

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

Faculté de technologie

Département de génie mécanique

N° :.....



DOMAINE : Sciences et Technologie

FILIERE : Génie mécanique

OPTION : Construction mécanique

Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique

Intitulé

**Contribution à l'étude de l'équilibrage
statique des rotors turbines**

Proposé et dirigé par :

Mr .AMROUNE Salah.

Présenté par :

HOUARI Amin

BELOUADAH Mounir

Soutenu devant le jury composé de:

Mr. SAIB Cherif

Université Mohamed Boudiaf - M'sila

Président

Mr. SLAMANI Mohamed

Université Mohamed Boudiaf - M'sila

Examineur

Mr. MENASRI Noureddine

Université Mohamed Boudiaf - M'sila

Examineur

Année universitaire : 2017 /2018

N° d'ordre : GM/...../2018

Dédicace

Nous dédions ce travail à :

Nos mères, sources de tendresse et d'amours

pour leurs soutiens tout le long de notre vie scolaire.

Nos pères, qui nous ont toujours soutenus

et qui ont fait tout possible pour nous aider.

Nos frères et nos sœurs, que nous aimons beaucoup.

Notre grande famille.

Nos cher ami (e) s, et enseignants.

Tout qu'on collaboré de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

Que dieu leur accorde santé et prospérité.

Remerciements

*Nous tenons à exprimer notre gratitude et reconnaissance à notre promoteur **Mr. AMROUNE Salah** d'avoir accepté de nous encadrer.*

*Comme nous tenons également à remercier tous les enseignants du département de génie mécanique faculté de Technologie de l'Université **Mohamed Boudiaf-M'sila** qui ont contribué à notre formation en nous inculquant leur savoir.*

*Nos remerciements s'adressent aux membres du Jury, **Mr. SAIB Cherif**, Docteur à l'université de M'sila, **Mr. SLAMANI Mohamed**, Docteur à l'université de M'sila et **Mr. MENASRI Noureddine**, Docteur à l'université de M'sila qui me font l'honneur de participer à la soutenance.*

*Nous tenons à adresser nos sincères remerciements, à ceux qui m'ont beaucoup appris au cours de le stage pratique que nous avons fait, et à **BOUCHLALLEGUE Nassereddine**, notre maître de stage qui nous a formé et a accompagné au long de cette expérience et l'ensemble des employés de société **MEI M'sila** tout au long de cette expérience avec beaucoup de patience et de pédagogie.*

Et enfin, nous remercions nos chers camarades pour leur aide durant toute la période de notre formation.

HOUARI A. et BELOUADHEH. M.

Résumé

La répartition des aubes sur le rotor d'une turbine est un élément fondamental pour la tenue d'équilibrage de ces aubes mobiles en fonctionnement.

En effet, une mauvaise répartition conduit à la création de balourds consécutifs et à des comportements différents sous le même chargement centrifuge de ces aubes mobiles. Ces balourds sont à l'origine de niveaux vibratoires importantes amener à un impact non négligeable sur les caractéristiques mécaniques et acoustiques de la turbomachine et qui, à l'extrême, peuvent entraîner une destruction des aubes mobiles de la turbomachine et de son entourage.

L'objectif de ce travail est de proposer une méthode qui permette d'améliorer la répartition des aubes d'un rotor de turbine d'une façon que la correction de masse trouve dans la tolérance admise pour obtenir un meilleur équilibrage en fonctionnement. Le but de cette étude est aussi de proposer une méthode de répartition qui reste applicable lors des opérations de maintenance ultérieures aboutissant à des changements ponctuels d'aubes avec code MATLAB.

Ces buts sont atteints par une procédure de répartition des aubes d'un rotor turbine dans lequel, il est procédé tout d'abord à la mesure du moment statique de chaque ailette, afin d'obtenir une répartition des ailettes à partir d'un algorithme prédéfini pour but de minimiser les défauts de balourd , et donner l'angle de correction ,et on a comparé nos résultats de ce projet avec les résultats obtenus de logiciel de répartition BLADIS.net de grande société spécialisée dans ce domaine au niveau de la société de maintenance des équipements industriels MEI (Sonelgaz M'sila) pour prouver la fiabilité de notre travail.

Mots-clés : Rotor, Aubes, Equilibrage statique, Répartition, Balourd.

Abstract

The distribution of blades on the rotor of a turbine is a fundamental element for the balancing behavior of these blades in operation.

Indeed, a bad distribution leads to the creation of consecutive imbalances and different behaviors under the same centrifugal loading of these blades. These imbalances are at the origin of important vibratory levels bring to a significant impact on the mechanical and acoustic characteristics of the turbine and which, in the extreme, can cause destruction of the blades of the turbine and its entourage.

The objective of this work is to propose a method which makes it possible to improve the distribution of the blades of a turbine rotor in a way that the mass correction finds in the accepted tolerance to obtain a better balance in operation. The purpose of this study is also to propose a distribution method which remains applicable during subsequent maintenance operations resulting in ad hoc changes of blades with MATLAB code.

These aims are achieved by a blade distribution procedure of a turbine rotor in which, firstly, the static moment of each fin is measured in order to obtain a distribution of the fins from an algorithm. Predefined for the purpose of minimizing unbalance faults, and giving the correction angle, and comparing our results from this project with the results obtained from BLADIS.net distribution software from large company specialized in this area at the company level maintenance of MEI industrial equipment (Sonalgaz M'sila) to prove the reliability of our work.

Keywords: Rotor, Blades, Static balancing, Distribution, Unbalance.

الخلاصة

إن توزيع زعانف على مستوى العمود الدوار للعنفة هو عنصر أساسي للحفاظ على وضعية توازن هذه زعانف أثناء التشغيل. في الواقع، يؤدي توزيع السيء لهذه زعانف إلى خلق عيوب ثقل موازن مستمر تتبعه سلوكيات مختلفة، مما ينشأ عنه قوى طرد مركزية. كما هذا الاختلال في الثقل الموازن يؤدي إلى ظهور إهتزازات و أصوات على مستوى العنفات و بها قد يسبب في اتلاف زعانفها و ما جاورها من عناصرها.

الهدف من عملنا هو اقتراح طريقة تسمح لنا بتحسين توزيع زعانف على مستوى العمود الدوار للعنفة، بحيث يتم العثور على التصحيح الاوزان في مجال السماح للحصول على توازن أفضل أثناء التشغيل و الهدف من الدراسة هو أيضاً اقتراح طريقة توزيع تبقى قابلة للتطبيق أثناء عمليات الصيانة اللاحقة و التي تؤدي إلى تغييرات منتظمة و دقيقة لزعانف باستخدام برنامج MATLAB.

يتم تحقيق هذه الأهداف من خلال عملية توزيع زعانف العمود دوار للعنفة ، حيث تقاس أولاً اللحظة الثابتة لكل زعنفة من أجل الحصول على توزيع الزعانف بخوارزمية محددة مسبقاً لتقليل عدم الاتزان و إعطاء زاوية التصحيح و بها نقارن بالنتائج التي تم الحصول عليها من برنامج توزيع BLADIS.net لشركة كبيرة متخصصة في هذا المجال على مستوى الشركة صيانة المعدات الصناعية لشركة (MEI Sonalgaz M'sila) لإثبات موثوقية عملنا.

كلمات البحث: عمود دوار ، زعانف ، موازنة ثابتة ، التوزيع ، الثقل الموازن.

Table des Matières

Dédicace.....	I
Remerciements.....	II
Résumé.....	III
Liste des matières.....	V
Liste des figures.....	VIII
Liste des Tableaux.....	X
Liste des acronymes et symboles.....	XI

Introduction générale

Introduction.....	01
-------------------	----

Chapitre I : Les turbines et les rotors.

I.1. Introduction	03
I.2. Historique	03
I.3. Les Turbines	05
I.3.1. Définition d'une Turbine	05
I.3.2. Classification des Turbines	06
I.4. Turbine à gaz	06
I.4.1. Définition.....	06
I.4.2. Différents types de turbines à gaz	07
I.4.3. Eléments principaux d'une turbine à gaz	08
I.4.4. Principe de fonctionnement	09
I.4.5. Avantages de la turbine à gaz	09
I.5. Turbine à vapeur	10
I.5.1. Définition	10
I.5.2. Différents types de turbines à vapeur	11
I.5.3. Avantages des turbines à vapeur	12
I.6. Rotor d'une turbine	12
I.6.1. Conception de rotor	13
I.6.2. Types des rotors	14
I.6.2.1. Rotor rigide	14
I.6.2.2. Rotor flexible	14
I.7. La roue de la turbine	16
I.7.1. Les aubes du stator	16
I.7.2. Les aubes du rotor	17

I.8.Conclusion	17
----------------------	----

Chapitre II: Les aubes des rotors turbines

II.1.Introduction	18
II.2. Les aubes	18
II.2.1. Détails des aubes	19
II.2.2. Le profil d'aube	19
II.2.3. Vrillage	20
II.2.4. Grille des aubes.....	21
II.3. Matériaux et procédés de fabrication des ailettes.....	22
II.3.1. Les matériaux.....	22
II.3.1.1. Superalliage.....	23
II.3.1.2.Des nouveaux alliages.....	24
II.3.1.3.Matériauxcomposite.....	25
II.4.2. Techniques de la fabrication des aubes	26
II.4.2.1.Procédé de moulage.....	26
II.4.2.2. Les procédures d'usinage des aubes de turbine.....	27
II.4.2.3.Les étapes d'usinage d'une aube.....	28
II.4.2.3.1.Ebauche de brut quelconque 3D	29
II.4.2.3.2.Usinage en bout d'aube de turbine 5 axes	29
II.4.2.3.3.Usinage en roulant 5 axes d'aubes de turbine.....	30
II.4.2.3.4.Usinage du raccord pied de pale-aube 5 axes	30
II.4.2.3.5.Stratégies complémentaires pour l'usinage du pied	30
II.5.Différent système de fixation des aubes sur disque.....	31
II.6. Technique de refroidissement des turbines à gaz.....	32
II.7. Conclusion.....	33

Chapitre III : Equilibrage statique des rotors turbines

III.1.Introduction	34
III.2. Définition d'équilibrage d'un rotor	34
III.3. But de l'équilibrage	35
III.4. Balourd et équilibrage	35
III.4.1.Balourd statique	36
III.4.2. Les causes du balourd	37
III.5.L'équilibrage statique des rotors	37
III.6. Qualité d'équilibrage.....	38
III.7. Préparation et réalisation d'un équilibrage.....	39

III.7.1. Les Machine à équilibrage	39
III.7.1.1 Système de mesure et d'affichage des machines.....	40
III.7.1.2. Avantages de système d'affichage.....	41
III.7. 2. Technique d'équilibrage statique.....	42
III.7.3. Préparation de l'opération	43
III.7.3.1. Préparation du rotor.....	43
III.7.3.2. La répartition des aubes d'un rotor de turbomachine	43
III.8. Hypothèse d'équilibrage statique des rotors.....	44
III.8.1. Principe fondamental de la statique.....	44
III.8.2. Équilibrage de plusieurs masses tournant dans le même plan.....	45
III.9. Conclusion	47

Chapitre IV: L'élaboration d'un programme de répartition d'aubes

IV.1. Généralité	48
IV.2. Présentation de l'application	48
IV.3. Disposition des différentes possibilités de répartition des aubes	48
IV.4. Mesure des moments statique.....	51
IV.5. Organigramme de l'application	55
IV.6. Les résultats de la répartition des aubes sous-programme MATLAB.....	56
IV.6.1. Les algorithmes de répartition	57
IV.6.1.1. Algorithme N°01	57
IV.6.1.2. Algorithme N°02.....	58
IV.6.1.3. Algorithme N°03	59
IV.6.1.4. Algorithme N°04	60
IV.6.1.5. Algorithme N°05	61
IV.6.1.6. Algorithme N°06	62
IV.6.1.7. Algorithme Proposé.....	63
IV.6.2. Résultats de code MATLAB.....	64
IV.7. Montage des aubes d'une Turbine à gaz	76
IV.8. Conclusion	77
Conclusion générale.....	78
Bibliographique.....	79
Annexe.....	82

Liste des figures

Figure I.1	Turbine hydraulique Fondées en 1832	04
Figure I.2.	Turbine a plusieurs étages	05
Figure I.3.	Diagramme fonctionnel d'une turbine à un arbre à cycle simple	07
Figure I.4.	Diagramme fonctionnel d'une turbine à deux arbres à cycle simple	07
Figure I.5.	Eléments principaux d'une turbine à gaz Market.....	08
Figure I.6.	Diagramme fonctionnel d'un groupe turbine à gaz	09
Figure I.7.	Turbine à vapeur	10
Figure I.8.	Schéma des turbines à vapeur: a) à condensation. b) à contre-pression	11
Figure I.9.	Schéma TAV: a) à soutirage et condensation. b) à soutirage et contre-pression.	12
Figure I.10.	Vue d'un rotor de turbine à vapeur basse pression MEI Sonelgaz M'sila	13
Figure I.11.	Arbre de rotor en acier forgé MEI Sonelgaz M'sila	13
Figure I.12.	Catégories de base des rotors à arbre élastique	15
Figure I.13.	Dessin d'un étage de rotor d'une turbine	16
Figure I.14.	Principes d'aérodynamique du premier étage de la turbine.....	17
Figure II.1.	Les aubages de rotor d'une turbine ABB récente	18
Figure II.2.	Les différents types des aubes	19
Figure II.3.	Aube d'une turbine à gaz	19
Figure II.4.	Profil d'une ailette.....	20
Figure II.5.	Description des différentes parties d'une <u>aube</u> d'un <u>rotor</u>	20
Figure II.6.	Vrillage d'une aube	21
Figure II.7.	Différente Type de Grille des aubes.....	21
Figure II.8.	Développement de matériaux d'aube depuis 1940 jusqu'à ce jour.....	22
Figure II.9.	Macrostructures des pales de turbine	23
Figure II.10.	L'ailette de turbine à gaz Frame 9001 GE (MEI SONALGAZ M'sila).....	24
Figure II.11.	Moteur LEAP et une des aubes Ti-Al en dernier étage de la turbine B.P.....	25
Figure II.12.	Schéma de principe de moulage à cire perdue.....	27
Figure II.13.	Machine d'usinage 5 axes DMF 180 (MEI SOUNLGAZ M'sila).....	27
Figure II.14.	Ebauche d'un brut quelconque 3D.....	29
Figure II.15.	Usinage en bout d'aube de turbine 5 axes	29
Figure II.16.	Usinage en roulant 5 axes d'aubes de turbine.	30
Figure II.17.	Stratégies complémentaires pour l'usinage du pied	30
Figure II.18.	Fixation des pales sur disque (MEI SONALGAZ M'sila)	31
Figure II.19.	Différentes technologies de liaison entre le disque (roue) et l'aube.....	32

Figure II.20.	Différentes technologies de fixation des aubes	32
Figure II.21.	Evolution de la technologie de refroidissement des aubes de turbines.....	33
Figure III.1.	Machine à équilibrer moderne pour une utilisation universelle	35
Figure III.2.	Modélisation d'un balourd.....	36
Figure III.3.	Balourd statique	37
Figure III.4.	Balancement d'un rotor	38
Figure III.5.	Balourd correspondant au degré de qualité d'équilibrage et à la vitesse nominale.....	39
Figure III.6.	Machine à équilibrer horizontale	40
Figure III.7.	Système Affichage d'une machine de type H-04 SCHENCK	41
Figure III.8.	Balance d'équilibrage statique utilisée pour des Rotors Turbomachine	42
Figure III.9.	Procédure de répartition les aubes d'un rotor d'une turbine MEI M'sila.....	43
Figure III.10.	Description du balourd d'un rotor en forme de disque dans le même plan	45
Figure III.11.	Diagramme de vecteur de Équilibrage plusieurs du masse tournant dans le même plan.....	47
Figure IV.1.	Les Algorithmes de répartition d'aubes	50
Figure IV.2.	Mesure des moments statique avec une balance de type WM	51
Figure IV.3.	Calculateur de la machine à équilibrer	52
Figure IV.4.	Tableau des donner les aubes	53
Figure IV.5.	Tableau des moments statique de 20 aubes.	53
Figure IV.6.	Résultats hors tolérance avec système d'affichage vectoriel.....	54
Figure IV.7.	Résultats en tolérance avec système d'affichage vectoriel.....	54
Figure IV.8.	Organigramme de l'application	55
Figure IV.9.	Le sens pour la mesure de l'angle (α).....	56
Figure IV.10.	Logigramme représente l'algorithme de répartition des aubes N°01.....	57
Figure IV.11.	Logigramme représente l'algorithme de répartition des aubes N°02.....	58
Figure IV.12.	Logigramme représente l'algorithme de répartition des aubes N°03.....	59
Figure IV.13.	Logigramme représente l'algorithme de répartition des aubes N°04.....	60
Figure IV.14.	Logigramme représente l'algorithme de répartition des aubes N°05.....	61
Figure IV.15.	Logigramme représente l'algorithme de répartition des aubes N°06.....	62
Figure IV.16.	Logigramme représente l'algorithme de répartition des aubes proposé.....	63
Figure IV.17.	Représentation graphique de l'Algorithme de répartition N°1 pour 20 aubes....	65
Figure IV.18.	Représentation graphique de l'Algorithme de répartition N°2 pour 20 aubes....	65
Figure IV.19.	Représentation graphique de l'Algorithme de répartition N°3 pour 20 aubes....	66
Figure IV.20.	Représentation graphique de l'Algorithme de répartition N°4 pour 20 aubes....	66
Figure IV.21.	Représentation graphique de l'Algorithme de répartition N°5 pour 20 aubes....	67

