = 1.1$$

Après avoir les résultats obtenues on déduit que la turbine est en période de maturité, par ce que $\beta = 1.1 \approx 1$

C. validation du modèle choisi par le test de Kolmogorov-Smirnov ou le test d'adéquation :

Les modèles que nous pouvons établir en fiabilité sont issus d'un échantillon de population, puis on fait l'hypothèse qu'ils suivent une loi particulière (loi de Weibull pour Notre cas).

Ainsi, il reste à vérifier la validité de cette loi. Vérification obtenue par un test d'adéquation.

Pour cela on admet dans l'utilisation des statistiques un risque d'erreur (α) petit.

α : est le niveau significatif (α est égal à la probabilité de se tromper en utilisant ce test).

L'idée du test est de comparer la fonction réelle de répartition des défaillances à la fonction de répartition théorique.

Il consiste à mesurer l'écart point par point entre ces deux fonctions :

Rang	$F_e(t) = (\sum n_i - 0.3) / (N + 0.4)$ théorique	$F_e(t_i) = 1 - e^{-\left[\frac{t-\gamma}{\eta}\right]^\beta}$ réelle	$D_{n,\max} = F_e(t) - F_e(t_i) $
1	0.0876	0.1244	0.0368
2	0.1392	0.1408	0.0016
3	0.1907	0.1533	0.0374
4	0.2423	0.2844	0.0421
5	0.2938	0.3104	0.0166
6	0.3454	0.4474	0.1020
7	0.3969	0.4484	0.0515
8	0.4484	0.4595	0.0111
9	0.5	0.4709	0.0291
10	0.5515	0.5416	0.0099
11	0.6031	0.5716	0.0315
12	0.6546	0.5850	0.0696
13	0.7062	0.5934	0.1138
14	0.7577	0.6423	0.1154
15	0.8073	0.7701	0.0372
16	0.8608	0.8599	0.0009
17	0.9124	0.9497	0.0373
18	0.9639	0.9705	0.0066

D'après le tableau

$$D_{n,\max}=D_{6,\max}=0.1154$$

Selon le tableau de K-S avec $n=18$ et le risque de se trempé $\alpha=5\%$

$$\text{On à } D_{n,\alpha}=D_{18,005}=0.309$$

$$\text{Donc : } D_{n,\max}=0.1154 < D_{n,\alpha}=0.309$$

Alors : on accepte le modèle de Weibull avec un risque $\alpha=5\%$

D. Calcul de MTBF :

La MTBF est souvent traduite comme étant la moyenne des temps de bon fonctionnement. Entre deux défaillances successives du même composant. Il est donné par la formule suivante : $MTBF=A.\eta+\gamma$

La valeur de A et B est donnée par le tableau de Weibull.

- $\beta=1,1$ $A=0,9407$ $B=0,787$
- $\gamma=0$
- $\eta=1145.2$

$$MTBF=(0.9407*1145.2)+0=1077.30 \text{ h}$$

$$MTBF = 1077.30 \text{ h}$$

E. calcul de l'écart type :

$$\sigma = B.\eta=0,787 * 1145.2=901.27$$

$$\sigma = 901.27$$

F. calcul la fonction de la MTBF :

Fonction de fiabilité R(t) :

C'est probabilité de non défaillance au –delà du temps t

$$R(MTBF) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad R(t) = e^{-\left(\frac{1077.30}{1145.2}\right)^{1.1}} = 0.3948$$

$$R(MTBF) = 39.48\%$$

La densité de probabilité des défaillances :

Probabilité d'avoir une seule défaillance au temps.

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} . e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta}$$

$$f(MTBF) = \frac{1.2}{1145.2} \left(\frac{1077.2-0}{1145.2}\right)^{1.2-1} . e^{-\left(\frac{1077.2-0}{1145.2}\right)^\beta} = 4,087.10^{-4}$$

$$f(t)=0.0408 \%$$

La fonction de répartition :

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad F(\text{MTBF}) = 1 - e^{-\left(\frac{1077.30}{1145.2}\right)^{1.2}} = 0.6052$$

$$F(t) = 60.52$$

Taux de défaillance :

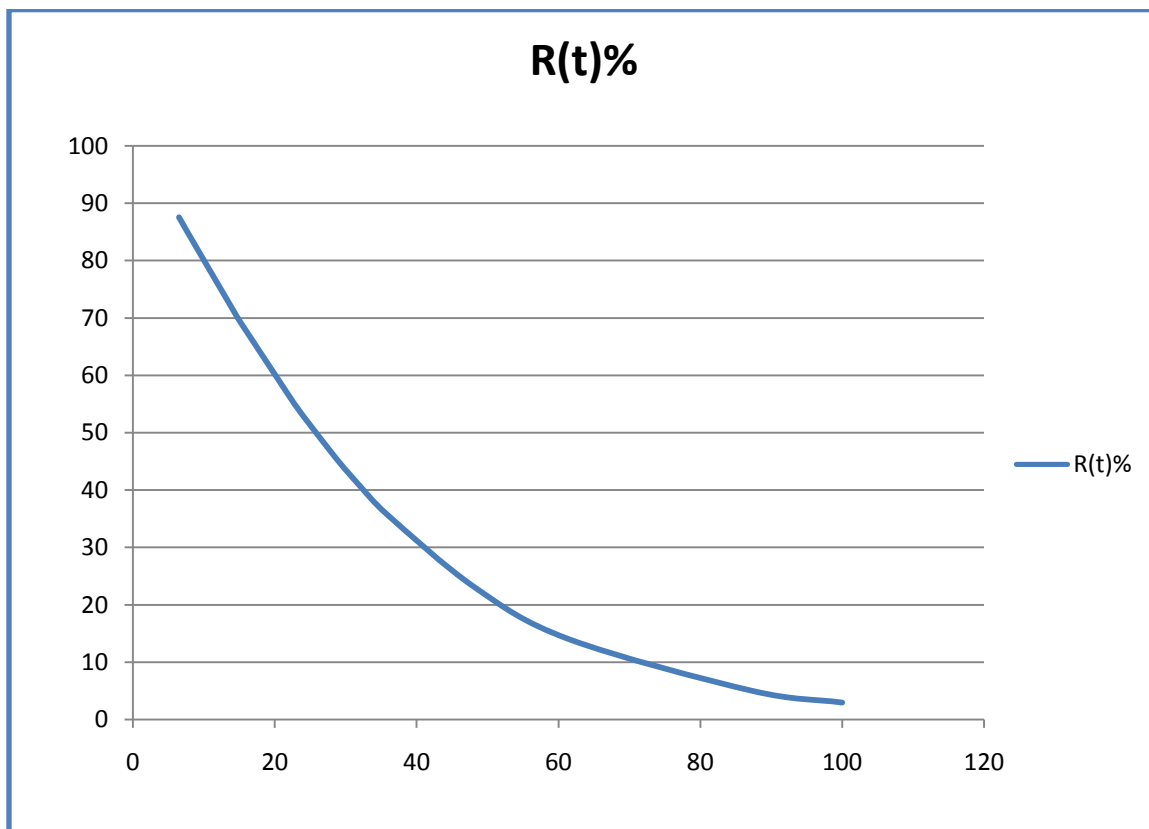
C'est la probabilité de défaillance à l'instant $(t + td)$, sachant que le dispositif bon à l'instant t .

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} \quad \lambda(\text{MTBF}) = \frac{1.2}{1145.2} \left(\frac{1077.3 - 0}{1145.2}\right)^{1.2-1} = 0.0010$$

$$\lambda(t) = 0.1035$$

Tableau N°04:

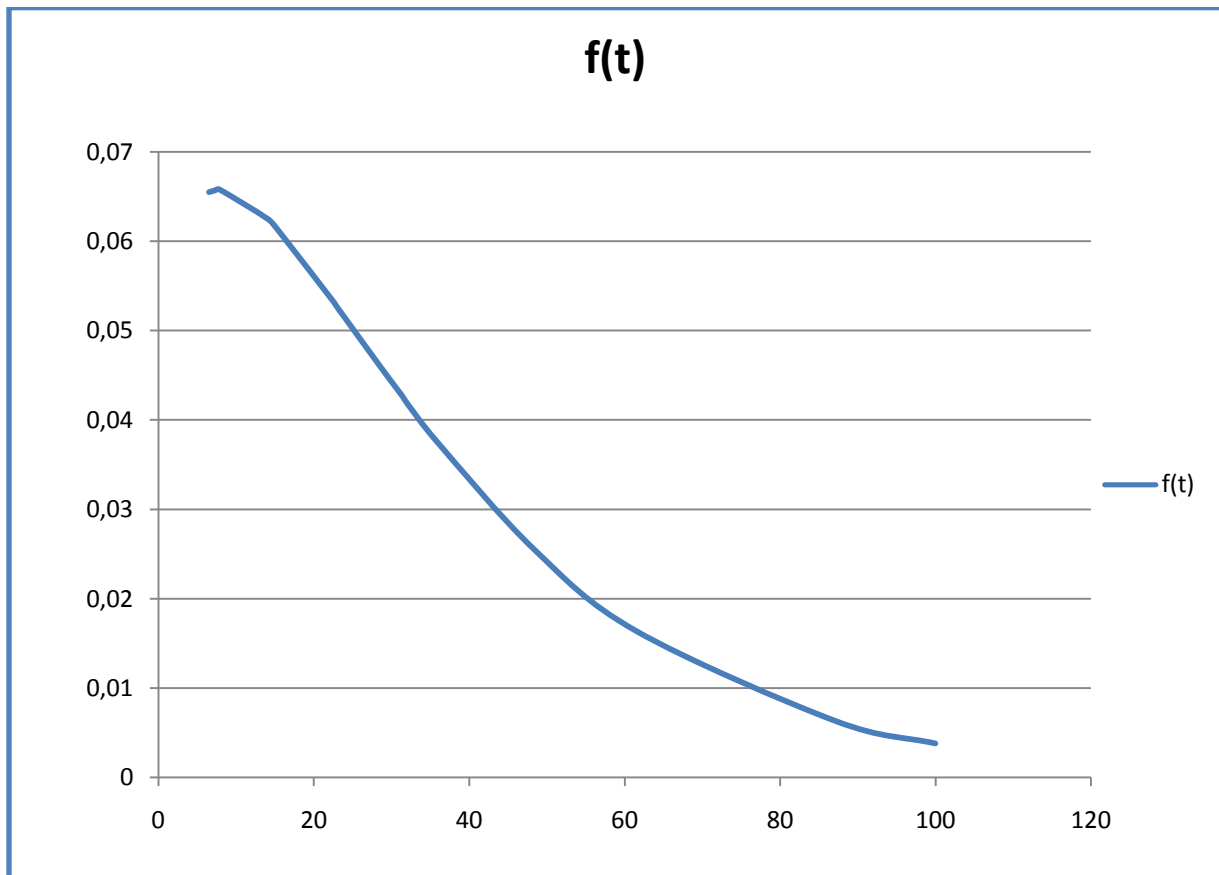
N°	TBF (heur)	R (t)%	f(t)%	F(t)%	$\lambda(t)\%$
01	213	87.56	0.0655	12.44	0.0748
02	238	85.92	0.0657	14.08	0.0765
03	257	84.67	0.0658	15.33	0.0777
04	460	71.55	0.0625	28.44	0.0873
05	502	68.95	0.0613	31.04	0.0888
06	741	55.26	0.0531	44.74	0.0960
07	743	55.15	0.0530	44.84	0.0961
08	764	54.05	0.0522	45.95	0.0966
09	786	52.91	0.0514	47.09	0.0971
10	931	45.84	0.0461	54.16	0.1005
11	998	42.83	0.0437	57.16	0.1019
12	1029	41.50	0.0426	58.50	0.1026
13	1049	40.65	0.0418	59.34	0.1029
14	1172	35.77	0.0376	64.23	0.1052
15	1579	22.98	0.0256	77.01	0.1117
16	2011	14.01	0.0164	85.99	0.1173
17	2853	05.03	0.0063	94.97	0.1257
18	3272	02.95	0.0038	97.05	0.1292

