



UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE BLIDA 1
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE MECANIQUE

LABORATOIRE D'ETUDES ET DE RECHERCHE
EN TECHNOLOGIE INDUSTRIELLE

Projet de Fin d'Etudes
Pour l'obtention du Diplôme de Master en
Construction Mécanique

Titre

**Étude et simulation d'équilibrage statique et dynamique d'une
turbine à vapeur (type A15) de la centrale électrique de Hadjret
Ennoss Tipaza**

Proposé et encadré par :
Pr. ALLALI ABDERRAZAK

Réalisé par :
LAKEHAL IMADEDINE
ABDESSELAMYEN WAHID

Remerciements.

Ce travail de thèse a été réalisé au sein du Département de Mécanique de l'Université Saad Dahlab de Blida 1.

Selon la tradition, et à travers cette page de remerciements, nous tenons à saluer toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la concrétisation de ce travail.

*On tient à remercier vivement nos promoteurs, le professeur **ALLALI Abderrazak**, et chef du département de mécanique, faculté de technologie **TEMMAR Mustapha**, université de Blida -1- pour avoir dirigé ce travail, et dont l'aide précieuse nous été indispensable sur le plan scientifique et humain.*

Nous voudrions remercier les membres du jury pour leur précieux temps accordé à la lecture et à la critique de ce travail.

Nos très cordiaux remerciements vont aussi à tous nos enseignants pour tous les efforts conjugués tout au long de notre formation.

LAKEHAL IMAD EDDINE.
ABDESSELAMYEN WAHID.

Dédicaces.

Nous avons toujours pensé faire ou offrir quelque chose à nos parents en signe de reconnaissance pour tout ce qu'ils n'ont consenti rien que pour nous voir réussir, et voilà, l'occasion est venue.

A ceux qui nous ont donné la vie, symbole de beauté, et de fierté, de sagesse et de patience.

A nos très chères mères et pères.

A nos frères et nos Sœurs.

A ceux qui sont la source de notre inspiration et de notre courage, à ceux qui nous doivent de l'amour et de la reconnaissance.

A nos nièces et neveux.

A tous les membres de nos familles.

A nos amis, et toutes les personnes qui nous ont connus de près ou de loin. Et spéciales dédicaces pour l'équipe de formation de l'université.

A tous mes amis d'université de SAAD DAHLEB BLIDA surtout le groupe de Construction Mécanique.

**LAKEHAL IMAD EDDINE.
ABDESSELAMYEN WAHID.**

Résumé

L'innovation technologique se fait par la compréhension des phénomènes physiques complexes que l'on rencontre lors de l'exploration des différents domaines scientifiques.

La demande d'énergie électrique ne cesse de croître, alors que les ressources deviennent chères, Il est donc nécessaire d'améliorer les performances de la turbine de manière à réguler les coûts d'investissement. En Algérie, l'énergie électrique est produite, principalement par les turbines (vapeur, gaz ou combiné).

L'équilibrage est une technique pour stabiliser une pièce qui dispose d'un axe de rotation et une opération qui consiste à contrôler et corriger la répartition des masses sur un mobile pour s'assurer que le balourd résiduel se situe dans les limites acceptables. Il existe deux types d'équilibrage : l'équilibrage statique (en l'absence de rotation), et l'équilibrage dynamique (lorsque le mobile tourne sur son axe principal).

Nos travaux consistent en une étude qui contribue à l'équilibre statique et dynamique de la turbine à vapeur A15 situé à la centrale électrique de Hadjret Ennous-Tipaza, à travers la gestion de la maintenance assistée par ordinateur (GMAO), ensuite nous avons étudié la théorie de la dynamique et de la statique du rotor de la turbine à vapeur et effectué une simulation du rotor à l'aide du programme MATLAB et logiciel ANSYS, Et nous avons testé et interprété les résultats obtenus.

Mots-clés : Équilibrage statique, Équilibrage dynamique, Turbine à vapeur, Rotor.

ملخص

يتحقق الابتكار التكنولوجي من خلال فهم الظواهر الفيزيائية المعقدة التي يواجهها المرء عند استكشاف مجالات علمية مختلفة.

يستمر الطلب على الطاقة الكهربائية في النمو، بينما تصبح الموارد باهظة الثمن، لذلك من الضروري تحسين أداء التوربينات بطريقة تنظم تكاليف الاستثمار. تُنتج الطاقة الكهربائية في الجائر، بشكل أساسي عن طريق التوربينات (بخارية أو غازية أو مجتمعة).

الموازنة هي تقنية لثبيت جزء له محور دوران وعملية تتكون من التحكم في توزيع الكتل على جسم متحرك وتصحيحه لضمان أن يكون عدم الاتزان المتبقي ضمن الحدود المقبولة. هناك نوعان من الموازنة: التوازن الثابت (في حالة عدم وجود دوران)، والتوازن الديناميكي (عندما يدور المتحرك على محوره الرئيسي).

يتكون عملنا من دراسة تساهم في التوازن الساكن والديناميكي للتوربينات البخارية A15 الموجودة في محطة توليد الكهرباء بحجرة النص تيبازة، من خلال إدارة الصيانة بمساعدة الكمبيوتر (G.M.A.O)، بعد ذلك درسنا نظرية الديناميك والسكون لدوار التوربين البخاري ثم أجرينا محاكاة للدوار باستخدام البرنامجين MATLAB و ANSYS، وقمنا باختبار وتفسير النتائج التي تم الحصول عليها.

الكلمات المفتاحية: موازنة ثابتة، توازن ديناميكي، توربين بخاري، دوار.

Abstract

Technological innovation is achieved by understanding the complex physical phenomena that one encounters when exploring different scientific fields.

The demand for electrical energy continues to grow, while resources are becoming expensive, it is therefore necessary to improve turbine performance in a way that regulates investment costs. In Algeria, electrical energy is produced, mainly by turbines (steam, gas or combined).

Balancing is a technique for stabilizing a part which has an axis of rotation and an operation which consists in controlling and correcting the distribution of masses on a moving body to ensure that the residual unbalance is within acceptable limits, there are two types of balancing: static balancing (in the absence of rotation), and dynamic balancing (when the mobile turns on its main axis).

Our work consists of a study that contributes to static and dynamic balance of the A15 steam turbine located at the Hadjret ennouss-Tipaza power plant, through the management of computer-assisted maintenance (C.A.M.M), then we studied the theory of steam turbine rotor dynamics and statics and performed a rotor simulation using the MATLAB program and ANSYS software, And we tested and interpreted the results obtained.

Keywords: Static balancing, Dynamic balancing, Steam turbine, Rotor.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	I
DEDICACES	II
RESUME	III
TABLE DES MATIÈRES.....	VI
LISTES DES FIGURES ET DES TABLEAUX.....	X
LISTE DES ABREVIATIONS.....	XIII

Introduction générale

INTRODUCTION GENERALE.....	1
----------------------------	---

CHAPITRE I : Maintenance industrielle d'une turbine à vapeur type A15 (G.M.A.O).

I.1 Introduction :	3
I.2 Présentation de l'entreprise :	3
I.2.1 Groupe SNC-Lavalin :	3
I.2.2 Activités :	3
I.2.3 Historique :	4
I.2.4 Emplacement :	4
I.2.5 Approvisionnement de la centrale :	5
I.3 Etat de l'art en l'équilibrage turbine à vapeur :	5
I.3.1 Ouvrages de base :	5
I.3.2 Publications :	5
I.3.3 Actes des congrès :	6
I.3.4 Nouvelle génération de turbine à vapeur A15 :	7
I.4 Généralités sur les turbines à vapeur :	8
I.4.1 Définition d'une Turbine :	8

I.4.2 Classification des Turbines :.....	9
I.4.3 Turbine à vapeur type A15 :.....	9
I.4.4 Différents types de turbine à vapeur :.....	10
I.4.5 Composition de turbines à vapeur A15	12
I.4.6 Design :.....	13
I.4.7 Chemin de la vapeur :.....	13
I.4.8 Carcasse :.....	14
I.4.9 Diffuseur d'échappement Basse Pression :.....	14
I.4.10 Systèmes de scellement :.....	15
I.4.11 Aubes de turbine à vapeur :.....	15
I.4.12 Roue de la turbine :.....	16
I.5 Avantages des turbines à vapeur :.....	17
I.6 Rotor de turbine à vapeur :.....	18
I.6.1 Conception de rotor :.....	18
I.6.2 Types des Rotors :.....	19
I.7 Généralités sur la gestion de la maintenance assistée par ordinateur :.....	21
I.7.1 Gestion de maintenance assistée par ordinateur :.....	21
I.7.2 Maintenance :.....	27
I.8 Conclusion :.....	31

CHAPITRE II : Théorie de l'équilibre statique et dynamique des rotors.

II.1 Introduction :.....	32
II.2 Définition d'équilibrage d'un rotor :.....	32
II.3 Balourd et équilibrage :.....	33
II.3.1 Types de balourd :.....	35

II.3.2 Causes du balourd :.....	37
II.4 Equilibrage statique des rotors :.....	37
II.5 Qualité d'équilibrage	38
II.6 Préparation et réalisation d'un équilibrage :	39
II.6.1 Machine à équilibrage :.....	40
II.6.2 Technique d'équilibrage statique :.....	42
II.6.3 Préparation de l'opération :	43
II.7 Méthode d'équilibrage :	45
II.7.1 Procédure d'équilibrage :	46
II.7.2 Choix d'une masse d'essai :	49
II.8 Conclusion :.....	55

CHAPITRE III : Simulation et modélisation.

III.1 Généralité :.....	56
III.2 Présentation de l'application :.....	57
III.3 Modélisation et simulation :.....	59
III.3.1 Étapes du programme MATLAB :.....	59
III.3.2 Étapes du logiciel ANSYS :	66
III.4 Conclusion :	74

CHAPITRE IV : Résultat et interprétation.

IV.1 Introduction :.....	75
IV.2 Matériels du travail :	75
IV.3 Résultat et interprétation :.....	76
IV.3.1 Influence des propriétés géométriques de l'arbre sur les fréquences.....	
propres et les vitesses critiques :	77

IV.4 Conclusion :	79
CONCLUSION GÉNÉRALE.....	80
BIBLIOGRAPHIE	81
ANNEXES	83

LISTES DES FIGURES.

Figure I.1 : Design turbine à vapeur de type A15.....	07
Figure I.2. : Turbine à vapeur de type A15.....	07
Figure I.3 : Turbine à plusieurs étages	08
Figure I.4 : Turbine à vapeur	10
Figure I.5 : Schéma des turbines à vapeur à condensation.....	11
Figure I.6 : Schéma des turbines à vapeur à contre-pression	11
Figure I.7 : Schéma de turbine à vapeur à soutirage et condensation.....	12
Figure I.8 : Schéma de turbine à vapeur à soutirage et contre-pression	12
Figure I.9 : Schéma simplifié d'un circuit vapeur.....	13
Figure I.10 : Principes d'aérodynamique du premier étage de la turbine (a) à réaction (b) à action.....	16
Figure I.11 : Dessin d'un étage de rotor d'une turbine.....	17
Figure I.12 : Rotor de la turbine basse pression	18
Figure I.13 : Catégories de base des rotors à arbre élastique	21
Figure I.14 : Exploration arborescente.....	25
Figure I.15 : Equipement.....	25
Figure I.16 : Historique d'un équipement.....	25
Figure I.17 : Création d'une DI.....	26
Figure I.18 : Bon de Travail.....	26
Figure I.19 : Activité(s).....	26
Figure I.20 : Analyses.....	27
Figure I.21 : Maintenance préventive.....	27
Figure II.1 : Machine à équilibrer moderne pour une utilisation universelle	33
Figure II.2 : Modélisation d'un balourd	34
Figure II.3 : Déséquilibre statique	35
Figure II.4 : Déséquilibres de couple	36
Figure II.5 : Déséquilibres dynamiques	36
Figure II.6 : Balancement d'un rotor	38
Figure II.7 : Balourd spécifique résiduel admissible correspondant au degré de qualité d'équilibrage G et à la vitesse nominale n	39
Figure II.8 : Machine à équilibrer horizontale	40

Figure II.9 : Système Affichage d'une machine de type H-04 SCHENCK	42
Figure II.10 : Balance d'équilibrage statique utilisée pour des Rotors Turbomachine	43
Figure II.11 : Procédure de répartition les aubes du rotor d'une turbine	44
Figure II.12 : Spectre de vibrations à la fréquence de rotation de l'arbre.....	46
Figure II.13 : Montage des capteurs	47
Figure II.14 : Principales étapes de la procédure d'équilibrage sur un plan	48
Figure II.15 : Masse d'essai	50
Figure II.16 : Diagramme vectoriel : valeurs mesurées.	53
Figure II.17 : Diagramme vectoriel : valeurs calculées	53
Figure II.18 : Diagramme vectoriel, exemple pratique	54
Figure III.1 : Diagramme de fonctionnement MATLAB	58
Figure III.2 : Interface principale MATLAB	59
Figure III.3 : Modèle de rotor	60
Figure III.4 : Degrés de liberté des éléments	62
Figure III.5 : Interface graphique	63
Figure III.6 : Interface graphique de la case à cocher [3D].....	64
Figure III.7 : Interface graphique pour le sélecteur de numéro de mode	64
Figure III.8 : Interface graphique avec la vitesse de rotation de 1200 tr / min.....	65
Figure III.9 : Calcul du diagramme de Campbell	65
Figure III.10 : Nouvelle superposition de modèle	66
Figure III.11 : Menu principal	66
Figure III.12 : Commande de bar d'outil	67
Figure III.13 : Menu d'option	67
Figure III.14 : Dossier d'enregistrement le projet	67
Figure III.15 : Méthode de schématisation de projet	68
Figure III.16 : Schéma de projet	68
Figure III.17 : Configuration du matériau	70
Figure III.18 : Maillage du modèle	71
Figure III.19 : Raideurs des paliers	71
Figure III.20 : Direction de déformation	72
Figure III.21 : Mode propre 1.....	72
Figure III.22 : Mode propre 2.....	73
Figure III.23 : Total déformation	73
Figure IV.1 : Modèle 3D du rotor	76

Figure IV.2 : Diagramme de Campbell de programme MATLAB	78
Figure IV.3 : Diagramme de Campbell pour les six modèles différents	78
Figure IV.4 : Diagramme de la stabilité pour les six modèles différents	79

LISTES DES TABLEAUX.

Tableau II.1 : Quatre possibilités susceptibles de se produire après la pose de la masse d'essai.....	51
Tableau III.1 : Donnée et dimension de rotor.....	70
Tableau III.2 : Propriétés et statistiques de la barre de référence.....	71
Tableau IV.1 : Caractéristiques de l'ordinateur de simulation.....	75
Tableau IV.2 : Comparaison entre les valeurs des fréquences propres.....	76
Tableau IV.3 : Fréquence propre avec différentes vitesses de rotation.....	77

LISTE DES ABREVIATIONS ET SYMBOLES

ABREVIATIONS :

GMAO	Gestion de maintenance assistée par ordinateur.
HRSG	Heat Recovery Steam Generators.
ASME	American Society of Mechanical Engineers.
ASLE	American Society of Lubrication Engineers.
IGTI	International Gas Turbine Institute.
HP	Haute Pression.
MP	Moyenne Pression.
LP	Low Pressure.
BP	Basse Pression.
TV	Turbines à Vapeur.
BLADIS.net	Logiciel de répartition d'aubes SCHENCK.
ISO	Organisation Internationale de Normalisation.

SYMBOLES :

U	Valeur du Balourd (g.mm).
F	Force de balourd (N).
m	Masse de déséquilibre (kg).
r	Rayon de déséquilibre (m).
ω	Vitesse de rotation (rad/s).
α	Angle (deg).
N	Nombre d'aubes.
M	Moment statique (kg.m).

INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'Algérie produit une puissance électrique d'environ 6600 MW dont 95% provient des centrales électriques, le reste provient des centrales hydroélectriques. La consommation annuelle en énergie électrique est de l'ordre 6%.

Les turbines jouent des rôles très importants dans l'industrie et elles sont utilisées essentiellement pour produire de l'énergie électrique. L'utilisation d'une turbine, comme n'importe quelle machine tournante de puissance doit comporter un programme planifié d'inspections périodiques, la réparation et le remplacement des pièces défectueuses afin d'assurer une fiabilité maximale de la machine.

Les nombreux problèmes d'intervention sont trouvés au niveau des machines tournantes qui ont une relation avec le processus d'équilibrage qui est considéré en ce moment très nécessaire pour la pratique de tous les rotors, que ce soit pour prolonger la durée de vie de la machine, qui impose l'optimisation de l'exploitation et la qualité de productions. L'équilibrage est un processus permettant de contrôler la répartition des masses d'un rotor et d'améliorer celle-ci pour maintenir les forces et les vibrations provoquées par les balourds dans des limites acceptables.

Après la période de stage qui s'est déroulé en février 2020 à la centrale électrique de Hadjret Ennous-Tipaza, que le thème de notre projet de fin d'étude en Master construction mécanique a été défini. Il est principalement lié à la contribution à l'équilibre statique et dynamique de la turbine à vapeur de type A15 pour la centrale visitée. A cet égard, on se demande une étude sur la maintenance industrielle à l'aide du (G.M.A.O), Aussi, que faut-il faire pour améliorer la stabilité de rotor de la turbine à vapeur dans cette centrale électrique, Et d'avoir un impact positif sur la production d'énergie.

Plan du travail :

INTRODUCTION GÉNÉRALE.

CHAPITRE I : Maintenance industrielle d'une turbine à vapeur type A15 (G.M.A.O).

CHAPITRE II : Théorie de l'équilibre statique et dynamique des rotors.

CHAPITRE III : Simulation et modélisation.

CHAPITRE IV : Résultat et interprétation.

CONCLUSION GÉNÉRALE.

CHAPITRE I : Maintenance industrielle d'une turbine à vapeur type A15 (G.M.A.O).

I.1 Introduction :

Avant de commencer à étudier l'équilibrage des turbines qui est au cœur de nos travaux, il convient de présenter brièvement les caractéristiques de turbine à vapeur.

Une turbomachine est une machine tournante qui réalise un transfert d'énergie entre son arbre propre, et un fluide en mouvement.

On peut classer les turbomachines en deux grandes catégories à savoir : leur rôle (la récupération de l'énergie d'un fluide afin d'entraîner mécaniquement une charge) ou de transmettre un fluide en énergie mécanique provenant d'un moteur [1].

Dans le premier cas, ce sont des machines réceptrices comme les turbines à gaz, les turbines hydrauliques, les éoliennes, etc. Alors que dans le second cas, ce sont des machines génératrices parmi lesquelles on retrouve les pompes, les compresseurs et les ventilateurs.

Dans ce chapitre, on fera une présentation générale de la turbine à vapeur A15 de la centrale électrique de Hadjret Ennous-Tipaza, l'état de l'art de cette turbine et généralité sur la gestion de la maintenance assistée par ordinateur.

I.2 Présentation de l'entreprise :

I.2.1 Groupe SNC-Lavalin :

Le groupe est présent dans une centaine de pays, son siège social est à Montréal au Canada. Il se classe parmi les 10 plus grosses firmes du genre par le nombre d'employés au monde. Lavalin est issu de la fusion de SNC et de la Lavalin en 1991. Le groupe SNC-Lavalin est l'un des plus importants groupe d'ingénierie et de construction au monde. C'est un acteur majeur en matière de propriété d'infrastructures et de services d'exploitation et d'entretien. SNC-Lavalin possède des bureaux dans tout le Canada et dans plus de 35 autres pays [1].

I.2.2 Activités :

SNC-Lavalin fournit la main-d'œuvre pour concevoir et gérer différents ouvrages demandant une expertise en génie civil ou en énergie.

CHAPITRE I : Maintenance industrielle d'une turbine à vapeur type A15 (G.M.A.O).

Elle fournit des services d'ingénierie, d'approvisionnement, de construction, de gestion de projet et de financement de projet dans différents secteurs d'activité économiques.

En 2008, elle est décrite comme la plus grande société d'ingénierie au monde. Elle compte à ce moment 4500 employés au Québec et de 16000 dans le monde, dont 1052 ingénieurs québécois.

I.2.3 Historique :

La création de groupe SNC-LavalinInc remonte à 1911, lorsque Arthur Surveyer fonde un petit cabinet d'ingénierie-conseils. Au fil des ans, la firme connaît une croissance constante et se taille une réputation d'excellence au Canada dans les secteurs du génie civil et de l'énergie, en 1937 le fondateur s'associe à Emil Nenniger et à Georges Chevert. En 1947 l'entreprise est rebaptisé Surveyer, Nenniger et Chenevert Inc.

I.2.4 Emplacement :

La centrale à cycle combiné de Hadjret Ennous est située dans la wilaya de Tipaza, à environ 12 Km à l'ouest de Cherchell, elle est limitée au sud par la route nationale RN 11 et au nord par la mer Méditerranée. Son site possède une superficie d'environ 35 hectares.

La centrale est constituée de plusieurs bâtiments dont trois principaux, couvrant chacun une superficie d'environ 2150 m². Chaque bâtiment abrite principalement :

- Turbine à gaz et une turbine à vapeur.
- Il est muni de ponts roulants et de monorails servant à l'entretien du groupe turbo-alternateur.
- Chaudière de récupération (HRSG).
- Systèmes de refroidissement situés à l'extérieur.

Les autres bâtiments de la centrale abritèrent la cantine, les unités pour le traitement d'eau, le poste de départ, la salle de contrôle. Les équipements d'entretien et les entrepôts.

Le poste de départ est situé au sud des trois îlots de production d'énergie.

CHAPITRE I : Maintenance industrielle d'une turbine à vapeur type A15 (G.M.A.O).

La centrale est munie d'une prise d'eau de mer et d'une station de pompage.

L'eau pompée servira principalement à refroidir la vapeur du condenseur, ainsi que les auxiliaires de la centrale, les eaux refroidissement seront rejetées dans la mer Méditerranée par trois émissaires.

I.2.5 Approvisionnement de la centrale :

Le combustible principal de la centrale est le gaz naturel, il est livré au site par l'entreprise Sonelgaz.

Le combustible de secours est le gasoil, l'exploitation de la centrale nécessite approximativement 2000 millions de mètres cubes de gaz naturel par année.

I.3 Etat de l'art en l'équilibrage turbine à vapeur :

I.3.1 Ouvrages de base :

Quelques ouvrages apportant une contribution essentielle à la science de l'équilibrage des turbines à vapeur (Selon l'ordre de publication) :

- Turbine à Vapeur Cycle Combiné de Hadjret en Nouss de GE Energy Products – Europe en 2008.
- Cours Thermodynamique applique au système énergétique, Université Numérique Thématique en Sciences de l'Ingénieur et Technologie, Mines Paris 2011.
- Hatto Schneide, Technique d'équilibrage, Traduction de les 6 éditions allemandes, Springer-Verlag France, Paris 2006, p 124- 07-32-305 et198.

I.3.2 Publications :

Les articles concernant l'équilibrage des turbines à vapeur sont le plus souvent publiés dans les transactions de l'ASME (American Society of Mechanical Engineers) et general electric comme le Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, ceux relatifs à la lubrification dans celles de l'ASME – Journal of Tribology, Journal of Sound and Vibrations – et de l'ASLE (American Society of Lubrication Engineers).

CHAPITRE I : Maintenance industrielle d'une turbine à vapeur type A15 (G.M.A.O).

Néanmoins, il ne faut pas oublier d'autres revues qui consacrent certains numéros à ces phénoménologies comme la Revue Pétrole et Technique, la Houille Blanche, etc.

Enfin la collection des Techniques de l'Ingénieur, dans la série BM5 du Génie Mécanique, consacre plusieurs articles à ce domaine.

I.3.3 Actes des congrès :

Un certain nombre de congrès internationaux consacrent des sessions spécifiques aux vibrations des machines tournantes. On citera, parmi les principaux :

- Congrès Turbo Expo organisés par l'ASME et l'ASME IGTI (International Gas Turbine Institute) qui se tiennent tous les ans alternativement en Amérique et en Europe.
- Congrès européens de l'IME (Institution of Mechanical Engineers) – organisme anglais – European Congress of Fluid Machinery qui se tiennent tous les ans à La Haye (Pays Bas).
- Conférences internationales sur les vibrations des machines tournantes organisées tous les quatre ans au Royaume Uni par l'IME.
- Conférences internationales sur la dynamique de rotor organisées tous les quatre ans, en alternance avec celles de l'alinéa précédent, par le Comité scientifique pour la dynamique de rotor de l'IFTMM (International Federation for the promotion of the Mechanics and Machines Science).
- Turbomachinery Symposium organisé tous les ans à Houston par le Turbomachinery Laboratory de l'université du Texas A&M.

CHAPITRE I : Maintenance industrielle d'une turbine à vapeur type A15 (G.M.A.O).

I.3.4 Nouvelle génération de turbine à vapeur A15 :

- ❖ HP de réaction élevée.
- ❖ Impulse IP / LP (similaire à la conception A10).
- ❖ Fixé chez LP.
- ❖ Coulissant Mid Standard.
- ❖ Standard avant fixe.
- ❖ Bras d'obus HP coulissants.
- ❖ Expansion différentielle limitée.
- ❖ Nouvelles limites de stress.

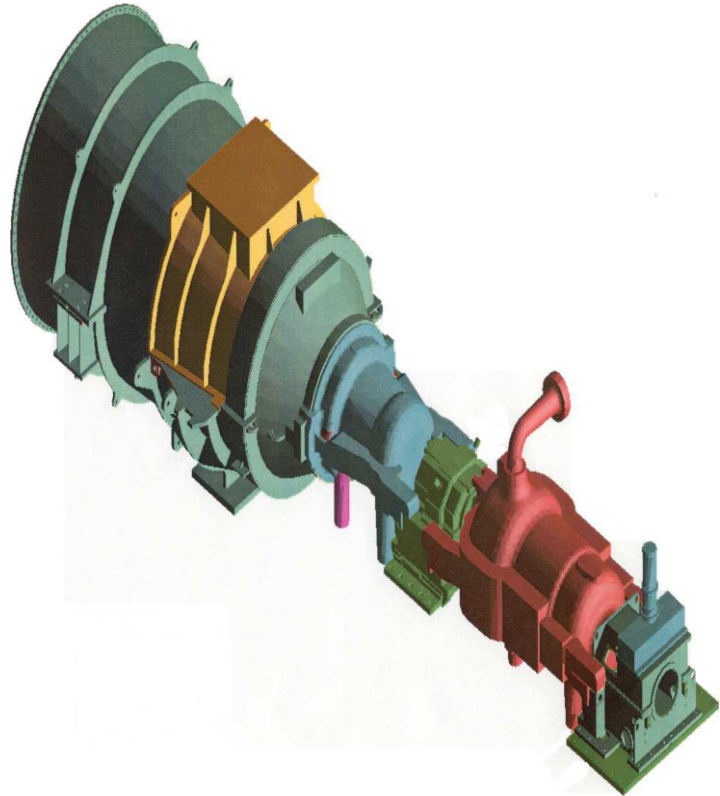


Figure I-1 : Design turbine à vapeur de type A15.