Figure IV.22.	Représentation graphique de l'Algorithme de répartition N°6 pour 20 aubes....	67
Figure IV.23.	Représentation graphique de l'Algorithme de répartition proposé pour 20 aubes....	68
Figure IV.24.	Représentation graphique de l'Algorithme de répartition N°1 pour 70 aubes....	69
Figure IV.25	Représentation graphique de l'Algorithme de répartition N°2 pour 70 aubes....	69
Figure IV.26.	Représentation graphique de l'Algorithme de répartition N°3 pour 70 aubes....	70
Figure IV.27.	Représentation graphique de l'Algorithme de répartition N°4 pour 70 aubes....	70
Figure IV.28.	Représentation graphique de l'Algorithme de répartition N°5 pour 70 aubes....	71
Figure IV.29.	Représentation graphique de l'Algorithme de répartition N°6 pour 70 aubes....	71
Figure IV.30.	Représentation graphique de l'Algorithme de répartition proposé pour 70 aubes....	72
Figure IV.31.	Représentation graphique de l'Algorithme de répartition N°1 pour 120 aubes...	73
Figure IV.32.	Représentation graphique de l'Algorithme de répartition N°2 pour 120 aubes...	73
Figure IV.33.	Représentation graphique de l'Algorithme de répartition N°3 pour 120 aubes...	74
Figure IV.34.	Représentation graphique de l'Algorithme de répartition N°4 pour 120 aubes...	74
Figure IV.35.	Représentation graphique de l'Algorithme de répartition N°5 pour 120 aubes...	75
Figure IV.36.	Représentation graphique de l'Algorithme de répartition N°6 pour 120 aubes...	75
Figure IV.37.	Représentation graphique de l'Algorithme de répartition proposé pour 120 aubes...	76
Figure IV.38.	Numérotation des aubes par ordre de résultat	76
FigureIV.39.	Répartition de disque par Numérotation des aubes par ordre de résultat.....	77
FigureIV.40.	Vue d'un disque rotor en cours de montage des aubes par ordre des résultats de la répartition statique.....	77

Liste des tableaux

Tableau II.1	Composition chimique de la pale de turbine à gaz de Type Frame 9001 GE.	24
Tableau IV.2	Balourd et son angle obtenu par expérience de 20 aubes.	64
Tableau IV.3	Balourd et son angle obtenu par expérience de 70 aubes.	68
Tableau IV.1	Balourd et son angle obtenu par expérience de 120 aubes.	72

Listes des acronymes et symboles

Acronymes :

ISO : Organisation internationale de normalisation.

FAO : Fabrication Assistée par Ordinateur.

G 2.5: Degré de Qualité d'équilibrage.

BLADIS.net : Logiciel de répartition d'aubes SCHENCK.

MATLAB : Matrix Laboratory (Langages de programmation de quatrième génération).

MEI : Société de Maintenance des Equipements Industriels.

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

Introduction générale

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.

Le rotor est influencé par un ensemble d'efforts stationnaires radiaux de fonctionnement comme le poids, une réaction de denture pour un engrenage, et des forces hydrodynamiques ou aérodynamiques pour les turbines, la résultante des paliers et de la butée, etc. L'arbre de rotor se déforme sous l'effet de ces forces et chacune de ses tronçons tourne autour d'une position d'équilibre statique constituant la ligne de rotation. Cette ligne se change avec les conditions de fonctionnement, mais, en aucun cas, elle ne représente jamais une distribution de balourd par rapport à la droite qui passe par les centres des tourillons. Bien sûr, cette déformée a des effets induits par ailleurs (fatigue de l'arbre, modification des charges des paliers), mais pas sur la répartition de balourd.

Dans ce contexte on a fait une étude sur l'équilibrage statique des rotors turbines, en passant par le montage d'ailettes suivant divers algorithmes de répartition des aubes pour ramener le balourd du disque avec ces aubes dans une tolérance admissible. On propose d'élaborer un code de calcul sur MATLAB pour faire une simulation graphique de la réparation des ailettes afin de calculer la masse et l'angle de correction, on a subdivisé notre travail en quatre chapitres.

Le premier chapitre porte sur la théorie des turbines et les rotors, les composants principaux de la turbine, leurs rôles et leur principe de fonctionnement.

Dans le deuxième chapitre, en présentant les différents types d'aubes et leurs fixations, les matériaux et les procédés de la fabrication des aubes, ainsi que la réalisation d'une aube de turbine et comment choisit le matériau d'une aube.

Le troisième chapitre est consacré à l'équilibrage statique des rotors turbines et son but et les techniques utilisées, les balourds et leurs causes, ainsi que la préparation et la réalisation des différentes techniques d'équilibrage.

Le quatrième chapitre est réservé à l'élaboration d'un programme informatique qui permet de faire la répartition des ailettes avec des différents algorithmes proposés par le constructeur SCHENCK et leurs représentations graphiques sur le programme MATLAB, afin de minimiser le balourd et donner l'angle de correction, dans une roue au niveau du rotor d'une turbine.

Chapitre I

Les turbines et les rotors

I.1. Introduction

Avant de commencer l'élaboration du programme de répartition des ailettes des rotors turbines qui est le cœur de notre travail, il convient de présenter brièvement les types de turbomachines ainsi que les rotors turbines.

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, nous traitons de la théorie de la turbine et son rotor, la turbine est devenue de nos jours très employée dans notre civilisation industrielle. Il existe trois principaux domaines d'applications de la turbine; le domaine de la motorisation, en particulière la motorisation des avions (turboréacteur) ; elle est également utilisée dans la production d'électricité (centrales électriques) et dans l'exploitation de pétrole et de gaz naturel. En se concentrant sur deux types des turbines qui ont utilisés beaucoup aujourd'hui.

I.2. Historique

Les premières turbomachines sont très anciennes, les turbines à eau remontant à l'antiquité, et ne s'intéressaient alors qu'à la récupération d'énergie. Mais, Les premières turbines à vapeur sont apparues beaucoup plus tard, au tout début de l'ère industrielle, pour transformer l'énergie de la vapeur en énergie mécanique, cette application est aujourd'hui à la base de la récupération d'énergie dans les centrales thermiques ou nucléaires.

Le passage aux turbines (cycle compression-combustion-récupération d'énergie) est apparu au XXIème siècle. Dès la fin du XVIIe apparaît une nouvelle forme d'énergie mécanique avec les machines à vapeur, et dans la première moitié du XVIIIe, cette technologie vient concurrencer l'énergie hydraulique, surtout en Angleterre où la machine à vapeur s'impose dans les manufactures à partir de 1830. En Europe continentale et au nouveau monde, l'énergie hydraulique conserve une bonne place. Cette concurrence de la machine à vapeur et le besoin

sans cesse croissant de l'industrie en énergie vont stimuler l'innovation. Le milieu du XVIIIe marque le début d'un long processus d'amélioration et de conception des machines hydrauliques.

On ne parle pas encore de turbines, l'amélioration porte sur les roues à aubes afin d'augmenter leur puissance et leur rendement. En même temps des ingénieurs explorent des voies nouvelles, c'est finalement un jeune ingénieur français, Benoît FOURNEYRON qui sur les pas de ses prédécesseurs (en particulier son professeur à l'Ecole des Mineurs de Saint-Etienne : Claude BURDIN, 1788/1873), mettra au point en 1827 la première turbine, une machine encore bien modeste qui ne délivre que 6 chevaux de puissance. Le développement de cette turbine (**figure I.1**) en phase industrielle ne sera pas immédiat, mais à partir de 1832 son essor va être rapide et universel, parallèlement, la puissance développée augmente de 1450 chevaux sous 66 mètres de chute.

En Europe, vers 1843, 129 usines sont équipées de turbines Fourneyron. Aux Etats-Unis, en 1895, la première grande centrale hydroélectrique, aux chutes du Niagara, reçoit trois turbines Fourneyron de 3700 kW [2].

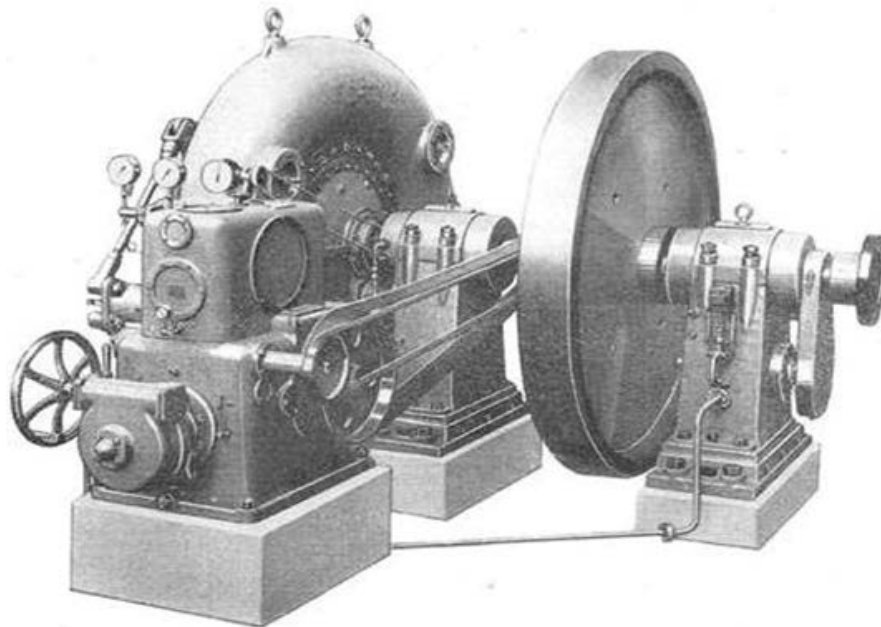


Figure. I.1 : Turbine hydraulique Fondées en 1832 [3].

I.3. Les Turbines

Les turbines font partie des turbomachines motrices, l'énergie est prélevée sur le fluide en écoulement et libérée vers l'extérieur sous la forme d'un travail mécanique.

I.3.1. 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) [4].

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 I.2**). C'est le cas dans la pratique lorsque les différentiels de pression deviennent trop élevés pour un seul étage.

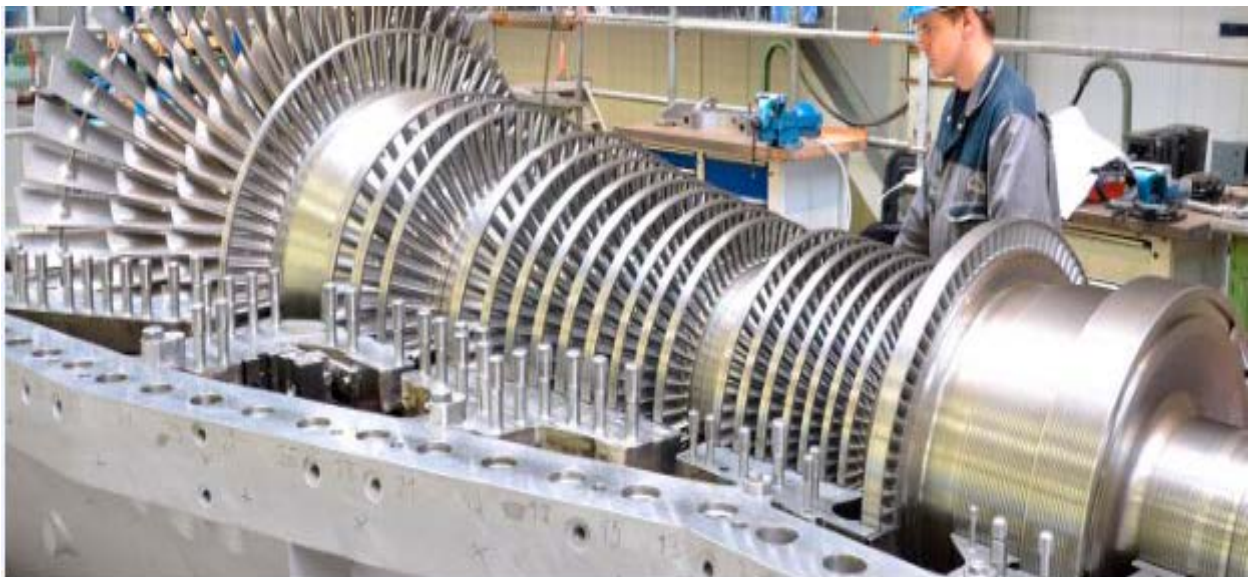


Figure. I.2 : Turbine à plusieurs étages [5].

I.3.2. 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. Dans ce qui suit, on a choisi de types de turbines (Turbines à gaz et Turbines à vapeur) car elles sont les plus utilisés en Algérie.

I.4. Turbine à gaz

Durant les années dernières, les turbines à gaz ont joué un rôle important dans l'industrie de production et propulsion, tel que les centrales nucléaire de puissance, les centrales de production d'électricité et les unités des hydrocarbures.

I.4.1. Définition

La turbine à gaz est un moteur à combustion interne, elle prend et comprime l'air atmosphérique dans son propre compresseur, augmente la puissance énergétique de l'air dans sa chambre de combustion et convertit cette puissance en énergie mécanique utile pendant les processus de détente qui a lieu dans la section turbine. L'énergie mécanique qui en résulte est

transmise par l'intermédiaire d'un accouplement à une machine réceptrice, qui produit la puissance utile pour le processus industriel [6].

I.4.2. Différents types de turbines à gaz

Une turbine à gaz peut comporter une ou deux lignes d'arbre pour l'ensemble des éléments tournants:

- **Turbine à une ligne d'arbre :** Le système est entraîné d'abord par un moteur jusqu'à une certaine vitesse (**figure I.3**), ensuite c'est la turbine haut pression (HP) qui continue l'entraînement de l'ensemble des éléments.

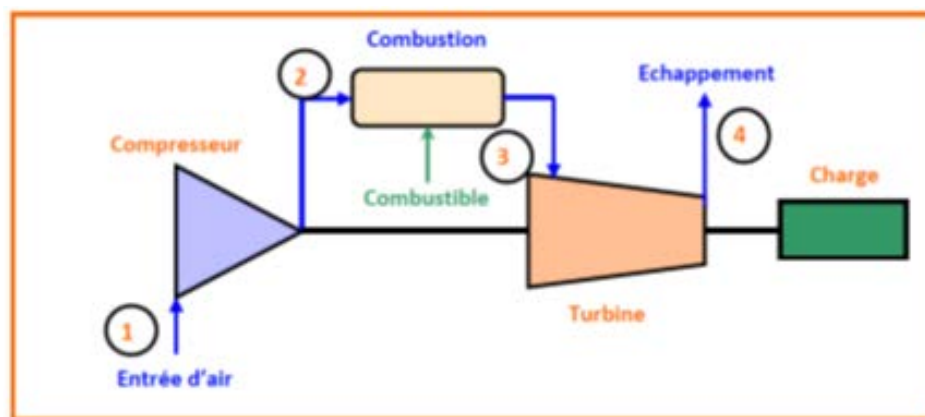


Figure.I.3: Diagramme fonctionnel d'une turbine à un arbre à cycle simple

- **Turbine à deux lignes d'arbre :** Comme pour une ligne d'arbre, il est rajouté une turbine basse pression (BP) en bout d'arbre séparé mécaniquement (**figure I.4**).