A. Courbe de la fiabilité $R(t)$:**Analyse :**

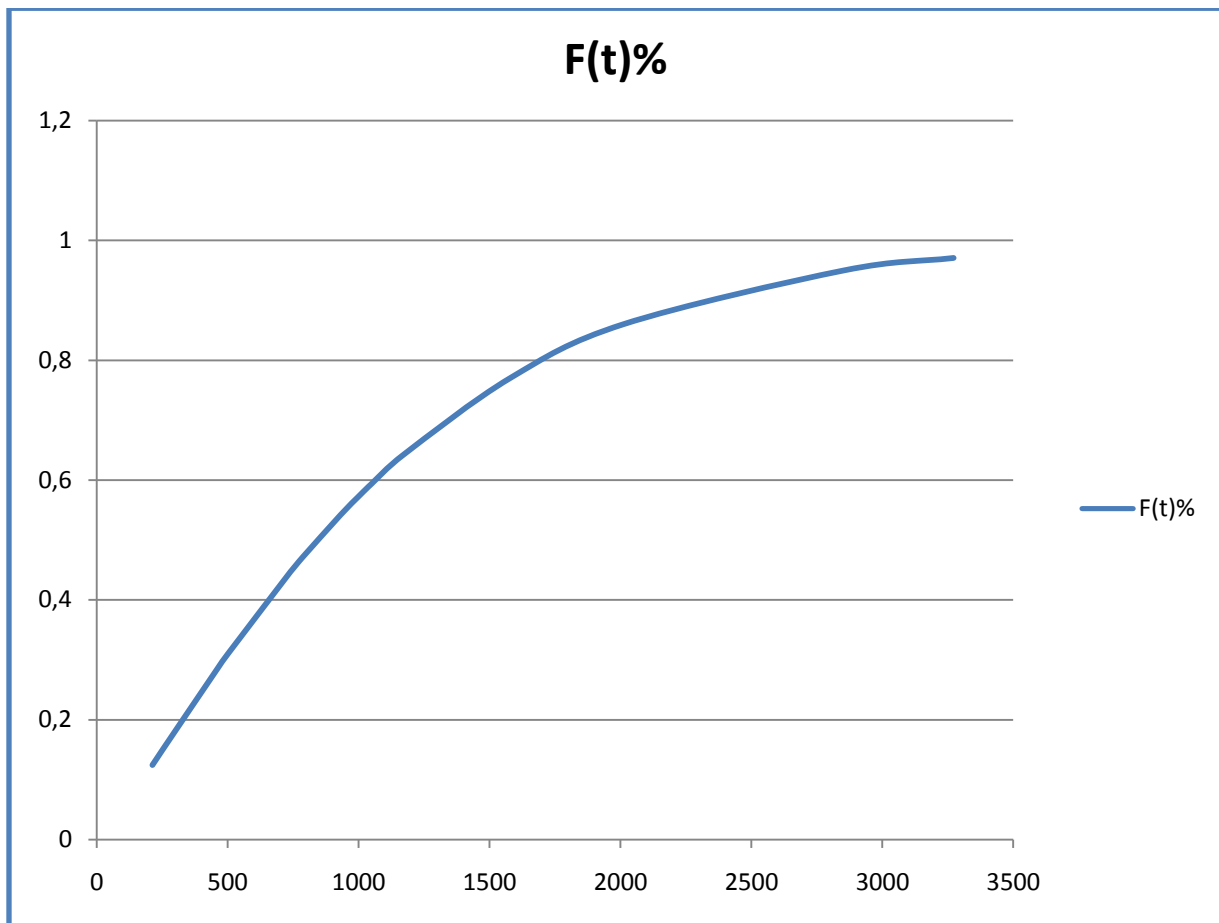
D'après l'allure de la courbe on remarque la dégradation de fiabilité (probabilité de bon fonctionnement à t_i) au cours de cumul de temps de bon fonctionnement signifié que la turbine à vapeur subir plusieurs arrêt qui provoquer la rupture de production,

Cette dégradation est due essentiellement soit à une mauvaise utilisation de la turbine ou la dégradation du matériel soit à une maintenance inadéquate, sur tout avec le manque des compétences ;

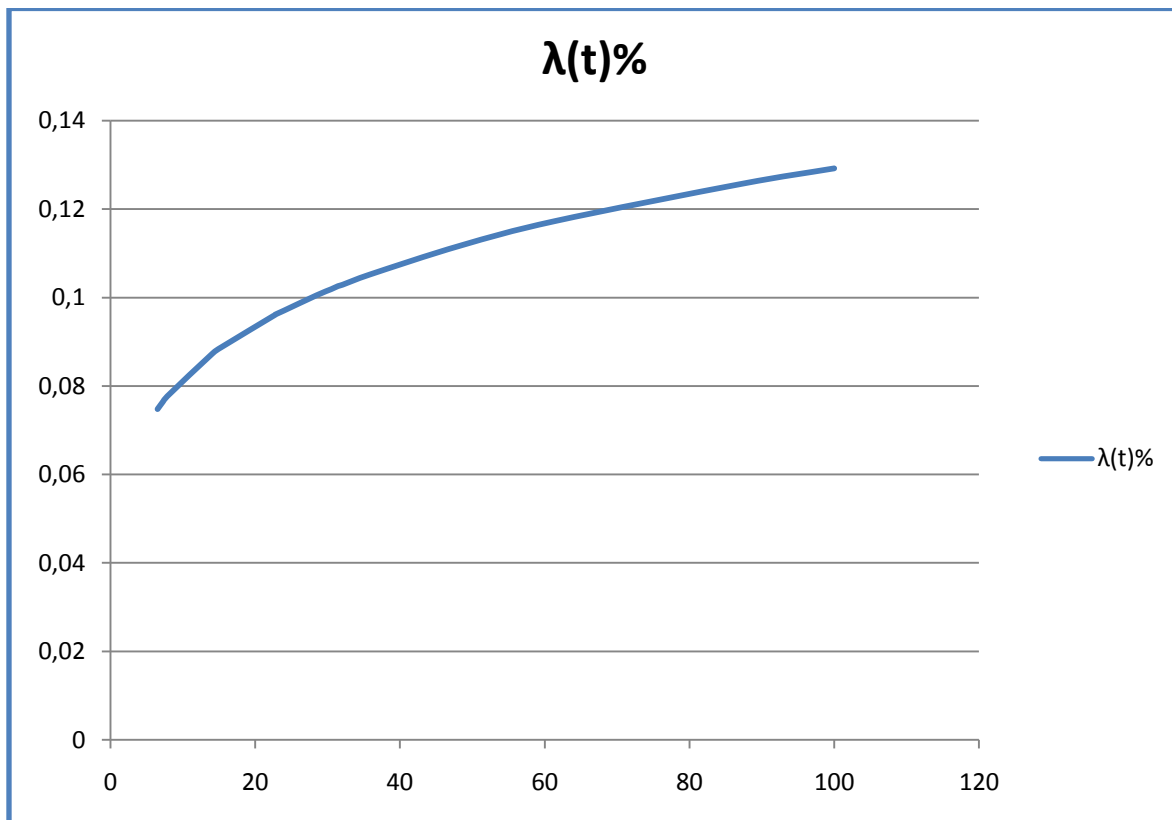
En considérant le temps $t=MTBF$, on voit que $R(MTBF)=39.48\%$ ce chiffre indiquent que la fiabilité de l'équipement est au dessus de la moyenne. Donc il est urgent de mettre un plan d'intervention systématique pour l'amélioration de la fiabilité.

B. Courbe de la densité de probabilité des défaillances :**Analyse :**

On remarque que la courbe de densité de probabilité des défaillances de la turbine ce 60-11-11 diminue au cours de cumul de temps de bon fonctionnement, La courbe de densité de probabilité suit la loi de Weibull et montre la distribution des défaillances autour de la moyenne de la tenue du matériel.

C. Courbe de la fonction de répartition :**Analyse :**

On remarque clairement que la courbe de fonction de répartition augmente au cours de temps de bon fonctionnement, qui signifie que la probabilité que la machine tombe en panne va augmenter dans temps. L'interprétation de cette courbe ne diffère pas de la précédente $F(t)=1-R(t)$

D. Courbe de taux de défaillance :**Analyse :**

D'après la courbe, nous avons un taux de défaillance qui croît lentement en fonction de temps, ce qui signifie que la turbine est en période de maturité, usure normale d'où la confirmation du paramètre de forme $\beta=1.1 \approx 1$, dans cette période, il est difficile de citer les causes de défaillance mais on retient l'usure et les vibrations répétées qui ont modifié la structure du matériau.

Conclusion :

D'une manière générale l'étude de la fiabilité de la turbine à vapeur 60 ce 55-11-11 nous a permis de voir que le système est fiable potentiellement, dans ce cas on peut dire que l'historique des pannes a une grande importance pour les calculs de fiabilité et le choix de politique de maintenance et surtout le suivi l'état des équipements, On conclut aussi que la turbine à vapeur est en zone de maturité d'après les résultats.

III.3. Amélioration de la fiabilité :

III.3.1. Diagramme d'Ishikawa :

1) Définition de l'effet

Une faible fiabilité de notre turbine à vapeur, elle est au dessous de la moyenne égale 39,48.

2) Identification des causes :

D'après le brainstorming les causes possibles qui peuvent diminuer la fiabilité sont

- la production de vapeur n'est pas fiable.
- Production de vapeur non stable.
- le programme de maintenance de la turbine n'est pas adéquat.
- Manque des PDR (pièces de rechange).
- Manque de compétence des opérateurs.
- Les pièces de la turbine ne sont pas conformes.
- L'endroit de la turbine n'est pas supportable.
- La vapeur utilisé n'est pas sèche (à 310°C la vapeur est saturé mais pas sèche).
- Mauvais alignement de la turbopompe.
- Les jeux de fonctionnement ne sont pas respectés.
- Mauvais réchauffage des conduites de vapeur lors de démarrage.
- L'état des purges n'est pas bon.
- Mauvais refroidissement après les arrêts.
- Mauvaise lubrification.
- Vibrations critiques sur la turbine.
- La charge de turbine est insupportable.
- La pompe n'est pas en bon état.
- Fuite de la garniture mécanique.