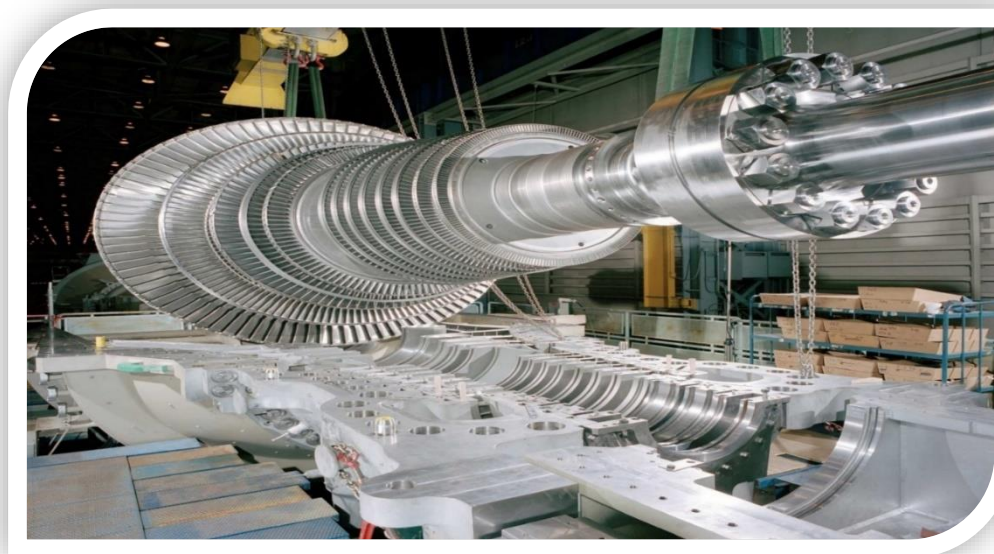


Figure I-2 : Turbine à vapeur de type A15.

I.4 Généralités sur les turbines à vapeur :

I.4.1 Définition d'une Turbine :

Toutes les turbines comportent en principe une roue à la périphérie de laquelle sont disposées des palettes ou aubes, sur ces aubes vient buter un jet de fluide guidé par une canalisation fixe (Stator) [2].

Une turbine est un dispositif rotatif destiné à utiliser l'énergie cinétique d'un fluide liquide (comme l'eau) ou gazeux (vapeur, air, gaz de combustion) pour faire tourner un arbre supportant les aubes de la turbine. Les composants principaux d'une turbine sont le rotor qui tourne et le distributeur qui est lui en position fixe. L'ensemble constitue un étage. Souvent, la quantité d'énergie qui doit être prélevée sur le fluide est tellement grande qu'un étage unique ne suffit pas pour le faire.

Plusieurs étages sont alors montés en série pour former une turbine à plusieurs étages (**Figure 1-1**). C'est le cas dans la pratique lorsque les différentiels de pression deviennent trop élevés pour un seul étage.



Figure I-3 : Turbine à plusieurs étages [3].

I.4.2 Classification des Turbines :

Les turbines peuvent être classées selon les caractéristiques suivantes :

Milieu de travail :

- Turbines hydrauliques.
- Turbines à vapeur.
- Turbines à gaz.
- Turbines éoliennes.

Principe de fonctionnement :

- Turbines à action : turbines à impulsion, turbines à jet libre, turbines à flux croisé.
- Turbines à réaction.

Direction d'écoulement :

- Turbines axiales.
- Turbines radiales.
- Turbines diagonales.

Dans notre pays (Algérie), les turbines sont utilisées essentiellement pour produire l'énergie électrique dans les centrales, ainsi elles sont utilisées dans le domaine de transport et de la réinjection du gaz, ce qui donne à la turbine une grande importance dans l'économie nationale [4].

Ci-dessous, nous avons choisi la turbine à vapeur car c'est l'une des turbines les plus utilisées en Algérie.

I.4.3 Turbine à vapeur type A15 :

La turbine à vapeur est un des matériels stratégiques des installations de production d'énergie électrique. Son indisponibilité entraîne la perte de la production d'énergie, contrairement à d'autres matériels (pompes alimentaires, pompes de circulation assistée, ventilateurs...etc.) dont la redondance permet de poursuivre l'exploitation des installations soit à pleine charge, soit éventuellement à charge partielle [5].

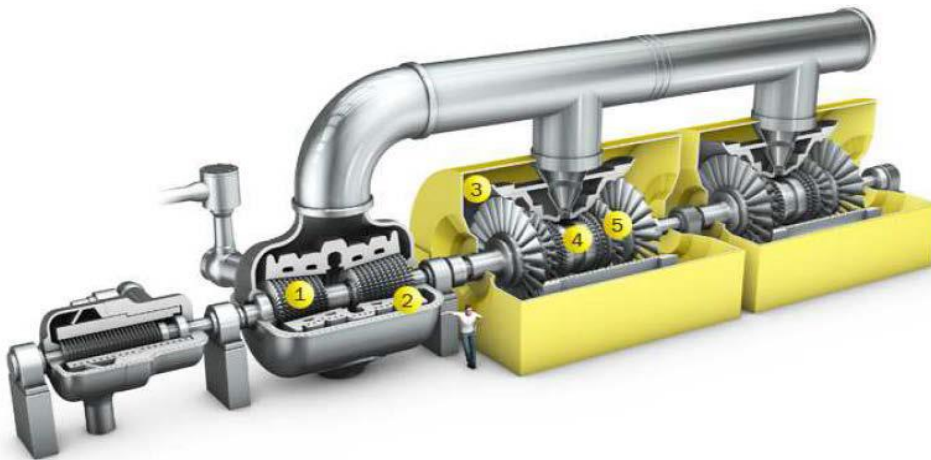


Figure I-4 : Turbine à vapeur [6].

1. Aubes de turbine.
2. Carters de turbine.
3. Carters de turbine.
4. Arbre de turbine à vapeur.
5. Diaphragme de turbine à vapeur.

I.4.4 Différents types de turbine à vapeur :

Les turbines à vapeur sont classées selon les conditions de la vapeur à l'évacuation, soit des types à condensation ou sans condensation, en fonction de leur utilisation, on distingue quatre grandes catégories de turbines à vapeur :

- **Turbines à condensation :** Dans lesquelles la vapeur est complètement détendue jusqu'à une pression voisine de 0,02 à 0,04 bar, puis liquéfiée dans un condenseur refroidi soit par l'air ambiant, soit par de l'eau (**Figure I-5**), ce type de turbine est surtout utilisé dans les installations de production de force motrice [7].

- **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 (**Figure I-6**).

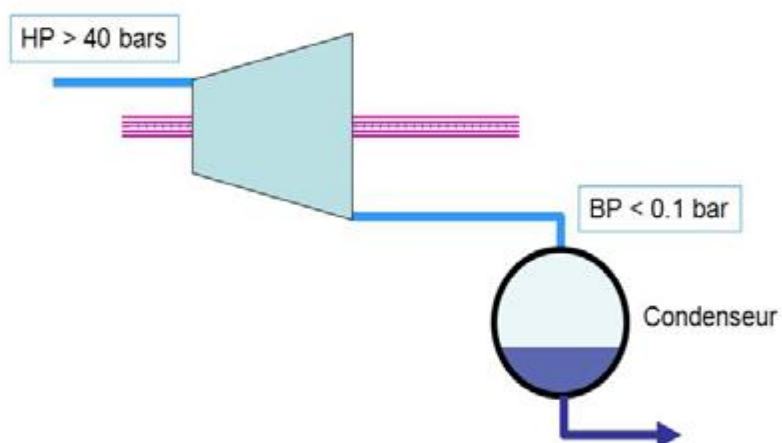


Figure I-5 : Schéma des turbines à vapeur à condensation.

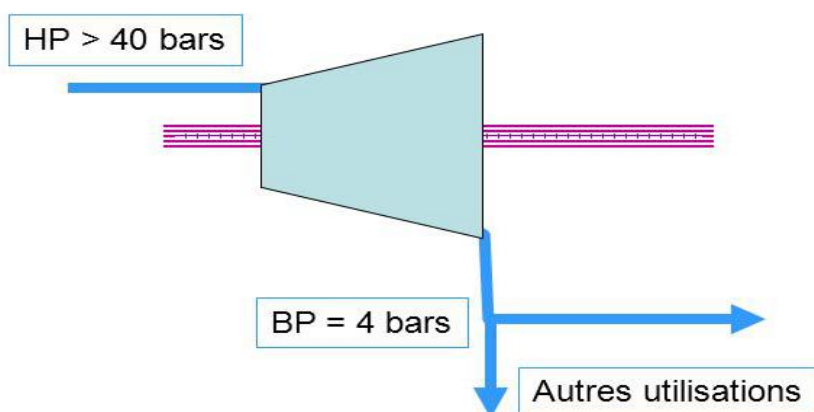


Figure I-6 : Schéma des turbines à vapeur à contre-pression.

- **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 détendue dans un corps basse pression, comme dans une turbine à condensation (**figure I-7**).

CHAPITRE I : Maintenance industrielle d'une turbine à vapeur type A15 (G.M.A.O).

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.

- **Turbines à soutirage et contre-pression** : Dont la vapeur s'échappe à basse pression dans un réseau BP au lieu d'être condensée (**figure I-8**).

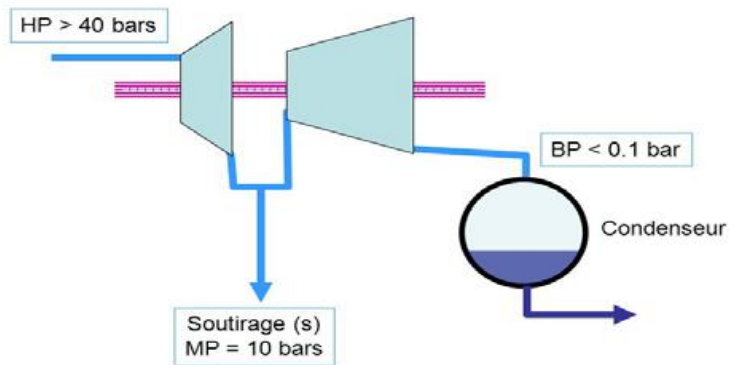


Figure I-7 : Schéma de turbine à vapeur à soutirage et condensation.

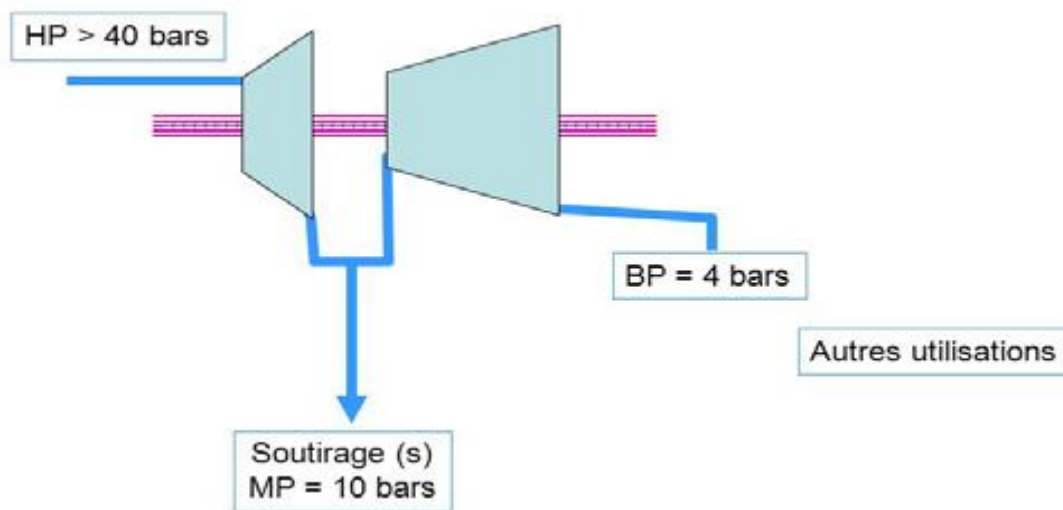


Figure I-8 : Schéma de turbine à vapeur à soutirage et contre-pression.

I.4.5 Composition de turbines à vapeur A15 : [8]

- Section HP : 30 étapes de réaction.
- Section MP : 11 étapes d'action.
- Section BP : 6 étapes d'action réaction.

CHAPITRE I : Maintenance industrielle d'une turbine à vapeur type A15 (G.M.A.O).

Conditions normales à l'entrée HP : 565 °C à 147 BAR.

Génération de puissance nominale du cycle combiné (CC) : 423 MW (aux conditions ISO).

I.4.6 Design :

- Simple flux.
- Resurchauffe.
- Vanne vapeur HP combinée (stop et contrôle).
- 2 vannes vapeur IP combinées (valve interceptrices).
- 2 vannes BP (vannes papillon stop et contrôle).

I.4.7 Chemin de la vapeur :

- Vapeur HP passe la vanne HP et entre dans le corps HP et se détend jusqu'à la sortie de la TV HP.
- Vapeur retourne à la chaudière pour la resurchauffe.
- Vapeur resurchauffée passe les vannes interceptrices MP et entre dans la TV MP-BP.
- Arrivée de vapeur BP entre dans la TV MP-BP, au niveau BP.

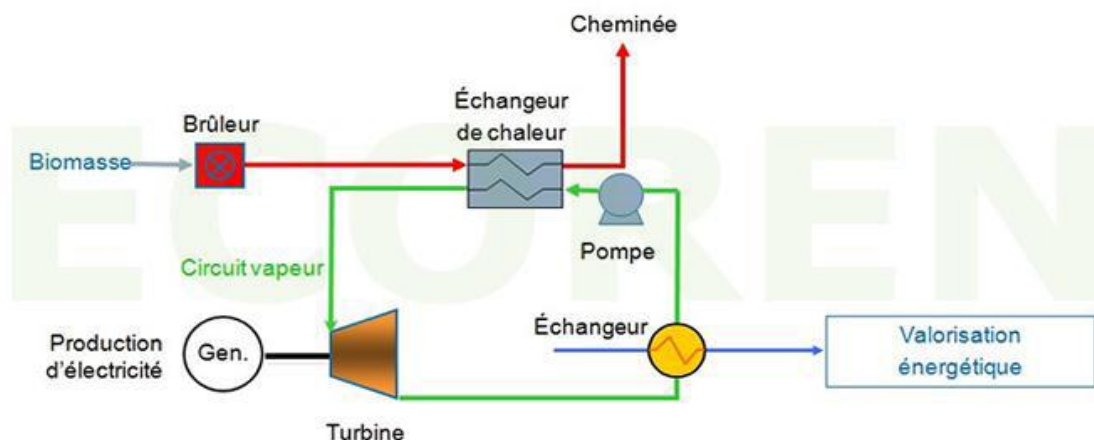


Figure I-9 : Schéma simplifié d'un circuit vapeur.

CHAPITRE I : Maintenance industrielle d'une turbine à vapeur type A15 (G.M.A.O).

I.4.8 Carcasse :

Les carcasses sont utilisées pour les corps HP et MP, Elles possèdent un plan de joint horizontal et sont unies par boulons.

Les aubes stationnaires de la turbine HP sont montées sur un porte-aubes en fonte, le montage des porte-aubes tient compte des dilatations thermiques.

La carcasse HP s'appuie sur la partie fixe avec 4 bras ajustés symétriquement, le blocage dans la direction latérale s'effectue au moyen de contre-clavettes.

Les sections MP et BP par une bride verticale boulonnée, la section MP s'appuie sur le Mid- standard, la section BP s'appuie directement sur le massif de béton.

Le design de la carcasse d'acier permet une dilatation libre dans toutes les directions des parties fixes et mobiles, cela permet une dilatation également distribuée autour de l'axe de l'unité où le maintien des jeux fonctionnels est critique pour le rotor, durant les démarrages ou les changements brusques de charge (changement de température TV), les carcasses peuvent se dilater dans les directions axiale et radiale alors que les diaphragmes se maintiendront concentriques à l'axe de la machine.

I.4.9 Diffuseur d'échappement Basse Pression :

La trajectoire de la vapeur BP passe par le diffuseur d'échappement, lui-même fait de plaques d'acier au carbone, ces plaques sont découpées, formées et soudées ensemble pour former le diffuseur.

Le diffuseur doit laisser passer la vapeur et soutenir le dernier palier avec un minimum de déflexion, sceller le volume d'échappement (fuites) et résister à la pression de l'atmosphère extérieure (condenseur sous vide).

Un diaphragme de sécurité monté sur le diffuseur permet de protéger le condenseur, le diffuseur et la TV contre une soudaine surpression.

I.4.10 Systèmes de scellement :

Des labyrinthes métalliques plaqués sur l'arbre sont utilisés pour sceller la turbine à vapeur et empêcher ainsi toute fuite de vapeur HP vers l'extérieur ou d'entrée d'air de l'extérieur vers l'intérieur dans les parties sous vide.

Les dents de labyrinthe sont conçues pour assurer une protection maximale contre les fuites et les pertes d'énergie résultantes.

I.4.11 Aubes de turbine à vapeur :

➤ Aubes fixes (Les aubes du stator) :

Les aubages fixes des sections MP et BP sont fixés sur des plaques planes semi-circulaires.

Les couronnes fixes sont faites à partir d'acier faiblement allié, convenant aux températures d'opération, Les aubages fixes sont faits d'acier au chrome (Cr12).

Les aubes de stator sont portées par le carter du stator et sont réglables en position autour de leurs axes pour optimiser l'écoulement de fluide, l'angle d'attaque des aubes est contrôlé en fonction des conditions de fonctionnement par un système d'asservissement qui commande le déplacement d'une couronne rotative.

Les aubes de stator peuvent être fixées directement sur le carter du compresseur ou par un anneau de retenue qui est fixé sur le carter de compresseur [12].

➤ Aubes mobiles (Les aubes du rotor) :

Fruit d'un design abouti et d'un choix rigoureux de matériaux, les aubes mobiles sont faites pour résister à la corrosion et à l'érosion de la vapeur.

Les aubes sont en acier allié forgé, Une queue d'aronde (ou pied de sapin) est ensuite usinée pour permettre leur fixation sur les roues du rotor.

Chaque étage de turbine axiale comporte une rangée d'aubages fixes ou distributeur destiné à créer un moment cinétique et une roue mobile munie d'ailettes. La fonction de la roue mobile est d'annuler le moment cinétique incident, ce qui entraîne la création d'un couple sur l'arbre de la turbine.

CHAPITRE I : Maintenance industrielle d'une turbine à vapeur type A15 (G.M.A.O).

Les aubages de la roue mobile sont de deux types : soit à action, soit à réaction, dans le premier cas, la pression reste sensiblement constante à la traversée de la roue mobile, et la déviation des aubages est importante (**Figure I-10**) [13].

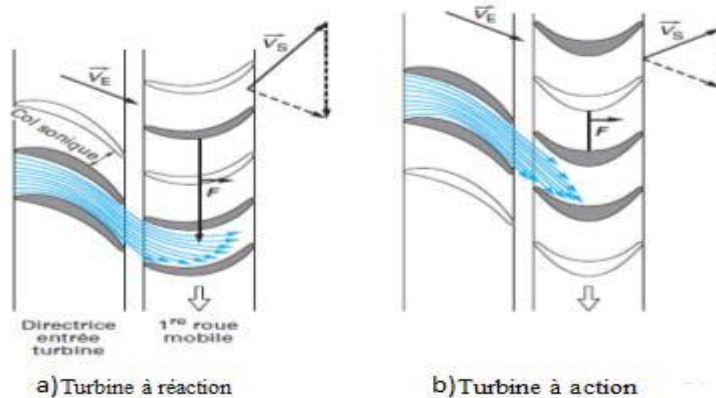


Figure I-10 : Principes d'aérodynamique du premier étage de la turbine (a) à réaction (b) à action.

La poussée axiale sur l'arbre est alors faible, cette configuration est réservée aux coupes de pied des ailettes mobiles. La seconde disposition, qui donne une baisse de pression dans la roue, se rencontre sur les coupes de tête des aubages.

I.4.12 Roue de la turbine :

La transformation d'énergie dépend de tous ces éléments, mais à des degrés différents, la roue motrice en est l'élément principal l'étude de son aubage est centré sur le problème de cette transformation d'énergie, opération qui doit s'effectuer dans les meilleures conditions possibles. La connaissance de certaine caractéristique des éléments contigus à la roue motrice, soit le distributeur et le diffuseur, la norme ISO 1940-1 définie la roue motrice de turbine un ensemble rotatif de l'étage de turbine comprenant le disque et les ailettes.

La roue est constituée d'un disque à la périphérie duquel on trouve les pales, disque est soit solidaire de l'arbre, soit monté sur celui-ci par un accouplement (**Figure 1-11**), Pour limiter la conduction de température, ses faces avant et arrière sont refroidies par circulation d'air, il

CHAPITRE I : Maintenance industrielle d'une turbine à vapeur type A15 (G.M.A.O).

comporte en outre des masses ou des cordons permettant l'équilibrage, un étage de turbine est constitué d'un aubage fixe distributeur ou stator, suivi d'un aubage mobile ou rotor.

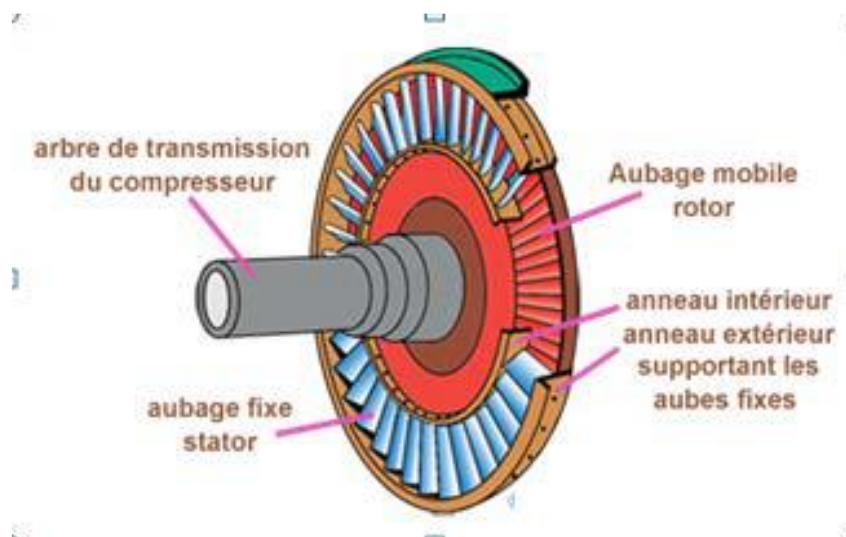


Figure I-11 : Dessin d'un étage de rotor d'une turbine.

I.5 Avantages des turbines à vapeur :

Lorsqu'une usine est alimentée en vapeur, l'installation de la turbine à vapeur peut être plus économique que celle de gros moteurs électriques ou de turbines à gaz.

La puissance de sortie des turbines à vapeur est plus élevée que celle des turbines à gaz de taille et de consommation énergétique similaires.

Des alternateurs électriques entraînés par turbine peuvent être utilisés pour fournir une partie de la puissance électrique d'une usine de procédés pendant les charges de pointe et fournir de la puissance à la compagnie d'électricité à d'autres moments.

La turbine et les générateurs de vapeur fonctionnent ainsi à leur maximum, de plus, la rentabilité du projet devient intéressante si les taux de l'énergie primaire sont appropriés et qu'il y a possibilité de vendre la puissance de réserve.

Il existe une vaste gamme de turbine à vapeur ; certains modèles sont dotés d'arbre communs et de pompes pour répondre à des exigences industrielles et électriques.

I.6 Rotor de turbine à vapeur :

Le terme rotor est utilisé dans plusieurs domaines, le plus souvent il désigne la partie en rotation d'une machine, mécanique ou électrique, qui interagit avec la partie fixe appelée le stator, cependant le terme se retrouve dans divers autres concepts de physique.

Le rotor c'est un corps sans ses propres tourillons ne devient un rotor que lorsque des tourillons lui sont fixés par l'intermédiaire de pièces supplémentaires (un corps en forme de disque avec un alésage permettant d'y faire passer un arbre).

La norme ISO définit le rotor de turbine, c'est un ensemble rotatif de la turbine contenant tous les éléments rotatifs de la turbine [9].

Le rotor est usiné dans la masse (acier allié forgé), les roues sont spécialement usinées pour accueillir les aubes et résister aux efforts (centrifuges et turbinage) appliqués sur les dites aubes lors de l'opération de la machine.

Des anneaux d'étanchéité sont installés en bout d'aubes pour éviter les fuites.



Figure I-12 : Rotor de la turbine basse pression.

I.6.1 Conception de rotor :

Une turbomachine ne comportant qu'un seul rotor est dite à simple étage ou encore monocellulaire, les turbine comportant plusieurs étages sont également appelées multicellulaires, le rotor monobloc ou intégral, en lequel les roues et l'axe sont formés d'une pièce forgée de simple-morceau [10].

I.6.2 Types des Rotors :

Un système de rotor peut être constitué de disques et d'aubages de différentes formes, de différents diamètres des arbres et des paliers situés dans des positions différentes, dans l'analyse des vibrations du système complexe du rotor sont simplifié et un modèle mathématique approprié est utilisé.

Dans le processus de modélisation, nous devons savoir quels paramètres sont importants pour le système, les rotors des machines tournantes sont classés en fonction de leurs caractéristiques, comme suit :

➤ Rotor rigide :

Si la déformation de l'arbre de rotation est négligeable dans la plage de vitesse de fonctionnement, il est appelé un rotor rigide.

➤ Rotor flexible :

Un rotor est généralement considéré comme étant souple ou flexible quand il fonctionne à proximité ou au-dessus de sa fréquence naturelle (vitesse critique). La règle de base est de considérer un rotor flexible s'il fonctionne à 70% de la 1ère critique ou plus rapide, si l'arbre commence à se déformer sensiblement au début de la plage des vitesses de fonctionnement, il est appelé un rotor flexible, la déformation la plus élevée d'un rotor est en général au voisinage de la vitesse critique [11].