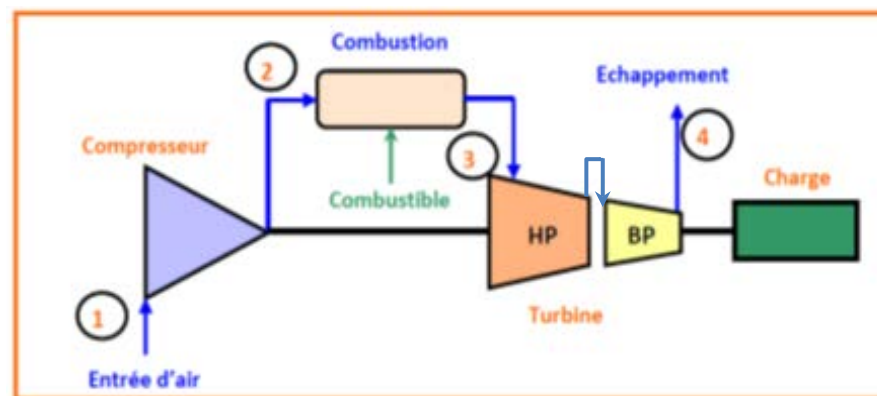


Figure.I.4: Diagramme fonctionnel d'une turbine à deux arbres à cycle simple.

La conception à deux lignes d'arbres représente le maximum de souplesse et est retenue pour les applications de grandes puissances.

I.4.3. Eléments principaux d'une turbine à gaz

Une turbine à gaz se compose de trois sections principales (**figure I.5**):

- Premier section compresseur :

La section compresseur à débit axial se compose d'un rotor et d'une série de corps. Les corps renferment les aubes orientables, les étages du rotor et l'aubage du stator, ainsi que les rangées d'aubes fixes de guidage.

- Deuxième section combustion :

La chambre de combustion est conçue pour brûler un mélange de fuel et d'air et pour délivrer à la turbine les gaz résultants à une température uniforme la plus élevée possible afin d'optimiser son fonctionnement.

- Troisième section turbine:

La section Turbine comprend le rotor, le corps, les directrices, les segments de protection, le cadre d'échappement et le diffuseur d'échappement le palier arrière turbine est situé au centre du cadre d'échappement [7].

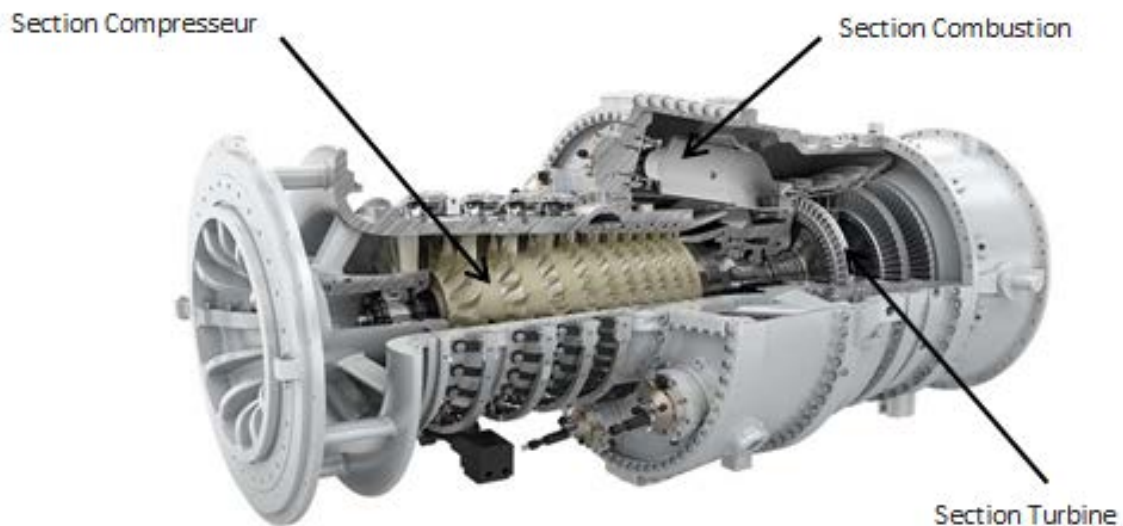


Figure.I.5: Eléments principaux d'une turbine à gaz Market [8].

I.4.4. Principe de fonctionnement

La turbine à gaz fonctionne suivant trois phases qui se déroulent continuellement à savoir la compression, la combustion et la détente. . Dans sa forme la plus simplifiée, le principe de fonctionnement des turbines à gaz est présenté sur la (**Figure I.6**).

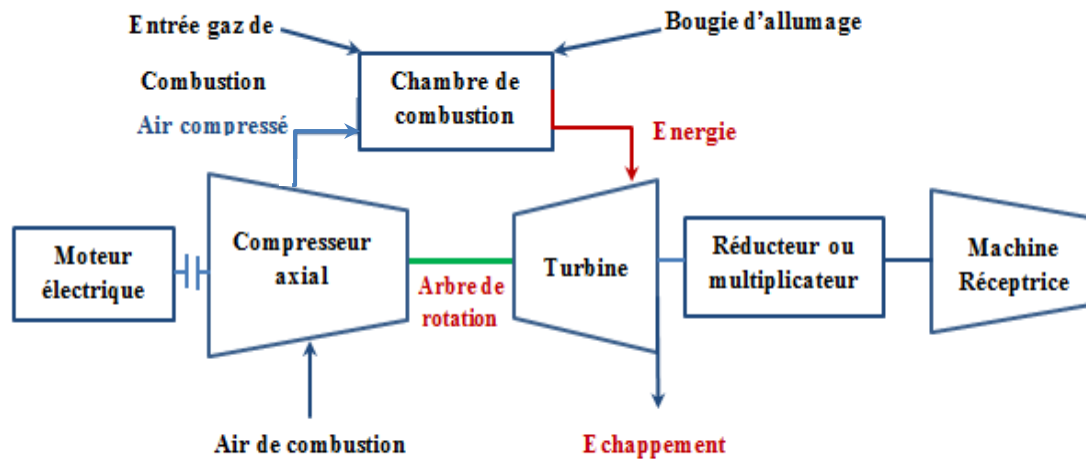


Figure. I.6: Diagramme fonctionnel d'un groupe turbine à gaz.

I.4.5. Avantages de la turbine à gaz

Lors de la conception, de la construction et de la fabrication modernes des turbines à gaz, les aspects suivants se trouvent au premier plan pour tous les composants:

- Orientation vers les procédés de turbines à gaz et combinés.
- Conception des transmissions complexes de chaleur et du refroidissement.
- Combustion propre et aptitude potentielle à utiliser des combustions variées et de moindre qualité (gaz pauvre, fuel lourd).
- Matériaux et couches de protection de haute qualité.
- Intégrité mécanique des composants.
- Conduite moderne du procédé, des régulations et des commandes.
- Puissance massique et volumique très élevée.

Lorsque la puissance massique très élevée se donne bien à la propulsion aéronautique particulière sur les hélicoptères, La propulsion navale fait également de plus en plus appel aux turbines à gaz.

I.5. Turbine à vapeur

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.

I.5.1. Définition

La turbine à vapeur est un moteur thermique rotatif qui convertit l'énergie d'un courant de vapeur d'eau en énergie mécanique, plus généralement c'est un organe qui permet la détente d'un fluide en transformant son énergie sous forme mécanique (**figure I.7**) [9].

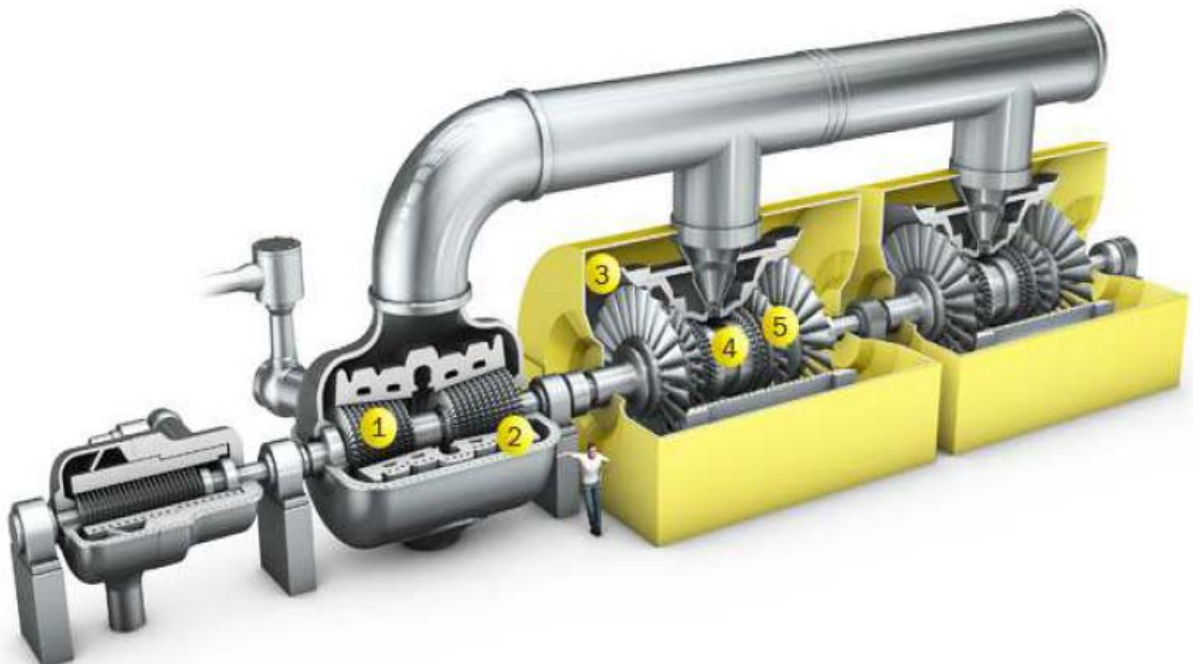


Figure .I.7: Turbine à vapeur [10].

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.5.2. Différents types de turbines 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 :

- **Les 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.8a**). Ce type de turbine est surtout utilisé dans les installations de production de force motrice [11].

- **Les turbines à contre-pression**, dans lesquelles la vapeur est détendue de la pression HP (> 40 bars) jusqu'à une pression BP (de l'ordre de 4 bars). Ce type de turbine permet de produire de la puissance mécanique ou de l'électricité grâce aux hautes températures et pression que l'on peut obtenir dans une chaudière, tout en utilisant l'enthalpie résiduelle pour des procédés divers (**figure I.8b**).

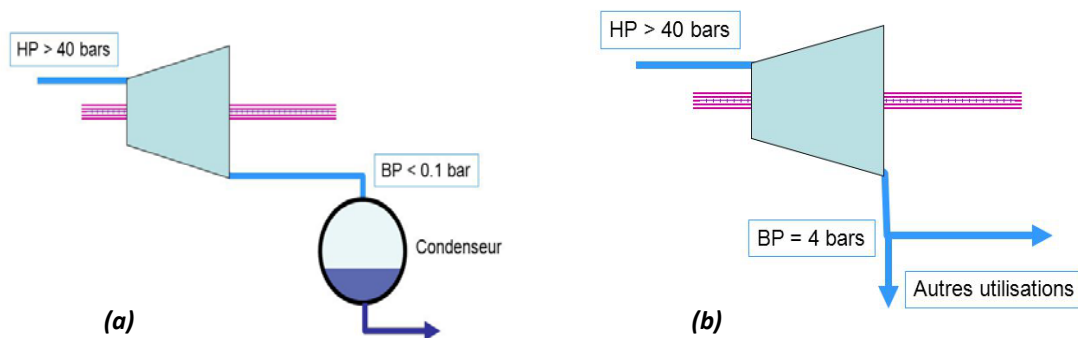


Figure. I.08 : Schéma des turbines à vapeur: a) à condensation. b) à contre-pression.

- **Les turbines à soutirage et condensation**, dans lesquelles la vapeur subit une détente partielle jusqu'à une moyenne pression (environ 20 bars) dans un corps haute pression. Une partie est dirigée vers un réseau d'utilisation, tandis que le reste de la vapeur est détendue dans un corps basse pression, comme dans une turbine à condensation (**figure I.9a**).

Ce type de turbine trouve un champ d'application important dans les usines de cogénération dont les demandes de chaleur sont susceptibles de varier fortement au cours du temps.

- **Les turbines à soutirage et contre-pression**, dont la vapeur s'échappe à basse pression dans un réseau BP au lieu d'être condensée (**figure I.9b**).

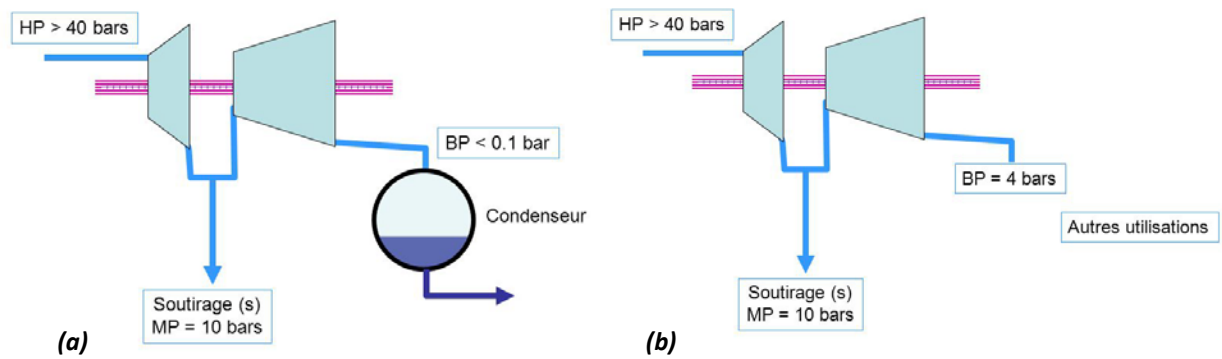


Figure.I.9 : Schéma de turbine à vapeur :a) à soutirage et condensation. b) à soutirage et contre-pression.

I.5.3. 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 d'une turbine

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 (**figure I.10**) [12].

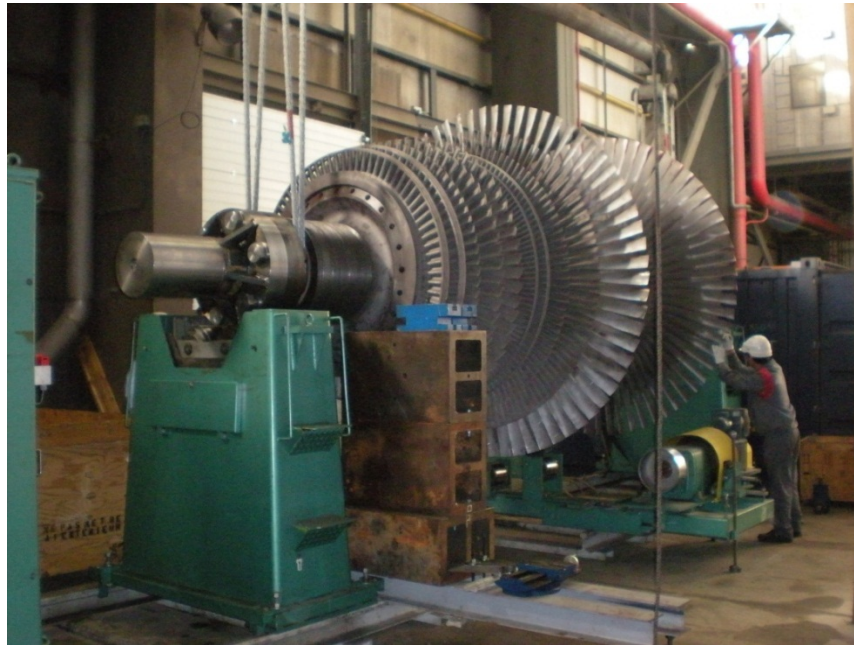


Figure.I.10 : Vue d'un rotor de turbine à vapeur basse pression MEI Sonalgaz M'sila.

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 (**figure I.11**) [13].



Figure I.11: Arbre de rotor en acier forgé MEI Sonalgaz M'sila.

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:

I.6.2.1. 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.

I.6.2.2. 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. [14].