3) Classification des causes :

On peut classifier les causes précédentes se forme de 6 familles :

1. Matière :

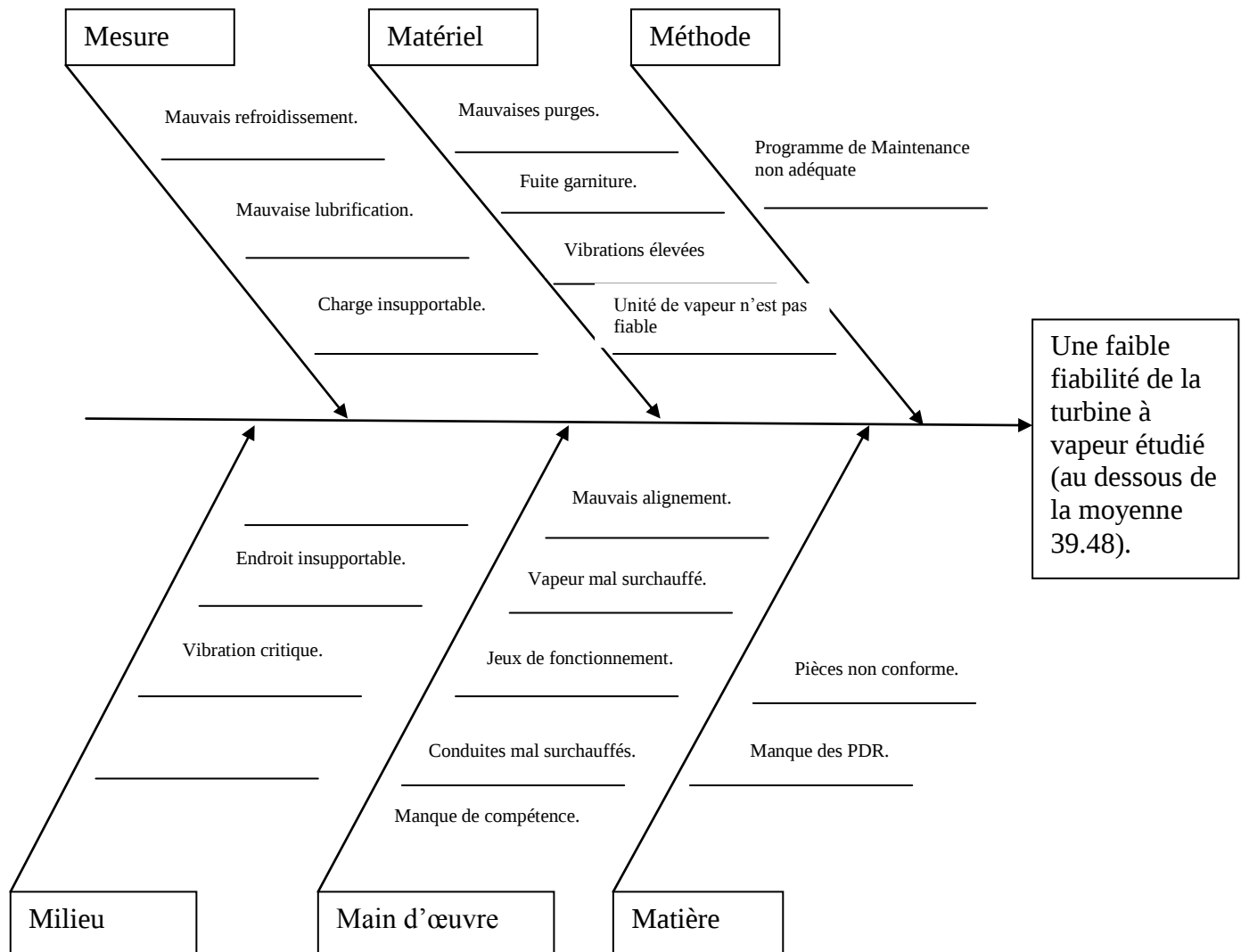
- Manque des PDR (pièces de rechange).
- Les pièces de turbine ne sont pas conformes.

2. Main d'œuvre :

- Mauvais alignement de la turbopompe.

- La vapeur utilisé n'est pas sèche.
 - Les jeux de fonctionnement ne sont pas respectés.
 - Mauvais réchauffage des conduites de vapeur lors de démarrage.
 - Manque des compétences.
 - La pompe n'est pas en bon état.
3. Méthode :
- Production de vapeur non stable.
 - le programme de maintenance de la turbine n'est pas adéquat.
4. Milieu :
- L'endroit de la turbine n'est pas supportable.
 - Vibrations critiques sur la turbine.
5. Matériel :
- L'unité thermique de la production de vapeur n'est pas fiable.
 - L'état des purges n'est pas bon.
 - Fuite de la garniture mécanique.
 - Vibrations critiques sur la turbine.
6. Mesure :
- Mauvais refroidissement.
 - Mauvaise lubrification.
 - La charge de la turbine est insupportable.

4) Construction du diagramme :



5) Proposition d'action en maintenance :

Puisque les causes qui influent sur la fiabilité de turbine sont multiples telles que ce qui j'ai cité au dessus, on doit respecter beaucoup d'action en maintenance pour assurer la fiabilité où il faut :

- Assurer la bonne formation des opérateurs pour arriver à la bonne exploitation de l'équipement.
- Augmenter les actions de maintenances préventives telles que les contrôles, les visites et les inspections.
- Elaborer des consignes d'exploitation générales et particulières pour assurer une exploitation dans les normes techniques et se sécurité du matériel et des exploitants.

-
- Améliorer la maintenance en utilisant les techniques conditionnelles (l'analyse vibratoire, la thermographie ...etc.)
- Remettre en service les équipements de signalisation, de régulation automatique et de protection, l'exploitation d'équipements industriels ne peut être sécurisée sans ces derniers.
- Assurer la bonne préparation des interventions (démarrage, arrêt...etc.)
- Respecter les consignes de constructeur lors de montage et démontage de l'équipement tel que les jeux de fonctionnement.
- Améliore le refroidissement et la lubrification en utilisant les modifications.
- Assurer le bon nettoyage.
- Assurer le bon historique de l'équipement.

III .1. Généralités sur la fatigue des matériaux : [6]

III .1.1. Introduction :

La résistance à la fatigue des pièces mécaniques est dépend de nombreux facteurs et bien entendu du matériau qui les constitue. Mais elles seront d'autant plus fiables que leur concepteur aura pris soin de leur éviter toute concentration inopportune de contraintes. Le chargement cyclique des zones critiques où se concentrent les contraintes en est à l'origine. Dans ces zones, l'endommagement progressif du matériau se manifeste par l'apparition de microfissures, apparition plus ou moins rapide selon la nature du matériau et l'importance du chargement appliqué. Après cette période d'amorçage, l'une des fissures ou plusieurs d'entre elles vont se propager dans toute l'épaisseur de la pièce jusqu'à la rupture brutale. D'un point de vue purement mécanique.

On peut identifier deux grandes classes de comportement dû à la fatigue :

- a) **la fatigue associée à un grand nombre de cycle** : c'est la plus courante, les niveaux de contraintes qui la provoquent sont sensiblement inférieurs à celui de la contrainte d'écoulement des matériaux. La rupture a lieu sans aucune déformation permanente et la déformation produit dans les limites du domaine élastique.
- b) **La fatigue plastique associée à un petit nombre de cycles (fatigue oligocyclique)** : c'est celle qu'on rencontre dans le cas de fil de métal plié et déplié. Les déformations imposées à la pièce sont telles qu'à chaque cycle de chargement, celle-ci subit une déformation permanente. La fatigue plastique n'est tolérable que dans certaines situations bien contrôlées.

III .1.2. Définition de la fatigue :

La fatigue est un processus (succession de mécanismes) qui sous l'action de contraintes ou déformations variables dans le temps modifie les propriétés locales d'un matériau et peut entraîner la formation de fissures et éventuellement la rupture de la structure.

III .1.3. Mécanisme de fatigue :

L'observation macroscopique d'une section rompue sous l'effet de fatigue indique qu'il existe trois étapes dans le processus de fatigue :

- 1 - L'amorce de la fissure.
- 2 - La propagation de la fissure.
- 3 - La rupture finale du matériau.

III .1.4. Diagramme d'endurance :

Pour un métal donné, à une température fixée, l'essai de fatigue est défini par le mode de déformation imposée (traction, compression, torsion, flexion, par exemple), les valeurs minimales et maximales de la contrainte appliquée, la vitesse de déformation caractérisée par le nombre de cycles par seconde et le nombre de cycles à la rupture qui est en général, la conclusion de tout essai de fatigue poursuivi assez longtemps. A chaque éprouvette correspond un point du plan (σ, N) et à partir d'un lot d'éprouvette soumises à des contraintes maximales différentes, on obtient une courbe qui à l'allure de celle représentée sur la figure.

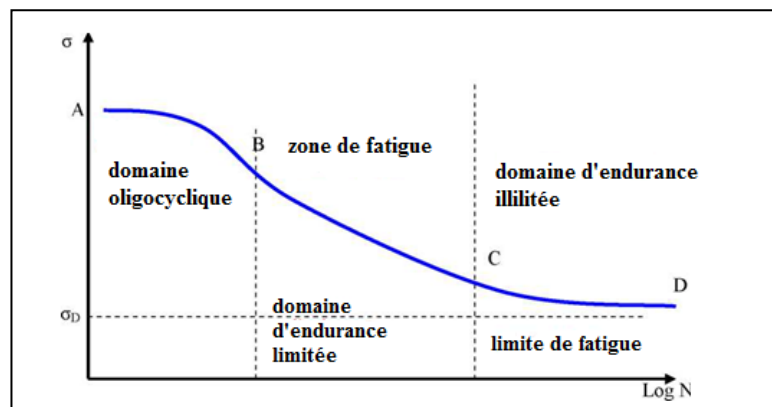


Figure 1 : Principales zones de la courbe de Wohler.

Sur cette courbe, connue sous les noms de Wohler, courbe S-N (Stress-Number of cycles) ou courbe d'endurance, on peut distinguer trois domaines :

A. Fatigue oligocyclique : (la zone AB)

Il est généralement admis que ce domaine correspond à des contraintes élevées supérieures à la limite d'élasticité du matériau. Le nombre de cycles à rupture s'entend de H jusqu'à 10^4 ou 10^5 cycles (pour les aciers doux).

B. L'endurance limitée dite zone de fatigue : (la zone BC)

C'est le domaine de fatigue habituellement considéré où la rupture apparaît après un nombre limité de cycle.

C. l'endurance illimitée ou zone de sécurité : (la zone CD)

Le point D (pour les métaux ferreux) qui est à l'infini. La courbe de Wohler présente généralement une variation de pente plus ou moins marquée autour de 10^6 à 10^7 cycles, suivie d'une zone (CD) où la courbe tend vers une limite asymptotique parallèle à l'axe des N .

III .1.5. Facteurs influant sur la résistance à la fatigue :

En fait, la résistance à la fatigue est affectée par plusieurs facteurs dont il faut prendre en considération lors de la conception d'une pièce. Nous allons étudier brièvement quelques uns de ces facteurs.

- **Concentration de contrainte** : Des essais de fatigue, effectués sur des éprouvettes entaillées ou rainurées, permettent de déterminer expérimentalement l'effet de l'entaille sur la résistance à la fatigue.
- **Finis de surface** : Ce facteur est en relation étroite avec l'effet imputable à la concentration de contrainte ; une pièce dont la surface est polie durera plus longtemps.
- **Volume de pièce** : Plus une pièce est volumineuse, plus sa vie écourtée. l'amorce d'une fissure est associée à la présence des microfissures : plus le volume est grand plus le nombre des microfissures augmente, est plus forte est la probabilité qu'une amorce de fissure par fatigue se produise.
- **Traitement thermique** : Un traitement thermique approprié peut engendrer, en surface, des contraintes résiduelles compressives. Celles-ci tendent à refermer des fissures améliorant ainsi la résistance à la fatigue.

Température : La température, exerçant un effet direct sur la résistance, influe sur le comportement d'une pièce soumise à la fatigue.

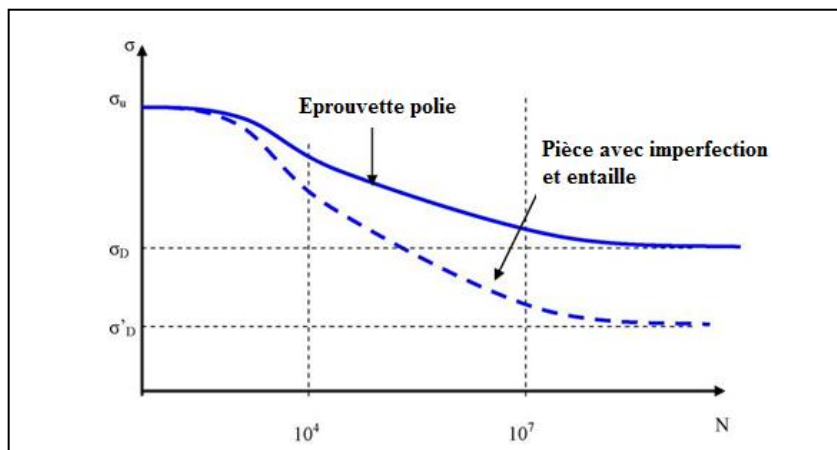


Figure 2 : l'importance de l'état de surface à la résistance à la fatigue.

III .1.6. Paramètres d'ordre métallurgique :

▪ Taille des grains :

Les structures à grains fins présentent une meilleure tenue en fatigue que les structures à gros grains.