Les machines typiques qui contiennent les rotors flexibles sont turbines à vapeur et à gaz, pompes centrifuges à plusieurs étages, compresseurs, et roulements de papier, donc la plage de la vitesse de fonctionnement par rapport aux vitesses critiques détermine si le rotor est rigide ou flexible (le rapport entre la vitesse de la rotation du rotor et de sa fréquence normale).

CHAPITRE I : Maintenance industrielle d'une turbine à vapeur type A15 (G.M.A.O).

Cinq catégories de base présentant des caractéristiques spécifiques permettent de décrire les comportements principaux des rotors à arbre élastique pour l'équilibrage, (**Figure I-13**).

- **Arbre élastique** : arbre forgée de simple-morceau, sans balourd (**Figure I-13a**).
- **Disque rigide** : C'est le montage du disque en position opérationnelle qui va être essentiel, ou plus précisément comment il est positionné par rapport à l'axe de l'arbre (**Figure I-13b**).
- **Tronçon rigide** : des tronçons rigides peuvent en raison de leur longueur présenter des moments de balourd. En ce qui concerne l'équilibrage, ils se comportent alors comme des disques avec un battement axial (**Figure I-13c**).
- **Cylindre à arbre élastique** : les cylindres, de par leur construction (tube), présentent une masse et une rigidité régulièrement répartis (**Figure I-13d**).
- **Rotor intégral** : un rotor de ce genre est la plupart du temps composé de plusieurs pièces, mais ne peut pas être démonté pour l'équilibrage (**Figure I-13e**).

La combinaison de ces catégories permet de reconstituer tout type de rotor envisageable. Un disque ou un tronçon rigide (**Figure I-13b et c**) doit être monté sur un arbre élastique (**Figure I-13a**), sinon il ne s'agit pas d'un rotor à arbre élastique.

Le cylindre élastique (**Figure I-13d**) et le rotor intégral (**Figure I-13e**) sont intrinsèquement « à arbre élastique », mais ils peuvent être équipés en plus d'éléments rigides (disques et tronçons).

Théoriquement, tout rotor à arbre élastique peut être équilibré à haute vitesse grâce à la procédure d'équilibrage pour différentes vitesses, les modes de flexion sont utilisés méthodiquement pour la mesure de la répartition des balourds et pour la correction [11].

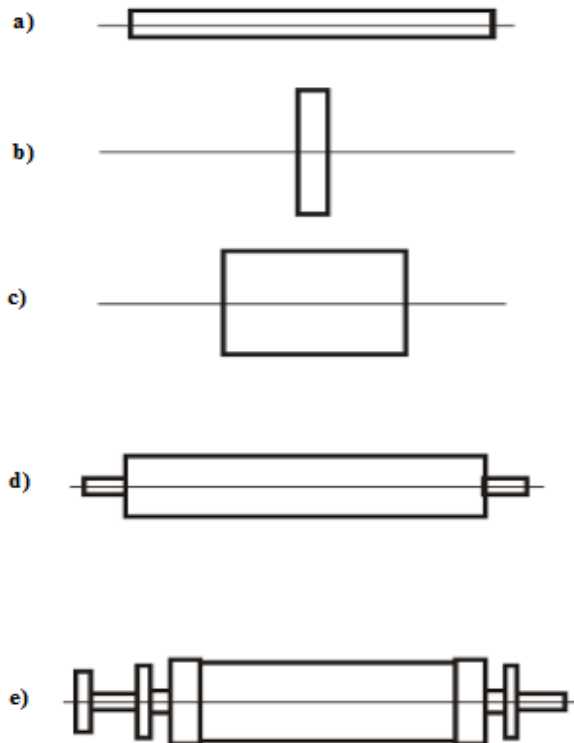


Figure I-13 : Catégories de base des rotors à arbre élastique [11].

I.7 Généralités sur la gestion de la maintenance assistée par ordinateur :

I.7.1 Gestion de maintenance assistée par ordinateur :

La gestion de maintenance assistée par ordinateur (souvent abrégée en GMAO) est une méthode de gestion assistée d'un logiciel destiné aux services de maintenance d'une entreprise afin de l'aider dans ses activités.

🚦 Fonctionnalités d'une GMAO :

GMAO vise en premier lieu à assister les services maintenance des entreprises dans leurs missions, un service de maintenance, selon la définition de l'AFNOR, cherche à maintenir ou à rétablir un bien (équipement) dans un état spécifié afin que celui-ci soit en mesure d'assurer un service déterminé.

CHAPITRE I : Maintenance industrielle d'une turbine à vapeur type A15 (G.M.A.O).

Une GMAO peut également être utile dans d'autres services de l'entreprise, comme la production ou l'exploitation (afin de fournir des informations sur l'état des équipements), ainsi que la direction financière ou générale de l'entreprise, en fournissant des indicateurs facilitant les prises de décisions en matière de renouvellement de parc, par exemple.

Ainsi, les fonctions les plus courantes de ces progiciels sont :

- Gestion des équipements : inventaire des équipements, localisation, gestion d'information dédiée par type d'équipement (production, bâtiments, véhicules, réseaux, ordinateurs).
- Gestion de la maintenance : corrective (avec ordre de travaux, bon de travaux, ou ordre de maintenance), préventive (systématique, conditionnelle, prévisionnelle), ce module comporte souvent des fonctionnalités ouvertes à des utilisateurs au-delà du service de maintenance, comme une gestion des demandes d'intervention , permettant à toute personne autorisée de l'entreprise de signaler une anomalie devant être prise en considération par la maintenance.
- Gestion de la mise en sécurité des installations pour les travaux de maintenance : consignation, centralisation, autorisation de sécurité, déconsignation pour permettre le verrouillage optimal d'une installation pendant des opérations de maintenance.
- Gestion des stocks : magasins, quantités minimum ou maximum de réapprovisionnement, analyse ABC, listes de sélection (*pick-lists*), référencement et recherche, articles de rechange, catalogue fournisseurs.
- Gestion des achats : de pièces détachées ou de services (sous-traitance, forfait ou régie), cycle devis, demande d'achat, commande, réception et retour fournisseur, facturation.
- Gestion du personnel et le planning : activités, métiers, planning de charge, prévisionnel, pointage des heures.
- Gestion des coûts et budget : de main-d'œuvre, de stocks, d'achat, de location de matériel, préparation des budgets, suivi périodique, rapports d'écart.
- Indicateurs clés de performance (key performance indicators) : cockpit de pilotage ou tableau de bord pour le manager (requêtes de base de données concernant des statistiques, des alertes).

CHAPITRE I : Maintenance industrielle d'une turbine à vapeur type A15 (G.M.A.O).

D'autres fonctionnalités existent : gestion de l'inspection, métrologie, normes (transport, VRM), code-barres, lien avec un SIG, matériel mobile (PDA, pocket PC), télésurveillance (analyse vibratoire, infra-rouge).

De plus, la GMAO est généralement la seule application de l'entreprise ayant une description complète et technique de l'ensemble des équipements de celle-ci. Ce constat a amené progressivement certaines GMAO à proposer des fonctionnalités s'appuyant sur cette connaissance des équipements, mais sortant du cadre de la maintenance au sens strict.

On peut citer par exemple le suivi de certaines réglementations (ATEX dans l'industrie, contrôle technique de véhicule, matériovigilance dans les hôpitaux...), ou la gestion de certains processus métier liés aux équipements (suivi des consommations dans les transports, gestion des plans dans le bâtiment...), l'ajout de ces fonctionnalités a amené les éditeurs à parler de plus en plus de logiciels de gestion des biens d'équipement (asset management) pour souligner que leurs applications avaient vocation à être utilisées bien au-delà du service de maintenance.

OptiMaint :

Position d'OptiMaint sur le marché :

- OptiMaint est l'ALTERNATIVE entre une solution de GMAO complexe, coûteuse et longue à mettre en place et une solution avec des fonctionnalités trop simples et limitées.
- OptiMaint s'adapte aux besoins particuliers de chaque client quel que soit son métier.
- OptiMaint est fourni en standard avec toutes ses fonctionnalités.

Cible d'OptiMaint :

OptiMaint a été conçu avec des responsables de maintenance pour couvrir les besoins concrets d'une petite, moyenne ou grande structure dans tous les secteurs d'activité.

Il est multisectoriel :

- Industrie.
- Services et sous-traitance.

CHAPITRE I : Maintenance industrielle d'une turbine à vapeur type A15 (G.M.A.O).

- Pharmaceutique et médical.
- Transport.
- Collectivités locales.
- Etc...

Fonctionnalités d'OptiMaint :

La GMAO OptiMaint permet :

- **GESTION DU PATRIMOINE** : Organiser, suivre et analyser tous les actifs d'une structure.
- **GESTION DES INTERVENTIONS** : Gérer la maintenance curative, préventive et conditionnelle.
- **GESTION DES ACHATS** : Gérer le cycle complet des achats de la demande de prix jusqu'à la facture fournisseur.
- **GESTION DES STOCKS** : Gérer tous les mouvements de stock (réceptions/sorties...) ainsi que les inventaires.
- **GESTION DES BUDGETS** : Définir les budgets annuels pour une affectation automatique des coûts.
- **GESTION DES PROJETS D'INVESTISSEMENT** : Gérer les projets d'investissement.

Gestion du Patrimoine :

- Organisez vos équipements (analytiquement, géographiquement, etc...).
- Centralisez toutes les informations (historique, documents, plannings, etc...).
- Analysez et prenez des décisions.

CHAPITRE I : Maintenance industrielle d'une turbine à vapeur type A15 (G.M.A.O).

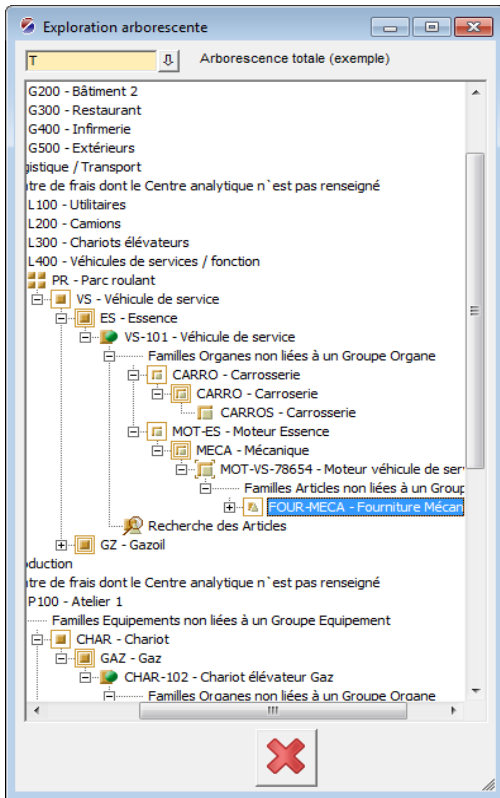


Figure I-14 : Exploration arborescente.



Figure I-15 : Equipement.

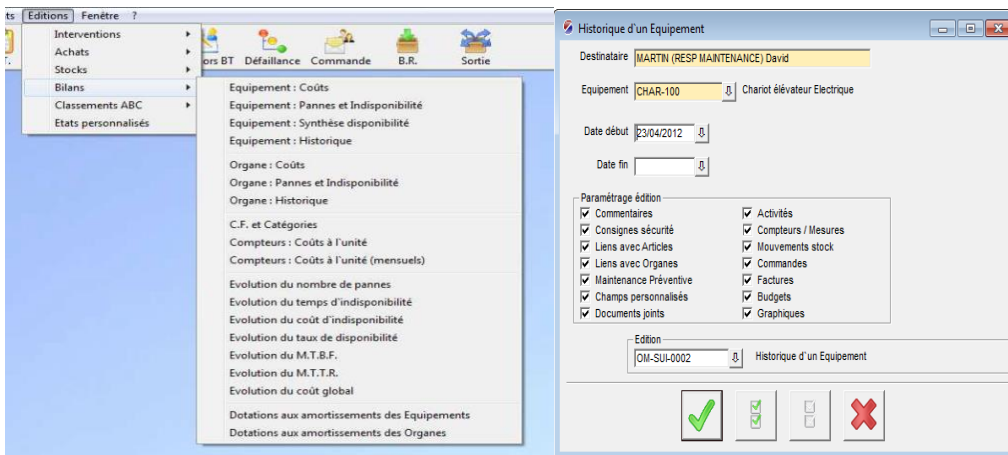


Figure I-16 : Historique d'un équipement.

CHAPITRE I : Maintenance industrielle d'une turbine à vapeur type A15 (G.M.A.O).

Gestion des Interventions :

- Suivi des Demandes d'Interventions (ex : de la production au département de la maintenance).
- Organisez les maintenances curatives.

D.I. 24 Créée

Signatures Activités Autres demandes Histo. Destinataires

Général Compléments Commentaires Réponse Détail situations

Emetteur 100 MARTIN David
Destinataire 100 MARTIN David
Date souhaitée 12/06/2009 Début incident 12/06/2009 10:28 Fin intervention
Rubrique
Priorité
C.F. 300 Chariots élévateurs
Equipement CHAR-100 Chariot élévateur Electrique Etat 30 Arrêt
Organe
Symptôme DEM Ne démarre plus
Localisation
Observation Ne démarre plus

Validation

Création 12/06/2009 10:28
Modification 12/06/2009 10:28

Figure I-17 : Création d'une DI.

B.T. 25 Edité Très Haute Criticité

Articles Intervenant/Dia Mvts Equ./Org

Général Compléments Commentaires / Doc. Mode opératoire Activités Achats

Rubrique 100 Réparation - Correctif
Equipement CONV-101 Convoyeur à Rouleaux
Etat 10 En service
Equipement Organe
Etat Organe
Symptôme CAS Casse
Priorité 1 Très urgent
Emetteur 100 MARTIN David
Destinataire 120 ROSSI Luka
Intervenant principal
Fournisseur
Gamme
Projet
Contrat
Statut

Observation Galet cassé

Création 13/06/2009 12:13
Modification 13/06/2009 12:13
DMA

Figure I-18 : Bon de Travail.

Activité sur B.T.

Activité 73

Général Compléments Commentaires Doc. joints Mvts stock

B.T. 31 Clôture B.T.
Equipement CHAR-100 Chariot élévateur Electrique
C.F. 300 Chariots élévateurs
Intervenant 100 MARTIN David C.F. Interv.
Organe

Date Heure
Début 23/04/2013 16:28 Temps passé 1,00 heure(s)
Fin 23/04/2013 17:28 Temps indisponibilité

Observation

Création 23/04/2013 16:28
Modification 23/04/2013 16:28

Figure I-19 : Activité(s).

- Evoluez vers plus maintenance préventive et moins de pannes.

CHAPITRE I : Maintenance industrielle d'une turbine à vapeur type A15 (G.M.A.O).

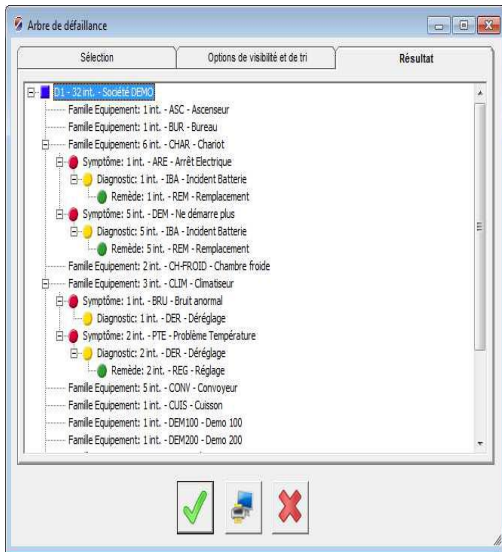


Figure I-20: Analyses.

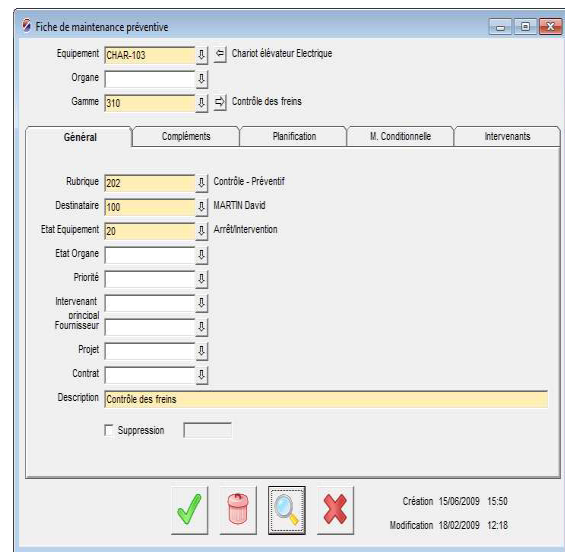


Figure I-21: Maintenance préventive.



I.7.2 Maintenance :

Le service de maintenance industrielle d'un équipement occupe un rôle important dans chaque entreprise industrielle.

Le service d'entretien doit maintenir :

- Matériel en bon état de marche, près de sa précision d'origine.
- Bâtiments et les installations dans le meilleur état.

Il doit assurer en outre :

- Maintenance préventive du matériel.
- Réparations des bâtiments, et le nettoyage des machines et des locaux.

Presque toujours sa tâche principale est de diminuer les frais de l'entretien et de la réparation.

La maintenance industrielle est une fonction indispensable normale, systématique et prévisible.

CHAPITRE I : Maintenance industrielle d'une turbine à vapeur type A15 (G.M.A.O).

La forme de l'entretien préventif, qui évite les incidents, les longs arrêts et les gros frais, se généralise aux niveaux des différents secteurs productifs.

La diversité de ses tâches, la souplesse nécessaire de son fonctionnement, la rapidité d'intervention pour les dépannages qui impose d'avoir des équipes spécialisées ; l'effectif de ces équipes varie avec l'importance de l'entreprise et son genre d'activité.

Le but principal de cet ouvrage de « Maintenance Industrielle premier niveau » de l'équipement" consiste à prendre des connaissances :

- Causes et formes de l'usure et des cassures des pièces de machines.
- Méthodes modernes de la réparation et le rétablissement des pièces usées et cassées.
- Particularités de démontage et de montage des machines.
- Méthodes d'entretien et d'organisation de la réparation des équipements.

Organisation de la maintenance préventive :

Dans les entreprises, les réparations urgentes et les dépannages exceptionnels car on y pratique ainsi la prévention.

Tout d'abord on établit un plan d'entretien, qui consiste à :

- Étudier et classer le matériel d'une usine. Pour chaque machine, on dresse les tableaux principaux des pièces d'usures et celles fragiles, qui exigent des soins particuliers.
- Préciser les conditions des contrôles, la façon de les exercer et les conditions d'emplois des machines.
- Imaginer les incidents éventuels et envisager à l'avance la façon d'y remédier (réagir) vite.
- Evaluer le temps d'immobilisation probable dans les différents cas.

Ensuite, on approvisionne (prévoir) avec les pièces de rechange :

CHAPITRE I : Maintenance industrielle d'une turbine à vapeur type A15 (G.M.A.O).

Les pièces, qui sont sujettes à l'usure ou à la rupture doivent-être en stock, surtout si les machines sont d'origines étrangères, On peut aussi réduire ainsi considérablement les immobilisations pour les réparations.

Puis, on établit les feuilles de maintenance :

Après l'étude de la machine, on rédige une feuille d'instructions détaillées, donnant la liste des opérations de contrôle ou d'entretien courant et l'ordre chronologique d'exécution.

Ces feuilles indiquent ainsi : Le personnel et l'outillage nécessaire, ainsi que la méthode de contrôle.

On rédige les comptes rendus des visites préventives :

Après chaque visite, le responsable d'entretien rédige, sur des imprimées spéciaux un rapport de l'état du matériel examiné et des interventions prochaines à envisager.

Au cours de fonctionnement de la machine, il faut toujours tenir compte des observations des usagers :

On recherche si les machines sont convenablement conduites, on le fait apprécier par leur conducteur. Tous ces renseignements guident dans le choix du matériel à utiliser.

Il faut d'ailleurs se tenir constamment au courant du comportement du matériel et noter les incidents qui surviennent entre les visites systématiques. A cet effet, les chefs d'ateliers notent les remarques relatives au fonctionnement de leurs machines sur un registre qui sera consulté chaque fois par le chef de service de maintenance.

Travaux de maintenance :

On distingue principalement : Le graissage, les travaux de réparation et d'entretien.

Graissage, est généralement effectué par une équipe spéciale utilisant des fiches de graissage. Cette fiche indique aussi les dates auxquelles les visites doivent-être faites.

Réparation et dépannage, toutes les demandes de réparations ou de dépannage doivent-être formulées par écrit et mentionner :

- Equipe ou le service demandeur.
- Date d'émission, le délai demandé, la nature du travail à effectuer.

CHAPITRE I : Maintenance industrielle d'une turbine à vapeur type A15 (G.M.A.O).

✚ Moyens matériels du service de maintenance :

Le service de maintenance groupe, dans les usines importantes, des ouvriers de nombreux métiers : Mécaniciens, tourneurs, fraiseurs, soudeurs, forgerons, électriciens, plombiers, peintres, maçons etc. rassemblés dans un atelier bien outillé en machines-outils, en matériel de levage et de manutention.

L'équipe a un service d'outillage nécessaire : Clés, tournevis, vérins, limes, perceuses, meules portatives.

Les visites de contrôles périodiques sont facilitées par l'usage d'un chariot spécial, dont les armoires contiennent : Broches rectifiées, équerres et règles de précision, palmers, comparateurs etc.

En outre un pupitre muni d'appareils de mesure : Voltmètre, ampèremètre, wattmètre.

Le service d'entretien est un service de sécurités du matériel et des travailleurs.

C'est un service autonome avec comptabilité particulière pour établir le coût de son activité.

Il ne relève que du chef de fabrication.

✚ Contrôle du matériel :

On distingue les opérations suivantes :

- Inspection préventive exercée par le service de maintenance.
- Contrôle des appareils de mesure, des compteurs etc.
- Contrôle du régime des machines : Leurs vitesses et leur taux d'utilisation au moyen d'appareils spéciaux.
- Contrôle du chargement des machines (tableaux de plannings).

CHAPITRE I : Maintenance industrielle d'une turbine à vapeur type A15 (G.M.A.O).

I.8 Conclusion :

Ce chapitre se termine par des rappels et des définitions relatifs à la turbine à vapeur et au rotor.

Son objectif est de donner un aperçu assez précis du travail effectué dans le cadre de la description des différents comportements parmi les composants de la turbine qui conduisent à la technologie utilisée.

II.1 Introduction :

Une machine tournante se compose d'un ensemble des mécanismes et d'organes combinés destinés à transformer une énergie ou à transmettre un mouvement, ces mécanismes, mobiles entre eux, ne peuvent fonctionner sans jeux, contraintes, efforts dynamiques et chocs dont les effets se manifestent principalement, sous forme des vibrations et des bruits, tout changement dans l'importance de ces jeux, de ces contraintes, efforts ou chocs, se traduit inévitablement par une modification de l'intensité ou des fréquences de ces vibrations, or cette modification de comportement vibratoire constitue souvent la première manifestation physique d'une anomalie affectant la machine, cause potentielle à terme de dégradations, voire de pannes.

Le système d'équilibrage doit améliorer le comportement des machines tournantes en réponse au balourd notamment lors du passage des vitesses critiques en montée en vitesse et en ralentissement.

Les solutions correctives d'équilibrage des rotors sont réalisées par ajout de matière (masse d'équilibrage) ou enlèvement de matière. Les conditions d'équilibrage sont en général déterminées à l'aide de « machines d'équilibrage » (**figure II-1**) qui mesurent les déformations et donc les efforts variables générés par le rotor lors de sa rotation sur le support de cette machine.

Ce chapitre représente l'équilibrage statique et dynamique des rotors qui est réalisé généralement grâce à l'aide des machines d'équilibrage, et nous faisons le point sur la préparation et la réalisation d'un équilibrage statique et dynamique.

II.2 Définition d'équilibrage d'un rotor :

Un solide est dit équilibré lors de sa rotation autour d'un axe fixe si son centre de masse est sur l'axe de rotation (l'axe de rotation est un axe principal d'inertie pour ce solide).

L'équilibrage des machines tournantes est le procédé par lequel on tente d'améliorer la répartition de la masse d'un rotor de façon que le rotor tourne dans ses paliers sans créer de forces centrifuges non compensées.

Chapitre II : Théorie de l'équilibre statique et dynamique des rotors.

L'équilibrage des rotors contribue à prolonger la vie utile des équipements et doit améliorer le comportement des machines tournantes [11].

De façon générale, on réunit sous le terme d'équilibrage deux opérations partielles :

- Masse du Balourd
- Compensation du balourd.

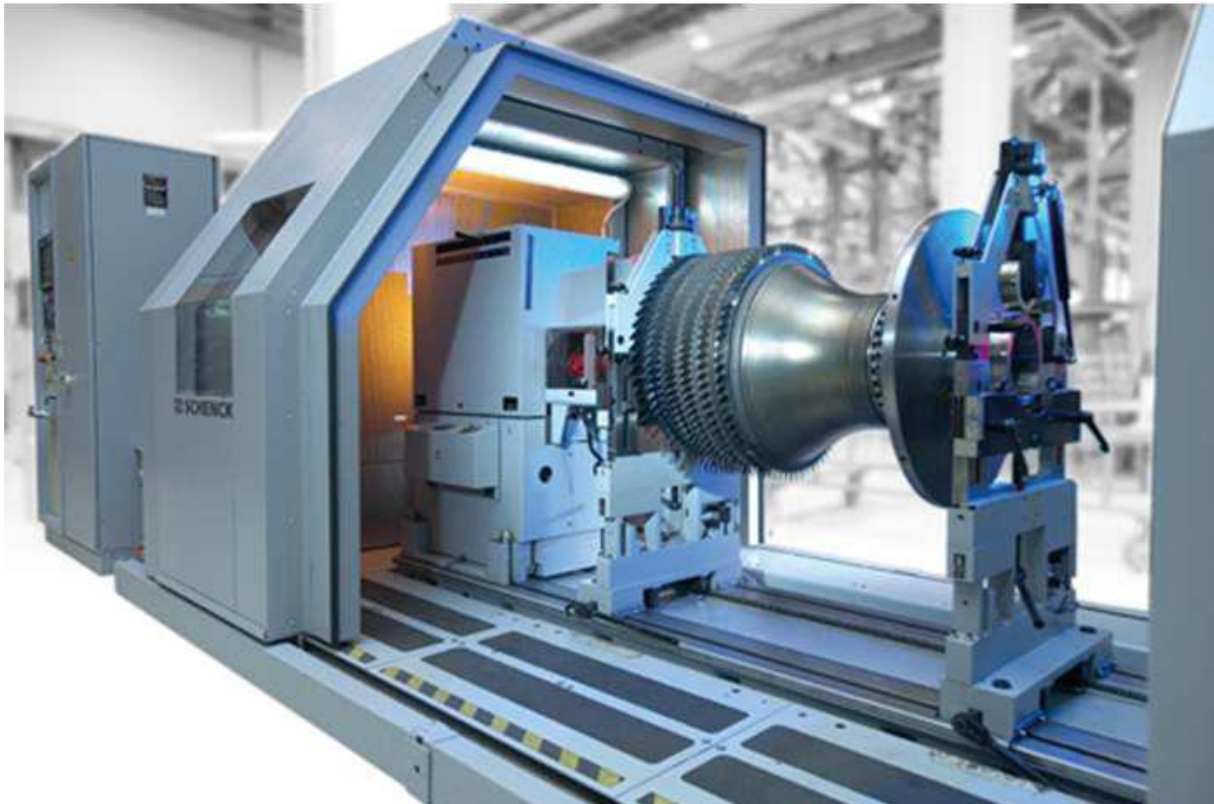


Figure II-1 : Machine à équilibrer moderne pour une utilisation universelle [14].