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).

Cinq catégories de base présentant des caractéristiques spécifiques permettent de décrire les comportements principaux des rotors à arbre élastique pour l'équilibrage (**figure.I.12**).

- **Arbre élastique** : arbre forgée de simple-morceau, sans balourd (**figure.I.12a**).
- **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.12b**).
- **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.12c**).
- **Cylindre à arbre élastique** : les cylindres, de par leur construction (tube), présentent une masse et une rigidité régulièrement répartis (**figure.I.12d**).

- **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.12e**).

La combinaison de ces catégories permet de reconstituer tout type de rotor envisageable. Un disque ou un tronçon rigide (**figure. I.12b et c**) doit être monté sur un arbre élastique (**figure I.12a**), sinon il ne s'agit pas d'un rotor à arbre élastique.

Le cylindre élastique (**figure I.12d**) et le rotor intégral (**figure I.12e**) 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 [14].

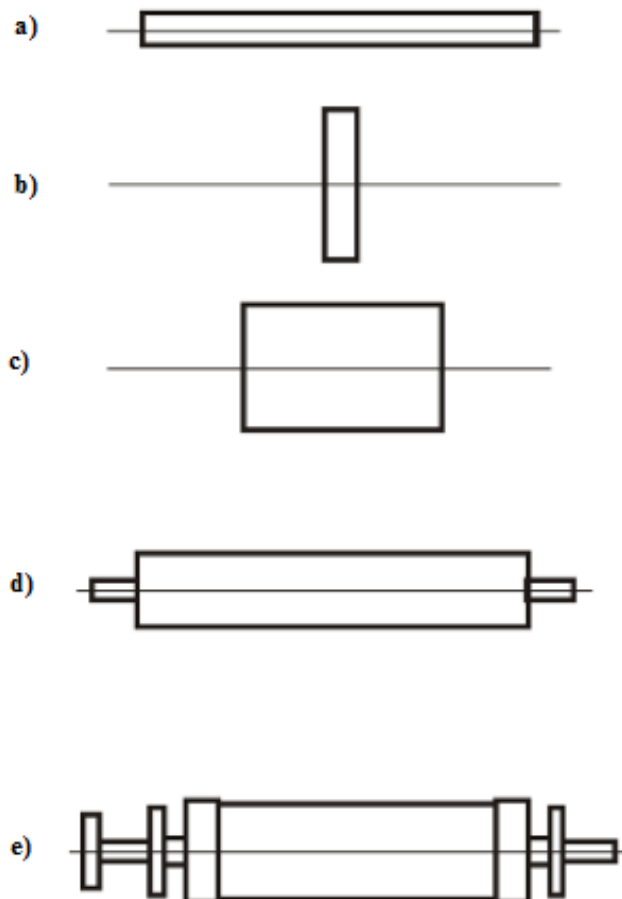


Figure I.12 : Catégories de base des rotors à arbre élastique [14].

I.7. La 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 définit 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 I.13**). Pour limiter la conduction de température, ses faces avant et arrière sont refroidies par circulation d'air. Il 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.

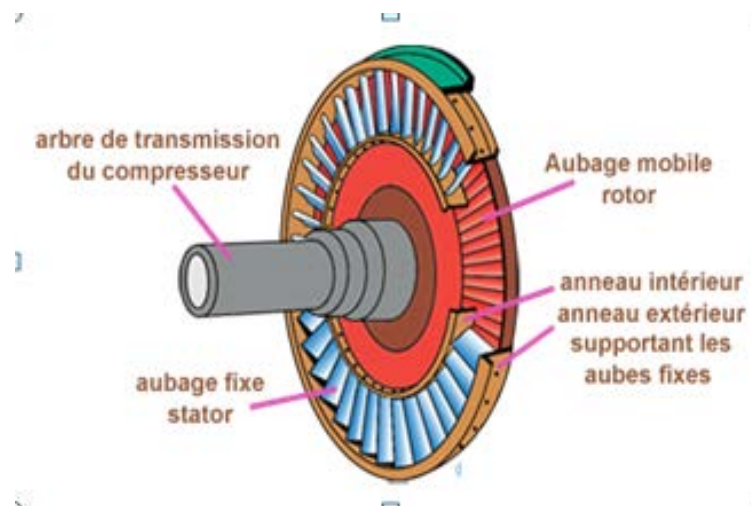


Figure .1.13 : Dessin d'un étage de rotor d'une turbine.

I.7.1. Les aubes du stator

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 [15].

I.7.2. Les aubes 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.

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.14**). [16]

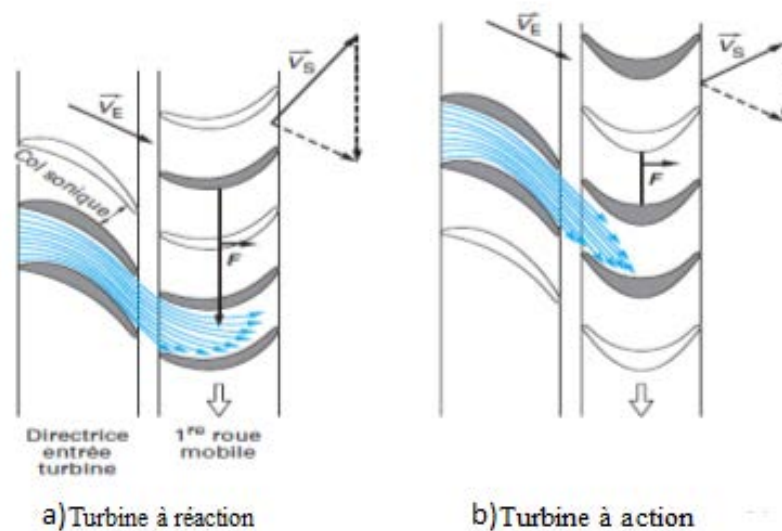


Figure.I.14 : Principes d'aérodynamique du premier étage de la turbine (a) à réaction (b) à action.

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.8. Conclusion

Ce chapitre est conclu des rappels et des définitions liées à des turbines et ses rotors, dont le but de donner une vision assez large sur les travaux effectués dans le cadre de description des différents comportements entre les éléments de la turbine qui conduisent à la technologie utilisée. Par contre, l'élément essentiel de la turbine (ailette) qui a une forme géométrique compliquée, il sera expliqué en détail dans le prochain chapitre.

Chapitre II

Les aubes d'une turbine

II.1.Introduction

L'objectif de dimensionnement des aubes de turbine est d'assurer une durée de vie de fonctionnement avant reconditionnement. Les plans de fabrication de la première dirigeante d'entrée turbine prévoient un mode de contrôle. Les déformations ou l'usure des aubes dans cette zone ont un impact sensible sur le fonctionnement des turbines. L'évolution de la technologie des aubes est résumée à la fois par des améliorations visant à augmenter l'efficacité du refroidissement et la tenue mécanique des matériaux qui se dégrade.

La conception et la fabrication des pales jouent un rôle fondamental dans la performance finale du système. Le but est de définir, dès la conception, une géométrie des pales performantes et économiquement réalisables.

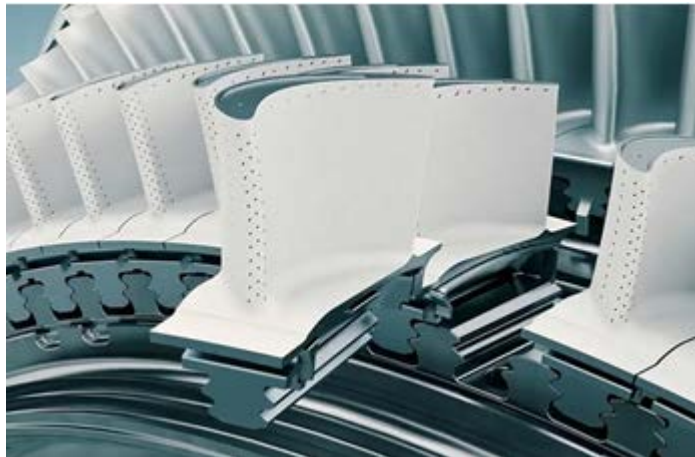


Figure II.1 : Les aubages de rotor d'une turbine ABB récente [17].

II.2. Les aubes

Les aubes de turbine ont une grande influence sur le comportement dynamique de rotor parce que ce sont eux qui subissent la majorité de la force appliquée par le fluide, c'est pour cette raison on ne peut pas les négliger [18].

L'aube est un élément en forme d'aile dont les surfaces extérieures constituent les côtés adjacents d'un passage efficace dans lequel le fluide moteur est mis en rotation (**figure II.2**) [19].

Il existe deux types des aubes :

- Ailette fixée à l'assemblage des redresseurs de la turbine.
- Ailette fixée au disque ou au rotor de la turbine.

Les aubes flexibles sont modélisées par des poutres de type Euler-Bernoulli et sont encastrées sur un disque rigide du rotor.



Figure II.2 : Les différents types des aubes [20].

II.2.1. Détails des aubes

Actuellement, Les modes propres des aubes sont bien modélisées par les calculs mécaniques, et maîtrisée par l'utilisation d'aubes à talon en tête, leur fixation au centre pour amortir tous les modes vibratoires. **Figure II.3** montre deux sortes d'ailettes avec pied de sapin. Celle qui est à droite porte un talon.

L'ensemble de ces talons forment une couronne. La face de cette couronne est fixée sur l'anneau extérieur, ce qui permet d'améliorer l'étanchéité et d'augmenter le rendement de la turbine [16].



Figure II.3: Aube d'une turbine a gaz.

II.2.2. Le profil d'aube

Comme une aile, une aube est composée d'un bord d'attaque d'une âme et d'un bord de fuite (**figure II.4**). Le profil des aubes est optimisé pour respecter le domaine d'utilisation de l'étage d'une turbine. Dans un étage d'aubes, le taux de compression plus élevé est possible si la vitesse relative entre le fluide et les rotors est supersonique.

Cependant, ceci est réalisé tout dépend de l'efficacité et de l'utilisation.

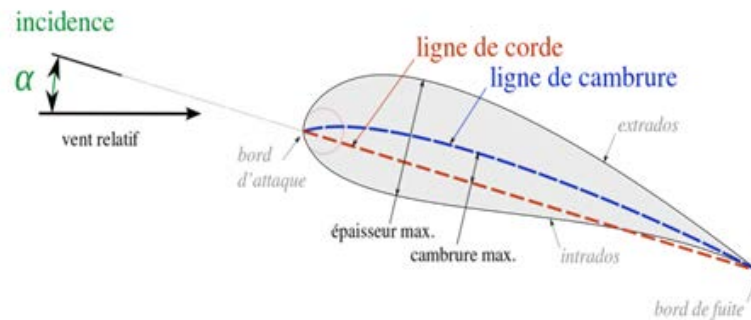


Figure II.4 : Profil d'une ailette.

Une aube est une succession de sections droites empilées le long d'une génératrice (**figure II.5a**). Cette dernière est le lieu des centres de gravité des sections droites qui génère un profil aérodynamique. On désignera par calage l'orientation de la section par rapport à un repère fixe sur la génératrice [21].

- Si le calage est constant, l'aube est dite cylindrique.
- Si le calage est évolutif, l'aube est dite conique ou vrillée.

II.2.3. Vrillage

L'envergure de la pale devient très importante quand les étages d'une turbine sont détentes. La variation radiale de la vitesse d'entraînement modifie l'angle dans des propulsions importantes. Ce qui en résulte une évolution radiale de la section d'aubage et de son angle de calage (**figure II.5b**).

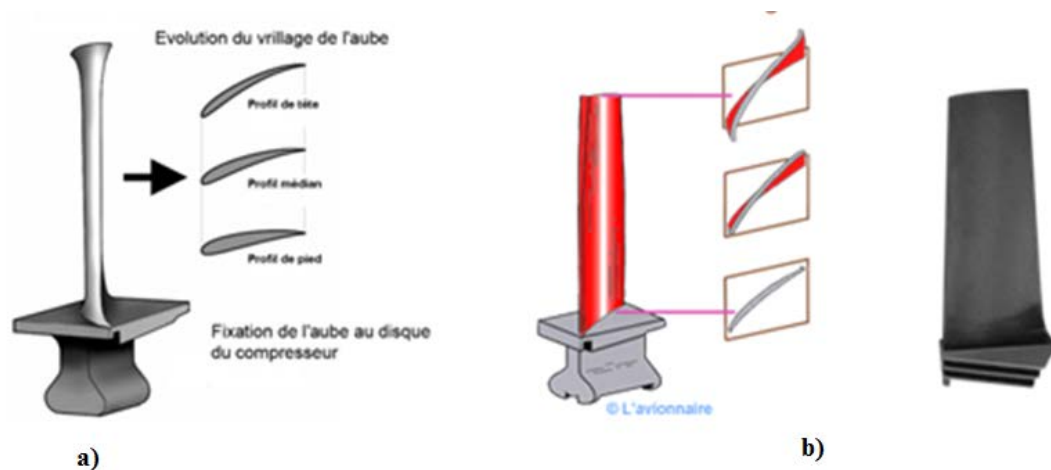


Figure II.5 : Description des différentes parties d'un aube d'un rotor.

Pour que l'incidence sur l'aubage soit bien adaptée sur toute son envergure, il faut modifier l'angle de calage des aubages en fonction du rayon, d'où leur forme vrillée (**figure II.6**).

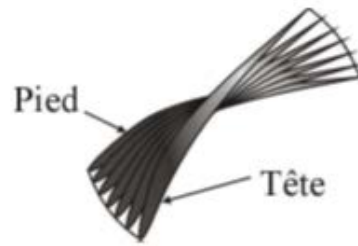


Figure II.6: Vrillage d'une aube.

II.2.4. Grille des aubes

Les couronnes d'aubages qu'elles que soient fixes ou mobiles, sont fréquemment appelées grilles d'aubes.

Une grille est formée d'une succession d'aubes, déduites les unes des autres par une opération géométrique donnée (**figure II.7**) [21] :

Les grilles planes parallèles : translation des aubes de la valeur p (pas).

- Les grilles cylindriques : rotation des aubes de $2\pi/z$ (z est le nombre d'aubes).
- Les grilles planes radiales.
- Les grilles toriques : les aubes sont imbriquées les unes aux autres et ne sont pas identique.

La grille possédant un nombre fini d'aubes, ses frontières sont constituées de parois accompagnant l'écoulement dont la position contribue à améliorer la régularité de la charge sur les aubes. Ces parois classiquement imperméables sont un obstacle à la propagation des ondes acoustiques générées par la grille.

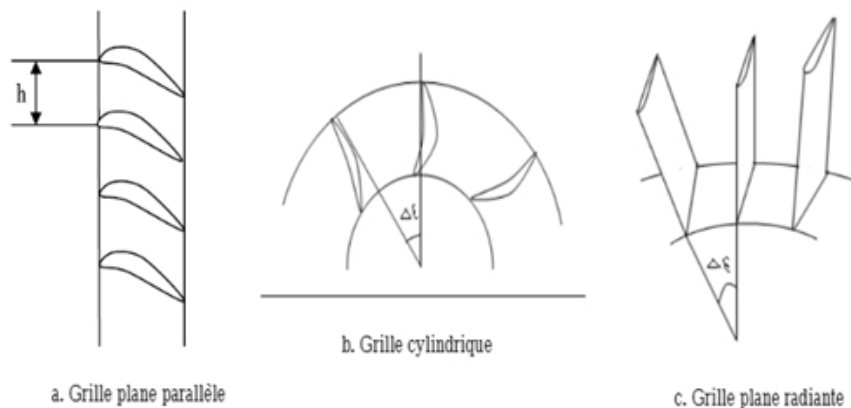


Figure II.7: Différents Types de Grille des aubes.

II.3. Matériaux et procédés de fabrication des ailettes

Les matériaux et procédés de fabrication sont indissociable dans les conceptions et la fabrication des structures en composites. Il n'en est pas de même pour les autres matériaux dont les évolutions qui apparaissent souvent sont liées à des avancées technologiques spécifiques pour assurer leur mise en œuvre opérationnelle.

Dans les turbomachines, les aubes de turbine à gaz les plus chaudes sont des pièces qui fonctionnent à très haute température, très difficiles à refroidir, et de plus, particulièrement sensibles à l'abrasion.