▪ Orientation du fibrage par rapport à la direction des efforts :

L'orientation générale des grains confère au matériau une anisotropie plus ou moins marquée.

❖ Taux d'écrouissage :

L'écrouissage résultant des opérations de formage a pour effet de consolider le matériau (augmentation de la limite d'élasticité), améliore la tenue en fatigue.

▪ Traitement thermique :

Un adoucissement ou un durcissement du matériau, la tenue en fatigue sera diminuée ou augmentée. De plus, le traitement thermique peut modifier la taille des grains.

▪ Santé métallurgique de l'alliage :

Les défauts métallurgiques (lacunes, défauts interstitiels, précipités, inclusions) peuvent être à l'origine de l'endommagement par fatigue [7].

III .2. Inspection d'une TV suite à un incident d'ailettes : [9]**III .2.1. Introduction :**

Pendant l'exploitation de la turbine à vapeur, des vibrations importantes ont été décelées. Des analyses spectrales effectuées sur les paliers ont révélé des pics à la fondamentale (fréquence de rotation de la turbine).

Ce qui explique un balourd du rotor.

La turbine est arrêtée et ouverture pour une inspection.

III .2.2. Phase démontage :

- Laisser refroidir la turbine
- Dé calorifuger la turbine
- Démontage des paliers
- Ouverture de la turbine à l'aide d'une boulonneuse pneumatique
- A l'aide d'un pont roulant déposer le demi-stator supérieur au sol
- Déposer le rotor sur des tréteaux
- Déposer les instruments de mesure et de sécurité pour vérification

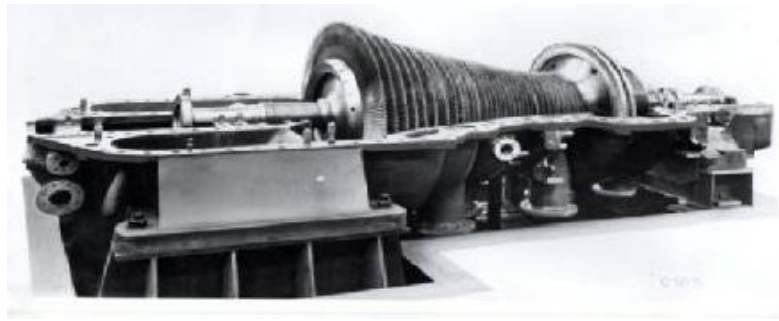


Figure 3 : Démontage de la turbine.

III .2.3. Phase inspection :

Un 1er examen visuel du rotor et du stator,

- Rotor : rupture de quelques ailettes BP
- Stator : déformations des têtes de quelques ailettes

- ☐ Sablage du rotor (au sable fin). Protection des soies de paliers
- ☐ Inspection minutieusement des ailettes du rotor et du stator et noter les rangées d'ailettes avariées.

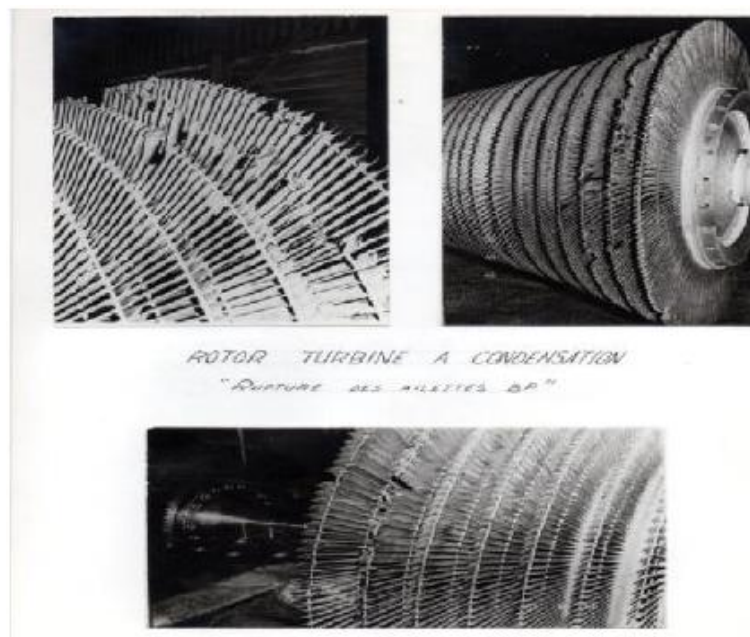


Figure 4 : Des radiographies sur les ailettes.

III.2.3.1 Inspection du rotor :

- Examen des ailettes
- Examen du tambour d'équilibrage
- Examen des boîtes étanches
- Examen des soies de paliers et contrôle aux dimensions
- Examen de la butée

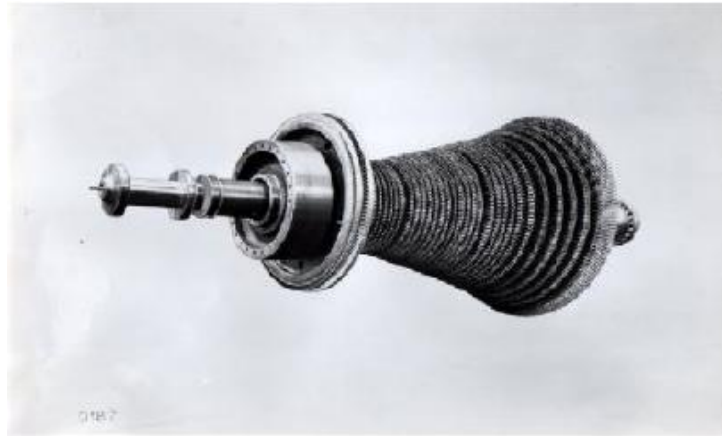


Figure 5 : le rotor de la turbine.

III .2.3.2 Inspection du stator :

- Examen des ailettes
- Examen des tuyères
- Examen de la chemise du tambour d'équilibrage
- Examen du cylindre
- Examen des purgeurs du corps de turbine

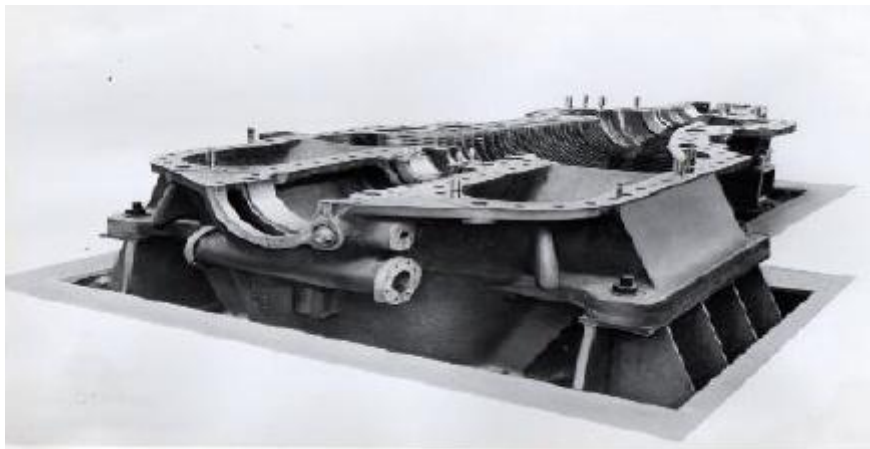


Figure 6 : La partie inférieure du stator.

III .2.4. Expertise des ailettes cassées :



Figure 7 : des ailettes cassées

III .2.4.1 Lieu de l'expertise :

L'expertise des ailettes s'effectue dans un laboratoire de matériaux spécialisé

III .2.4.2 Bût de l'expertise :

Les essais de laboratoire ont pour bût la détermination de l'origine de la destruction des ailettes mobiles en fonctionnement de la turbine.

III .2.4.3 Expertise des ailettes cassées :

* Examen visuel des ailettes cassées:

- la corrosion; les dépôts d'une couleur brun rougeâtre
- l'état de surface

* Analyse des dépôts : prélèvement de dépôts pour analyse chimique

* Analyse du métal : conformité de la nuance de l'acier par rapport à la prescription du fournisseur.

* Examen au microscope électronique à balayage :

Il détermine le caractère morphologique propre des ruptures examinées et les zone d'amorçage de ces ruptures.

* Examen au micrographique :

- Il détermine la surface de l'ailette et le cheminement de la fissure.
- Vérifie la qualité des brasures du fil de liaison (porosité)
- Détermine la structure et la dureté de l'ailette.

* Les essais mécaniques (destructifs):

- Essai de traction ; Essai de dureté

- Essai de résilience ; Essai d'allongement

III .2.5. La corrosion des ailettes :

Les ailettes sont soumises fréquemment aux variations de gradients de températures.

Les dépôts sur les ailettes associés à la vapeur, leurs chimiques pouvant provoquer la corrosion perturbant considérablement la marche de la turbine.

III .2.5.1 Qu'est-ce que la corrosion?

La corrosion est une réaction chimique qui se produit principalement entre un métal (ou alliage) et un fluide (liquide ou gaz). En effet presque tous les métaux ont un point commun, ils absorbent l'oxygène de l'air et forment des oxydes de fer de couleur typique brun rougeâtre appelé « rouille »

III .2.5.2 Corrosion localisée :

La corrosion se produit localement, et est limitée au dessous des dépôts des ailettes, se développe rapidement en profondeur.

III .2.5.3 Corrosion fissurant sous efforts alternés :

La formation de fissures est favorisée par des fossettes de corrosion par suite de l'effort d'entaille. Si cette pièce est soumise à des efforts alternés, elle est sujette à une rupture.

III .2.6. Conséquences de rupture d'ailettes :

Déséquilibre du rotor turbine

Des ruptures d'ailettes déséquilibrent le rotor et apparition des vibrations non acceptables pour la turbine.

Pollution du réseau eau distillée de l'usine

Une rupture d'ailette pendant le fonctionnement de la turbine endommagera d'autres. Une rupture d'ailettes des dernières rangées, par leurs forces d'inertie peuvent percer une ou plusieurs tubes du condenseur à eau de mer. Ce dernier étant en liaison avec le retour aux utilités, il y aura dégradation de la qualité d'eau distillée du réseau usine.

III .2.6.1 Les causes d'oxydation des ailettes :

- Mauvaise qualité de la vapeur
- Mauvais fonctionnement des purgeurs corps de turbine, donc présence d'eau dans le corps.
- Mauvaise conservation des turbines pendant un arrêt de longue durée, présence d'humidité à l'intérieur de la turbine.

VI .1. Simulation de la fatigue sur l'aube de la turbine 60 ce 55-11-11 :**VI .1.1. Introduction :**

L'expérience industrielle montre que la rupture de pièces de machines ou de structures en fonctionnement normal est le plus souvent due à la fatigue. Celle-ci est particulièrement insidieuse du fait de son caractère progressif masqué. Ceci est d'autre plus grave que la fissuration par fatigue conduit très souvent à la rupture brutale qui peut provoquer un accident.

La fatigue désigne le comportement des matériaux sous des cycles répétés de contrainte ou de déformation qui cause une détérioration de la matière, d'où résulte une rupture progressive. Les organes les plus sensibles dans les turbines sont les aubes qui subissent des contraintes répétées à chaque tour de rotor.

Puisque les aubes de la turbine 60 ce 55-11-11 de l'unité 10 (topping) sont des éléments qui ont un rôle sensiblement très importants et qui ont soumis aux différents types de contrainte répétées telle que la pression et la température, les possibilités d'endommagement sous l'effet de fatigue sont multiples.