II.3 Balourd et équilibrage :

Un balourd est par définition, une répartition irrégulière de la masse d'un rotor lors de sa rotation autour d'un axe. L'équilibrage est le procédé qui vise à compenser cette mauvaise répartition par ajout ou enlèvement de masses connues en des endroits déterminés du rotor [15].

La force de balourd est une force tournante, elle est égale à : $F = m \cdot R \cdot \omega^2 \cdot \sin \alpha$.

Chapitre II : Théorie de l'équilibre statique et dynamique des rotors.

avec :

F : force de balourd (N).

m : masse de déséquilibre (kg).

R : rayon de déséquilibre (m).

ω : vitesse de rotation (rad/s).

Le balourd est équivalent à une masse ponctuelle de déséquilibre à une distance donnée de l'axe de rotation. Ainsi, le balourd est égal à $U = m \cdot R$.

Par conséquent, la force de balourd devient : $F = U \cdot \omega^2 \cdot \sin \alpha$.

Les unités du balourd sont :

- Système international : m·kg (en mètre kilogramme).
- Industrie : cm·g (en centimètre gramme).
- Mécanique de précision : mm·g (en millimètre gramme).
- Aéronautique : en N·m/g (en newton mètre par g d'accélération).

La représentation de la (**figure II-2**) est une simplification, en pratique plusieurs défauts peuvent apparaître sur un même rotor mais ils ont pour effet de déplacer le centre de gravité G et, dans le cas du disque, il suffit d'ajouter une seule masse pour ramener le centre de gravité en coïncidence avec l'axe de rotation.

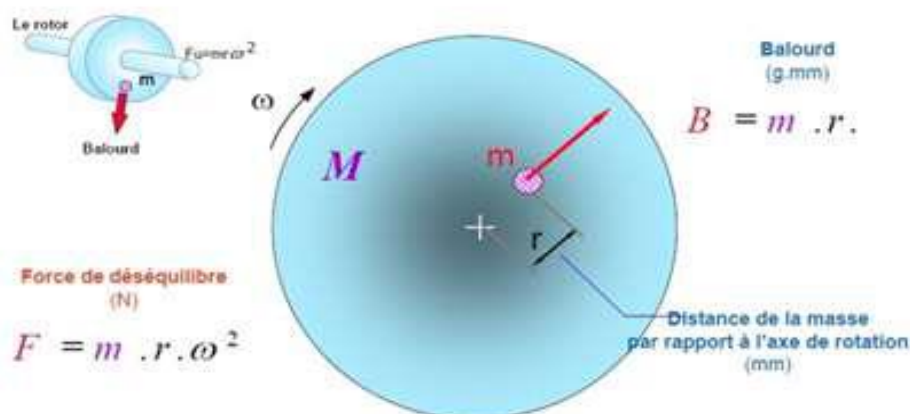


Figure II-2 : Modélisation d'un balourd.

II.3.1 Types de balourd :

➤ **Balourd statique :**

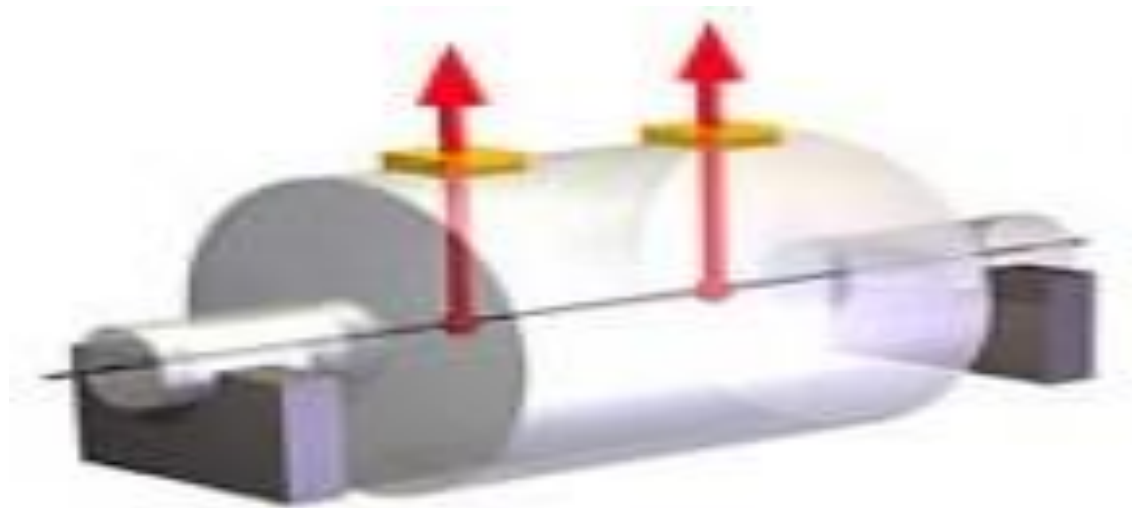


Figure II-3 : Déséquilibre statique.

Deux déséquilibres (présentés ici comme des flèches) peuvent avoir la même grandeur et la même position angulaire tout en étant situés à la même distance du centre de gravité. Le même état entraîne un déséquilibre deux fois plus important qui agit sur le centre de gravité, donc ici au milieu du rotor. Si on place un tel rotor sur deux couteaux, il va osciller jusqu'à se placer en "position lourde" vers le bas. Ce déséquilibre agit aussi s'il n'y a pas de rotation ; on l'appelle alors "déséquilibre statique". Il provoque un déplacement du centre de masse par rapport à l'axe géométrique, moyennant quoi, durant son utilisation, le rotor oscille parallèlement à son axe de rotation. Un déséquilibre statique doit être compensé au niveau de centre de gravité. Pour ce faire, il faut retirer de la matière de la "position lourde" ou en rajouter à l'opposé. La compensation du déséquilibre statique s'effectue fréquemment sur les rotors en forme de disque. Les machines à équilibrer verticales sont bien adaptées pour effectuer un tel type d'équilibrage [11].

➤ **Balourd de couple :**

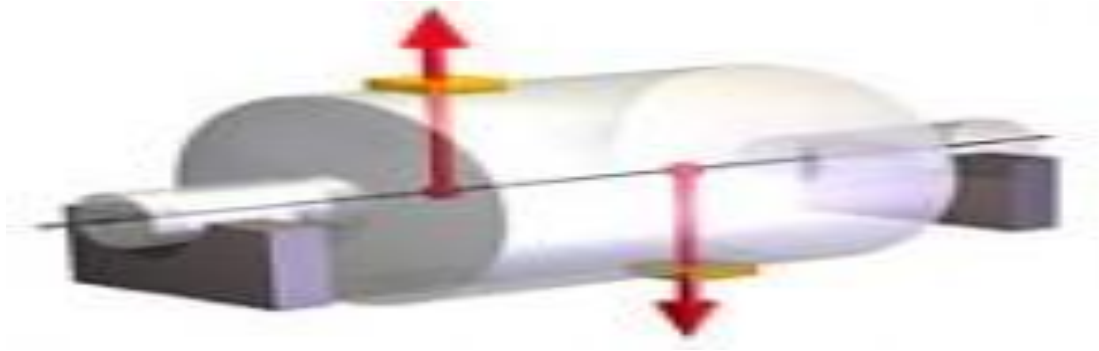


Figure II-4 : Déséquilibres de couple.

Deux déséquilibres (présentés ici comme des flèches) peuvent avoir la même grandeur, mais leur position angulaire se situe exactement à 180° l'un par rapport à l'autre. Cette répartition du déséquilibre ne peut plus être déterminée par oscillation, car le rotor n'accepte plus aucune position stable. Le rotor tourne, ce qui donne un mouvement de lacet autour de son axe (verticalement par rapport à l'axe de rotation), car les deux déséquilibres déclenchent un couple. Par conséquent, ce type de répartition de déséquilibre est nommé "déséquilibre de couple".

Pour corriger ce déséquilibre de couple, il est nécessaire de créer un couple résistant, donc de générer deux déséquilibres de correction de même force, et de les positionner à 180° du déséquilibre originel. Les déséquilibres de couple doivent être surtout pris en considération pour les rotors cylindriques de grandes longueurs. Les machines à équilibrer horizontales sont bien adaptées pour effectuer un tel type d'équilibrage.

➤ **Balourd dynamique :**



Figure II-5 : Déséquilibres dynamiques.

Chapitre II : Théorie de l'équilibre statique et dynamique des rotors.

En réalité, le rotor ne possède pas qu'un seul déséquilibre, mais théoriquement plusieurs qui sont répartis aléatoirement le long de l'axe de rotation. Ceux-ci peuvent être représentés par deux déséquilibres résultants (comme ici, représentés par les flèches) dans deux plans quelconques qui ont en général des grandeurs et des positions angulaires différentes. Puisque ce déséquilibre ne peut être mis en évidence que pendant la rotation, on parle d'un déséquilibre dynamique. Il peut se décomposer en un déséquilibre statique et un déséquilibre de couple, moyennant quoi, soit l'un, soit l'autre peut prédominer. Pour corriger complètement le déséquilibre dynamique, il est nécessaire d'avoir deux plans de correction.

Le déséquilibre dynamique se produit pratiquement sur tous les rotors. C'est pourquoi, on emploie, pour effectuer l'équilibrage, des machines à équilibrer aussi bien horizontales que verticales.

II.3.2 Causes du balourd :

Les causes principales peuvent être classées en quatre groupes d'origine toute pièce :

- **Défauts de conception** : Tolérance trop large sur la cotation des pièces (excentricité, jeu, etc...), Asymétrie de rotation (vilebrequin, mandrin, etc ...).
- **Défauts de fabrication** : Mauvaise homogénéité des matériaux utilisés (soufflure, inclusions, etc...), Tolérances d'usinage (circularité, concentricité).
- **Défauts de montage** : Asymétrie du montage des pièces (montage par clavette, goupilles, etc...), Pièces mal fixées ou montées avec jeu.
- **Défauts de service** : **Usure due à un enlèvement de matière (meule), modification de la masse par dépôt (encrassement, corrosion, etc...), influences thermiques** [16].

II.4 Equilibrage statique des rotors :

Pour éliminer le balourd, il faut rétablir une répartition homogène des masses par ajout ou par enlèvement de matière, il y a un type d'équilibrages de rotor appelé équilibrage statique.

On obtient cependant une meilleure précision si le balourd est déterminé pendant la rotation. Soit sur machine à équilibre, soit en service avec un appareil de mesure portable. Pour

la compensation, on fera une correction de masse dans un plan radial du rotor, de préférence dans le plan de centre de masse [17].

Quand le balourd est suffisamment important, on peut corriger le déséquilibre statique sans avoir à faire tourner le rotor. En effet, il suffit de poser le disque sur une paire de couteaux parallèles pour que la "partie lourde" du rotor se trouve dans la même position que dans l'exemple montré à la (figure II-7).

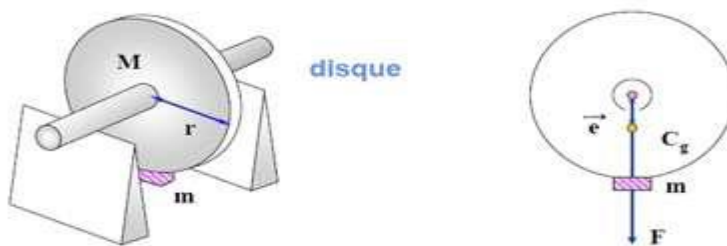


Figure II-6 : Balancement d'un rotor.

II.5 Qualité d'équilibrage : [18]

A l'aide des instruments de mesure disponibles de nos jours, le déséquilibre peut être réduit à de très faibles valeurs, toutefois il n'est pas économiquement et même techniquement justifiable de vouloir exagérer les exigences de qualité d'équilibrage.

La norme internationale ISO 1940, "Vibrations mécaniques - Exigences en matière de qualité dans l'équilibrage des rotors rigides", donne des recommandations pour la détermination d'un balourd résiduel admissible et pour la spécification de degrés de la qualité d'équilibrage des rotors en fonction de leur type, de leur masse et de la vitesse de fonctionnement maximale.

Sur la base d'une expérience internationale et de la prise en compte de la similitude, des degrés de qualité d'équilibrage G ont été établis, permettant de classer les critères de qualité d'équilibrage pour des types de rotor [19].

Bien que certains centres de service utilisent la norme ISO G 2.5 pour les turbines (figure II-8), la norme d'équilibrage G 2.5 est simplement un nombre calculé, c'est une valeur permettant de produire un degré de vibrations acceptable sur une machine universelle en marche à l'intérieur de son propre environnement, la valeur numérique de G équivaut à la vitesse de vibration mesurée en mm/s ($2,5 \text{ mm/s} = 0,1 \text{ pouce/s}$) d'un rotor en appui libre.

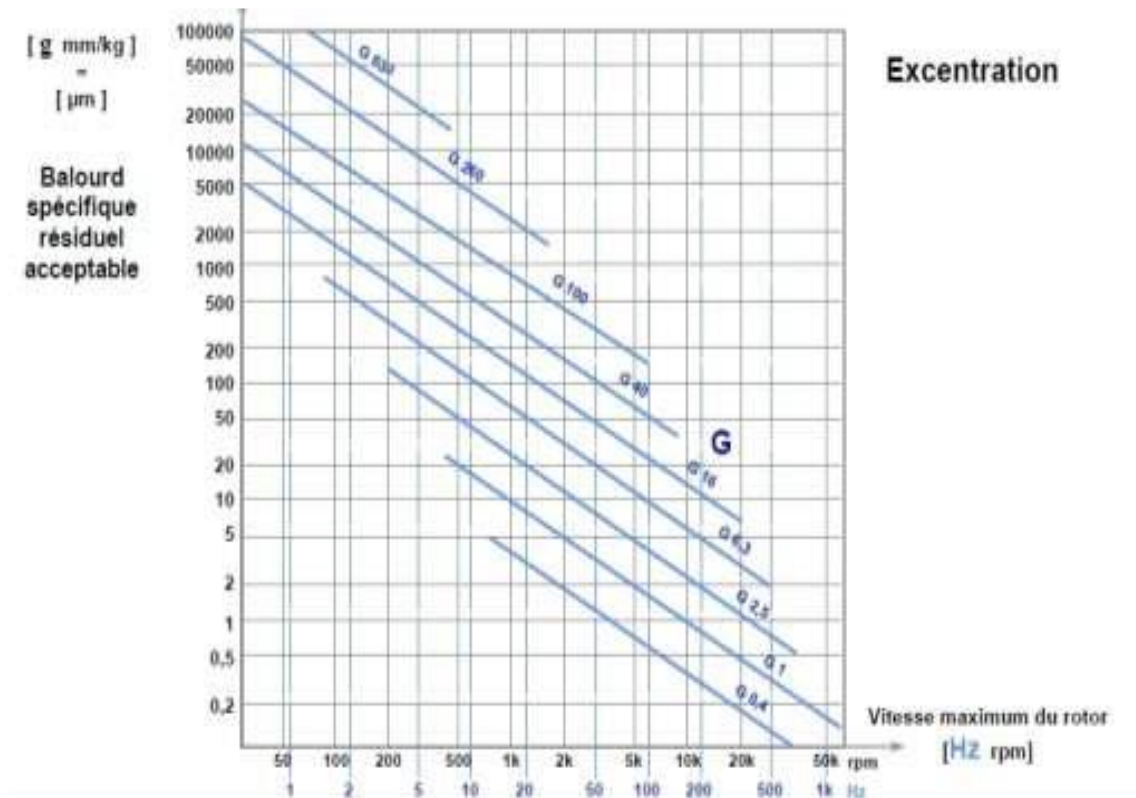


Figure II-7 : Balourd spécifique résiduel admissible correspondant au degré de qualité d'équilibrage G et à la vitesse nominale n [11].

II.6 Préparation et réalisation d'un équilibrage :

Pour faciliter la tâche de réalisation d'équilibrage, qui représente parfois une véritable terre inconnue pour certaines sociétés ou certains techniciens, le document de la norme ISO 2953 présente un recueil d'informations permettant de mieux décrire les opérations.

Ce document peut être utilisé pour mettre en gamme et préparer les différentes opérations liées à l'équilibrage :

- Choix de la bonne machine à équilibrer parmi les équipements de l'atelier.
- Sous-traitance de l'opération d'équilibrage à d'autres sociétés.
- Achat d'une machine à équilibrer adaptée.

Dans cette optique, on distingue les rotors avec et sans arbre propre, et les machines à équilibrer correspondantes (horizontales ou verticales).

II.6.1 Machine à équilibrage :

Toute opération d'équilibrage doit être exécutée à l'aide d'une machine à équilibrer appropriée. La plupart des machines à équilibrer pouvant accepter des rotors dans une large plage de masses et de dimensions, il est parfois envisageable d'utiliser différents modèles et différentes tailles de machines pour une même application.

Les machines à équilibrer sont des dispositifs de mesure de balourd, et doivent donc être contrôlées régulièrement dans le cadre de l'assurance qualité.

Pour la plupart des machines à équilibrer, la sensibilité et la précision de mesure augmentent avec la vitesse. Les machines à équilibrer universelles, qui couvrent une grande variété de rotors, présentent en conséquence (également pour l'ajustement du couple) plusieurs vitesses de rotors [20].

Le mode de contrôle et sa fréquence dépendent du type d'application et des risques pouvant survenir à la suite d'une défaillance. Lorsqu'un produit est fabriqué en série, un grand nombre de mesures peuvent être collectées et servir de base à l'évaluation. On met alors théoriquement en œuvre un certain nombre de moyens statistiques. Cela est également valable pour les machines à équilibrer intégrées dans une chaîne de fabrication en série [21].

Mais, dans le domaine de l'équilibrage, il n'existe en réalité aucune référence propre du type « balourd étalon ». Même les « modèles » que l'on utilise parfois ont leurs limites.



Figure II-8 : Machine à équilibrer horizontale [22].

II.6.1.1 Système de mesure et d'affichage des machines :

Le système de mesure du balourd est la solution optimale pour l'équilibrage des rotors sur des machines à équilibrer horizontales ou verticale.

Les machines à équilibrer possèdent un système d'affichage pour la valeur du balourd et son angle, ainsi que pour la correction. Tous les systèmes de mesure récents s'appuyant sur des ordinateurs, les affichages typiques sont des zones d'affichage composées de secteurs, ou bien différents types d'écrans [23].

Les écrans autorisent théoriquement toutes les représentations possibles des mesures, notamment la représentation vectorielle (**figure II-10**) qui permet de comprendre immédiatement le déséquilibre. Ces résultats sont complétés par toute une série d'informations, notamment la vitesse d'équilibrage et le type de balourd, et la tolérance.

II.6.1.2 Avantages de système d'affichage :

Pour déterminer le type d'affichage le plus efficace, vectoriel ou numérique donnant le module et l'angle, il faut savoir de quelle opération d'équilibrage il s'agit, et pour quel rotor, mais il existe des tendances générales :

❖ Affichage vectoriel

Permet de mieux se représenter le caractère vectoriel du balourd et les rapports de module et d'angle des deux plans de correction. Il est fréquemment doublé d'un affichage numérique, permettant une correction très précise.

❖ Affichage numérique

Permet une bonne lisibilité pour la correction de gros rotors, même à grande distance, mais il est plus difficile de se représenter la signification de l'affichage, et avec un module décroissant, l'incertitude croissante sur l'angle n'est plus représentée aussi clairement- Interface Windows permettant une utilisation fiable et simple.

- Ecran tactile permettant un accès rapide et une saisie efficace.

- Grande précision de mesure pour des rotors pour lesquels on recherche une excellente qualité d'équilibrage.
- Calcul direct et rapide des unités spécifiques aux différentes méthodes de correction du balourd.
- Sécurité et disponibilité élevées grâce à différents droits d'accès de la machine on a particulièrement veillé à ce qu'on puisse équilibrer un large spectre de rotors, à l'unité comme en petite série.
- Pages d'écran sont clairement organisées et complétées par des schémas pour une meilleure compréhension de certains paramètres de saisie Le système de mesure du balourd aide l'opérateur à corriger manuellement le balourd du rotor.



Figure II-9 : Système Affichage d'une machine de type H-04 SCHENCK [23].

La (figure II-9) représente l'affichage vectoriel sur un écran, combinée avec un affichage des résultats numérique de correction de balourd et son angle avec logiciel BLADIS, il calcule la correction à apporter pour divers procédés de correction, dans l'unité correspondante, lorsque la tolérance de balourd saisie ou calculée selon la norme ISO 1940 est atteinte, la valeur de mesure affichée à l'écran change de couleur.

II.6.2 Technique d'équilibrage statique :

D'après les définitions DIN ISO 1925 on nomme ainsi les machines sur lesquelles le rotor à équilibrer ne tourne pas, mais qui indiquent cependant une mesure pour le vecteur balourd en module et en direction.

Elles sont donc beaucoup plus élaborées que de simples équipements de mesure de type couteaux ou galets. Le rotor est installé avec son axe horizontal (figure 2-10). Le moment du

Chapitre II : Théorie de l'équilibre statique et dynamique des rotors.

poinds qui s'exerce au niveau du centre de gravité, lequel se trouve excentré par rapport à l'axe de prise de pièce est utilisé pour effectuer la mesure.

Sur les machines à équilibrer par gravité, on ne peut effectuer que des équilibrages en un plan, c.-à-d. que l'on ne peut mesurer et corriger que le balourd résultant, car pour le moment de balourd le centre de gravité se trouve déjà sur l'axe de l'arbre.

Les tolérances et les procédés d'équilibrage, ainsi que les valeurs-limites des vibrations sont définis dans des manuels techniques ou des normes telles qu'ISO 1940-1, ISO 10816-3.

L'équilibrage est réalisé sur des balances statiques ou des équilibreuses horizontales et verticales, mais aussi sur site avec des appareils portables.



Figure II-10 : Balance d'équilibrage statique utilisée pour des Rotors Turbomachine [14].

II.6.3 Préparation de l'opération :

L'équilibrage doit, comme tous les autres processus de fabrication, être correctement préparé pour être efficace. Une des étapes préalables consiste à exploiter toutes les possibilités de la machine à équilibrer et du type de correction choisi pour chaque rotor.

Les machines semi-automatiques et automatiques sont en général adaptées à des rotors bien spécifiques, et il est possible d'évaluer les temps nécessaires et le temps de travail par pièce dès le choix de la machine adéquate [11].

Reste l'approche consiste normalement à effectuer des études puis à définir les méthodes pour chaque rotor, tout en gardant à l'esprit que ces méthodes peuvent être transposées à des rotors similaires.

❖ **Préparation du rotor :**

Pour équilibrer un rotor d'une turbine, ce dernier doit être monté sur les paliers puis entraîné, et équipé d'une référence angulaire.

Tous les rotors n'intègrent pas ces exigences, ils nécessitent alors une préparation spéciale.

❖ **Répartition des aubes d'un rotor de turbomachine :**

Procédé de la répartition des aubes d'un rotor de turbomachine doivent être soigneusement étudiés, avant tout pour (**figure II-11**) :

- Fabrication en série.
- Correction en dehors de la machine à équilibrer.
- Rotors très précieux ou très fragiles.
- Rotors difficiles à manipuler ou très lourds.



Figure II-11 : Procédure de répartition les aubes du rotor d'une turbine [24].

Chapitre II : Théorie de l'équilibre statique et dynamique des rotors.

Dans lequel il est procédé tout d'abord à la mesure des moments statiques radial et tangentiel d'une pluralité d'aubes destinées à former ce rotor, puis ces aubes sont classées par paires selon un critère de choix déterminé dépendant de ces deux moments statiques préalablement mesurés, et enfin les paires choisies sont montées une à une sur le rotor en position diamétralement opposée un logiciel optionnel de répartition dénommé BLADIS.Net aide à monter de manière optimum les ailettes sur leur disque afin de réduire au minimum le déséquilibre de l'ensemble.

La série de machine de balances pesantes de moment pour des aubes de rotor est capable de la distribution de peser avec précision et de contreponds exactement en utilisant le logiciel.

Des aubes sont distribuées avec des algorithmes sans interruption de raffinage le logiciel net de BLADIS a une interface facile à utiliser de touche-écran.

Les balances pesantes de machine sont compactes et peuvent être montées sur le plancher d'atelier sans aucune base ou se boulonner.

- Il est facile de se réunir et installer le modèle.
- Mesure du déséquilibre statique des rotors en forme de disque, par exemple non durci roues de meulage, propulseurs et ventilateurs.

Utilisation de la machine pour la mesure du déséquilibre, pour des tâches avec correction de déséquilibre dans la production, dans l'inspection entrante, pour la finale équilibrant et pour la mesure de poids.

II.7 Méthode d'équilibrage :

Le principe de l'équilibrage "in situ" consiste à procéder à des déséquilibrages contrôlés (habituellement temporaires) de la masse du rotor au moyen de masses d'essai. Cette procédure vous sera d'abord présentée dans ses grandes lignes.

Vous apprendrez ensuite à choisir une masse d'essai convenable, à vérifier la validité des mesures de vibration, à tracer un diagramme vectoriel pour calculer les corrections requises, à corriger le déséquilibre et, finalement, à vous familiariser avec les différentes techniques de corrections de masse sur le rotor.