II.3.1. Les matériaux

Les matériaux utilisés pour les aubages de la turbine sont de matériaux à très haute résistance. Au cours de la période 1970/2000, une gamme développée de procédés a également accompagnée la naissance de nouveaux matériaux (**figure II.8**).



Figure II.8 : Développement de matériaux d'aube depuis 1940 jusqu'à ce jour [22].

Les aubes monocristallines sont moins susceptibles de s'endommager par fluage, néanmoins elles peuvent se déformer par fluage au cours du temps. Il est donc nécessaire de limiter au maximum le mouvement des dislocations dans les matériaux. D'autant plus, le monocristal ne possède pas un joint de grains pour bloquer les dislocations.

En premier lieu, la plupart des alliages métalliques qui travaillent à très haute température sont des alliages à base de Nickel.

En second lieu, des éléments d'addition (Al et ou Ti) sont ajoutés afin de permettre une précipitation de seconde phase dans la matrice de métal de base. Cette précipitation joue le rôle d'obstacle au mouvement des dislocations. Ainsi les superalliages des aubes de turbine sont-ils constitués d'une matrice de nickel, cubique à face centrée.

Cette solution n'est toutefois pas suffisante. Il faut utiliser également des technologies de refroidissement interne de plus en plus complexes afin de réduire la température de l'aube.

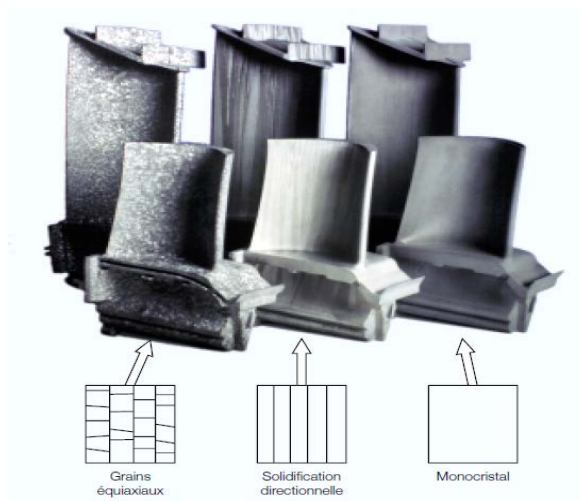


Figure II.9 : Microstructures des pales de turbine [23].

II.3.1.1. Superalliage

Les superalliages à base de nickel associent une aptitude remarquable à la mise en œuvre (capacités à être coulés, forgés, traités thermiquement, usinés, soudés, revêtus de couches protectrices...) à des résistances mécaniques à haute température très supérieures à celles de tous les alliages métalliques industriels (aciers, base d'aluminium, titane, cuivre...). Ils constituent les meilleurs matériaux actuellement développés pour répondre aux problèmes de mécanique-thermique. Ils offrent des caractéristiques métallurgiques très particulières pour expliquer cet ensemble de propriétés. Les superalliages présentent typiquement une structure cristalline cubique à face centrée de type austénitique. Les éléments d'alliages de la base sont le plus souvent le nickel, le cobalt et le fer, mais aussi le titane ou l'aluminium.

Le superalliage à base de nickel que nous avons étudié, est utilisé pour la fabrication des aubes de turbine dont la provenance est la **MEI/SONELGAZ de M'sila (figure II.10)**.

Les ailettes de turbine étaient en superalliages à base de nickel sont fabriquées selon la méthode de moulage à haut pression. Grâce à l'article de la recherche de AMROUNE,S et al [24], il est déduire la composition chimique de la pale de turbine à l'aide d'un appareil Thermo Fisher Scientific et est présentée dans le **tableau II.01**, l'analyse chimique de l'ailette à permet d'identifier le matériau qui correspond à la nuance 46Ni-8Cr-44Fe-0.5Co. La figure 1 présente l'ailette à étudier, cette dernière appartient aux ailettes de la partie compresseur de turbine à gaz de type Frame 9001 GE.

Element	Sn	Mo	Nb	Ni	Co	Fe	Mn	Cr	V
Wt%	0.011	0.084	0.003	46.366	0.404	44.285	0.488	8.279	0.030
Error	±0.005	±0.003	±0.001	±0.114	±0.052	±0.096	±0.034	±0.047	±0.006

Tableau II.01 : Composition chimique de la pale de turbine à gaz.



Figure II.10 : L'ailette de turbine à gaz Frame 9001 GE (MEI SONALGAZ M'sila).

II.3.1.2. Des nouveaux alliages

Des nouveaux alliages métalliques plus performants, comme l'alliage de titane et d'aluminium, sont des matériaux de nouvelle génération extrêmement performants : résistants à des hautes températures (**750°C**), ils permettent de diviser en deux la masse d'une aube par rapport aux alliages de nickel utilisés traditionnellement dans les turbines basse pression.

Avec le moteur LEAP (Leading Edge Aviation Propulsion), les nouvelles aubes de soufflante apportent au moteur LEAP entré en service en 2016 (**figure II.11**), un gain de masse contribuant à diminuer la consommation en carburant et les émissions d'oxyde d'azote). Il sera utilisé pour la première fois au monde dans un moteur d'avion moyen-courrier [25].

Cette technologie participera ainsi aux excellentes performances de ce nouveau moteur.

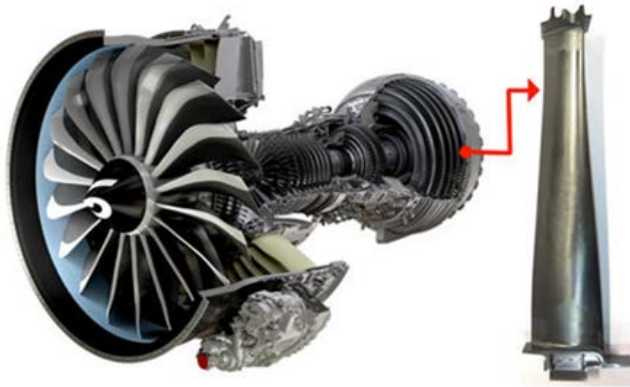


Figure II.11 : Moteur LEAP et une des aubes Ti-Al en dernier étage de la turbine basse pression.

II.3.1.3. Matériau composite

Une aube de turbomachine en matériau composite comprenant un renfort fibreux densifié par une matrice. La réalisation d'aubes en matériau composite pour turbomachines a déjà été proposée, le renfort fibreux étant obtenu notamment à partir de fils en carbone ou céramique et la matrice étant en matériau céramique ou en matériau organique ou en carbone.

Un procédé permettant la fabrication d'aubes mobiles de turbine en matériau composite avec talon et plateforme intérieure intégrés par : réalisation d'une ébauche fibreuse par tissage multicouches ; mise en forme de l'ébauche au moyen d'un outillage pour obtenir une préforme fibreuse ayant des parties formant préforme de pied et pale d'aube, préforme de talon d'aube et préforme de plateforme intérieure d'aube ; et densification de la préforme fibreuse par une matrice.

L'ébauche fibreuse est tissée avec une première partie en forme de bande ou nappe destinée à former la préforme de pied et pale d'aube et une deuxième partie en forme de bande ou nappe destinée à former les préformes de talon et plateforme intérieure, la deuxième partie traversant la première au niveau des emplacements du talon et de la plateforme intérieure [26].

II.4.2. Techniques de la fabrication des aubes

II.4.2.1. Procédé de moulage

La fonderie est une procédée de mise en forme qui consiste à verser un matériau à l'état liquide dans un moule et à retirer ce matériau après solidification. La difficulté est alors de réaliser le moule.

Suivant la nature du matériau, la taille de la série, la géométrie de la pièce il existe plusieurs procédés de moulage :

- Moulage au sable.
- Moulage à la cire perdue.
- Injection plastique.
- Moulage par injection de résine liquide.

Dans ce qui suit, on va détailler seulement le moulage à la cire perdu car la plupart des ailettes de turbine présentent des cavités internes à géométrie complexe formant notamment des circuits de refroidissement.

La fabrication de tels aubages passe par la réalisation d'un modèle en cire ou autre matériau équivalent qui comprend une pièce interne formant un noyau de fonderie et figurant les cavités de l'aubage. On utilise pour former le modèle un moule d'injection pour cire dans lequel on place le noyau et on y injecte la cire.

Le modèle en cire est ensuite trempé plusieurs fois dans des barbotines constituées d'une suspension de particules céramiques pour confectionner un moule carapace. On élimine la cire et on cuit le moule carapace. On obtient l'aubage en coulant un métal en fusion qui vient occuper les vides entre la paroi intérieure du moule carapace et le noyau.

Grâce à un germe ou un sélecteur approprié et un refroidissement contrôlé, le métal se solidifie selon une structure voulue. Selon la nature de l'alliage et les propriétés attendues de la pièce résultant de la coulée [27].

Il peut s'agir de solidification dirigée à structure colonnaire, de solidification dirigée à structure monocristalline ou de solidification équiaxe.

Les deux premières familles de pièces concernent des superalliages pour pièces soumises à de fortes contraintes tant thermiques que mécaniques dans le turboréacteur, comme les aubes de turbines HP.

Après la solidification de l'alliage, la carapace et le noyau sont décochés. Il en ressort l'aubage désiré. Comme cela est connu, on met en forme les noyaux de fonderie par moulage en utilisant par exemple une injection à la presse (**figure II.12**).

Cette mise en forme est suivie d'une opération de délaitage au cours de laquelle la fraction organique du noyau est éliminée par un moyen tel que la sublimation ou la dégradation thermique, suivant les matériaux utilisés [28].

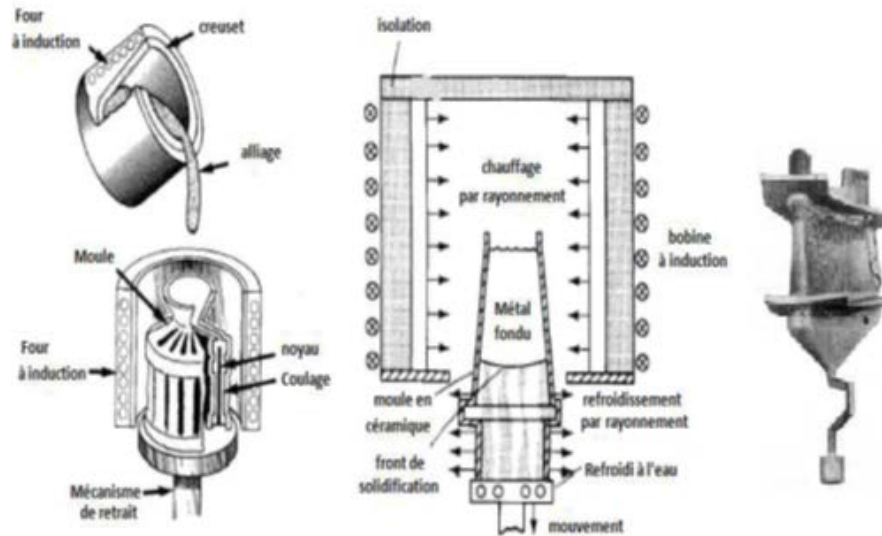


Figure II. 12 : Schéma de principe de moulage à cire perdue [29].

II.4.2.2. Les procédures d'usinage des aubes de turbine

Les aubes sont des pièces particulièrement complexes dont la fabrication selon un processus de fonderie long et coûteux s'avère délicate du fait notamment des tolérances de fabrication demandées.

La compétitivité de l'usinage d'aubes de turbines à gaz et à vapeur est un défi car ces pièces regroupent la plupart des caractéristiques les plus difficiles à usiner [30] :

- L'usinabilité des matières dans lesquelles sont faites les pièces est variable (certaines matières nécessitent des plaquettes spécifiques).
- Des quantités très importantes de matière doivent être enlevées et de bons états de surface doivent être produits (sans effets négatifs sur les aubes, notamment des contraintes résiduelles).
- la forme des pièces est complexe (certaines aubes demandent une programmation assistée par ordinateur FAO avancée avec les meilleures méthodes).
- Les aubes sont sujettes aux vibrations pendant l'usinage (pièces longues et minces qui demandent des outils avec une coupe légère capables d'absorber les vibrations. (**Figure II.13**),
- L'efficacité de la production est importante (production de grands volumes).

- Plusieurs outils sont nécessaires et ils doivent être appliqués correctement (du simple surfacage au profilage avec 4 ou 5 axes).



Figure II.13 : Machine d'usinage à 5 axes DMF 180 (MEI Sonelgaz M'sila).

La figure II.12 représente une machine à commande numérique sont programmées au moyen d'un langage spécifique appelé code G ou code ISO sous forme d'instructions formant le programme d'usinage.

Les stratégies optimisées de fraisage pour l'usinage d'aubes de turbine, y compris les stratégies d'usinage du pied et le fraisage de géométries spéciales de pale, permettent un usinage complet. Les automatismes facilitent la définition et raccourcissent la durée de programmation. Les vitesses d'avance élevées et l'utilisation d'outils de plus grand diamètre réduisent la durée d'usinage.

II.4.2.3. Les étapes d'usinage d'une aube

L'aube de turbine est usinée à partir d'une ébauche librement définie où quelconque, afin d'obtenir la forme de base de l'aube est souvent au centre des préoccupations les fabricants, surtout pour les aubes de taille moyenne, car elle représente l'essentiel de l'usinage.

L'ébauche de la tête et du pied des aubes, et en particulier l'usinage de la transition entre le profil aérodynamique et l'épaule, est une opération qu'il est important de bien réussir car elle demande l'enlèvement de quantités importantes de matière [31].

Pour effectuer cette opération avec efficacité, il est nécessaire d'utiliser une solution spéciale. L'usinage semi-fini et fini des aubes demande un choix des outils soigné. Liée à la taille des aubes, la machine et la méthode d'usinage. Pour obtenir les meilleurs résultats, et aussi bien doit tenir compte la quantité de matière à enlever et la surface sculptée.

La finition des aubes par le dressage (grande profondeur de coupe axiale) est la façon la plus rapide et efficace de procéder si la pièce, le logiciel de FAO et l'outil le permettent.

Le programme standard de fraises coniques à bout sphérique est spécialement conçu pour ce type d'opération. Ces outils offrent une excellente stabilité et une très bonne accessibilité [32].

Pour cela, on utilise des fraises à plaquettes rondes, des fraises carbure monobloc en bout et des fraises à surfacer que l'on applique avec des méthodes avancées adaptées à la taille et à la forme de l'aube ainsi qu'à la machine employée et aux possibilités de programmation disponibles.

II.4.2.3.1. Ebauche de brut quelconque 3D [32]

La stratégie évite automatiquement les trajets à vide dans les parties en contre-dépouilles. Des profondeurs de coupe régulières et l'avance indépendante des axes de rotation offrent des conditions de coupe constantes.

Le serrage des axes de rotation permet d'utiliser des outils de plus grande taille et d'obtenir un débit de copeaux en volume élevé.

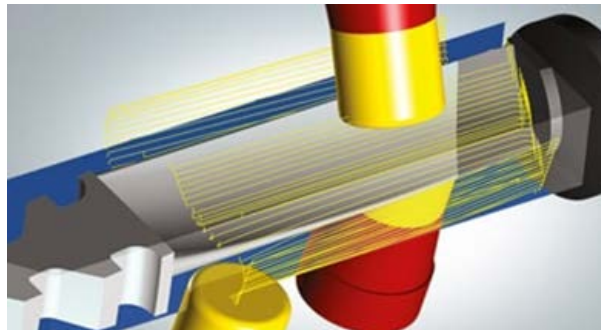


Figure II.14: Ebauche d'un brut quelconque 3D.

II.4.2.3.2. Usinage en bout d'aube de turbine 5 axes

Stratégie de finition des surfaces de pale : Le trajet d'outil hélicoïdal peut être généré comme un usinage simultané 5 ou 4 axes.

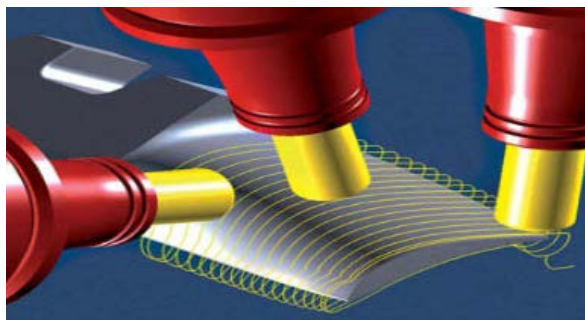


Figure II.15: Usinage en bout d'aube de turbine 5 axes [32].