Si pour ce là une étude de fatigue doit être appliqué afin de faire une approche fonctionnelle de l'aube à l'aide de l'outil informatique Solidworks et les méthodes numérique pour but de :

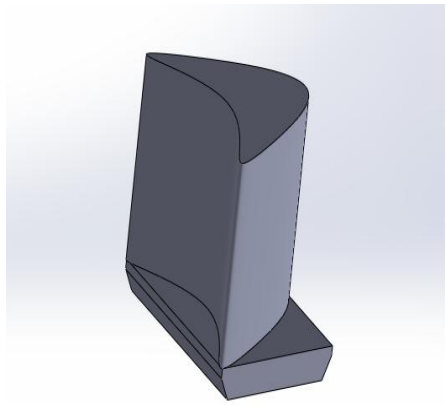
- Déterminer les contraintes maximales exercées sur l'aube.
- Connaitre le comportement en fatigue de matériau et déterminer la limite d'endurance.

Ces derniers points nous permet de bien suivre la performance de la pièce, réduire le pourcentage d'endommagement, améliorer la durée de vie bien que le coût de maintenance.

VI .1.2. Outils informatique utilisée (Solidworks) :

SolidWorks Simulation est un logiciel de calcul par éléments finis intégré à SolidWorks. Il utilise les fichiers pièces et assemblages auxquels il intègre des études dans chacune desquelles sont définis les matériaux, les chargements, les conditions aux limites ainsi que les paramètres de maillage et d'analyse. Les résultats sont contenus dans un fichier portant l'extension CWR.

VI.1.3. Propriétés physiques du matériau de l'aube

Modèle	Propriétés
 Aube de la turbine 60 ce 55-11-	Nom : Acier allié Z20 C30
	Type modèle : Isotrope élastique linéaire
	Limite conventionnelle d'élasticité : 6.20422e+008 N/m ²
	Résistance à la traction : 7.23826e+008 N/m ²
	Module élastique : 2.1e+011 N/m ²
	Le coefficient de Poisson: 0.28
	masse volumique : 7700 kg/m ³
	Module de cisaillement : 7.9e+010 N/m ²
	Coefficient de dilatation thermique : 1.3e-005 /Kelvin

VI.1.4. Caractéristiques de la Turbine 60 ce 55-11-11: [5]

60 ce 55-11-11	turbine à vapeur à action
V max.....	5195 tr/min.
V normal.....	2960 tr/min.
Puissance de base.....	528 KW
Température d'admission.....	310 °K.
Pression d'admission	30 Bars
Pression d'échappement.....	3.5 Bars.
Nombre d'étage	1 étage à 2 rangés.
Dispositif entraîné	Pompe.

Les caractéristiques de fonctionnement sont pour sept différentes conditions possibles les suivants :

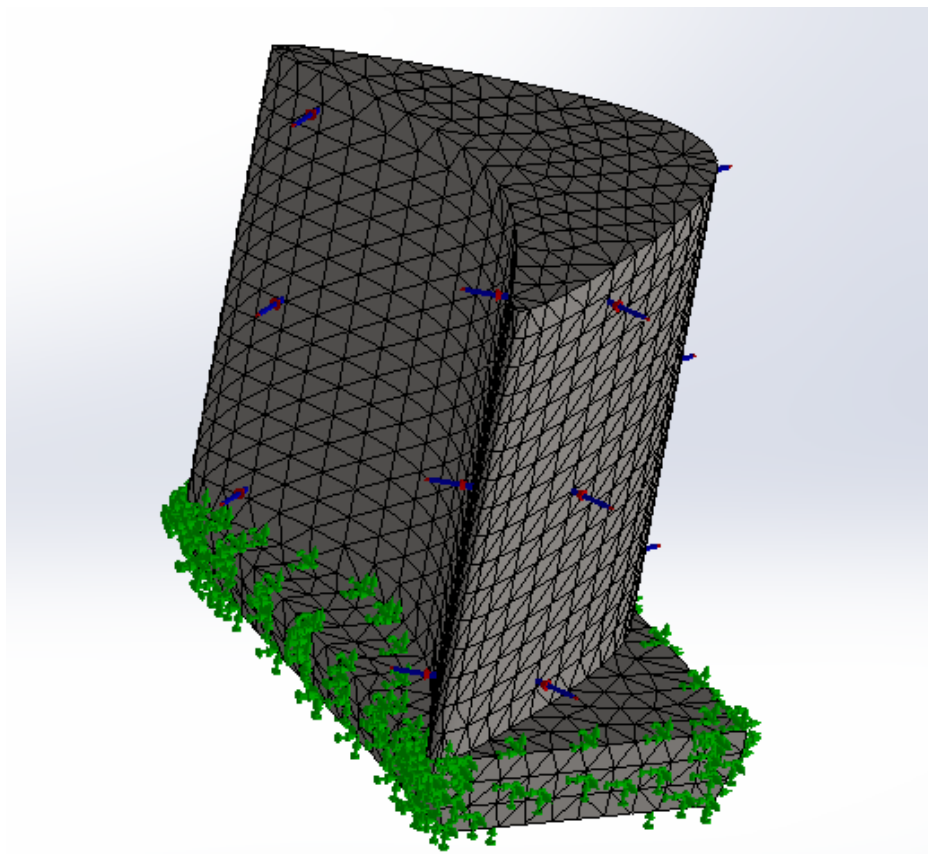
	A	B	C	D	E	F	G	
- Pression de la vapeur à l'admission	59	61	61	61	61	61	61	ATA
Température de la vapeur à l'admission	485	490	490	490	490	490	490	[#] C
- Pression de la vapeur au prélèvement	32	32	32	32	32	32	32	ATA
Température de la vapeur au prélèvement	416	420	420	420	420	420	420	C
- Pression de la vapeur à l'échappement	4	4	4	4	4	4	4	ATA
- Vitesse de rotation	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	ours/m
- Vitesse de rotation max	6195	6195	6195	6195	6195	6195	6195	ours/m
Consommation de la vapeur	3400	42700	39000	29500	25500	21700	21700	Kg/h
- Vapeur de soutirage	-		-	00000	00000	-	10000	Kg/h
- Vapeur à l'échappement	3400	42700	39000	29500	25500	21700	21700	Kg/h
- Puissance rendue	10285	10285	9350	10285	9350	4900	8350	KV

VI.1.5. Charge et montage :

Nom de montage	Détaille de montage
Fixed-1	Entities: 11 face(s) , Type: Géométrie fixe
Pression hydraulique-1	Entities: 2 faces Valeur: 3000000 Unités: N/m ²
Temperature-1	Entitiés: 2 faces Temperature: 253 C°

VI.1.5. Le maillage :

Type de maillage	Maillage solide
Mailage employé:	Maillage de base
Points de Jacobian	4 Points
nombre des nodes	16925
nombre des éléments	9238

**Figure 3 : maillage de l'aube.****VI .2. Résultats de la simulation de fatigue :**

VI .2.1. L'étude statique :

A) Les contraintes :

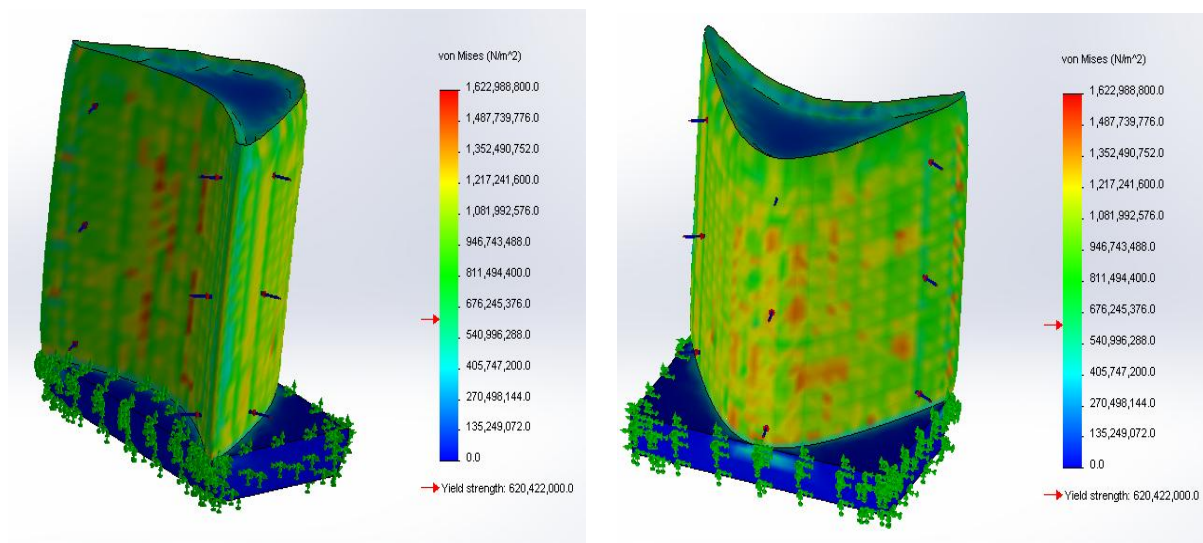


Figure 4 : simulation des contraintes sur les deux profils intrados et extrados de l'aube.

B) Les déformations :

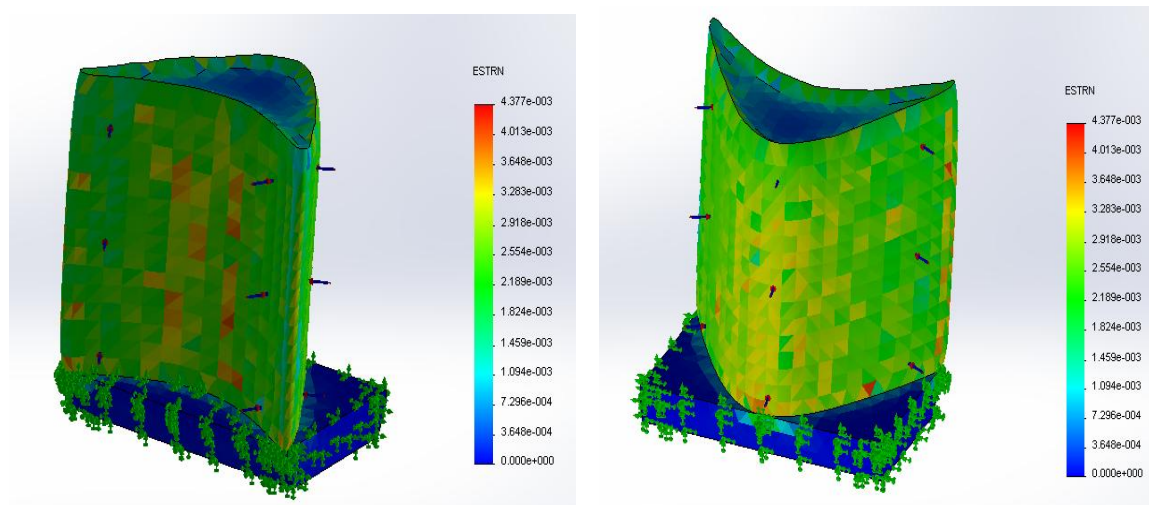


Figure 5 : simulation des déformations sur les deux profils de l'aube.

C) Analyse des résultats :

D'après les figures précédentes de l'aube de la turbine 60 ce 55-11-11 sous l'effet des charges moyennes de fonctionnement (température et pression) on observe que les contraintes ne sont pas réparties uniformément sur la géométrie de l'aube. Cette concentration de la contrainte qui a paru aux différentes zones de l'aube (figure 4) est due à la distribution non régulière de l'effort à la forme complexe de la structure (figure 5).

On remarque que les zones représentées en bleu ont subi une contrainte acceptable varie entre 100 N/cm^2 et 540 N/cm^2 l'équivalence de 10 kg/cm^2 et 54 kg/cm^2 . Et les zones représentées en ver ont subi une contrainte remarquable varie entre 540 N/cm^2 et 1500 N/cm^2 , elle va créer la fatigue au cours du temps.

Les zones qui fonctionnent dans l'intervalle qui varie entre 1500 N/cm^2 et 2440 N/cm^2 sont les plus sollicitées dans la structure.