II.7.1 Procédure d'équilibrage :

Pour équilibrer un rotor, vous devez placer une masse de correction d'une certaine grosseur à un endroit où elle annule le balourd du rotor, c'est-à-dire en un point qui lui est diamétralement opposé. Pour ce faire, il vous faut déterminer la valeur et la position de la masse de correction.

a) Balourd initial (A_0 et ϕ_0) :

La procédure d'équilibrage "in situ" consiste d'abord à mesurer la vibration causée par le déséquilibre du rotor qui, comme vous le savez maintenant, apparaît toujours dans le spectre de vibrations à la fréquence de rotation de l'arbre (**figure 2-12**).

Déséquilibre dans le spectre de vibrations :

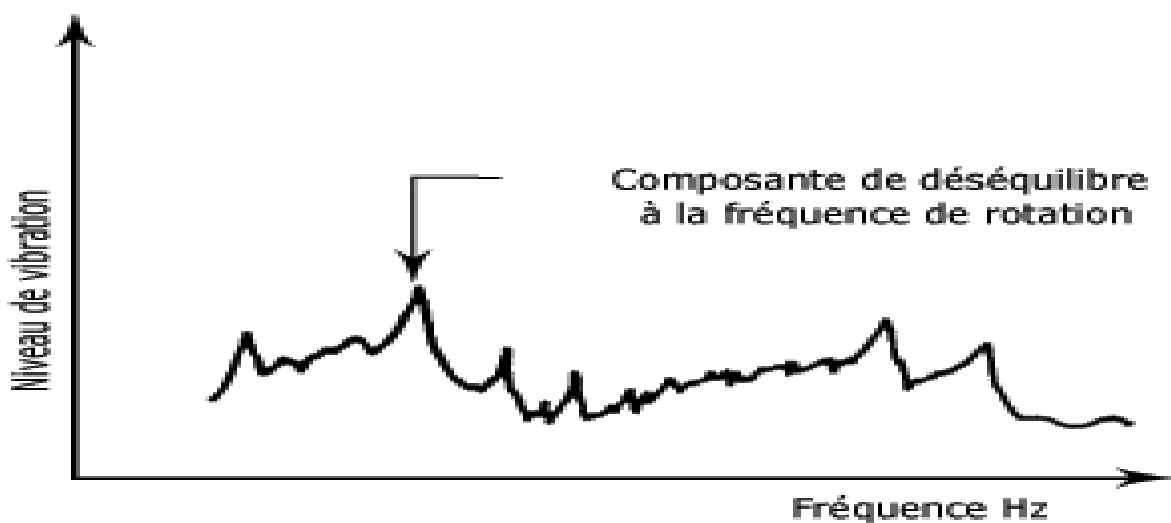


Figure II-12 : Spectre de vibrations à la fréquence de rotation de l'arbre.

La mesure de l'amplitude vibratoire, proportionnelle à la force produite par le balourd, requiert l'emploi d'un accéléromètre monté sur le palier du roulement. La mesure de la phase, essentielle pour localiser la "partie lourde" dans le rotor à équilibrer, requiert l'emploi d'un capteur tachymétrique.

Chapitre II : Théorie de l'équilibre statique et dynamique des rotors.

Le capteur tachymétrique, monté à une distance appropriée de la surface du rotor, peut aussi bien être une sonde photo-électrique ou une lumière stroboscopique.

La figure suivante vous montre le montage de l'accéléromètre et de la sonde photo-électrique de même que celui d'une bande réfléchissante fixée sur le rotor. Le passage de la bande réfléchissante déclenche la sonde photo-électrique une fois par tour et une impulsion est envoyée à l'analyseur de vibrations.

Vous obtenez alors les deux résultats de mesure suivants : ϕ_0 , soit l'angle de phase du signal vibratoire par rapport à l'impulsion du capteur tachymétrique ; A_0 , soit la vibration causée par le balourd, aussi appelée "amplitude initiale".

🔧 Montage des capteurs :

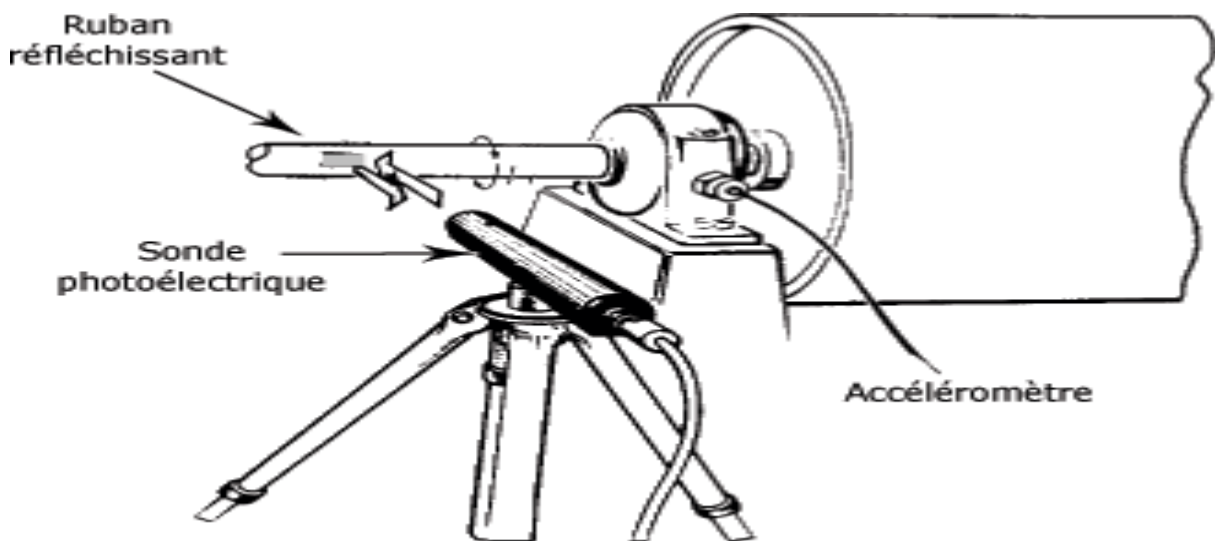


Figure II-13 : Montage des capteurs.

b) Vibration avec une masse d'essai (A_1 et ϕ_1) :

Après avoir établi l'état initial du rotor sous la forme des valeurs A_0 et ϕ_0 , vous devez placer une masse d'essai connue sur le rotor. La masse d'essai a pour effet de modifier l'amplitude et l'angle de phase de la vibration. Vous obtenez alors les mesures suivantes : A_1 et ϕ_1 , soit l'amplitude et la phase de la vibration avec la masse d'essai.

c) Masse de correction (m_c et ϕ_c) :

Connaissant l'effet de la masse d'essai, l'étape suivante consiste à augmenter ou à réduire cette masse de façon à la rendre égale au balourd et, au besoin, à la déplacer angulairement jusqu'à ce qu'elle soit diamétralement opposée au balourd. Ce calcul, normalement fait au moyen d'un programme d'équilibrage ou d'un diagramme vectoriel, vous donne la valeur m_c de la masse de correction et l'angle de correction ϕ_c .

d) Vibration résiduelle :

Il ne vous reste plus qu'à poser la masse de correction à l'endroit approprié sur le rotor et à mesurer de nouveau l'amplitude et l'angle de phase de la vibration. Si la vibration résiduelle ne se trouve pas en deçà d'un seuil acceptable, vous devrez reprendre le cycle d'équilibrage.

Vous trouverez à la figure suivante un résumé des principales étapes de la procédure d'équilibrage sur un plan. La masse initiale de déséquilibre y est représentée par la valeur m_r .

✚ Procédure d'équilibrage :

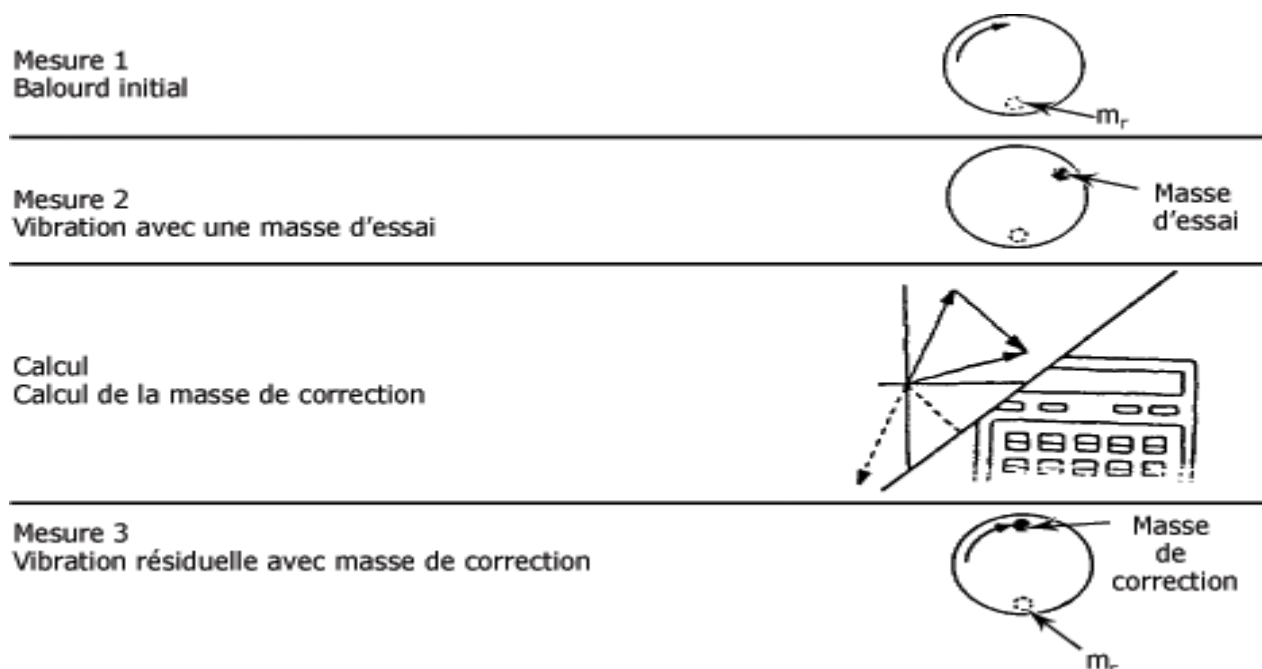


Figure II-14 : Principales étapes de la procédure d'équilibrage sur un plan.

II.7.2 Choix d'une masse d'essai :

a) Propriétés :

Les calculs de correction du déséquilibre sont basés sur les changements que produit la masse d'essai sur l'état initial du rotor. Il est donc important de choisir une masse qui permette d'obtenir de bons résultats. Sélectionnez une masse trop petite et vous ne noterez aucun changement d'amplitude ou de phase ; sélectionnez une masse trop grande et vous risquez d'endommager la machine.

Vous allez apprendre que la valeur du balourd résiduel admissible U_{adm} peut servir à donner une valeur appropriée de la masse d'essai.

Le balourd résiduel admissible est obtenu en multipliant le balourd spécifique par la masse du rotor, soit $U_{adm} = e_{adm} \times M$. Vous trouvez le balourd spécifique e_{adm} à l'aide de l'abaque ISO, en fonction du degré de qualité d'équilibrage requis et de la vitesse maximale de fonctionnement du rotor.

La norme ISO 1940 recommande de choisir une masse équivalente à 5 à 10 fois le balourd résiduel admissible comme masse d'essai. Vous pouvez convertir le balourd résiduel en une masse équivalente m_r , appelée masse résiduelle, en le divisant par le rayon de correction r_c , soit la distance entre l'axe de l'arbre et l'emplacement de la masse de correction. Sur de nombreux rotors, le rayon de correction et le rayon de pose de la masse d'essai r_e sont identiques. Par conséquent :

$$m_r = U_{adm}/r_c$$

$$m_r = \frac{\text{Balourd spécifique} \times \text{Masse du rotor}}{\text{Rayon de correction}}$$

$$m_r = \frac{e \times M}{r_c}$$

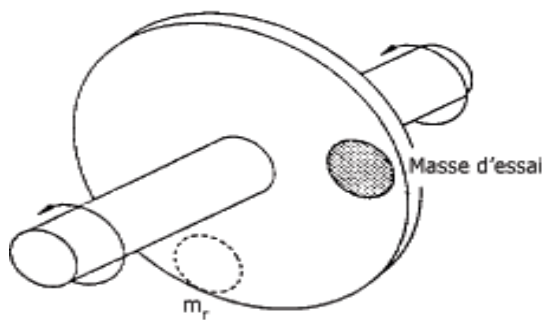
$$m_c = \text{Masse d'essai} = (5 \text{ à } 10) \times m_r$$

Chapitre II : Théorie de l'équilibre statique et dynamique des rotors.

La figure suivante reprend l'exemple déjà proposé, soit celui d'un rotor classé G6.3 et dont la vitesse maximale de fonctionnement est de 50 Hz (2500 r/min). Il a été établi précédemment, au moyen de l'abaque Iso, que le balourd résiduel spécifique pour ce rotor ne devait pas dépasser 200 g · mm/kg après équilibrage.

La masse du notre rotor M est de 500 kg et que le rayon de pose de la masse d'essai r_e est de 0,2 m, alors : $m_r = 200 \times 500 / (0,2 \cdot 1000) = 0,5$ kg. La masse d'essai doit donc être comprise entre 2,5 kg et 5 kg.

✚ Calcul de la masse d'essai :



Masse de rotor (M) = 500 Kg.

Rayon de la masse d'essai : 0.2 m.

Vitesse de rotation : 2500 tr/min.

$$m_r = \frac{\text{Balourd spécifique} \times \text{Masse du rotor}}{\text{Rayon de correction}}$$

$$m_c = \text{Masse d'essai} = (5 \text{ à } 10) \times m_r$$

$$m_r = (2.5 \text{ à } 5) \text{ Kg.}$$

Figure II-15 : Masse d'essai.

Il arrive que la masse d'essai calculée de cette façon soit trop petite. Toutefois, il vaut mieux avoir une masse d'essai trop faible plutôt que de risquer d'endommager le rotor. Avec l'expérience, vous en viendrez à estimer la masse d'essai adéquate.

b) Validation des mesures :

Malgré tout le soin que vous pouvez apporter à la sélection de la masse d'essai, il peut arriver que celle-ci ne donne pas des résultats acceptables pour les calculs d'équilibrage. C'est pourquoi il est très important de vérifier la validité des mesures avant de procéder aux calculs de la masse de correction.

Le tableau de la figure suivante montre les quatre possibilités susceptibles de se produire après la pose de la masse d'essai. Le symbole "triangle" ϕ représente l'écart entre l'angle de phase mesuré avant et après la pose de la masse d'essai.

Le symbole "triangle" A représente l'écart entre l'amplitude vibratoire mesurée avant et après la pose de la masse d'essai.

 **Évaluation des effets de la masse d'essai :**

Tableau II.1 : Quatre possibilités susceptibles de se produire après la pose de la masse d'essai.

	$\Delta A < 25 \%$	$\Delta A > 25 \%$
$\Delta \phi < 25^\circ$	Augmenter la masse d'essai	Déplacer la masse d'essai
$\Delta \phi > 25^\circ$	Continuer	Continuer

Si l'écart de phase "triangle" ϕ est inférieur à 25° , vous devez augmenter la valeur de la masse d'essai ou encore déplacer celle-ci selon que l'écart d'amplitude "triangle" A soit plus petit ou plus grand que 25 %. Si l'écart de phase "triangle" ϕ dépasse 25° , les valeurs mesurées peuvent servir à calculer la valeur et l'angle de la masse de correction.

c) Calculs de correction :

Quand des résultats satisfaisants sont obtenus à la suite des différentes mesures, l'étape suivante consiste à calculer la masse et l'angle de correction requis. Il existe deux méthodes pour trouver ces valeurs : par le tracé d'un diagramme vectoriel ou par le recours à un programme d'équilibrage.

d) Diagramme vectoriel :

La méthode par le tracé d'un diagramme vectoriel a l'avantage de vous permettre de visualiser les forces en jeu. Elle peut aussi vous aider à mieux comprendre comment on parvient à réaliser la correction du balourd dans un rotor déséquilibré.

 **Valeurs mesurées :**

Les mesures suivantes sont effectuées :

- A_0 et ϕ_0 , soit l'amplitude et l'angle de phase du balourd initial ;
- A_1 et ϕ_1 , soit l'amplitude et l'angle de phase du balourd avec la masse d'essai.

Vous pouvez déterminer les valeurs de la masse et de l'angle de correction en représentant d'abord les mesures sous la forme de vecteur. Le diagramme vectoriel des valeurs mesure, montré à la figure 4.22, est construit selon la procédure suivante :

1. Tracer un vecteur V_0 représentant le balourd initial. La longueur de V_0 est égale à l'amplitude A_0 et sa direction est donnée par l'angle de phase ϕ_0 (partie a de la figure ci-dessous).

2. Tracer un autre vecteur V_1 représentant le balourd (amplitude A_1 et angle de phase ϕ_1) mesuré avec la masse d'essai (partie b de la figure ci-dessous).

3. Tracer un vecteur de la pointe de V_0 à celle de V_1 en prenant soin de lui donner la direction indiquée à la partie c de la figure ci-dessous. Le nouveau vecteur V_c représente la contribution de la masse d'essai seule sur la nouvelle condition de déséquilibre du rotor.

Cette information va vous permettre de localiser avec précision la position de la masse de déséquilibre à l'origine du balourd initial et de calculer la masse de correction nécessaire pour l'éliminer sinon pour le réduire à une valeur acceptable.

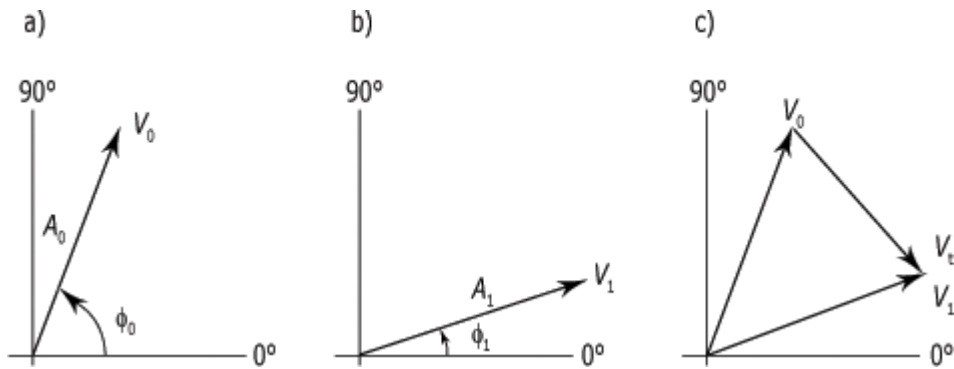


Figure II-16 : Diagramme vectoriel : valeurs mesurées.

✚ Valeurs calculées :

Les valeurs mesurées étant représentées sur le diagramme vectoriel, les calculs, montrés à la figure ci-dessous, se font comme suit :

1. Tracer un nouveau vecteur V_e parallèle au vecteur V_0 existant, suivant la même direction mais à partir de l'origine (partie d de la figure ci-dessous).

2. Reproduire le vecteur V_0 de l'autre côté de l'origine mais dans une direction opposée. Le nouveau vecteur appelé V_c représente la position et la valeur du balourd nécessaires pour annuler le balourd initial V_0 et ainsi équilibrer le rotor (partie e de la figure ci-dessous).

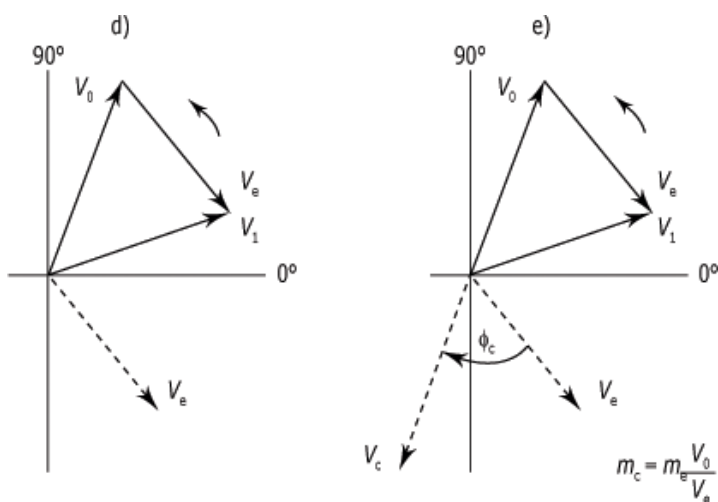


Figure II-17 : Diagramme vectoriel : valeurs calculées.

Finalement, la valeur et la position de la masse de correction sont déterminées de la façon suivante :

Chapitre II : Théorie de l'équilibre statique et dynamique des rotors.

1. Imaginez maintenant que vous fassiez pivoter le vecteur en pointillé V_e jusqu'à ce qu'il se confonde avec le vecteur V_c . L'angle ϕ_c représente l'angle de rotation nécessaire. Il correspond aussi à l'angle de correction ϕ_c dont le sens est donné suivant la rotation de l'arbre ; positif dans le sens de rotation ; négatif dans le sens contraire.

2. Prochaine étape consiste à augmenter ou à diminuer la longueur de V_e jusqu'à égaler celle de V_c . Pour ce faire, on suppose que l'amplitude vibratoire est proportionnelle au balourd. Vous pouvez ainsi établir que $m_e/V_e = m_c/V_c = m_c/V_0$, ce qui vous permet de calculer la valeur de la masse de correction m_c , soit $m_c = m_e \times V_0/V_e$.

Dans la pratique, le diagramme et les calculs vectoriels sont tracés sur une feuille de papier graphique polaire à l'aide d'une règle et d'un rapporteur. La figure suivante vous en montre un exemple.

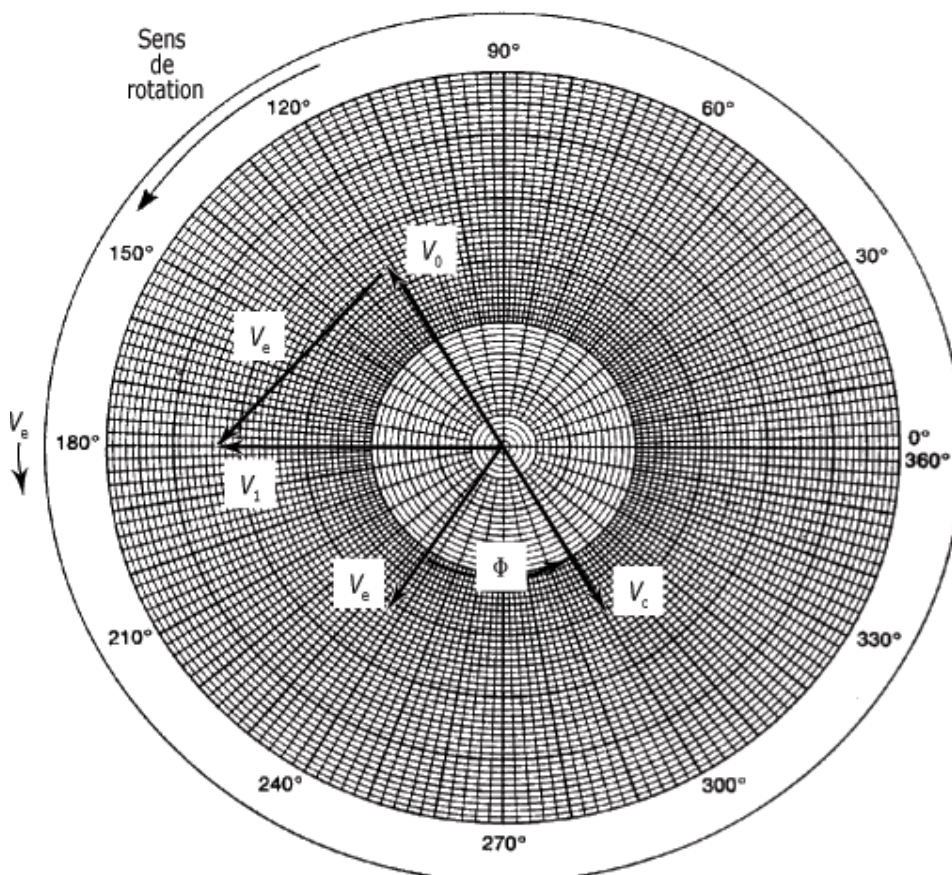


Figure II-18 : Diagramme vectoriel, exemple pratique.

II.8 Conclusion :

La correction de balourd est une procédure permettant de rectifier la répartition des masses du rotor. La correction s'effectue la plupart du temps en ajoutant ou en enlevant de la matière, de telle manière que la somme des forces centrifuges soit égale à zéro pour un plan de correction.

De nombreux dispositifs ont été réalisés à cette fin mais ils demandent souvent une mise en œuvre délicate puisque l'équilibrage est obtenu lorsque l'amplitude et la phase ou position angulaire du balourd correcteur engendré par la masse rapportée sont respectivement sensiblement égale et opposée à celles du balourd résiduel du rotor.

III.1 Généralité :

Une problématique de modélisation nécessite une réflexion préalable sur le type de phénomène à mettre en évidence ainsi que ses dynamiques, cette réflexion essentielle détermine le niveau de complexité de la modélisation à effectuer, le problème de niveau de tension a des dynamiques assez lentes et pourrait même être étudié grâce à des travaux en régime permanent ou statique. Cependant le régulateur à développer doit pouvoir s'adapter en fonction des évolutions du réseau.

Les études présentées feront l'objet d'hypothèses simplificatrices permettant une modélisation simplifiée et une rapidité de simulations accrue.

L'interface graphique de MATLAB est sans conteste l'un des points forts du logiciel et facilite le tracé de courbes et l'obtention de graphiques 2D ou 3D de grande qualité.

Le "langage" MATLAB contient un minimum de structures de programmation (structure itérative, structure conditionnelle, sous-routine) mais reste très rudimentaire.

L'avantage est qu'il est très simple et très rapide à programmer, offrant une grande tolérance (syntaxe simple, pas de définition de types,.. etc), ce qui permet un gain appréciable en temps de mise au point. L'ingénieur peut par ce moyen être plus efficace dans l'analyse d'un problème, en concentrant ses efforts sur celui-ci et non pas sur l'outil servant à le résoudre.

Les boîtes à outils (toolbox) dédiées à des domaines techniques spécifiques, sont :

- Traitement du signal.
- Ré.
- Gulation automatique.
- Identification.
- Réseaux de neurones.
- Logique floue.
- Calcul symbolique.

CHAPITRE III : Simulation et modélisation.