II.4.2.3.3. Usinage en roulant 5 axes d'aubes de turbine

Cette stratégie permet d'usiner en roulant la surface de plateforme de l'aube. La partie située entre la pale et les surfaces de plateforme, qui ne peut être fraisée avec l'usinage en bout 5 axes, est usinée avec l'usinage des flancs 5 axes. Les angles guides et d'inclinaison latérale offrent d'excellentes conditions de coupe est également usinée avec cette stratégie.

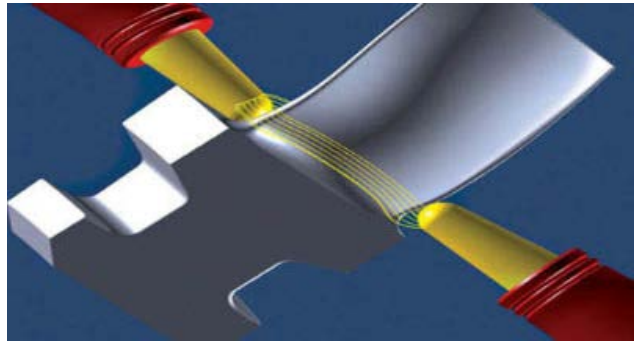


Figure II.16: Usinage en roulant 5 axes d'aubes de turbine.

II.4.2.3.4. Usinage du raccord pied de pale-aube 5 axes

Cette fonction optimise la finition dans le passage entre la pale et les surfaces de plateforme de la tête ou du pied. Un passage parfait est créé pour les pales voisines, ce qui est impossible dans la plupart des systèmes FAO.

II.4.2.3.5. Stratégies complémentaires pour l'usinage du pied

Les cycles d'ébauche, les opérations de finition pour la géométrie du pied et les stratégies de découpe, d'ébarbage ou de meulage sur les surfaces courbes font partie des opérations 3 axes.

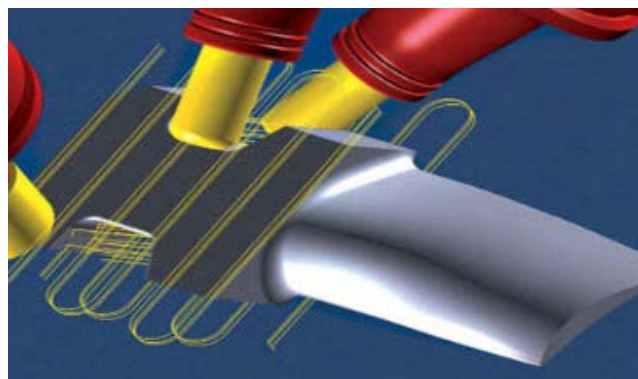


Figure II.17: Stratégies complémentaires pour l'usinage du pied.

II.5. Différent système de fixation des aubes sur disque

Les pales de turbine peuvent être taillées dans la masse ou rapportées par un procédé quelconque. Le procédé le plus utilisé est la fixation dite en pied, qui permet de répartir convenablement les efforts. Le type de rainure de fixation de racine s'adapte dans une rainure usinée autour de la circonférence de la roue ou du disque de rotor. Certains exemples de conceptions de racines d'aubes types de rainures sont illustrés dans la **figure II.18**.

Les racines d'une aube sont installées à travers la fenêtre de la pale de fermeture, puis glissent autour de la circonférence du disque dans la position désirée. La dernière aube s'ouvre et est fixée en place par une cheville.

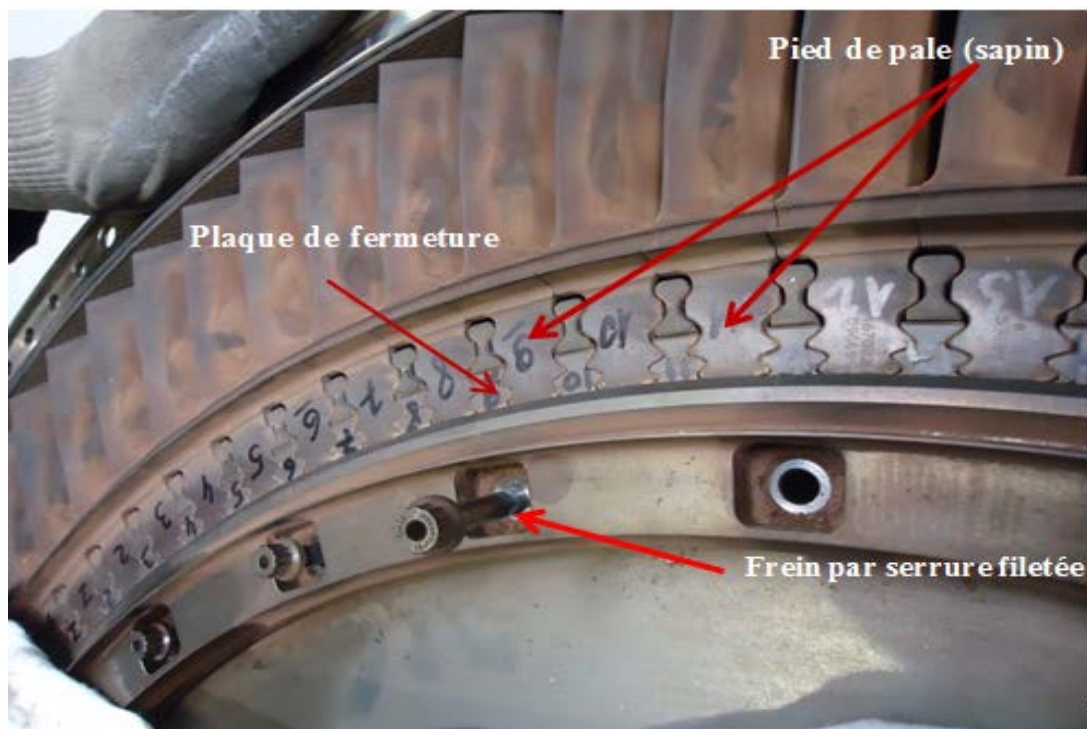


Figure II.18: Fixation des pales sur disque (MEI SONALGAZ M'sila).

Les pales rapportées sont par ailleurs, disposées de façon à réaliser l'équilibrage statique et dynamique du rotor. Le jeu entre l'extrémité des pales et le carter extérieur est d'une grande importance, il doit être ajusté pour obtenir un bon rendement (fuite minimum) sans provoquer le contact des pales.

Les ailettes de rotor sont rapportées sur le disque ou le tambour par divers systèmes d'attache dont certains très complexes en forme de sapin (**figure II.19**).

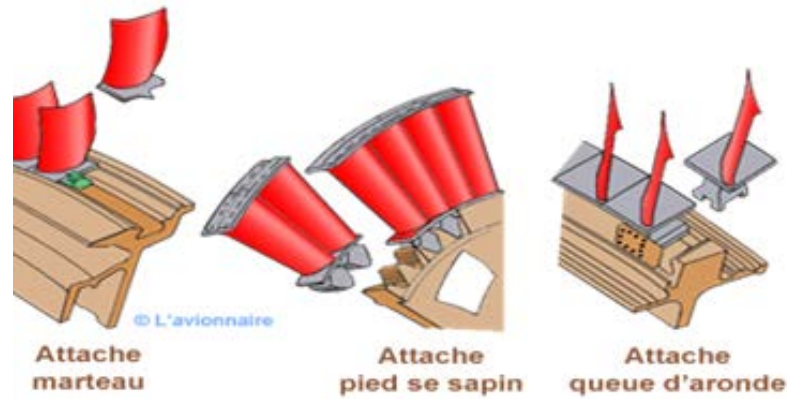


Figure II.19 : Différentes technologies de liaison entre le disque (roue) et l'aube [33].

Les aubes de stator peuvent être fixées directement sur le carter du compresseur ou par un anneau de retenue qui est fixe sur carter sont fixées par groupes (5 à 6 aubes) avec un pied en queue d'aronde.

La **figure II.20a** représente les aubes du redresseur (stator) qui sont fixées directement sur compresseur, La **figure II.20b** représente les aubes qui sont fixées au carter par une bague de retenue.

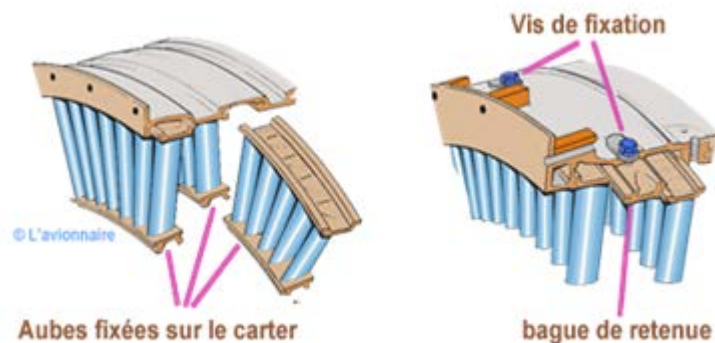


Figure II.20 : Différentes technologies de fixation des aubes.

II.6. Technique de refroidissement des turbines à gaz

L'augmentation du rendement et de la puissance spécifique d'une turbine à gaz permise par l'augmentation des températures de combustion pousse les motoristes à développer toute une série de technologies pour maximiser la température en sortie de chambre de combustion. Le principal stratagème employé est de refroidir la turbine avec de l'air prélevé dans le compresseur. L'air prélevé est conduit au travers des aubes mêmes de la turbine et permet d'élever la température de combustion sans risquer d'endommager les aubes.

Les systèmes de refroidissement les plus efficaces et les plus avancés, l'air froid circule à l'intérieur de l'aube et est libéré dans les gaz de combustion, par une série de perçages, afin de former une couche d'air « froid » autour de l'aube [34].

L'importants progrès a été réalisé au cours des dernières années grâce à l'apparition de nouvelles technologies. Le refroidissement par des canaux internes a été l'une des principales évolutions apportées par les concepteurs. Elle a permis au cours des 30 dernières années d'augmenter d'environ 500°C la température d'entrée turbine (figure.II.21). Elle a bien entendu augmenter les gradients thermiques dans les aubes, donc également la complexité des champs de contrainte.

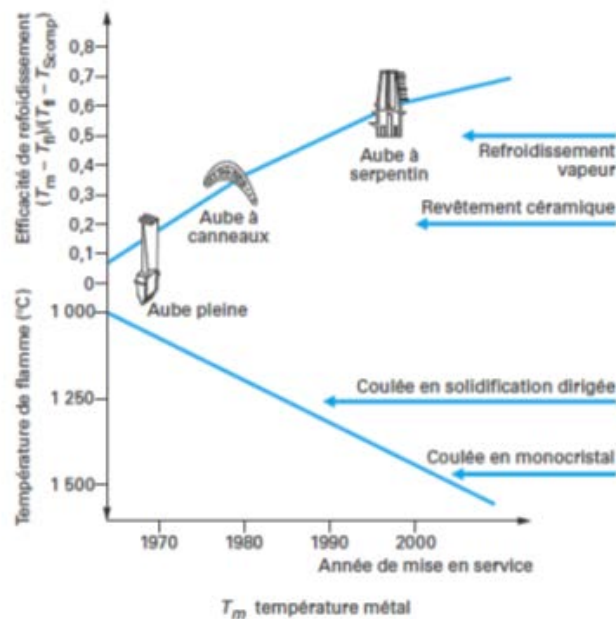


Figure II.21: Evolution de la technologie de refroidissement des aubes de turbines [16].

II.7. Conclusion

Les aubes de turbine dans la plupart des cas ont des géométries complexes et des surfaces de forme libre. La complexité de ces aubes a nécessité une parfaite intégration entre la conception, les matériaux et les techniques de fabrication.

Le refroidissement des aubes d'une turbine à gaz est un axe majeur de recherche en production électrique et en propulsion aéronautique. Il faut combiner de nombreux domaines technologiques (matériaux, agencement mécanique, chimie de combustion) pour remplir ces objectifs de nature thermodynamique.

Chapitre III

Equilibrage statique des rotors

III.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 inmanquablement 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 III.01**) 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 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, dans ce qui suit nous présentons la méthode analytique de la répartition des aubes d'un rotor qui permettra d'évaluer numériquement l'efficacité de l'équilibrage statique des rotors et procédure de la répartition. Tous les principes et développements nécessaires à l'élaboration du processus sont ensuite décrits.

III.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. L'équilibrage des rotors contribue à prolonger la vie utile des équipements et doit améliorer le comportement des machines tournantes [14].

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

- La masse du Balourd.
- La compensation du balourd.

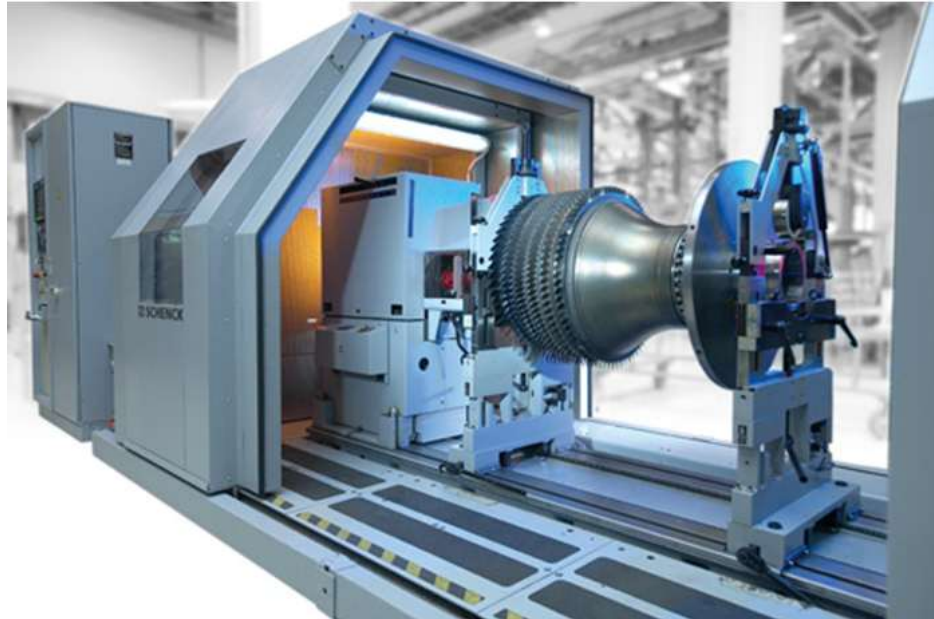


Figure III.1 : Machine à équilibrer moderne pour une utilisation universelle [35].

III.3. But de l'équilibrage

Les vibrations produites par un rotor déséquilibré créent une surcharge sur les paliers et sur la structure de la machine en général. L'équilibrage du rotor s'avère nécessaire pour éviter une ou plusieurs des situations suivantes :

- Une diminution de la vie utile de la machine, de la durée de vie des roulements et de l'intégrité de la structure.
- Un accroissement de la fréquence des entretiens requis par la machine.
- Une détérioration de la qualité de vie au travail en ce qui a trait au bruit, à la sécurité et au confort (vibrations transmises au corps par le plancher par exemple).

III.4. 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. [36]

La représentation de la **figure III.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.

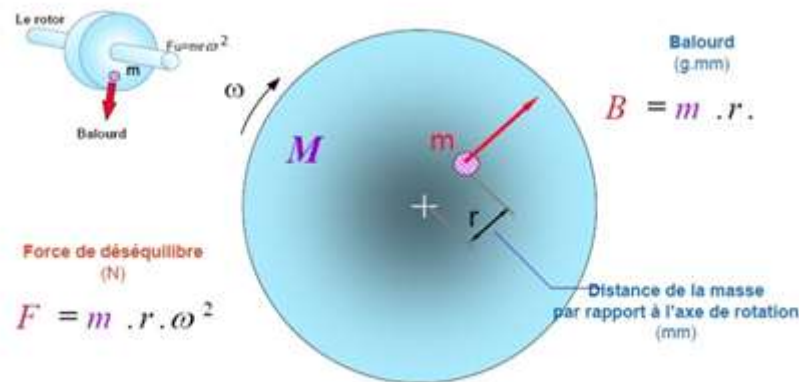


Figure III.2 : Modélisation d'un balourd.

III.4.1. Balourd statique

Nous venons de voir que l'ajout d'une seule masse permet d'équilibrer un rotor plan (exemple : disque, ventilateur...). Dans le cas où le rotor a une longueur non négligeable, plusieurs types de balourds peuvent se produire.