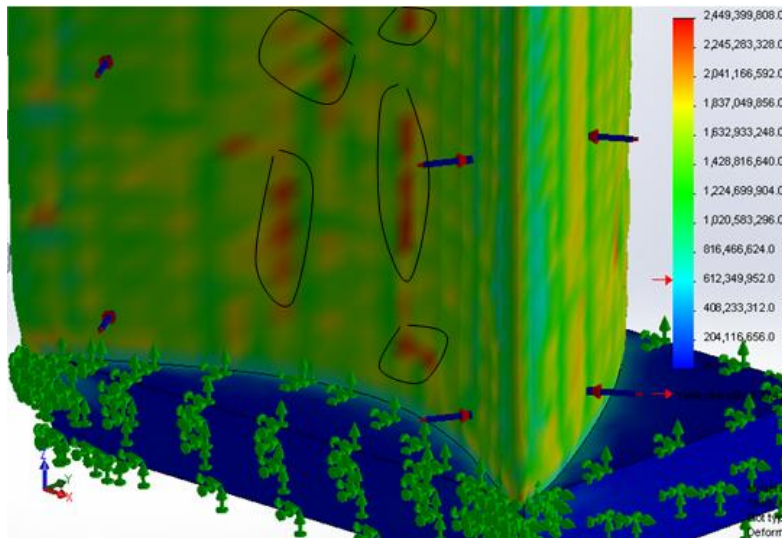


Figure 6 : la concentration ponctuelle de contrainte.

Ces points entourés en noir ont subi une contrainte élevée où elle peut créer une initiation de fissure si pour cela on doit inspecter cette zone de temps en temps. La complexité de la forme géométrique de l'aube a bien étudiée afin d'être capable de réaliser un bon entrainement du rotor.

D) Les déplacements :

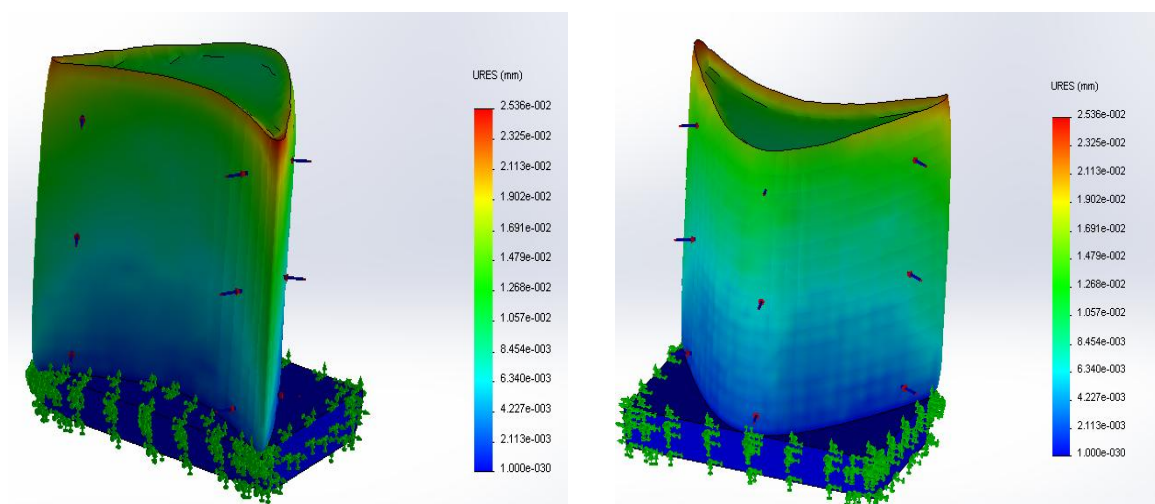


Figure 7 : simulation des déplacements sur les deux profils de l'aube.

- **Analyse des résultats :**

On observe dans la figure 7 que :

La zone représentée en bleu a un déplacement presque négligeable, et la zone représentée en vert a un déplacement remarquable qui varie entre 0,01 mm et 0.016 mm.

Ce déplacement remarquable est dû aux conditions extrêmes de fonctionnement (turbine haute puissance). Mais la zone représentée en rouge a un déplacement important arrive jusqu'à 0,025mm qui peut s'aggraver en créant une faiblesse du matériau.

Malgré la bonne élasticité de l'alliage d'acier de l'aube Z20 C30, Il faut bien maintenir notre structure pour augmenter la fiabilité et leur durée de vie.

VI .2.2. L'étude de fatigue :

a. Pourcentage d'endommagement et le nombre de cycle:

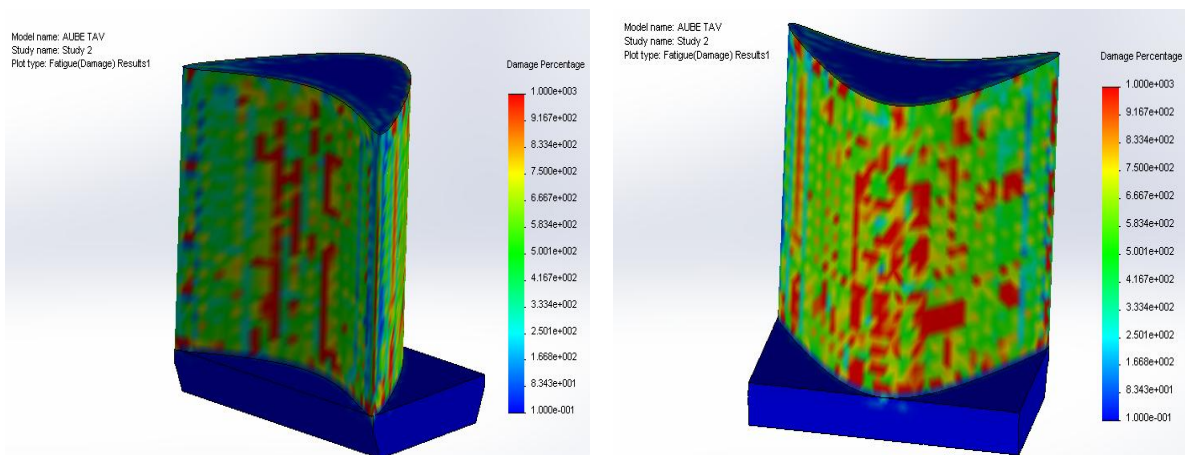


Figure 8 : simulation du pourcentage d'endommagement sur les deux profils de l'aube.

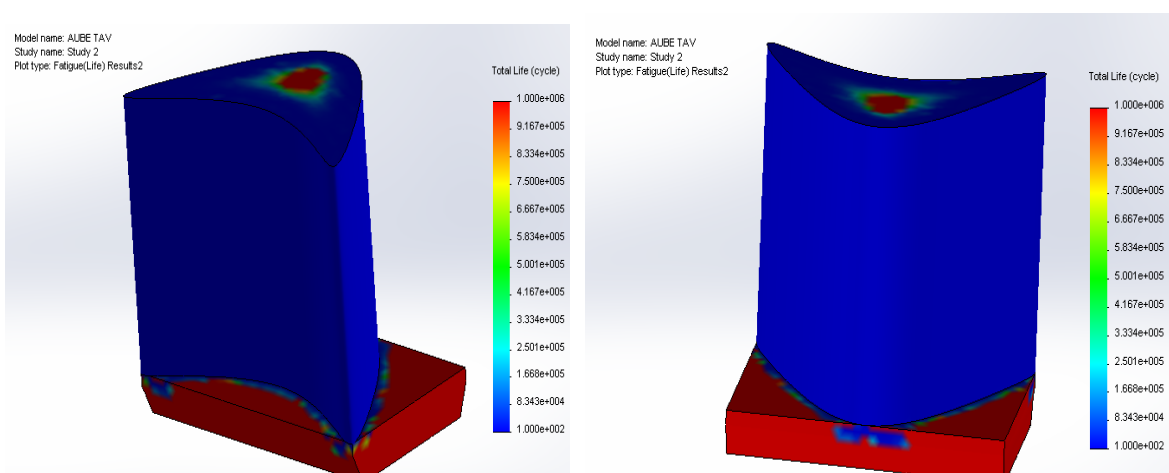


Figure 9 : simulation du nombre de cycle sur les deux profils de l'aube.

b. Analyse des résultats :

Puisque le milieu de fonctionnement de l'aube est agité par un fluide chargé en pression et en énergie thermique on remarque que la fatigue touche la plus part des zones de la structure, ces zones sont représentées en bleu ont la durée de vie la plus petite par rapport aux autres zones de la géométrie, elle arrive jusqu'à $6 \cdot 10^5$ cycles si bien que le pourcentage d'endommagement est remarquable varie entre 3% et 10%.

On remarque aussi que les zones représentées en rouge (figure 9) ont une durée de vie importante arrive jusqu'à $1,0 \cdot 10^6$ cycles parce qu'ils sont moins sollicités par le fluide (vapeur sèche) par conséquent leur pourcentage d'endommagement est très petit varie entre 1,6 et 2,5.

VI.2.3. L'initiation de la fissure :**a.Le tableau de $N = f(\sigma)$:**

Le tableau présente les résultats obtenus par le calcul en fatigue sur Solidworks avec les données d'entrées : pression et température et les données de sorties : Contraintes et nombre de cycle.

Tableau 1: Résultat du calcul en fatigue par simulation en fonction de la pression et de la température.

Pression (Bars)	Température (C°)	La contrainte (Mpa)	Nb de cycle min à L'initiation de fissure (Nb)
61	310	308	$1,000 \cdot 10^2$
50	292,80	244,6	$2,122 \cdot 10^3$
45	284,08	189,9	$9,707 \cdot 10^3$
40	274,60	143.5	$6,507 \cdot 10^4$
35	264,31	101.3	$1,011 \cdot 10^5$
30	253	59.1	$7,688 \cdot 10^5$
25	239,98	50.6	$9,200 \cdot 10^6$
20	225,09	21	$4,508 \cdot 10^8$

Calcul de la température :

Puisque la vapeur dans la turbine se détend adiabatiquement c'est-à-dire qu'il n'y a un échange thermique avec le milieu externe (quantité de chaleur est presque nulle).

On a : $T_2/T_1 = (P_2/P_1)^{((\delta-1)/\delta)}$

Où :

- T1 et P1 : sont des données du réseau 253c° et 30 bars.
- δ : c'est un indice de transformation adiabatique égale 1.4.
- P2 :c'est la pression de fonctionnement.

Exemple :

Pour 61 bars, T2 = 310.

b.La courbe de $N = f(\sigma)$:

Ces résultats nous ont permis de tracer la courbe de la contrainte en fonction du nombre de cycles avant l'initiation d'une fissure dans l'aube de la turbine.

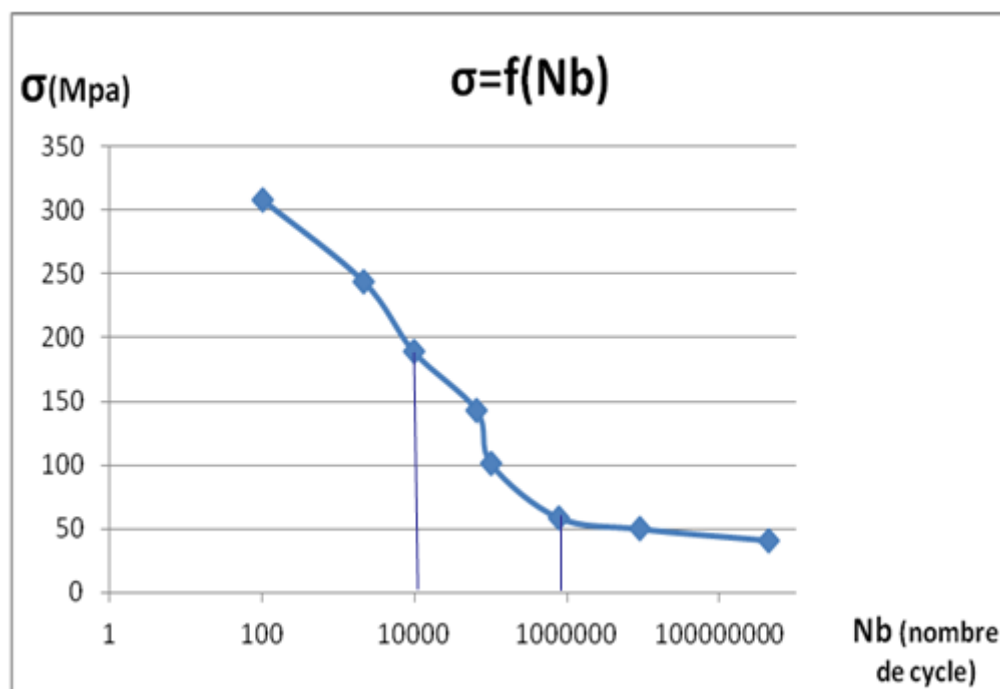


Figure 10 : La courbe de l'initiation de fissure de l'aube de la turbine 60 ce 55-11-11.

c. Analyse de la courbe :

Dans cette étude de la fatigue dans le cadre du dimensionnement du comportement et d'endommagement de la structure, on distingue trois situations sont divers dépend la variation de la contrainte exercée sur l'aube :

Dans la première phase, Cette première zone représente le domaine de fatigue plastique oligocyclique où l'initiation de la fissure devient inévitable après seulement un petit nombre de cycles, et la probabilité d'avoir une initiation de fissure est très grande. Ceci est dû à une contrainte élevée supérieure ou égale à la limite élastique du matériau.