Et bien d'autres encore, ces boîtes à outils sont simplement constituées d'un ensemble de fonctions spécialisées programmées à partir des fonctions de base de MATLAB, permettant par exemple la synthèse de filtres, le calcul de FFTs, la simulation d'algorithmes flous ou encore le calcul de réponse harmoniques. Simulink n'est rien d'autre qu'une boîte à outils de MATLAB permettant au moyen d'une interface graphique évoluée la construction rapide et aisée ainsi que la simulation de schémas fonctionnels complexes, contenant des systèmes linéaires, non linéaires voir non-stationnaires, y compris des opérateurs logiques, des outils mathématiques d'analyse, etc.

Incontestablement, MATLAB est un formidable outil pour l'ingénieur, y compris pour celui traitant des problèmes pratiques, avec sa boîte à outils Simulink, il est maintenant une référence au niveau mondial, non seulement dans les universités et instituts de recherche, mais aussi dans le milieu industriel.

III.2 Présentation de l'application :

❖ MATLAB :

MATLAB est un logiciel de calcul matriciel à syntaxe simple. Avec ses fonctions spécialisées, peut être aussi considéré comme un langage de programmation adapté pour les problèmes scientifiques, un interpréteur : les instructions sont interprétées et exécutées ligne par ligne, et il fonctionne dans plusieurs environnements tels que X-Windows, Windows, Macintosh, il existe deux modes de fonctionnement MATLAB :

- **Mode interactif** : exécute les instructions au fur et à mesure qu'elles sont données par l'utilisateur.
- **Mode exécutif** : exécute ligne par ligne un "fichier M" (programme en langage MATLAB).

On présente le diagramme de fonctionnement de MATLAB comme indiqué ci-dessous :

- **Fenêtre Commande** : Dans cette fenêtre, l'utilisateur donne les instructions et MATLAB retourne les résultats.
- **Fenêtres Graphique** : MATLAB trace les graphiques dans ces fenêtres.
- **Fichiers M** : Ce sont des programmes en langage MATLAB (écrits par l'utilisateur).

CHAPITRE III : Simulation et modélisation.

- **Toolboxes** : Ce sont des collections de fichiers M développés pour des domaines d'application spécifiques (Signal Processing Toolbox, System Identification Toolbox, Control System Toolbox, u-Synthesis and Analysis Toolbox , Robust Control Toolbox, Optimization Toolbox, Neural Network Toolbox , Spline Toolbox, Chemometrics Toolbox, Fuzzy Logic Toolbox, etc).
- **Simulink** : C'est l'extension graphique de MATLAB permettant de travailler avec des diagrammes en blocs.
- **Blocksets** : Ce sont des collections de blocs Simulink développés pour des domaines d'application spécifiques (DSP Blockset, Power System Blockset, etc.).

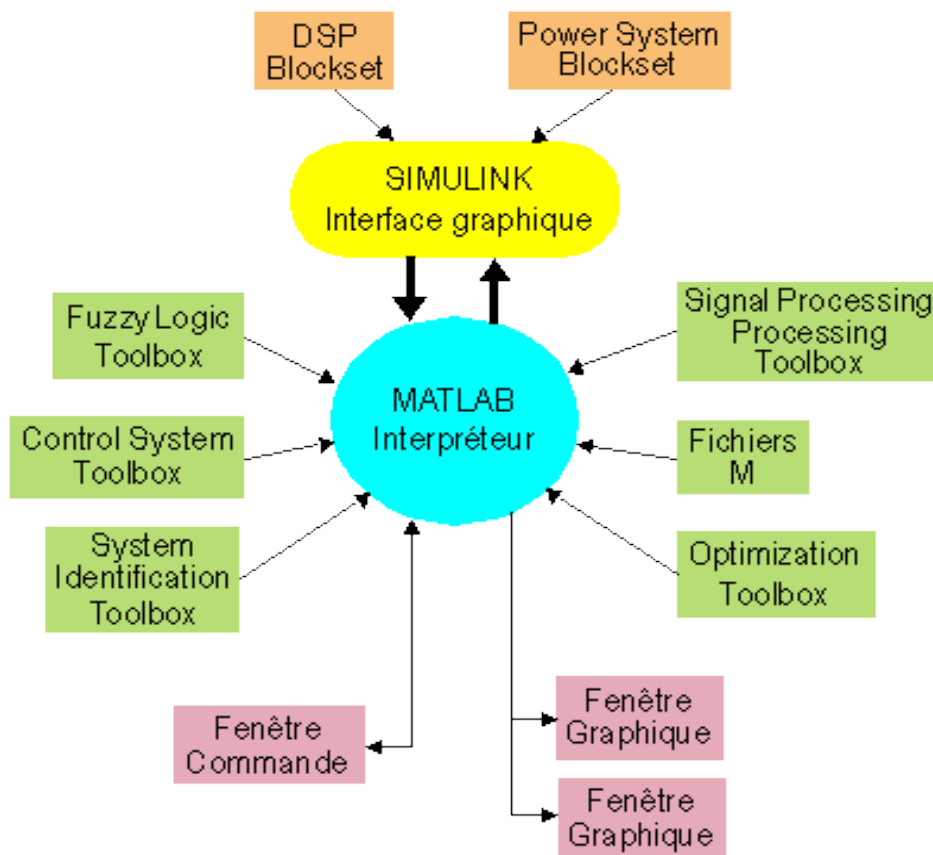


Figure III-1 : Diagramme de fonctionnement MATLAB.

❖ ANSYS :

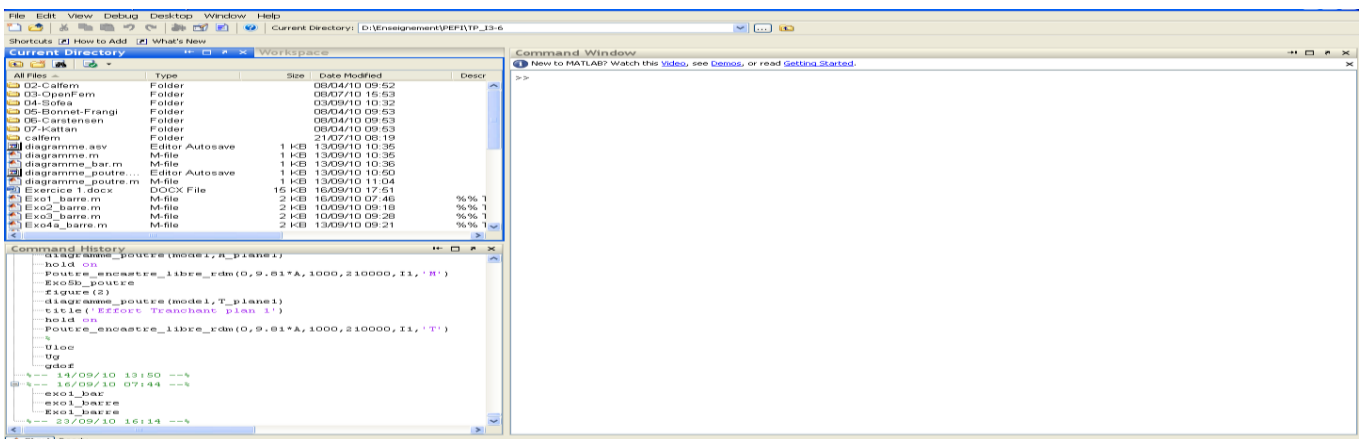
Deux environnements logiciels permettent de mettre en œuvre le code ANSYS :

- ANSYS classic : première solution logicielle développée par le constructeur, elle est destinée à la construction de modèles éléments finis à la géométrie simple, facilement constructible à l'aide d'opérations basiques, à partir de cet environnement, l'utilisateur construit directement un modèle éléments finis en utilisant le langage de script APDL (ANSYS Parametric Design Language), ANSYS classic est donc destiné à des utilisateurs compétents dans le domaine de la simulation numérique.
- ANSYS Workbench : cette plate-forme propose une approche différente dans la construction d'un modèle en ré-utilisant le code ANSYS initial, elle est particulièrement adaptée au traitement de cas à la géométrie complexe (nombreux corps de pièces) et aux utilisateurs non confirmés dans le domaine du calcul, dans cet environnement, l'utilisateur travaille essentiellement sur une géométrie et non plus sur le modèle lui-même, la plateforme est donc chargée de convertir les requêtes entrées par l'utilisateur en code ANSYS avant de lancer la résolution, le modèle éléments finis généré reste néanmoins manipulable en insérant des commandes propres au code ANSYS.

III.3 Modélisation et simulation :

III.3.1 Étapes du programme MATLAB :

Au lancement de Matlab, l'interface suivante apparaît :



Le modèle à construire est illustré ci-dessous.

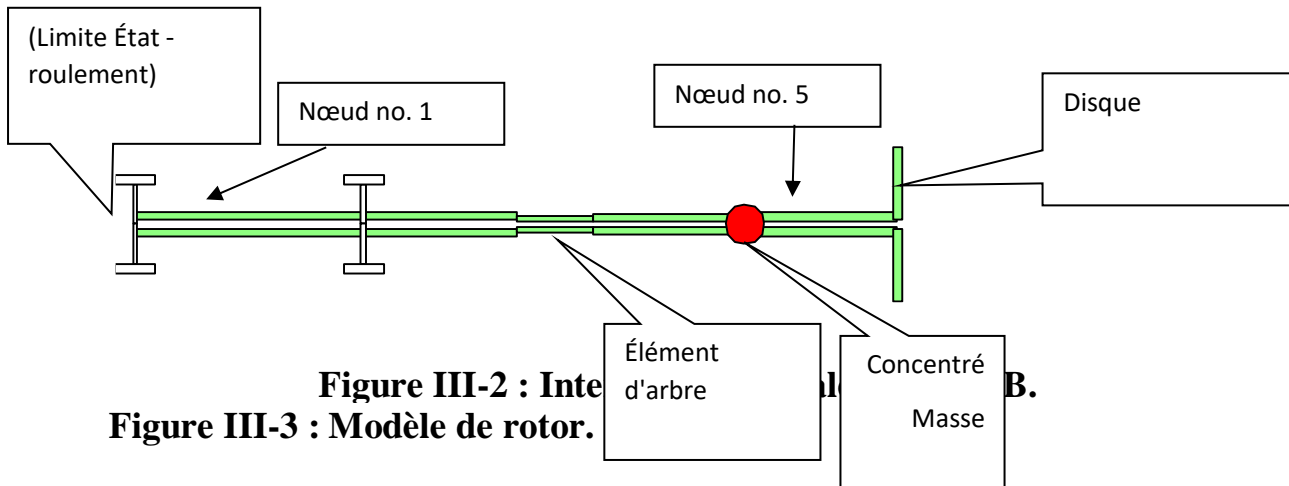


Figure III-2 : Inte
Figure III-3 : Modèle de rotor.

Étape 1 : Créez un fichier modèle ayant le suffixe .m (tutorial.m) dans un éditeur de texte.

- Définissez les emplacements nodaux des éléments, les emplacements nodaux sont définis dans un vecteur de nombres en unités cohérentes (mètres).

Dans notre cas, nous utilisons :

NOEUDS = [0 0,3 0,5 0,6 0,8 1,0].

(Ici $z = 0$ définit le nœud n° 1 $z = 0,3$ nœud n° 2 etc).

- Une fois les nœuds définis, des éléments sont définis entre les différents nœuds.

1 2 30e-3 12e-3 1

2 3 32e-3 10e-3 1

3 4 22e-3 8e-3 1

4 5 28e-3 6e-3 1

ELEMENTS = [5 6 30e-3 6e-3 1].

Chaque élément est défini au moyen d'une seule ligne dans « l'ÉLÉMENTS matrice ».

Le format de chaque ligne est :

CHAPITRE III : Simulation et modélisation.

{First_node Second_node Outer_diameter Inner_diameter Material_Set_number}.

- Définition d'un jeu de matériaux :

Dans la ligne Matlab ci-dessous, deux matériaux différents sont définis.

La première rangée est constituée du matériel no. 1 etc.

MATÉRIAUX = [210e9 7800 0,3; 70e9 3200 0,3].

Chaque ligne du MATÉRIAUX matrice au format suivant :

{Young_Modulus Desnity Poison_constant}.

- Définition d'un disque sur un nœud spécifique :

DISQUES = [12e-3 12e-3 1 6 0,2].

Où est le format :

{Node_no Outer_diameter Inner_diameter Largeur Material_no}.

- Roulements sont définis par leurs propriétés de rigidité et d'amortissement, supposons que les roulements ne possèdent pas d'amortissement et que leur raideur équivalente dans les directions x et y est de 2000 [N / m], un relèvement doit être défini aux nœuds numéro 1 et 2.

RESSORTS = [1 2e3 2e3; 2 2e3 2e3].

Où est le format :

{Node_no Kxx Kyy}.

Le modèle de roulement traité par ROTFE peut être plus compliqué et des termes croisés (Kxy, Kyx) et de rigidité angulaire peuvent également être utilisés, le format général de l'entrée de roulement est dans la section de référence, un degré de liberté fixe (rigidité infinie) peut être défini au moyen du {BCNodeDir} vecteur, puisque chaque nœud contient 4 DOF, l'inclusion de l'entrée {Node.DOF} (par exemple 1.3) dans ce vecteur forcera le 3ème DOF du nœud 1 (mouvement dans la direction y) à être forcé à zéro.

- Dans cet exemple, une masse ponctuelle sera ajoutée au nœud 5.

POINT_MASS = [5 .01 0 0].

Où est le format :

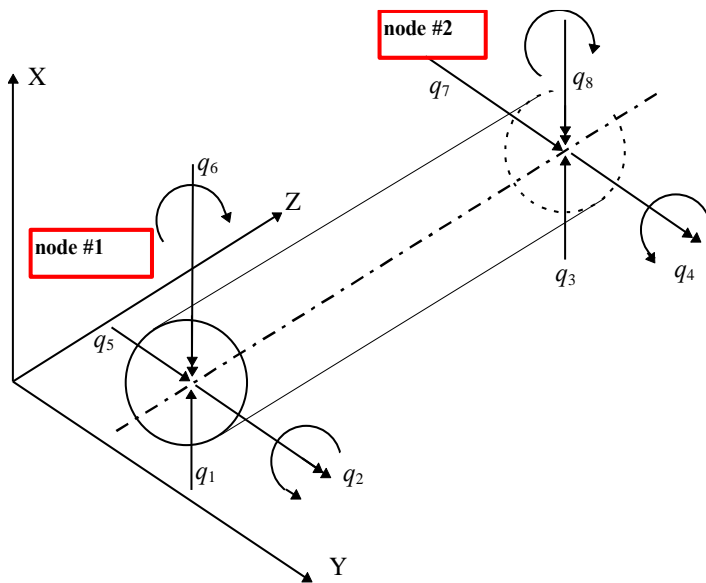
{Node_no m Jp J}.

Étape 2 : Dessiner le modèle pour assurer l'exactitude.

Le contenu du fichier doit être :

```
NOEUDS = [0 0,3 0,5 0,6 0,8 1,0];  
ELEMENTS = [ ...  
1 2 30e-3 12e-3 1  
2 3 32e-3 10e-3 1  
3 4 22e-3 8e-3 1  
4 5 28e-3 6e-3 1  
5 6 30e-3 6e-3 1];  
  
MATÉRIAUX = [210e9 7800 0,3; 70e9 3200 0,3];  
DISQUES = [ 6 0,2 12e-3 12e-3 1];  
RESSORTS = [1 2e3 2e3; 2 2e3 2e3];  
POINT_MASS = [5 .01 0 0];
```

Utilisez le Matlab « commander » tutoriel (drawrot) pour obtenir la **figure III-4**.



Ordre des coordonnées ROTFE

- $q_1 = \text{Nœud} = 1, \text{DIR} = 1 \rightarrow 1,1$
- $q_2 = \text{Nœud} = 1, \text{DIR} = 2 \rightarrow 1,2$
- $q_3 = \text{Nœud} = 2, \text{DIR} = 1 \rightarrow 2,1$
- $q_4 = \text{Nœud} = 2, \text{DIR} = 2 \rightarrow 2,2$
- $q_5 = \text{Nœud} = 1, \text{DIR} = 3 \rightarrow 1,3$
- $q_6 = \text{Nœud} = 2, \text{DIR} = 3 \rightarrow 2,3$
- $q_7 = \text{Nœud} = 1, \text{DIR} = 4 \rightarrow 1,4$
- $q_8 = \text{Nœud} = 2, \text{DIR} = 4 \rightarrow 2,4$

Figure III-4 : Degrés de liberté des éléments.

Cette commande en plus de tracer la géométrie du modèle, vérifie l'exactitude du fichier modèle et sa compatibilité avec ROTFE 2.0.

Étape 3 : Exécuter ROTFE.

Le modèle d'éléments finis est construit en tapant la commande suivante à partir de la ligne de commande Matlab :

```
Rot = rotfe ('tutoriel');
```

La structure Rot contient toutes les informations sur le modèle :

Dactylographie

Pourrir ↵

Rendements.

Étape 4 : Modes de tracé.

L'interface graphique de traçage des formes de modes est appelée en tapant {modeplot}.

Dans la zone d'édition du nom du modèle, tapez tutorial et appuyez sur la touche de retour, une saisie réussie produira un tracé du modèle identique à celui obtenu à l'étape 2.

L'interface graphique doit accepter la forme suivante :

Appuyez sur le bouton [GO] pour effectuer le calcul de la vitesse de rotation spécifiée.

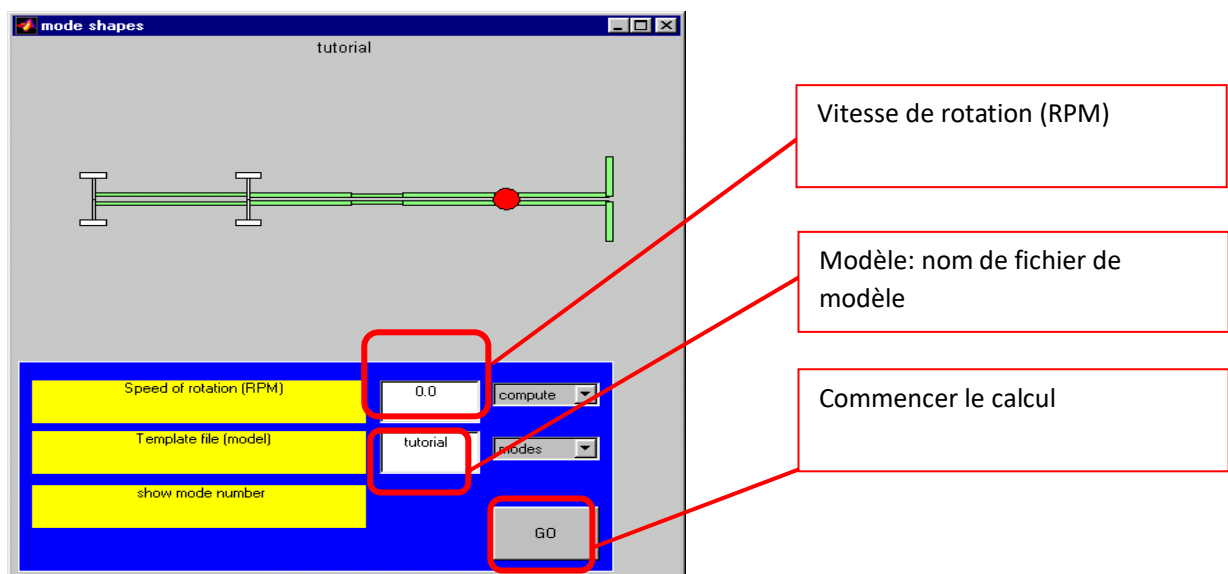


Figure : III-5 : Interface graphique.

CHAPITRE III : Simulation et modélisation.

Utilisez la case à cocher [3D] pour obtenir cette vue.

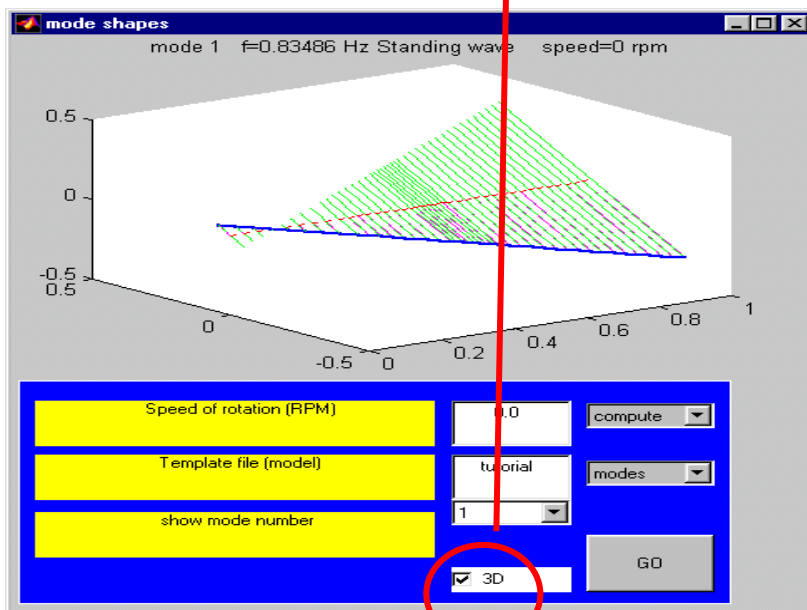


Figure III-6 : Interface graphique de la case à cocher [3D].

Les différentes formes de mode peuvent être visualisées en 2D (3D non cochée) et différents modes peuvent être sélectionnés.

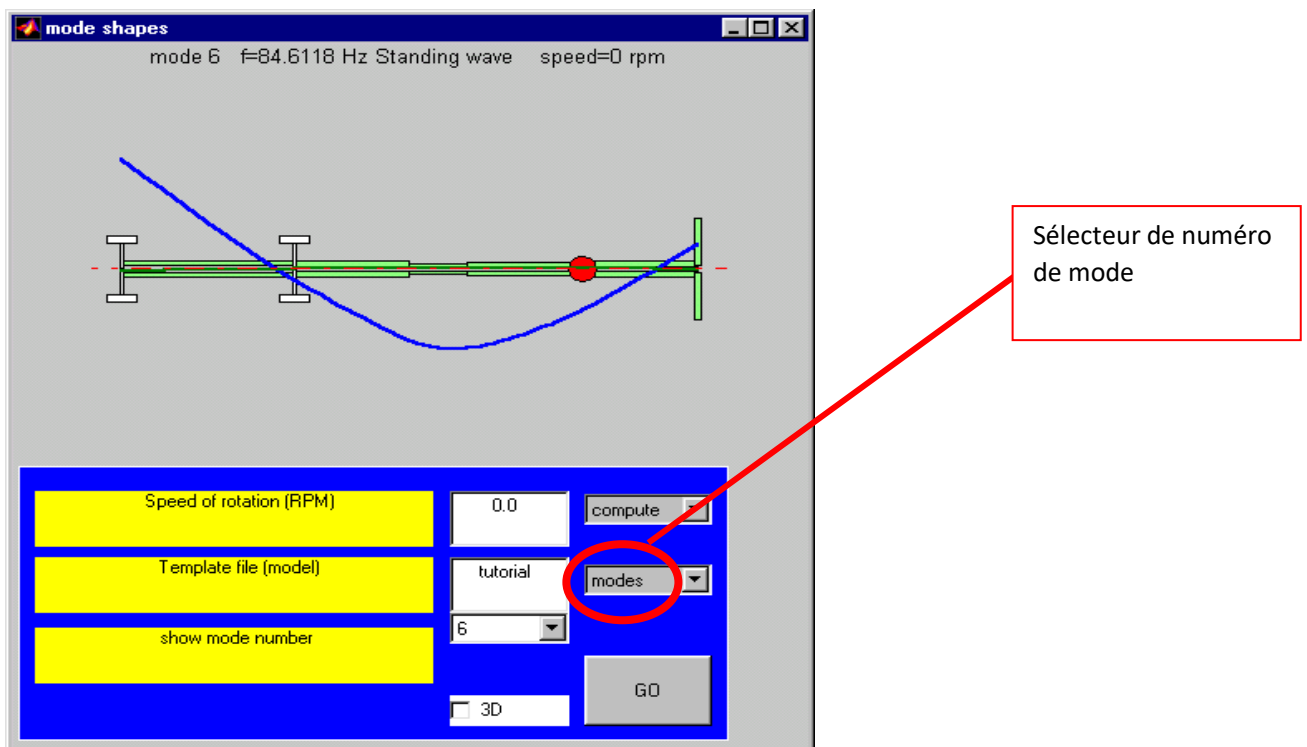


Figure III-7 : Interface graphique pour le sélecteur de numéro de mode.

Entrez la vitesse de rotation de 1200 tr / min et appuyez sur [GO].

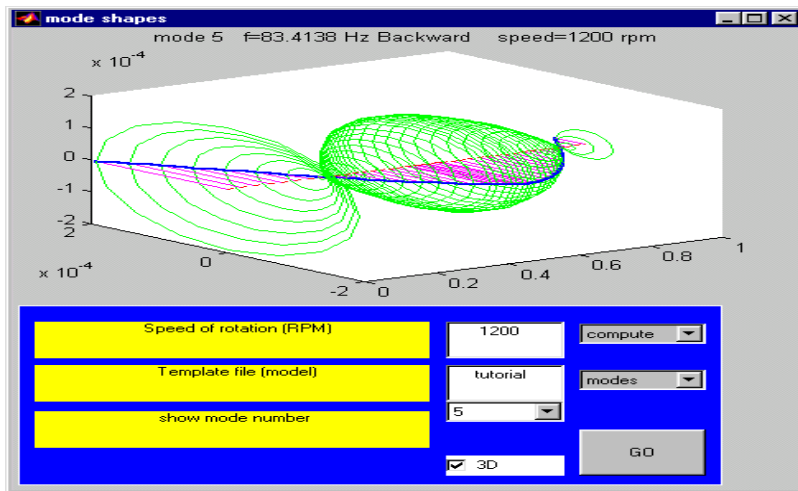


Figure III-8 : Interface graphique avec la vitesse de rotation de 1200 tr/min.

Étape 5 : Calculez et dessinez le diagramme de Campbell.

Dans la fenêtre de commande MATLAB, tapez :
{Campbell}.

Et dans le didacticiel sur le type de nom de fichier de modèle suivi d'une pression sur le bouton [GO].