Avant tout, il est nécessaire d'introduire une nouvelle notion : tout solide a tendance à tourner plus facilement autour d'un axe qui ne dépend que de la répartition de ces masses. Cet axe est appelé axe principal d'inertie. Il passe par le centre de gravité.

Un rotor est équilibré lorsque l'axe de rotation coïncide avec l'axe principal d'inertie. Tout ajout de balourd va changer la répartition des masses et donc modifier la position de l'axe principal d'inertie. Selon sa position relative par rapport à l'axe de rotation on distingue un équilibrage statique. C'est l'état tel que le balourd est situé au milieu du rotor. L'axe principal d'inertie (d) est uniquement déplacé parallèlement par rapport (a) l'axe de rotation de l'arbre (**Figure III.3**). En pratique, il correspond essentiellement aux rotors sur lesquels le déséquilibre est prépondérant dans un seul plan de diamètre important (ventilateur, disque). Dans ce cas, une seule masse disposée diamétralement opposée au balourd permet d'équilibrer le rotor (équilibrage en un seul plan) [14].

La mesure quantitative du balourd d'un rotor est obtenue en faisant le produit de la masse de déséquilibre m par la distance r qui la sépare de l'axe de centre de gravité et l'axe de rotation. La valeur ainsi calculée est appelée valeur du balourd U ou B . Les unités de valeur du balourd sont les grammes millimètres ($g \cdot mm$) :

$$U = e \cdot M = m \cdot r \dots\dots\dots (equ.3.1)$$

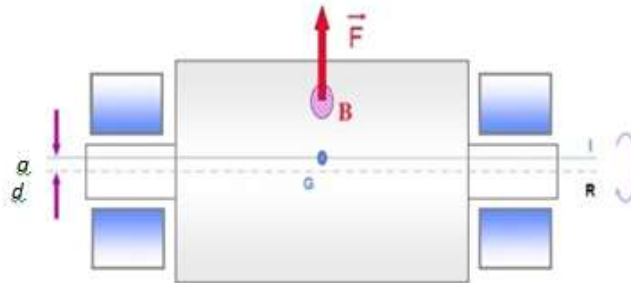


Figure III.3 : Balourd statique.

III.4.2. Les 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 [37].

III.5. L'équilibrage 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 [38].

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 III-5**.

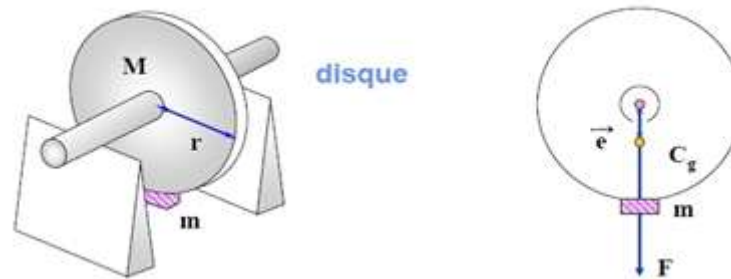


Figure III.4. Balancement d'un rotor.

III.6. Qualité d'équilibrage [39]

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 [40].

Bien que certains centres de service utilisent la norme ISO $G 2.5$ pour les turbines (**figure III.6**), 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 vélocité de vibration mesurée en mm/s ($2,5 \text{ mm/s} = 0,1 \text{ pouce/s}$) d'un rotor en appui libre.

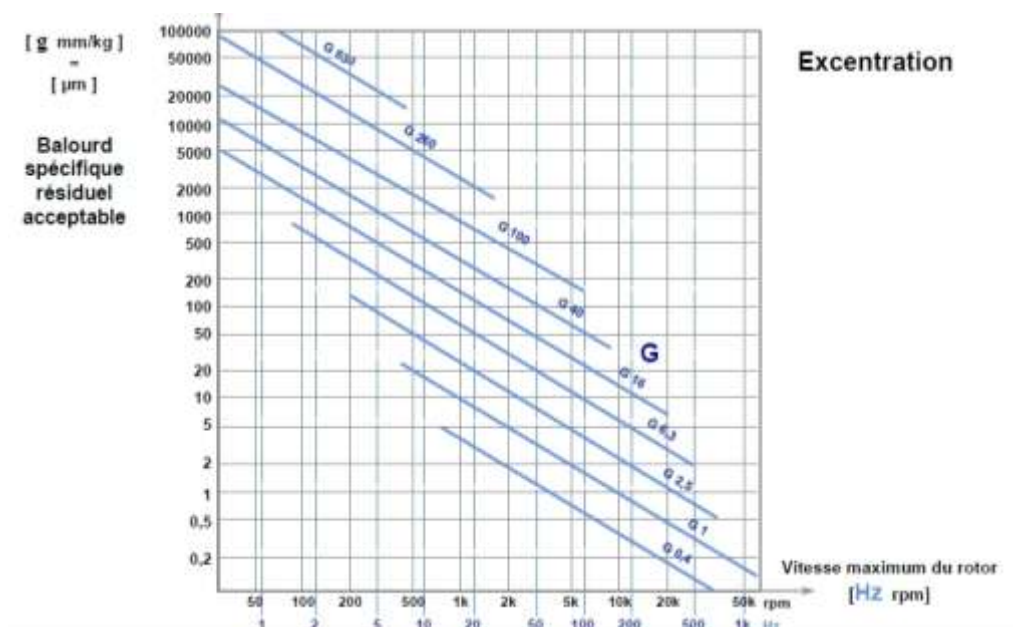


Figure III.5 : Balourd spécifique résiduel admissible correspondant au degré de qualité d'équilibrage G et à la vitesse nominale n [14].

III.7. 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 :

- le choix de la bonne machine à équilibrer parmi les équipements de l'atelier.
- une sous-traitance de l'opération d'équilibrage à d'autres sociétés.
- l'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).

III.7.1. Les 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 [41].

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 [42].

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 III.6 : Machine à équilibrer horizontale [43].

III.7.1.1. 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 [44].

Les écrans autorisent théoriquement toutes les représentations possibles des mesures, notamment la représentation vectorielle (**figure III.8**) 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.

III.7.1.2. 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 :

❖ **L'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.

❖ **Un 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.
- Les 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.

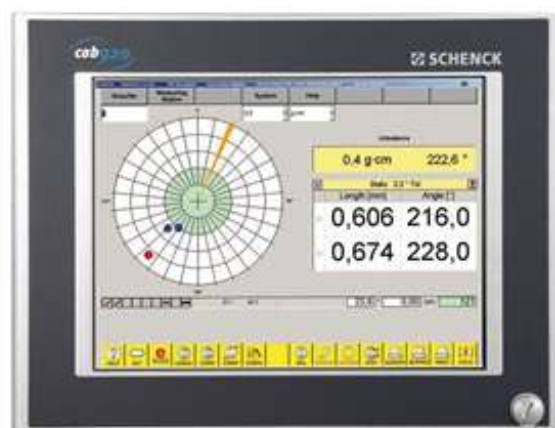


Figure III.7. Système Affichage d'une machine de type H-04 SCHENCK, [44]

La **figure III.7** 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.

III.7.2. 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 III-8**). Le moment du poids 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 III.8. Balance d'équilibrage statique utilisée pour des Rotors Turbomachine [35].

III.7.3. 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 [14].

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.

III.7.3.1. 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.

III.7.3.2. La 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.9**) :

- La fabrication en série ;
- La correction en dehors de la machine à équilibrer ;
- Les rotors très précieux ou très fragiles ;
- Les rotors difficiles à manipuler ou très lourds.



Fig. III.9: Procédure de répartition les aubes d'un rotor d'une turbine MEI Sonalgaz M'sila [45].

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.

III.8. Hypothèse d'équilibrage statique des rotors

III.8.1. Principe fondamental de la statique

En physique, un solide est en équilibre statique dans un repère galiléen si la résultante des forces est nul (équilibre de translation) et la résultante des moments des forces par rapport à n'importe quel point est nul (équilibre de rotation) [46].

Pour un système de plusieurs solides, il faut écrire les conditions précédentes pour chacun des solides. Ceci est une conséquence du « principe fondamental de la statique » qui stipule que « la somme et le moment de toutes les forces qui s'exercent sur lui est nulle ». En toute logique, et si nous possédions de bonnes connaissances mathématiques, il nous faudrait commencer par étudier la statique pour en déduire les formules d'équilibrage statique de notre travail. La théorie de la technique d'équilibrage s'appuie sur des principes physiques généraux. Les paragraphes suivants présentent les équations et les explications les plus importantes pour l'équilibrage.

III.8.2. Équilibrage de plusieurs masses tournant dans le même plan

Pour démontrer la relation qui permet de calculer le balourd et l'angle de correction, on va considérer quatre masses de grandeur m_1, m_2, m_3 et m_4 qui sont éloignées par rapport au centre de rotation à une distance r_1, r_2, r_3 et r_4 avec un angle $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ et α_4 (l'angle α_i signifiée la position de la masse par rapport au repère tournant de référence), comme montré dans la **figure III.10**.

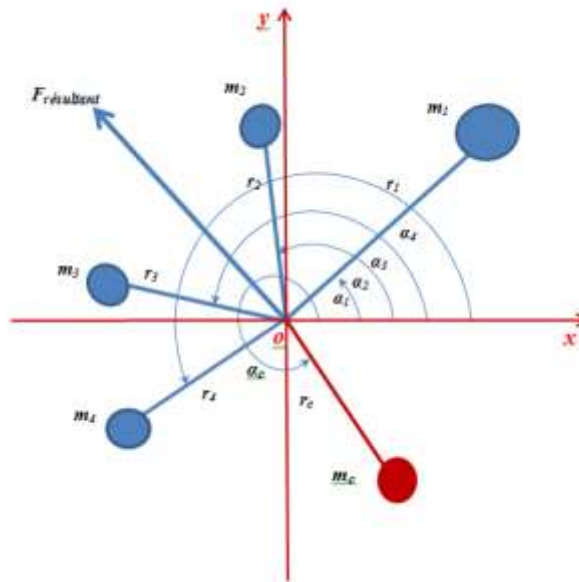


Figure III.10 : Description du balourd d'un rotor en forme de disque dans le même plan

Le cas le plus simple est représenté par un rotor en forme de disque monté perpendiculairement à l'axe de l'arbre. Si le rotor tourne avec une vitesse angulaire continue de ω rad/s., chaque masse élémentaire m_i engendre sur son rayon \vec{r}_i une force centrifuge \vec{F}_i

$$\vec{F}_i = m_i \cdot \vec{r}_i \cdot \omega^2 \dots\dots\dots(\text{equ.3.2})$$

La force opposée de même intensité, la force d'inertie de la masse, est appelée force centrifuge, son expression est :

$$\vec{F}_c = m_c \cdot \vec{r}_c \cdot \omega^2 \dots\dots\dots(\text{equ.3.3})$$

La somme vectorielle des forces centrifuges de tous les éléments est la force centrifuge qui agit sur les paliers, et elle s'exprime par :

$$\vec{F} = m_1 \cdot \vec{r}_1 \cdot \omega^2 + m_2 \cdot \vec{r}_2 \cdot \omega^2 + m_3 \cdot \vec{r}_3 \cdot \omega^2 + m_4 \cdot \vec{r}_4 \cdot \omega^2 \dots\dots\dots(\text{equ.3.4})$$

Donc : $\vec{F}_r = \sum_{i=k}^n m_i \cdot \vec{r}_i \cdot \omega^2 \quad N \dots\dots\dots(\text{equ.3.5})$

Deux possibilités peuvent se présenter :

- $\vec{F}_r = 0$: aucune force centrifuge ne s'exerce, le rotor est alors sans balourd, il s'agit d'un « rotor parfaitement équilibré ».
- $\vec{F}_r \neq 0$: le rotor est soumis à un balourd.

La question est maintenant de savoir comment exprimer le balourd de la meilleure manière. On peut se représenter la force centrifuge résiduelle comme issue d'un balourd $m_c \cdot r_c$ ou U (équ. 3.6) et l'on simplifie ensuite l'influence du régime des deux côtés (équ. 3.7) :

$$\sum_{i=k}^n m_i \cdot \vec{r}_i \cdot \omega^2 = m_c \cdot \vec{r}_c \cdot \omega^2 \quad N \dots \dots \dots \text{(équ. 3.6)}$$

$$\sum_{i=k}^n m_i \cdot \vec{r}_i = \vec{U} \quad g \cdot mm \dots \dots \dots \text{(équ.3.7)}$$

Pour résoudre ces équations mathématiquement, diviser chaque force en ses composants de x et de y :

$$\sum_{i=k}^n m_i \cdot r_i \cdot \cos \alpha_i = U \cdot \cos \alpha \quad \dots \dots \dots \text{(équ.3.8)}$$

$$\sum_{i=k}^n m_i \cdot r_i \cdot \sin \alpha_i = U \cdot \sin \alpha \quad \dots \dots \dots \text{(équ.3.9)}$$

L'addition de la Racine-carré des deux équations ci-dessus (équ.3.7) et (équ.3.8) donne :

$$U = \sqrt{(\sum_{i=k}^n m_i \cdot r_i \cdot \cos \alpha_i)^2 + (\sum_{i=k}^n m_i \cdot r_i \cdot \sin \alpha_i)^2} \quad \dots \dots \dots \text{(équ.3.10)}$$

Divisant (équ.3.8) près (équ.3.7):

$$\tan \alpha_c = \frac{\sum_{i=k}^n m_i \cdot r_i \cdot \sin \alpha_i}{\sum_{i=k}^n m_i \cdot r_i \cdot \cos \alpha_i} \quad \dots \dots \dots \text{(équ.3.11)}$$

On a utilisé la méthode analytique pour déduire la masse de correction (argument) et son angle (phase) :

$$- \text{Argument} = U$$

$$- \text{Phase}(\alpha_c) = \arctan. \frac{\sum_{i=k}^n m_i \cdot r_i \cdot \sin \alpha_i}{\sum_{i=k}^n m_i \cdot r_i \cdot \cos \alpha_i}$$

Ces calculs peuvent être représentés graphiquement, comme montré dans **fig. III-12**. Découvrir la force centrifuge (ou le produit de la masse et du rayon de rotation) exercé par chaque masse sur l'arbre tournant. Tracer un tableau de vecteur avec les forces centrifuges obtenues (ou le produit des masses et de leurs rayons de rotation), telles que le ab représente la

force centrifuge exercée par le moment $m_1.r_1$ dans la grandeur et le sens à une certaine balance appropriée.

De même, l'attraction soit, bc , cd , et de pour représenter les moments d'autres masses m_2r_2 , m_3r_3 et m_4r_4 . Maintenant, selon la loi de polygone des forces, les ae latéraux se fermants représente la force résultante dans la grandeur et le sens. La force d'équilibrage est, puis, égale à la force résultante, mais dans le sens opposé.

On a trouvé à l'extérieur l'importance de la masse d'équilibrage (m) à un rayon donné de rotation (r), Tel que : $m_c r_c$. Résultante de $m_1.r_1$, de m_2 de r_2 , r_3 de m_3 et r_4 de m_4 .

En général pour la solution, le m_1r_1 , m_2r_2 , m_3r_3 et m_4r_4 des vecteurs, le m_2 de r_2 , le m_3 graphiques le r_3 et le r_4 de m_4 , etc., sont ajoutés. S'ils se ferment dans une boucle, le système est équilibré.

Autrement, le vecteur se fermant donnera la masse de correction. Son sens identifie la position angulaire de contre-masse relativement à l'autre masse. Les positions angulaires sont mesurées dans le sens contraire des aiguilles d'une montre à partir de la ligne de référence le long de l'axe des abscisses.

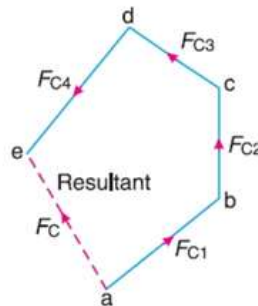


Figure III.11 : Diagramme de vecteur de l'équilibrage plusieurs du masse tournant dans le même plan.

III.9. Conclusion

La correction de balourd est une procédure permettant de rectifier la répartition des masses (aubes) 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.