Dans la deuxième, C'est la zone d'endurance limitée ou l'amorce de la fissure apparaît après un certain nombre de cycle, c'est le domaine de fatigue utilisée pour le dimensionnement des pièces. Les contraintes sont bien inférieures à la limite d'élasticité du matériau. L'initiation de la fissure survient dès qu'une augmentation locale de la contrainte survient dans un défaut préexistant ou une modification de la géométrie de la pièce.

Une analyse fiabiliste bien définie permettra de déterminer la durée de vie et de dire, à partir de combien de cycles, il faudra faire une inspection.

Dans la dernière, C'est le domaine d'endurance illimité ou zone de sécurité, après cette zone la courbe devient parallèle à l'axe des abscisses. En dessous d'une valeur σ_R il n'y a jamais rupture par fatigue ou du moins ce qui est prévu en théorie pour les aciers. En pratique, la détermination de la limite d'endurance pose un problème particulier par suite du caractère aléatoire des ruptures de fatigue dans cette zone.

Les effets de concentration locale de contrainte, du milieu agressif et des microdéformations augmenteront le risque d'avoir une fissure

IV. 2.4. Propagation de la fissure :

On admet l'hypothèse qu'une fissure s'est initiée dans l'aube de la turbine après un nombre de cycle en fonction de la contrainte appliquée (Figure 1). Cette fissure définie par ses dimensions : 1,6mm de longueur, 0,02 mm de largeur et 4mm de profondeur. Cette introduction de fissure a pour but d'évaluer la durée de vie de l'aube sous l'effet d'une contrainte donnée.

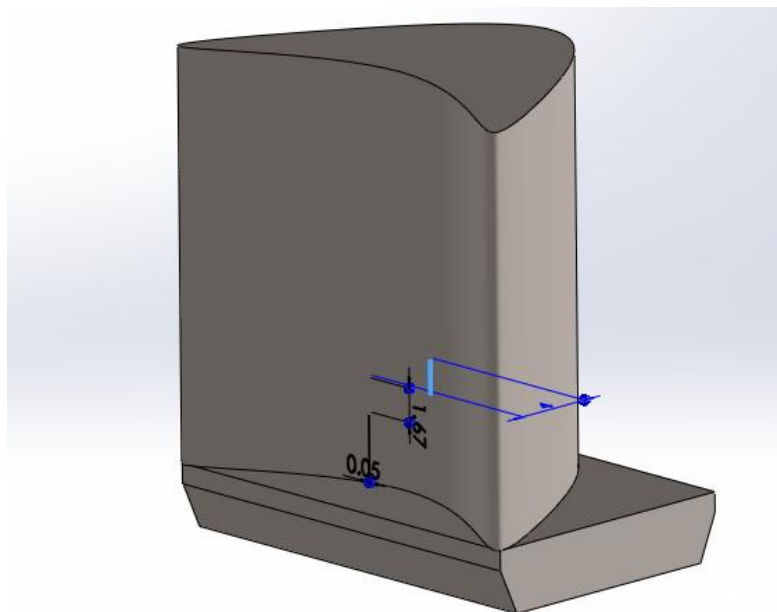


Figure 11 : introduction d'une fissure sur le profil intrados de l'aube.

Les résultats obtenus (contraintes et déformations) dans les figures suivantes pour une pression quelconque appliquée montrent la variation de l'intensité de contraintes et des déformations (Figure 2 e figure 3 respectivement)

a. Les contraintes et les déformations :

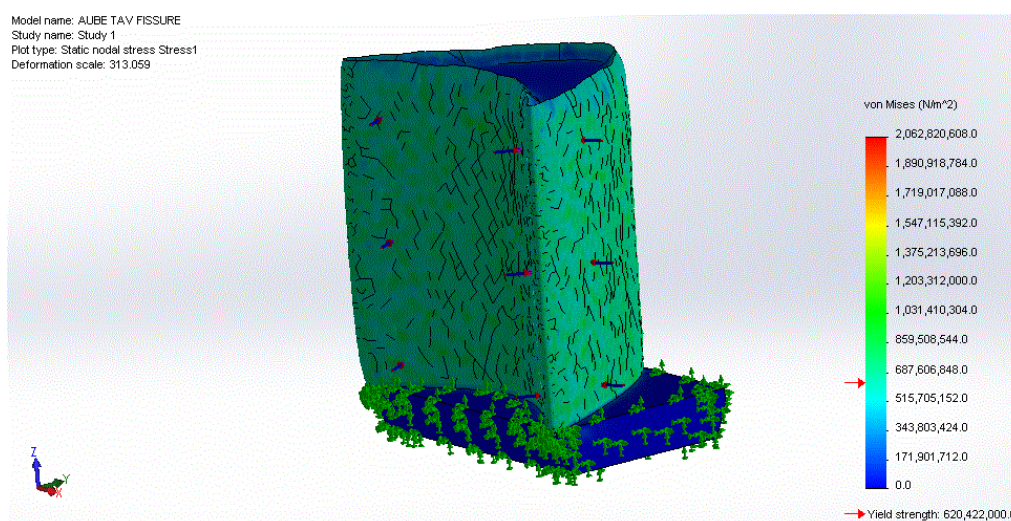


Figure 12 : simulation des contraintes sur le profil intrados de l'aube fissurée.

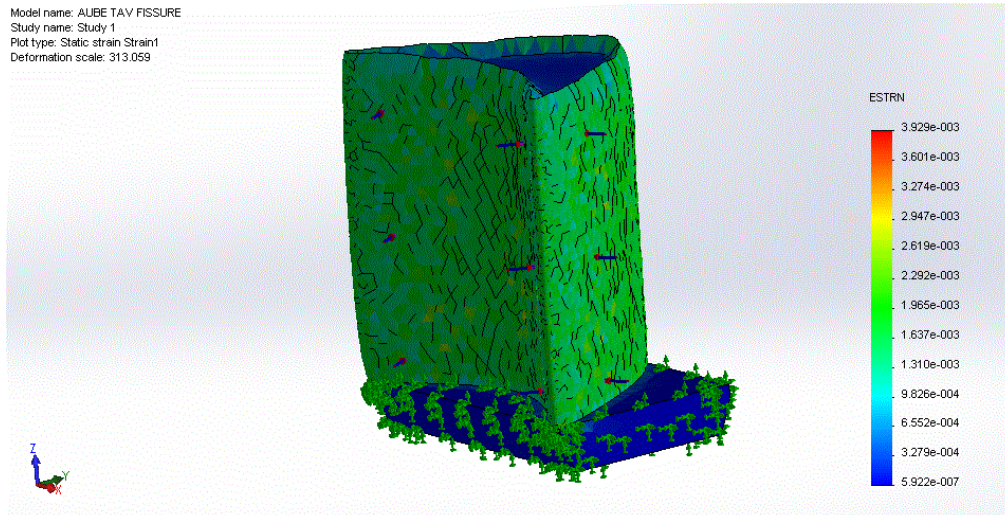


Figure 13 : Simulation des déformations sur le profil intrados de l'aube fissurée.

D'après ces figures précédentes (figure 1 et 2) on observe qu'il y a une augmentation de contrainte au niveau de l'aube arrive jusqu'à 2002 N/cm^2 l'équivalence de 200 Kg/cm^2 et précisément à la zone de la fissure sans oublier que cette élévation de contrainte est suivie d'une pression de fonctionnement constante égale 30 bars.

Cet aperçu exprime une concentration de contrainte au niveau de la fissure qu'on peut la voir bien à la vidéo de la simulation. La figure suivante est tirée de l'animation, elle présente la propagation de la fissure :

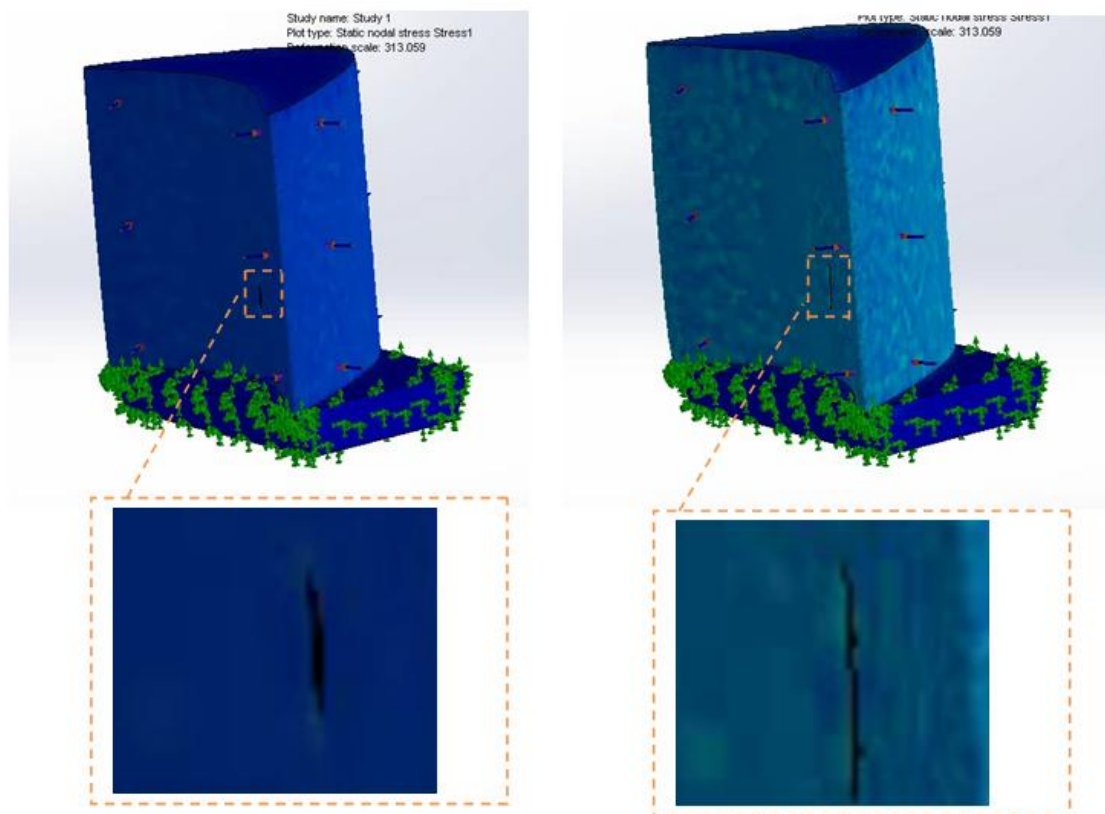


Figure 14 : aperçu de la propagation de la fissure au profil intrados de l'aube.