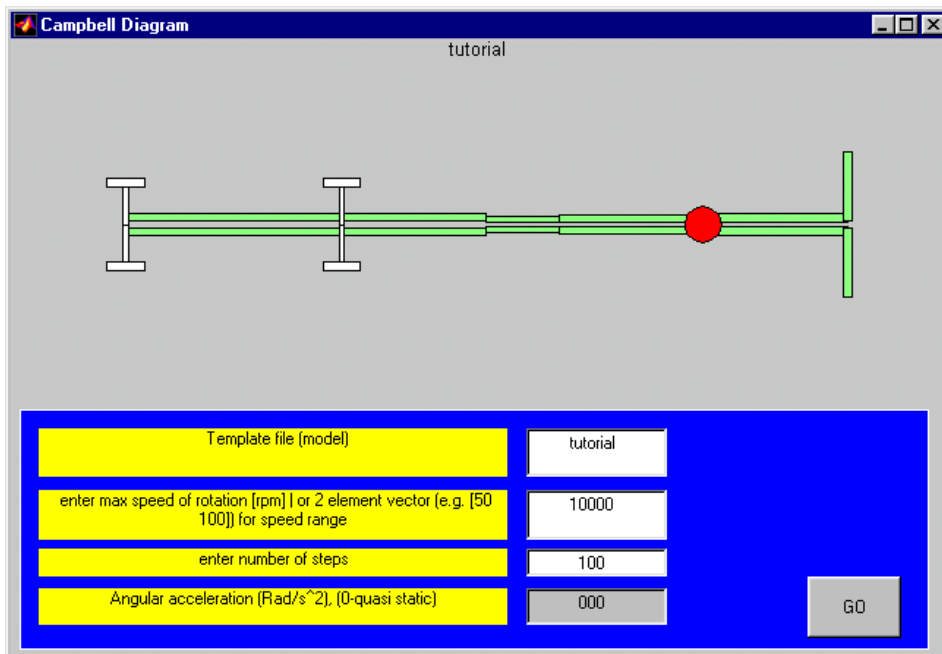


Figure III-9 : Calcul du diagramme de Campbell.

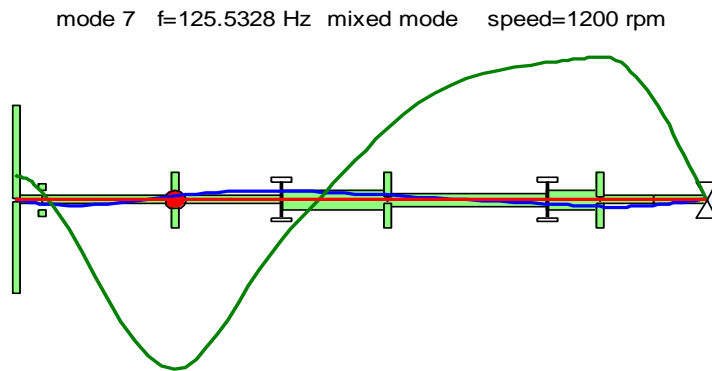


Figure III-10 : Nouvelle superposition de modèle.

III.3.2 Étapes du logiciel ANSYS :

L'ouverture du logiciel fait apparaître le menu principal présenté ci-dessous voir **figure III.11**.

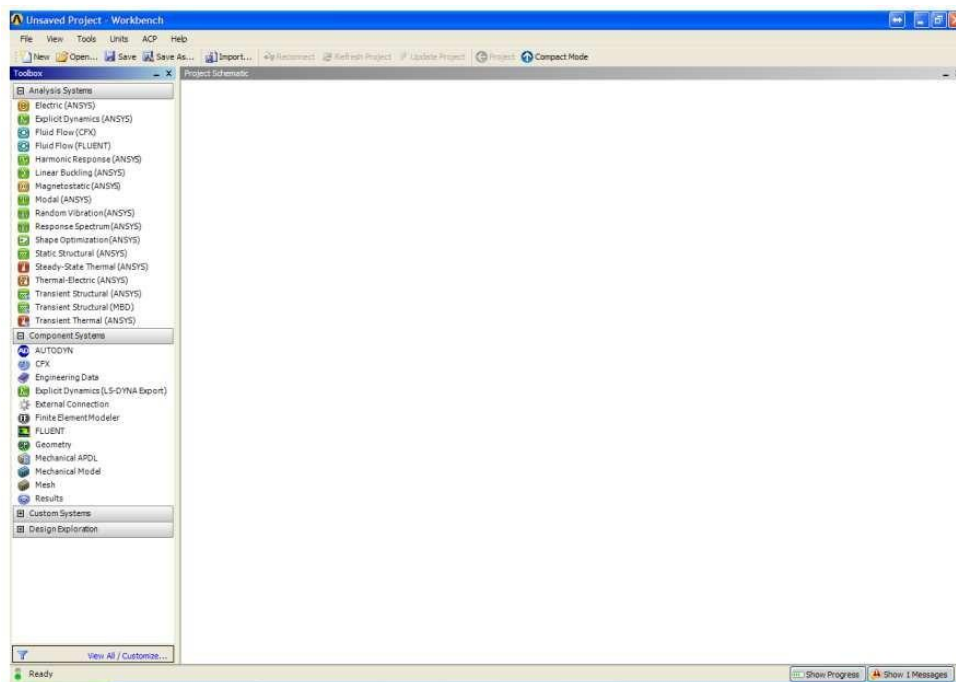


Figure III-11 : Menu principal.

Le bar d'outil permet un accès rapide à plusieurs commandes tel que la sauvegarde mais aussi un accès aux options du logiciel voir **figure III-12**.

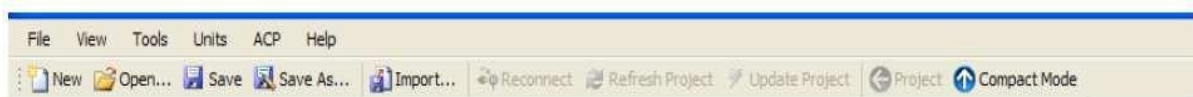


Figure III-12 : Commande de bar d’outil.

La première étape est de modifier les paramètres linguistiques du logiciel afin que celui-ci soit entièrement en anglais afin de faciliter l’apprentissage, les tutoriaux sont souvent en anglais.

LMC sur Tools et LMC sur Options... Le menu ci-dessous devrait apparaître à votre écran voir **figure III-13**.

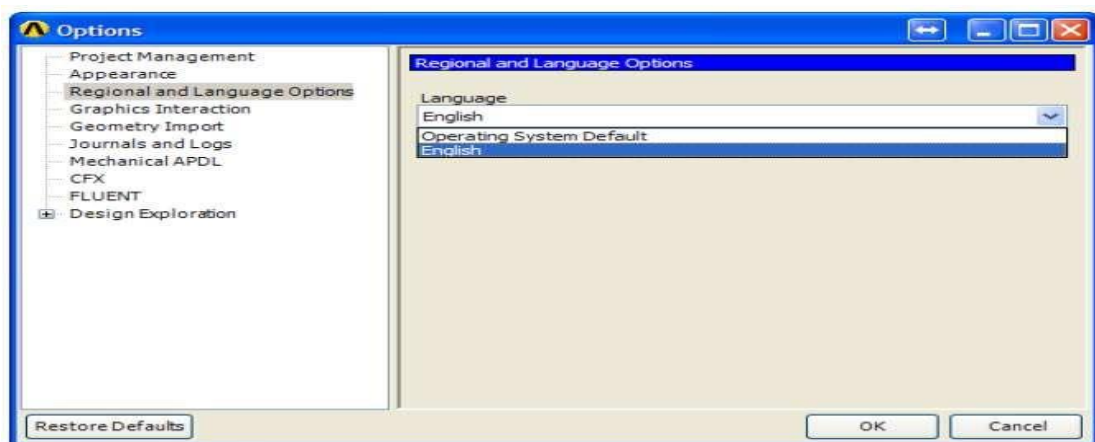


Figure III-13 : Menu d’option.

Pour débiter un nouveau projet, LMC sur New. LMC sur Save As... pour enregistrer celui-ci dans le dossier de votre choix. Il est conseillé de créer un nouveau dossier et d’enregistrer le projet à l’intérieur de celui-ci. Cette technique permet de regrouper tous les fichiers de l’analyse à l’intérieur d’un même dossier voir **figure III-14**.

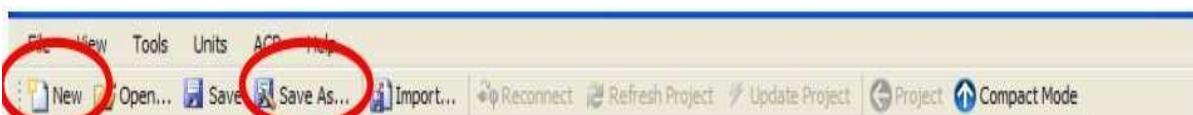


Figure III-14 : Dossier d’enregistrement le projet.

La barre d’outils Toolbox vous donne accès à plusieurs systèmes d’analyse. Pour débiter une analyse modale, LMC sur Modal (ANSYS) et glisser dans Project Schématique voir **figure III-15**.

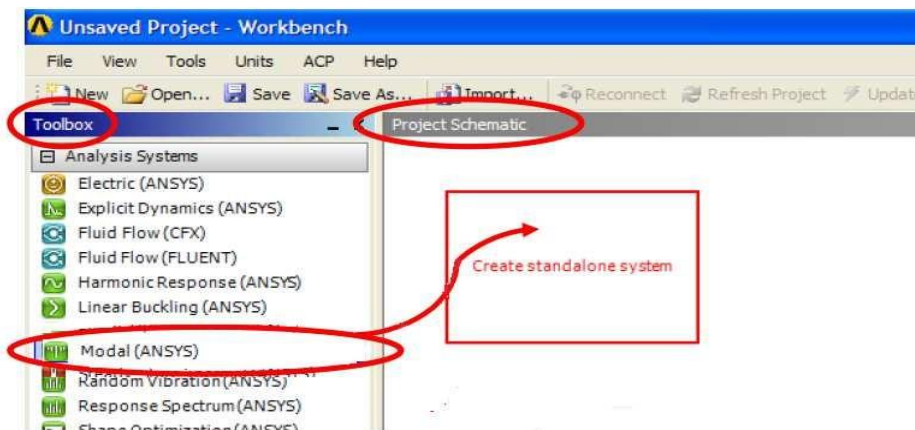


Figure III-15 : Méthode de schématisation de projet.

Le système A est maintenant créé dans Project Schématique voir **figure III-16**.

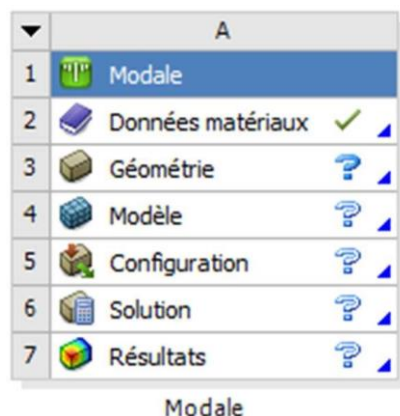


Figure III-16 : Schéma de projet.

Le système comporte différentes cellules soit : Engineering Data, Geometry, Model, Setup, Solution, Results. Pour faciliter leurs compréhensions, on peut les regrouper selon le logiciel déjà étudié Workbench (ANSYS).

- Prétraitement : Engineering Data, Geometry et Model.
- Résolution : Setup et solution.
- Post-traitement : Résultats.

Il est possible d'obtenir une description de chaque cellule dans le fichier d'aide d'ANSYS Workbench.

❖ Engineering Data :

La cellule Engineering Data est utilisée pour définir et accéder à des modèles de matériau pour être utilisé dans une analyse. LMC la cellule Engineering Data ou RMC et choisir Edit dans le menu contextuel qui apparaît pour entrer l'environnement.

❖ Geometry :

Utilisez la cellule Geometrie pour importer, créer, modifier ou mettre à jour un modèle pouvant être utilisé pour une analyse. LMC sur la cellule ou RMC et choisir Edit dans le menu contextuel qui apparaît pour entrer l'environnement.

❖ Model/Mesh :

La cellule Model est associée à la définition de la géométrie, des systèmes de coordonnées, des connections et du maillage dans le module de simulation Mechanical.

❖ Setup :

La cellule Setup permet de définir les chargements, conditions frontières et autre configuration de l'analyse.

❖ Solution :

La cellule Solution permet d'avoir accès aux données de résolution.

❖ Results

La cellule Results regroupe les résultats de l'analyse. Celle-ci est souvent référée à une cellule de post-traitement.

III.3.2.1 Barre de référence :

Donnée et dimension de rotor dans le tableau suivant.

Tableau III-1 : Donnée et dimension de rotor.

Longueur (L) de l'arbre	14.2 m
Diamètre (D) de l'arbre	1.4 m
Diamètre de disque	7 m
Placement de disque ($2L/3$)	9.64 m
Vitesse de rotation	2500 tr/mn
Épaisseur de disque (e)	1.5 m

La barre de référence dans la figure suivant.

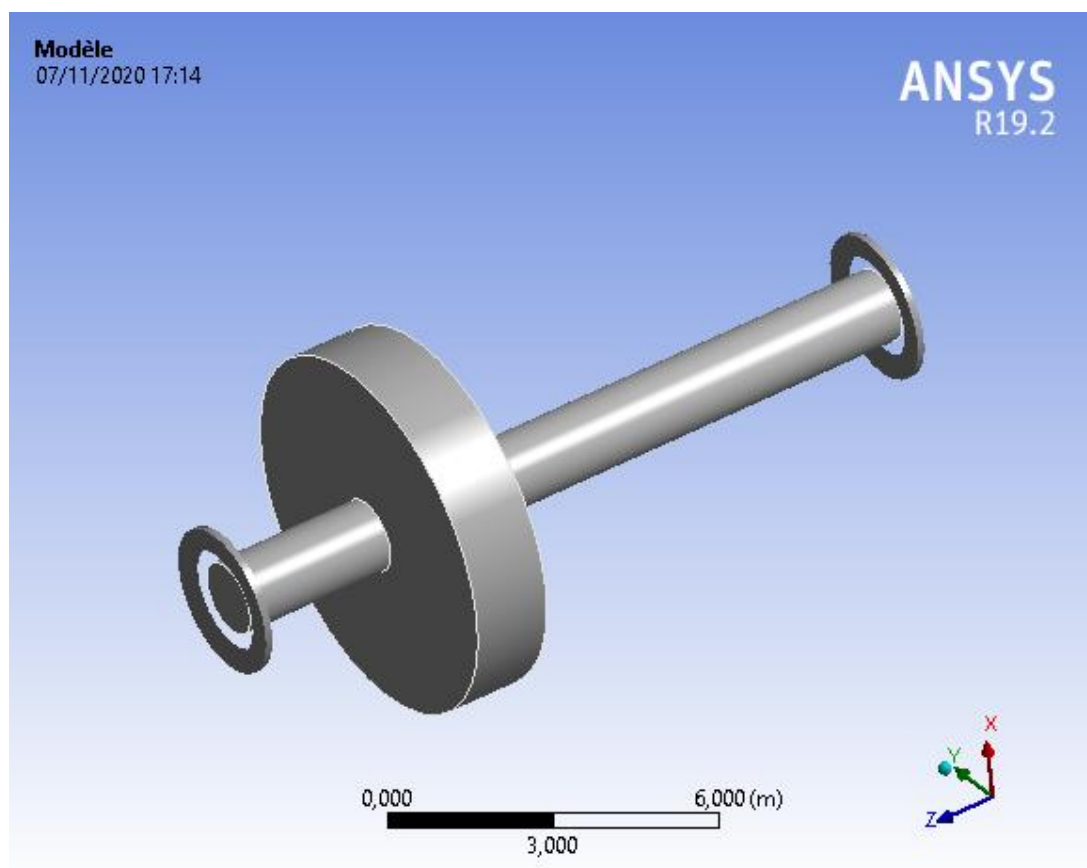


Figure III-17 : Configuration du matériau.

III.3.2.2 Maillage du modèle :

On a choisi le type de maillage comme suivant.

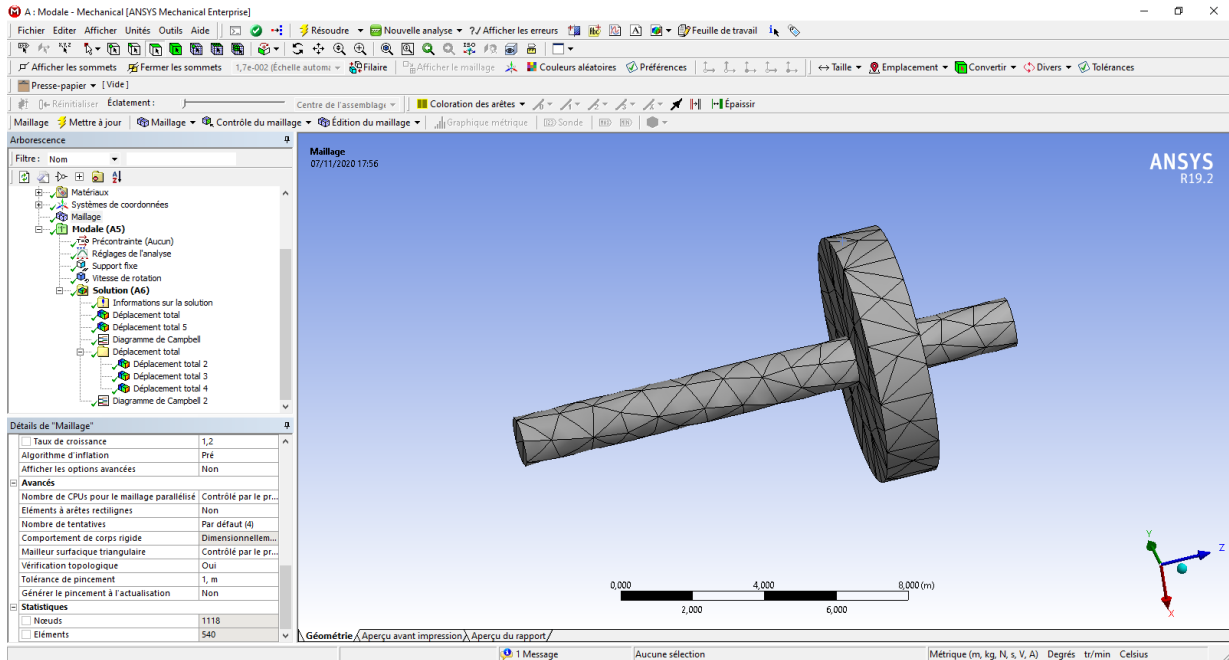


Figure III-18 : Maillage du modèle.

Tableau III-2 : Propriétés et statistiques de la barre de référence.

Statistiques	
Nœuds	1118
Éléments	540

III.3.2.3 Conditions aux limites :

LMC sur Modal, LMC sur Palier (Raideur) voir **figure III.19**.

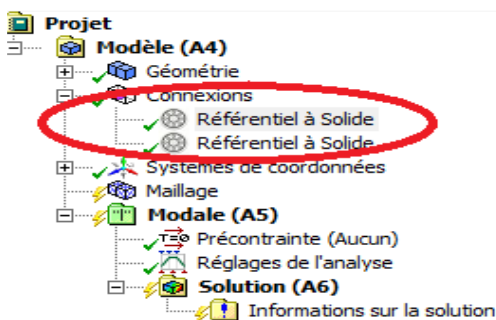


Figure III-19 : Raideurs des paliers.

III.3.2.4 Affichage des résultats :

Pour affiché la déformation. LMC sur Solution, LMC sur Déformation voir **figure III-20**.

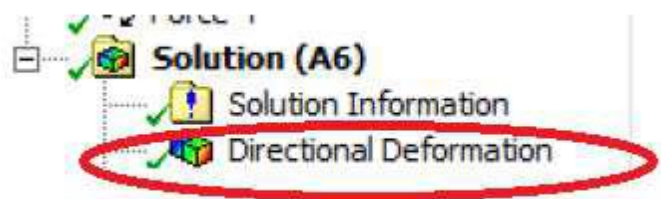


Figure III-20 : Direction de déformation.

➤ Premier mode propre :

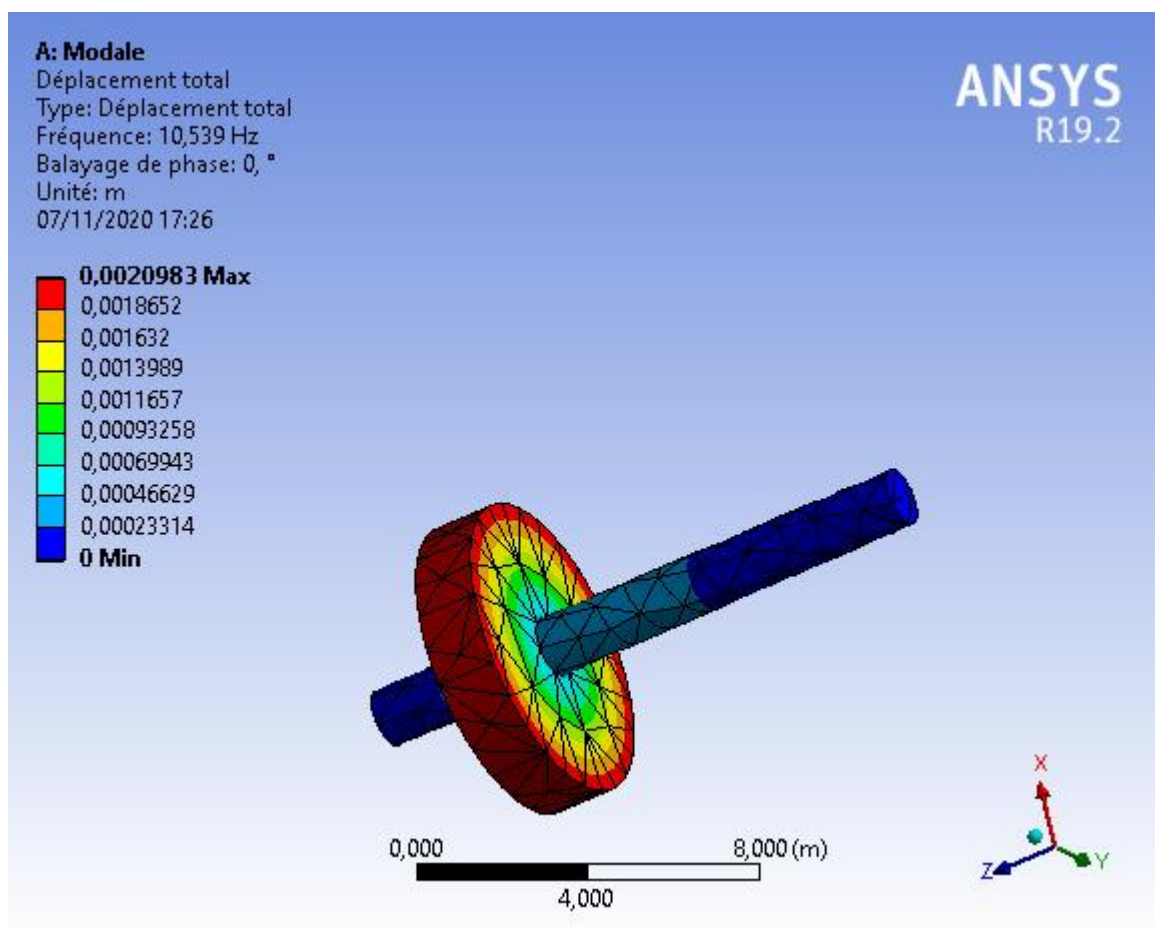


Figure III-21 : Mode propre 1.

✚ Deuxième mode propre :

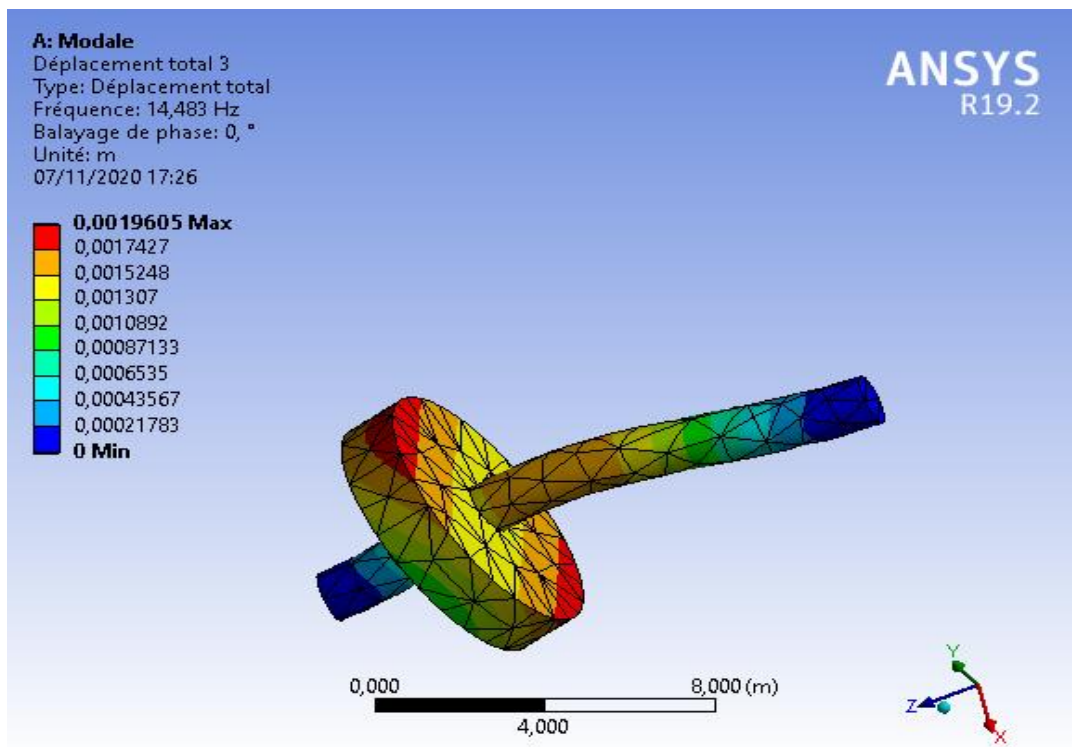


Figure III-22 : Mode propre 2.

✚ Troisième mode propre :

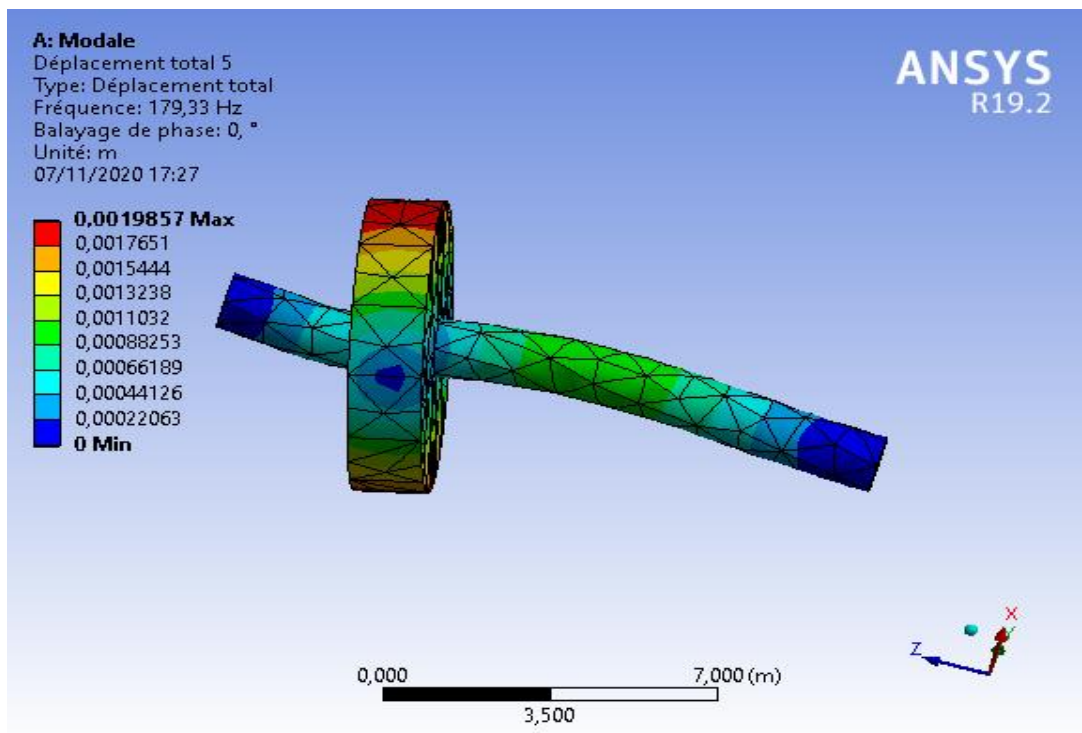


Figure III-23 : Total déformation.

III.4 Conclusion :

Dans ce chapitre, on a présenté la modélisation et la simulation graphique de MATLAB et ANSYS pour l'équilibrage d'un rotor de turbine à vapeur de Type A15.

IV.1 Introduction :

Dans ce chapitre, nous vous proposons les résultats de notre étude et analyse pour divers exemples d'applications pour étudier l'influence des paramètres physiques et géométriques, la position du disque sur l'arbre tournant.

Nous étudions cette influence de ces paramètres sur les fréquences propres et les vitesses critiques de l'arbre avec disque, pour la stabilisation du rotor.

IV.2 Matériels du travail :

La simulation a été faite sous un ordinateur portable « TOSHIBA L770/L775 » dont les caractéristiques sont détaillées dans le tableau suivant :

Tableau IV-1 : Caractéristiques de l'ordinateur de simulation.

Ordinateur portable TOSHIBA - Caractéristiques détaillées	
Modèle	L770/L775
Processeur	Intel® Core™ i5 cadencé jusqu'à 2,4 GHz en mode Turbo
Mémoire	
Capacité mémoire	8 Go
Type	SO-DIMM DDR3
Fréquence	1066 MHz
Affichage	
Écran	17"
Résolution	WXGA (1366 x 768)
Carte graphique	NVIDIA GEFORCE 315M
Stockage	
Espace disque total	500 Go

IV.3 Résultat et interprétation :

Dans cette partie, nous avons examiné l'effet des paramètres mentionnés dans la simulation précédente et la modélisation réalisée Par les logiciels MATLAB et ANSYS.

En utilisant un modèle 3D voir **Figure IV-1**.

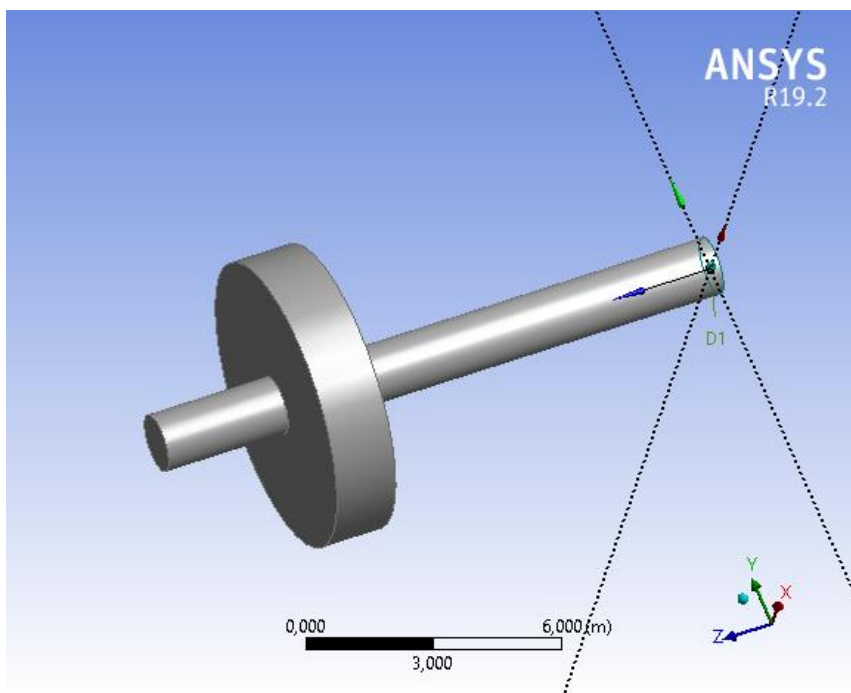


Figure IV-1 : Modèle 3D du rotor.

Ce tableau représente les différentes valeurs des fréquences propres trouvées lors de simulation.

Tableau IV-2 : Comparaison entre les valeurs des fréquences propres.

Méthode de résolution	Modes		
	1	2	3
Fréquence (Hz)	10.539	14.483	179.33
Taux d'erreur (%) Max	0.0020983	0.0019605	0.0019857

Du point de vue de la fréquence, nous voyons que nos résultats de rotor sont presque identiques dans tous les modes représentés par le taux d'erreur maximal.

IV.3.1 Influence des propriétés géométriques de l'arbre sur les fréquences propres et les vitesses critiques :

Dans le tableau suivant, on varie les vitesses de rotation de l'arbre (tr/min) pour avoir ces influences sur les fréquences propres, les vitesses critiques et la stabilité du rotor, on garde les mêmes conditions aux limites (bi-appui flexible amorti) et les mêmes propriétés physiques de l'arbre.

Tableau IV-3 : Fréquence propre avec différentes vitesses de rotation.

Mode	Direction de swhir	Mode Stabilité	Vitesse critique	0, tr/min	1500, tr/min	3000, tr/min	4500, tr/min	6000, tr/min
1,	BW	STABLE	607,15 tr/min	10,539 Hz	9,5017 Hz	6,2596 Hz	4,5118 Hz	3,4907 Hz
2,	INDETERMINE	STABLE	750,58 tr/min	14,483 Hz	10,539 Hz	10,539 Hz	10,539 Hz	10,539 Hz
3,	FW	STABLE	1017,6 tr/min	14,503 Hz	18,124 Hz	19,749 Hz	20,552 Hz	21,022 Hz
4,	BW	STABLE	1703,5 tr/min	37,96 Hz	28,783 Hz	25,899 Hz	24,726 Hz	24,109 Hz
5,	FW	STABLE	3677,8 tr/min	38,111 Hz	56,772 Hz	61,088 Hz	61,551 Hz	61,69 Hz
6,	FW	STABLE	0, tr/min	64,41 Hz	69,556 Hz	100,08 Hz	138,69 Hz	179,33 Hz

- Dans la **figure IV-2**, on montre le Diagramme de Campbell dans lequel nous avons précédemment entré des données pour le calcul en MATLAB.
- La **figure IV-3**, présente le Diagramme de Campbell pour les six modèles différents.
- La **figure IV-4**, présente le Diagramme de la stabilité pour les six modèles différents.

Chapitre IV : Résultat et interprétation.

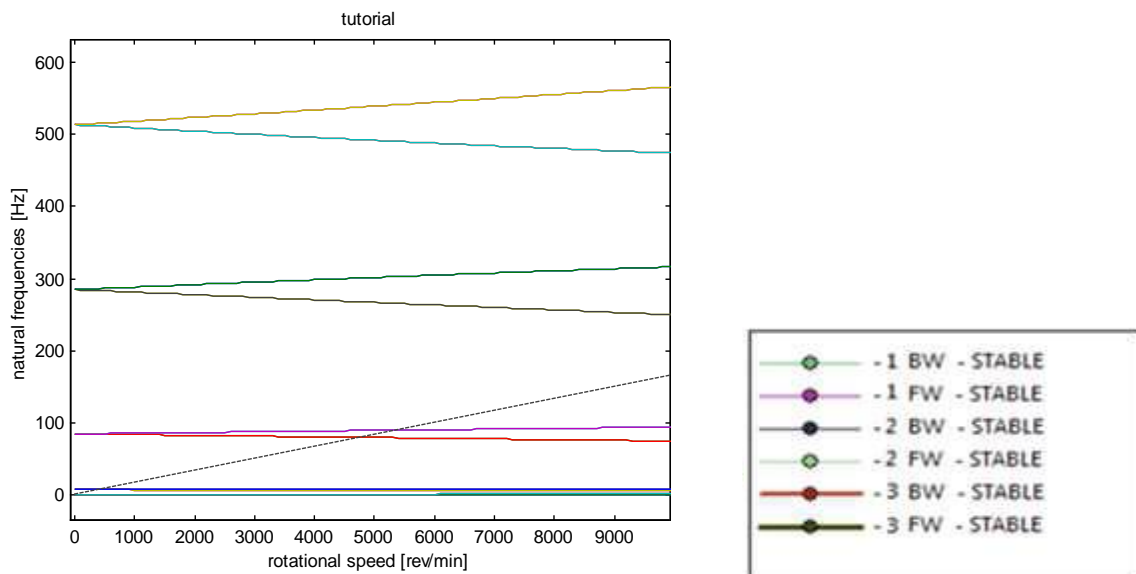


Figure IV-2 : Diagramme de Campbell de programme MATLAB.

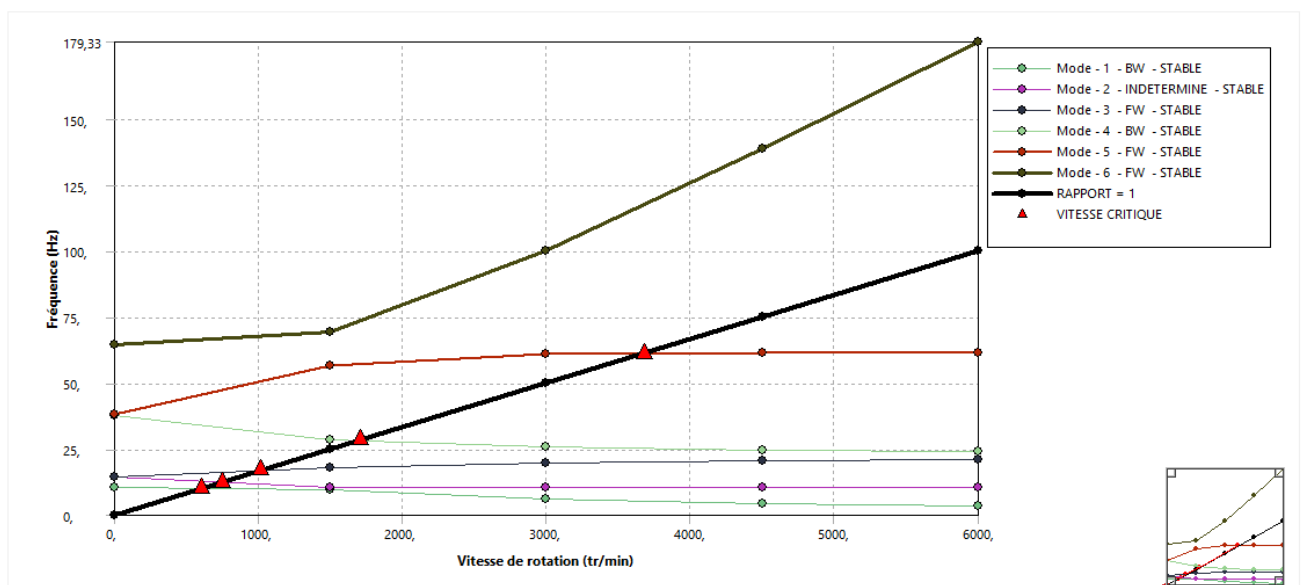


Figure IV-3 : Diagramme de Campbell pour les six modèles différents.

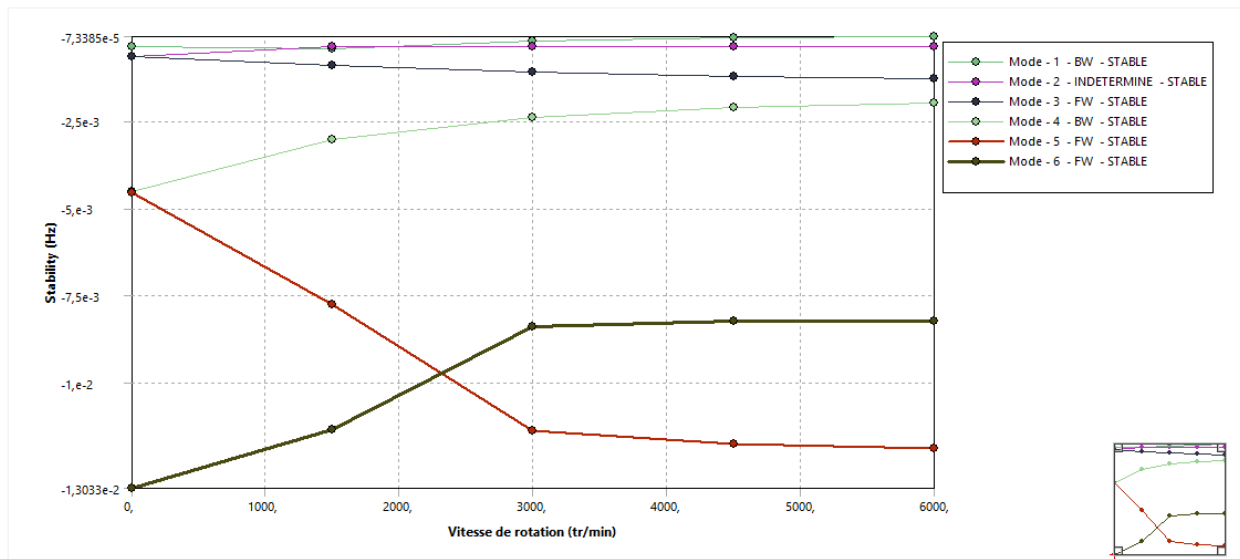


Figure IV-4 : Diagramme de la stabilité pour les six modèles différents.

IV.4 Conclusion :

Les résultats montrent que les propriétés géométriques d'un arbre tournant ont une influence très importante sur les fréquences propres et par conséquent sur les vitesses critiques et la stabilité de l'arbre tournant.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Ce mémoire est une initiation à l'étude de l'instabilité des rotors, notre objectif est de comprendre le phénomène liés à la dynamique des rotors, et pour déterminer les fréquences propres et les vitesses critiques d'un rotor par le programme MATLAB et logiciel ANSYS, et on a présenté les éléments constituant un rotor et qui sont : l'arbre, le disque et les paliers.

Deux expériences ont été élaborées pour illustrer l'utilité des équations analytiques, la modélisation des équations a été exécutée dans le programme MATLAB pour un équilibrage d'un étage d'un rotor qui faciliterait la conversion du déséquilibre mesuré dans les résultats expérimentaux.

Les résultats obtenus grâce à MATLAB et ANSYS ont montré que le balourd enregistré d'un étage de rotor se trouve dans la tolérance même avec un grand nombre d'aubes, Le système d'équilibrage doit améliorer le comportement des machines tournantes en réponse au balourd.

Les problèmes vibratoires des machines tournantes demeurent préoccupants malgré les progrès réalisés ces dernières années dans leur conception, les balourds en sont une cause des plus importantes, l'étude bibliographique met en évidence l'intérêt de concevoir un système d'équilibrage actif adapté aux machines de grandes dimensions en régimes permanent et transitoire.

Le concept d'équilibrage actif développé dans cette étude a été appliqué avec succès à des machines tournantes de grandes dimensions, il peut par conséquent être étendu à d'autres machines au moyen d'une adaptation de la technologie des dispositifs d'équilibrage, de plus, les défauts de balourd sont inévitables, il peut donc être envisagé de concevoir des machines équipées de dispositifs actifs dès leur conception ce qui permettrait un positionnement des plans d'équilibrage et une conception des dispositifs optimisés.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Michel Pluviôse, Ingénierie des turbomachines : Circuits, aubages, vibrations, effets instationnaires et des exercices résolus, 2eme édition 2012, p30, Ellipses, Français.
- [2] HOUARI Amin et BELOUADAH Mounir, Contribution à l'étude de l'équilibrage statique des rotors turbines, Université Mohamed Boudiaf de M'sila, 2018, p 01.
- [3] Manuel de société SCHENCK.
- [4] SALAH AMROUNE, Réhabilitation d'un rotor turbine à vapeur et contribution à l'élaboration d'un logiciel de répartition d'aubes, Université Mohamed Boudiaf de M'sila, 2001, p 01.
- [5] Cours Thermodynamique applique au système énergétique, Université Numérique Thématique en Sciences de l'Ingénieur et Technologie, Mines Paris 2011.
- [6] Eugène Hecht ,Physique, 1eme éditions, De boeck Université , page 194, 1999.France.
- [7] Renaud Gicquel, La Thermodynamiqueappliquéeaux systèmes énergétiques, Tome 01, Presses de l'Ecole des Mines de Paris, p141, 2005, France.
- [8] Manuel de société General Electric.
- [9] International Standard ISO1941, Specification and verification of balance tolérances, Second édition, 2003-08-15.
- [10] Jean-Marc PUGNET,Équilibrage des rotors rigides et flexibles, BM 5130, Technique de l'ingénieur, 2eme Edition, p02, 7/2007.
- [11] Hatto Schneide, Technique d'équilibrage, Traduction de la 6 édition allemande, Springer-Verlag France, Paris 2006 , p 124- 07-32-305 et198.
- [12] Revue de Société ABB, Technologies de l'énergie et de l'automatation, Suisse 5/1998.
- [13] Jacques Maunand, Production d'électricité par turbine à gaz, Technique d'ingénieur, D4-001, p11, 2008.
- [14] Olivier Pantale, Machine Mécanique et Turbomachines, Ecole National Ingénieur de Tarbes, p26, 2008, France.
- [15] M. Jean-Pierre SAGUIN, Equilibrage & Diagnostic, Manuel SCHENCK, page 7.1991, Darmstadt Allemand.
- [16] Nassim Gougam, Equilibrage dans les Conditions de Service, société Brüel & Kjær, p 04, 2002, France.

- [17] Document Manuel Machine Equilibrage, Bruel et Kjaer Vibro, Equilibrage dans les condition de service, p 06, 2002,France.
- [18] International standard, Mechanical vibration - balance quality Requirements for rotors in a constant (rigid) state, norme iso 1940/1-1986, second édition 2003-08-15.
- [19] ISO 1940-1, Mechanical vibration Balance quality requirements for rotors in a constant (rigid) state , Part 1, 2003/Cor,2005.
- [20] ISO 1925:2001, Mechanical vibration Balancing Vocabulary , 4 Édition , 2001-04-01.
- [21] Jacques MOREL ,Surveillance vibratoireet maintenance prédictive,R 6 100 – 1,p10,Techniques de l'Ingénieur,2002.
- [22] H. Sitterding, Gesch. Construction de turbomachines en Suisse. Perspective, dans NZZ, 22.6.1955.
- [23] Fiche Technique de Machine d'équilibrage H-04 SCHENCK. archive MEI. M'sila 2014.
- [24] Document, société MEI, Sonalgaz M'sila,Alger,2018.

ANNEXES

Annexe A :

❖ Commande de programme MATLAB :

```
function [a,b,c,d,bu,du]=rot2ss(varargin)
% [a,b,c,d,bu,du]=rot2ss(Rot)
% or
% [a,b,c,d,bu,du]=rot2ss(Rot,W)
% or
% [a,b,c,d,bu,du]=rot2ss(M,C,K,rc,fc)
% or
% [a,b,c,d,bu,du]=rot2ss('template',[W])
%
%
% Transform a rotor model (output of rotfe.m) to
% a state space. Optionally reduce the order of the model
% according to the sub-field Reduct in Rot. If Rot.Reduct.flag==1
% the state transformation Rot.T is being used to reduce the model
% This transformation is computed directly by rotfe or by reduceX.m
%
% The model described by this function is:
%
%  $q' = a*q + b*u(t) + bu*(Fu\_cos*cos(W*t) + Fu\_sin*sin(W*t))$ 
%  $y = c*q$ 
% d,du are 0 and are provided for sole sake of compatability
% By I. Bucher
% Date 15-3-1996
% Rev. 1.0
%
% for Matlab 5.3
% Rev 1.5 5-8-98
% Rev 2.01 2-8-99
```

```

input_form=3;
if isstruct(varargin{1}), % full FE etc. model in
    switch nargin
        case 1, Rot=varargin{1}; W=Rot.W;
        case 2, [Rot W]=deal(varargin{:});
    end
    input_form=1;
elseif isstr(varargin{1}) % rot2ss(File,...)
    Rot=rotfe( varargin{1} );
    W = Rot.W;
    if nargin>1, W=varargin{2}; end
    input_form=2;
end
switch input_form
case {1,2}
    reduceQ=0;
    if isfield(Rot,'Reduct'),
        if Rot.Reduct.flag==1, reduceQ=1;
        end,end

if ~reduceQ % not reduced model >
    n=size(Rot.M,1);
    if nargin>2, % dW(t)/dt-> alpha is provided
        a=[zeros(n) eye(n); -Rot.M\[Rot.K+C*Rot.Kst Rot.D+W*Rot.G]];
    else,
        a=[zeros(n) eye(n); -Rot.M\[Rot.K Rot.D+W*Rot.G]];
    end
    b=[zeros(n); inv(Rot.M)]; bu=b;
    c=[eye(n) zeros(n)];
    d=zeros(n);
    nr=length(Rot.FORCE_DOF); nf=length(Rot.RESP_DOF);
    if length(nr)>0, c=c(Rot.RESP_DOF,:); end,% only dof indicated in template
    if length(nf)>0,b=b(:,Rot.FORCE_DOF); end,% "-"

```

```

if all([nf nr]>0), d=d(Rot.RESP_DOF, Rot.FORCE_DOF); end, % "-"
du=zeros(size(c,1), size(bu,2));

else
n=size(Rot.M,1);
a=[zeros(n) eye(n); -Rot.M\[Rot.K Rot.D+W*Rot.G]];
bu=[zeros(n); inv(Rot.M)];
b=bu*Rot.T.';
d=zeros(n)*Rot.T.';

c=[Rot.T 0*Rot.T];
d=zeros(n)*Rot.T.';
nr=length(Rot.FORCE_DOF); nf=length(Rot.RESP_DOF);
if nr>0, c=c(Rot.RESP_DOF,:); end, % only dof indicated in template
if nf>0, b=b(:,Rot.FORCE_DOF); end, % "-"
d=zeros( size(c,1), size(b,2)); % "-"
du=zeros(size(c,1), size(bu,2));
end % if ~reduceQ
bu=full(bu); du=full(du);

case 3 % compatibility with former versions
n=size(varargin{1},1);
switch nargin
case 5, [M,C,K,rc,fc]=deal(varargin{:});
case 3, [M,C,K]=deal(varargin{:}); rc=1:n; fc=1:n;
end

a=[zeros(n) eye(n); -M\[K C]];
b=[zeros(n); inv(M)];
c=[eye(n) zeros(n)];
d=zeros(n);
b=b(:,fc); d=d(rc,fc); % take force cords & response

```

```

    c=c(rc,:);
end
a=full(a); b=full(b); c=full(c); d=full(d);

function [M,K,F]=rottors(File)
%
% process a rotfe input template file
% and create a torsional vibration model
%
% I. Bucher 20.7.98
if isstr(File); % is it a file ?
    [File ext]=nameext(File);
    save_flag=0; if nargout<1, save_flag=1; end
    FAIL=['error(["rottors: script file >> " File " << not found in MATLAB path"])'];
    eval(File,FAIL); % run script to create model
elseif isa(File,'struct'); % input was a Rot structure
    Rot=File; % better use the name Rot
    clear File
    f=fieldnames(Rot); % get all field names
    n=size(f,1);
    for q=1:n, % Create the variables as in a model file
        eval([f{q} '= Rot.' f{q} ';'])
    end
    clear Rot
else
    error(['rottors: Input argument File must be a string ']);
end

%>>>>>> diameters
d=ELEMENTS(:,3:4); % diameters external & internal

%>>>>>> material
tMATERIALS=[MATERIALS(1,:)*0; MATERIALS]; % add dummy line so that indices
start from 2

mat_no=ELEMENTS(:,5); E=tMATERIALS(mat_no+1,1); rho=tMATERIALS(mat_no+1,2);

```

```

nu=tMATERIALS(mat_no+1,3);
MAT=[E./(2*(1+nu)) rho]; % material input for shaffet
%>>>>>> DISCS
[nd md]=size(DISCS);
if nd>0, % empty ([]) entry for discs
    nd1=DISCS(:,1); do=DISCS(:,2); di=DISCS(:,3); % node,ro,ri
    t=DISCS(:,4); dmat=DISCS(:,5); drho=MATERIALS(dmat,2); % width,material,rho

    DISCStor=[nd1 do t drho]; % must add di later <<<<<<!!!!

else
    DISCStor=[];
end
if ~exist('TorsionBC'), TorsionBC=[]; end
if exist('POINT_MASS')
    [nd md]=size(POINT_MASS);
    if nd>0, % empty ([]) entry for discs
        Jp=POINT_MASS(:,[1 3]); % find node
    end % if nd>0
else
    Jp=[];

end
[M,K,F]=shaffet(NODES,d,MAT,TorsionBC,DISCStor,eps+NODES(1),[],Jp);
if nargout==1
    save temp.mtx
    M=load('temp.mtx','-mat');
    delete temp.mtx
end

```

Annexe B :

- ❖ Notre présence à la centrale thermique de Hadjret Ennousse-Tipaza pour étudier la turbine à vapeur de type A15 :



- ❖ La turbine à vapeur de type A15 de Hadjret Ennousse-Tipaza :