b. Les déplacements :

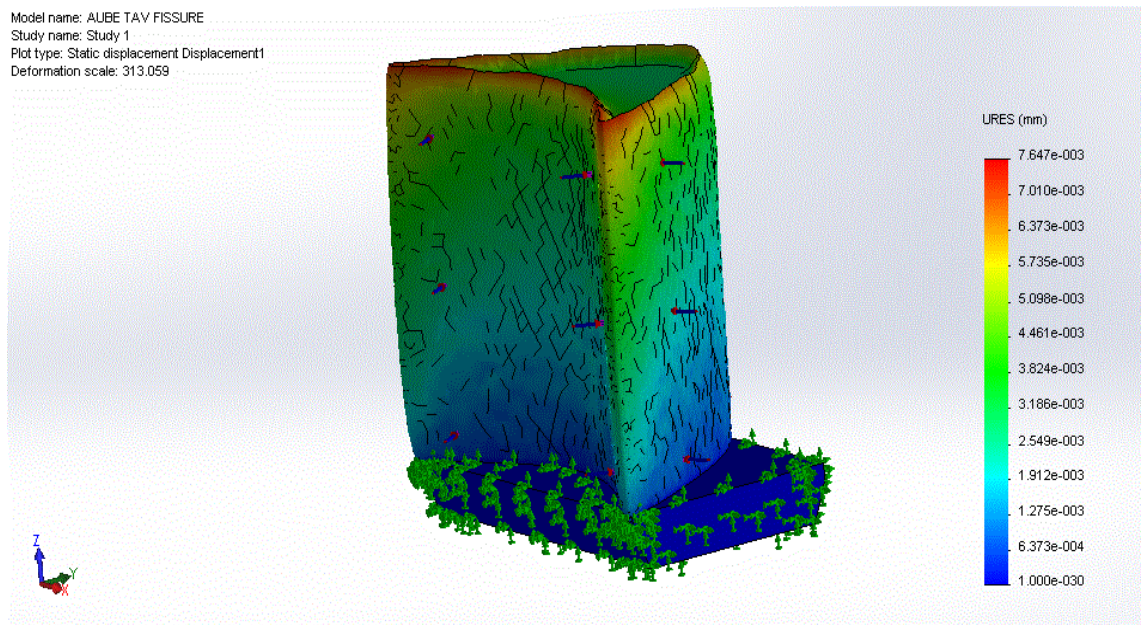


Figure 15 : Simulation de déplacement sur le profil intrados de l'aube fissurée.

Cette figure montre l'évolution de déplacement sur le profil de l'aube fissurée par rapport au début de fonctionnement (avant la fissure).

La variation de déplacement est remarquable arrive jusqu'à $7.6 \cdot 10^{-3}$ mm alors qu'elle a été $2.5 \cdot 10^{-2}$ ce qui exprime un déplacement des extrémités de profil de l'aube vers eux.

c. Le nombre de cycle :

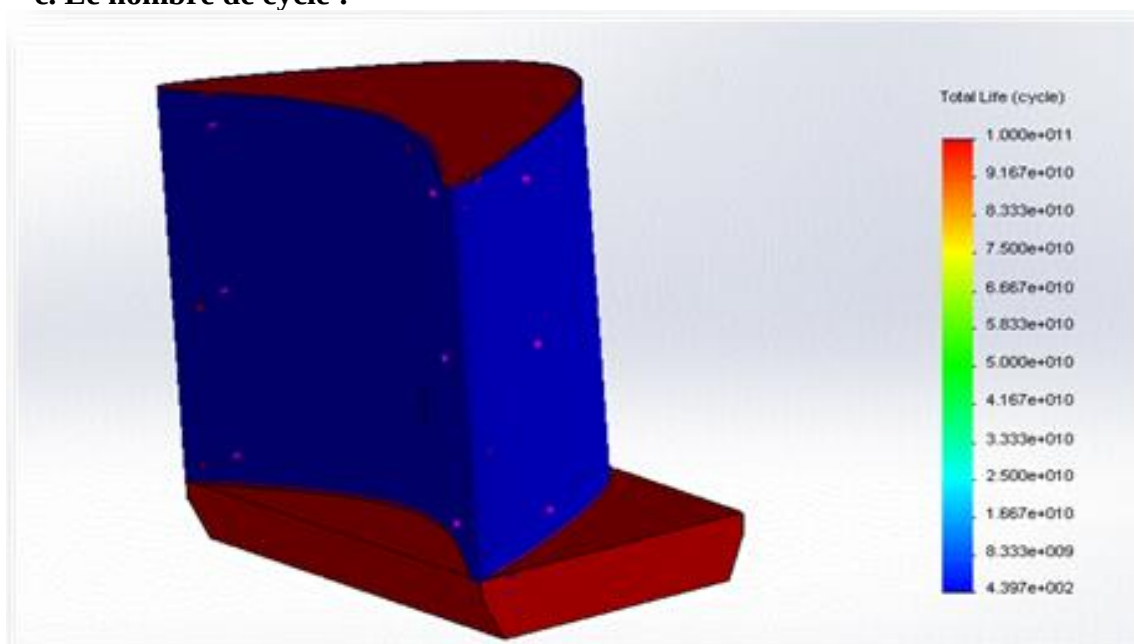


Figure 16: simulation du nombre de cycle sur le profil de l'aube fissurée.

d. Le tableau de $N = f(\sigma)$:

Le tableau présente les résultats obtenus par le calcul en fatigue sur Solidworks avec les données d'entrées : pression et température et les données de sorties : Contraintes et nombre de cycle dont l'existence d'une fissure à l'aube de la turbine.

Tableau 2: Résultat du calcul en fatigue par simulation en fonction de la pression et de la température.

Pression (Bars)	Température (C°)	La contrainte (Mpa)	Nb de cycle min à la propagation de la fissure (Nb)
61	310	448.98	$8.92 \cdot 10^1$
50	292,80	361.1	$2.07 \cdot 10^2$
45	284,08	285	$7.97 \cdot 10^2$
40	274,60	221.53	$2.41 \cdot 10^3$
35	264,31	157.77	$1.00 \cdot 10^4$
30	253	106.38	$8.34 \cdot 10^4$
25	239,98	61.55	$5.67 \cdot 10^5$
20	225,09	45	$6.32 \cdot 10^6$

e. La courbe : Ces résultats nous ont permis de tracer la courbe de la contrainte en fonction du nombre de cycles totale à la propagation de la fissure (nombre de cycle à l'initiation de la fissure plus le nombre de cycle à la propagation) dans l'aube de la turbine.

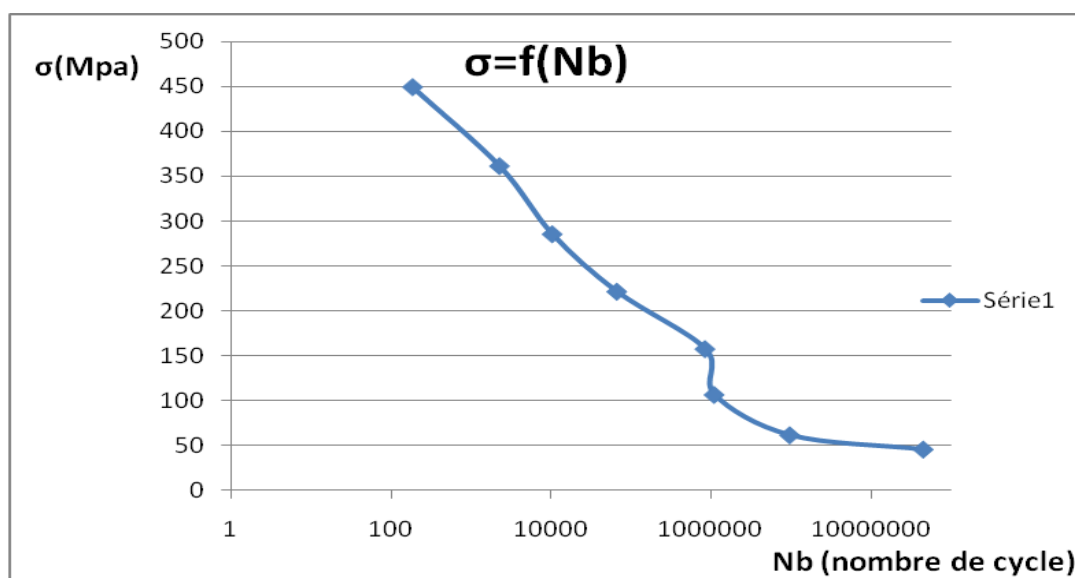


Figure 17 : La courbe de la propagation de la fissure de l'aube de la turbine 60 ce 55-11-11.

f. Discusion :

D'après la courbe précédente (figure 17) et celle de la figure 10, on observe que la majorité de la durée de vie de l'aube de la turbine est avant l'initiation de la fissure.

Cette aperçu exprime que la propagation de la fissure est très courte et qu'elle peut provoquer la panne avant d'être remarquée ou l'exécution d'une intervention. Cela veut dire que l'exécution d'une maintenance conditionnelle est obligatoire pour maintenir nos aubes en bon état.

Conclusion :

Notre séjour au sein du complexe RA1k, nous a permis d'enrichir nos connaissances théoriques et pratiques sur la maintenance des différents organes de la turbine à vapeur et de connaître les différentes technologies et performances ainsi que les actions de maintenance. Une analyse de l'équipement montre une insuffisance considérable en termes de fiabilité. Le diagramme Cause à Effet élaboré a permis de déceler le phénomène de fatigue comme une cause principale.

D'un autre côté, la révolution des logiciels mécaniques tel que Solidworks a permis de réduire le temps de réalisation d'une étude de fatigue par rapport au système classique et de suivre l'état de notre structure.

Toutes ces performances nous ont aidé à étudier et à analyser l'évolution de la fatigue, en faisant recours au fichier technique auquel nous avons construit la courbe de Wohler de l'aube de la turbine 60 ce 50-11-11 et qui est la plus utilisée. Notre démarche consistait à apparaître les zones qui ont une concentration de contrainte et une probabilité d'initiation de la fissure.

Les résultats de la simulation, nous ont permis de constater la limite de contrainte, le déplacement maximal, le nombre de cycle de l'aube à l'initiation et à la propagation de la fissure, et le plus important ; c'est l'attention particulière qui doit être attribuée au type d'endommagement et qui peut être traduit par l'application d'une maintenance préventive systématique ou conditionnelle. D'autre part, nous avons analysés les sollicitations dans la totalité de la géométrie de l'aube ce qui permet de connaître les points probables à l'initiation de la fissure.

Références bibliographiques :

- [1] Mr Bellefki : « cours pompe » IAP d'Arzew 2013, la maintenance en mécanique pétrolière.
- [2] 2005 ENSPM Formation Industrie – IFP Training, MT TVA -01774_B_F – Rév. 3, TURBINE A VAPEUR DESCRIPTION, FOCTIONNEMENT ET EXPLOITATION.
- [3] Mr Belhrizi : « cours turbine » IAP d'Arzew 2013, la maintenance en mécanique pétrolière.
- [4] M. Abidat : « théorie général de turbomachine » U.S.T.M.B. d'Oran Mars 2003.
- [5] PROJET RAFFINERIE DE SIKDA, MANUEL D'ENTRETIEN : turbine à vapeur, cantieri navali del tirreno e riuniti type 60 ce 55-11-11, VOL.1.
- [6] Cours de fatigue des matériaux 2011, Mr MERABTINE Abd elmadjid, Master1, Université Badji Mokhtar Annaba.
- [7] Cour fatigue des matériaux, UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA, 2012.
- [8] Activité Aval, Division Raffinage, Raffinerie d'Arzew, FORMATION TURBINES, Mohamed DEBBI Ingénieur mécanique 2013.
- [9] MEROUANI Imed eddine TSS mécanique, mémoire de fin d'étude maintenance des turbines à vapeur chapitre 3, école d'Arzew 2013.