Chapitre IV

**L'élaboration d'un programme
de répartition d'aubes**

IV.1. Généralité

Le montage d'un étage d'un rotor turbine est de répartir les aubes de telle façon que le balourd d'un étage ailettes trouve dans la tolérance admise, ou tout au moins qu'il soit le plus petit possible afin d'utiliser que des masses d'équilibrage pour atteindre ce but d'une façon simple et rentable.

Dans ce chapitre Nous avons contribué à l'élaboration d'un programme avec code MATLAB, pour faire la répartition des aubes. Et nous allons comparer les résultats des essais obtenus de la partie pratique que nous avons faite avec le logiciel BLADIS.net de grande société dans ce domaine avec les données des essais de notre étude du programme élaboré. Donc Nous effectuons trois expériences de la répartition des aubes à partir des valeurs initiales du moment statique de chaque ailette donnée par la balance électronique au niveau de la société MEI (Sonelgaz-M'sila).

IV.2. Présentation de l'application

Nous avons élaboré un programme de répartition des ailettes avec code calcul MATLAB. Le travail a été réalisé avec un micro-ordinateur de configuration suivante :

- Système d'exploitation Win7 (64bit).
- Intel® Core™ 3 CPU 1,80 GHz.
- Mémoire physique 4Go.
- Version de programme Matlab 2012.

Le principal objectif de programme MATLAB est d'obtenir une répartition des aubes d'un étage de Turbine, que le balourd de l'étage aube se trouve dans les limites admissibles de la tolérance ou pour le moins, qu'il soit si petit, qu'il ne peut procéder qu'à des corrections infimes.

IV.3. Disposition des différentes possibilités de répartition des aubes

Pour équilibrer un tel rotor turbine , il faut ramener son centre de gravité sur l'axe de rotation en plaçant une masse d'équilibrage à l'opposé du centre de gravité par rapport à l'axe de rotation, pour trouver cette masse il faudra faire plusieurs essais avec des masses de valeur différentes, **La figure IV.1**représentent les algorithmes de répartition d'aubes, l'objectif de notre travail est de résoudre le problème déséquilibre d'un rotor libre en utilisant le code de calcul MATLAB. Suivant un algorithme présélectionné :

1- Si le nombre d'aubes est divisible par 2 :

AlgorithmeN°01 : Deux secteurs décroissants. (**Figure IV.1a**).

Algorithme N°02 : Un secteur décroissant en alternant aubes lourds et aubes légères (**Figure IV.1b**).

Algorithme N°03 : Deux secteurs décroissants en alternants aubes lourds et aubes légères (**Figure IV.1c**).

2- Si le nombre d'aubes est divisible par 4 :

Algorithme N°04 : Quatre secteurs décroissants en alternant aubes lourdes et aubes légères (**Figure IV.1d**).

Algorithme N°05 : Quatre secteurs décroissants en sens horaires/anti-horaire (**Figure IV.1e**).

3- Si le nombre d'aubes est divisible par 3 :

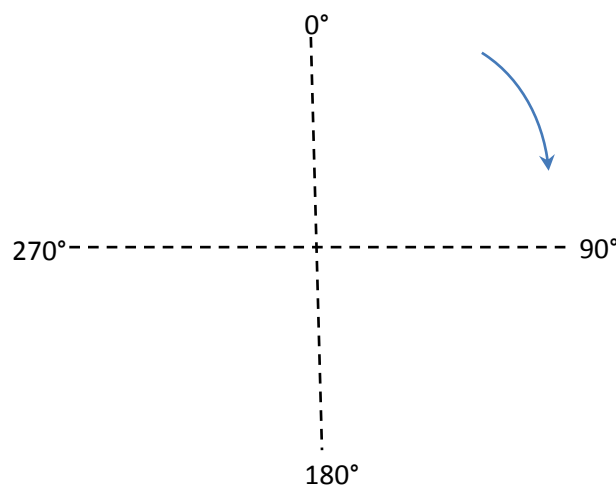
Algorithme N°06 : Trois secteurs décroissants en alternant aubes lourds et aubes légères. (**Figure IV.1f**).

4-2- Suivant un algorithme défini par l'utilisation-lui-même (**7-Ordre de Pesage**)

4-3- Classement les aubes : nombre d'aubes arbitraire.

La représentation graphique de **figure ci-dessous** montre le disque avec ses aubes, les longueurs correspondent aux poids-moments mesures. Les différences ont été volontairement amplifiées de manière à représenter clairement l'algorithme sélectionné.

Dans le programme BLADIS.NET, les aubes sont positionnées dans le sens des aiguilles d'une montre, la représentation ci-dessous représente le sens pour la mesure de l'angle dans le programme.



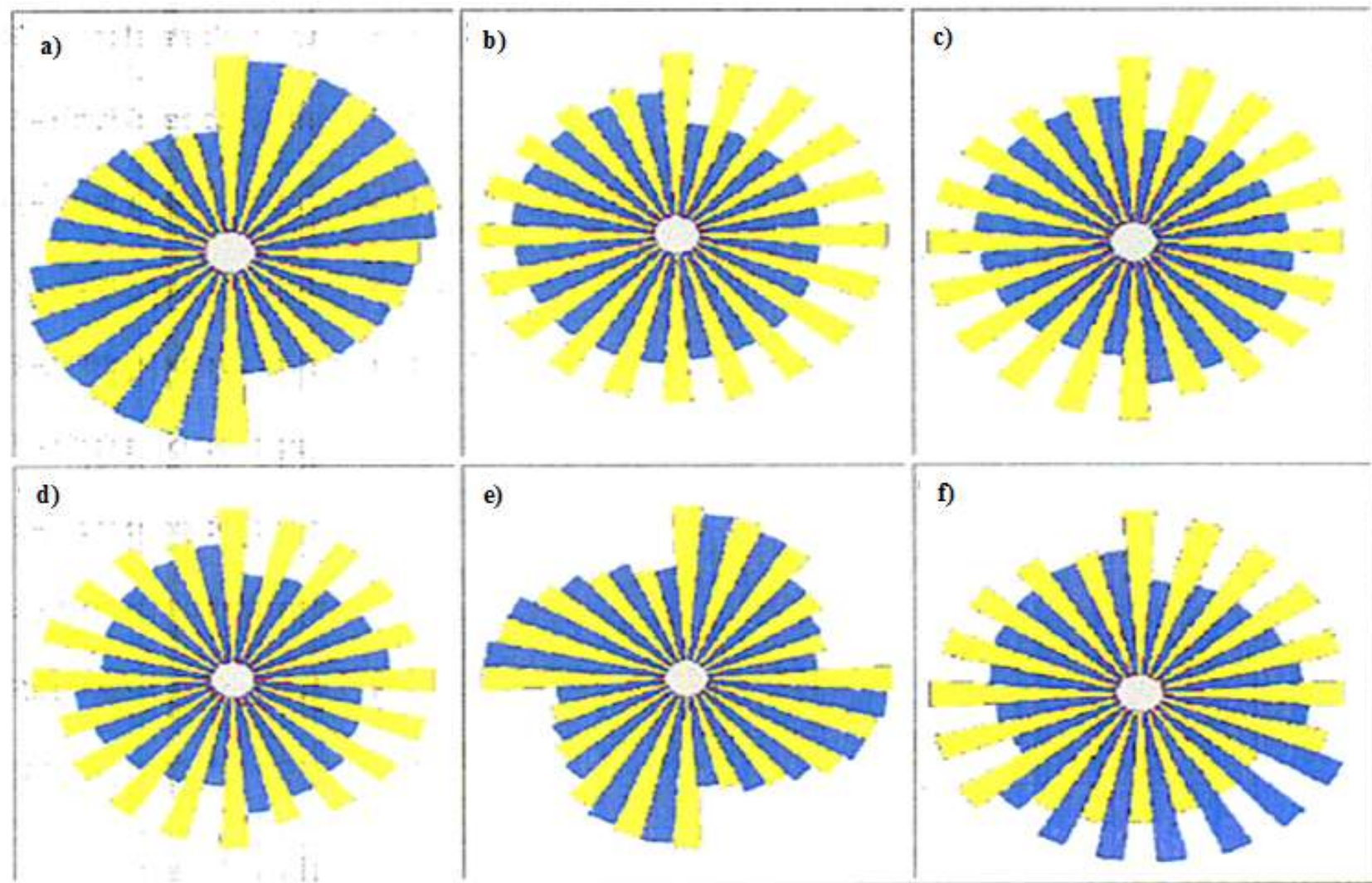


Figure IV.1 : Les Algorithmes de répartition d'aubes.

IV.4. Mesure des moments statique

Avant de lancer l'application qui permet de faire la répartition des ailettes, on procède à la mesure des moments statiques des ailettes à l'aide d'une balance électronique série de WM de balances pesantes de moment pour des aubes de rotor est aussi capable de la distribution de peser avec précision et de contrepoids exactement en utilisant le logiciel de BLADIS.net. Des aubes sont distribuées avec des algorithmes sans interruption de raffinement le logiciel a une interface facile à utiliser d'écran d'affichage [44].

Les balances pesantes série de WM sont compactes, et peuvent n'être montées sur le plancher d'atelier sans aucunes bases ou boulonnage. Il est facile de réunir et établir le modèle. Les caractéristiques de ces machines (**figure IV.2**) :

- Orientation: horizontale.
- Type: a aube.
- Applications: Pour rotor.
- Autres caractéristiques: de haute précision.
- Charge sur rotor: 140, 40.



Figure IV.2: Mesure des moments statique avec une balance de type WM (MEI SONALGEZ M'sila).

La balance de contrôle du moment statique et le système BLADIS Net forment normalement un poste de travail intégré où les aubes sont pesées et réparties. On peut également, le cas échéant, dissocier ces deux fonctions. Le calculateur enregistre les données et les résultats, tous ces paramètres sont ensuite stockés.

Le premier pas est de choisir de dissocier les deux fonctions et ensuite mesurer le moment statique des aubes (**figure IV.3**).

Après l'acquisition des mesures, suivant la deuxième étape qui a pour but d'optimiser et définir un bon résultat d'équilibrage d'une répartition selon ce qui suit :

- Entrer les données des aubes à partir du clavier (**figure IV.4**).
- Trier les aubes selon les moments décroissants et monter les aubes dans l'ordre prescrit (l'ordre de pesage, Numéros de série, l'ordre des moments décroissants (**figure IV.5**)).
- Sélectionner la répartition qui doit servir pour le lancement de l'optimisation et définir votre propre répartition (**Figure IV.6**).
- Effectuer une série de permutation pour respecter le meilleur rapport de réduction du balourd En fonction de répartition prédéterminée. (**figure IV.7**).
- Enfin, les résultats de l'optimisation imprimés dans un procès-verbal qui contient un tableau avec répartition complète des aubes, la liste et le graphique des permutations d'aubes (**Annexe C**).



Figure IV.3: Calculateur de la machine à équilibrer.

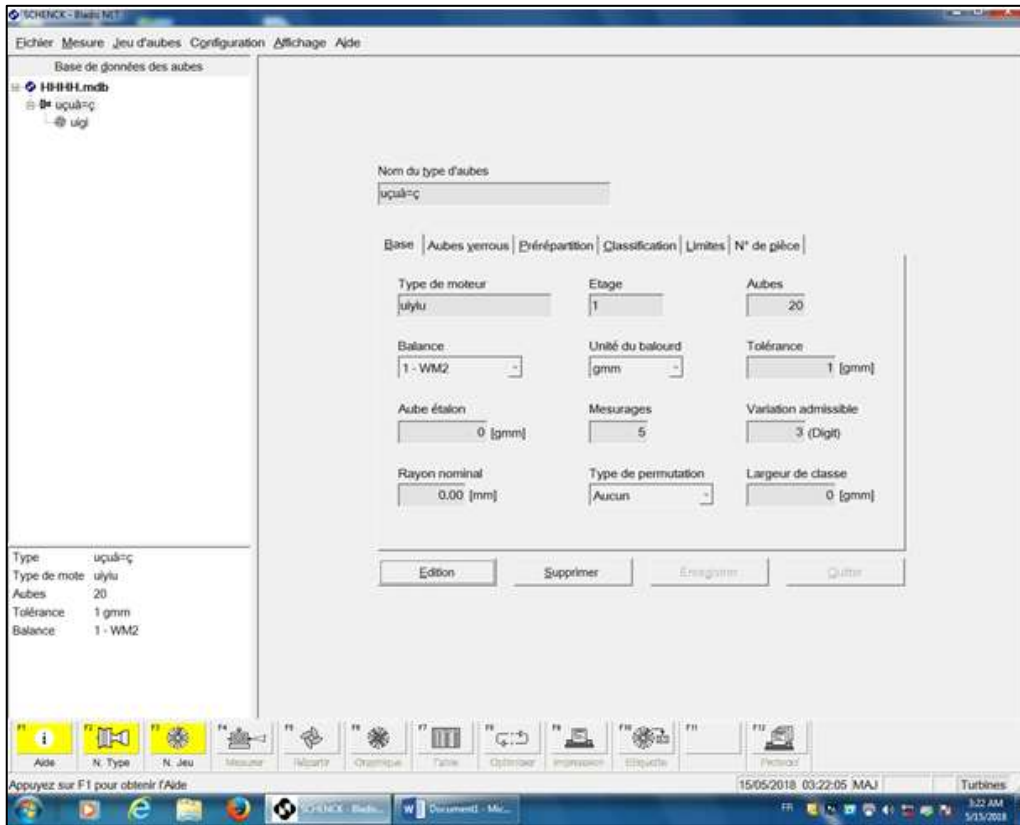


Figure IV.4 : Tableau des données d'aubes.

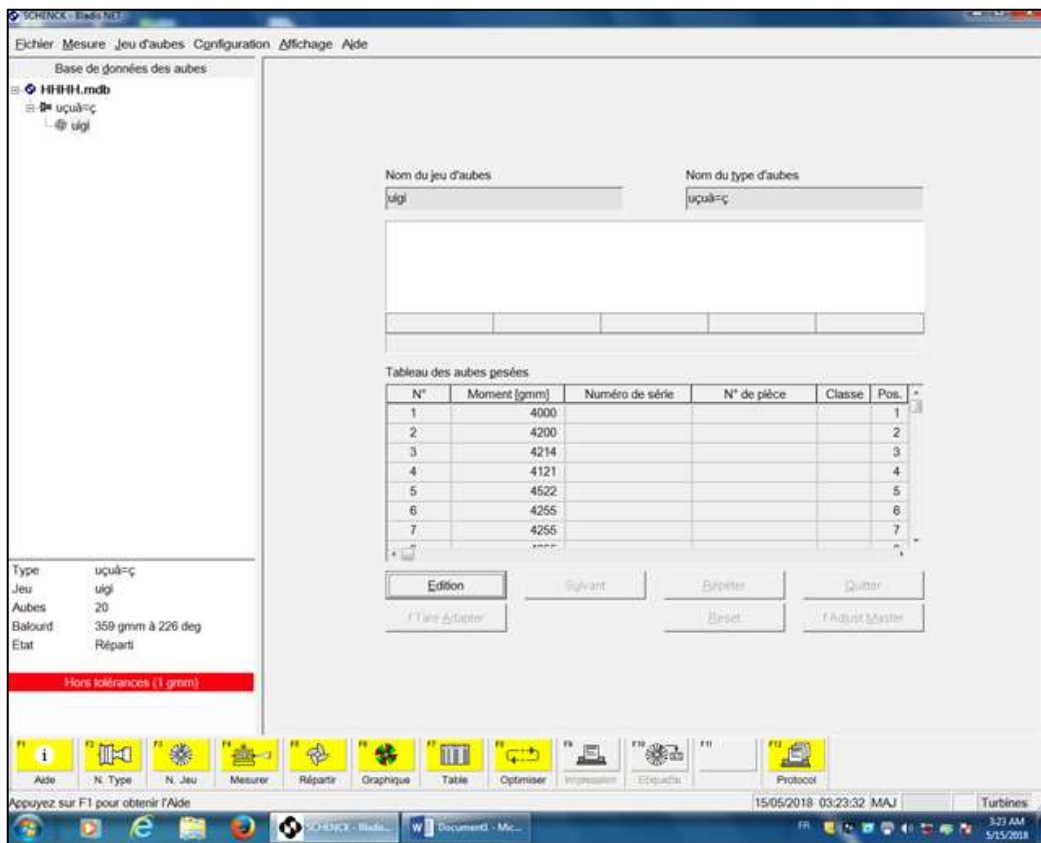


Figure IV.5: Tableau des moments statiques.

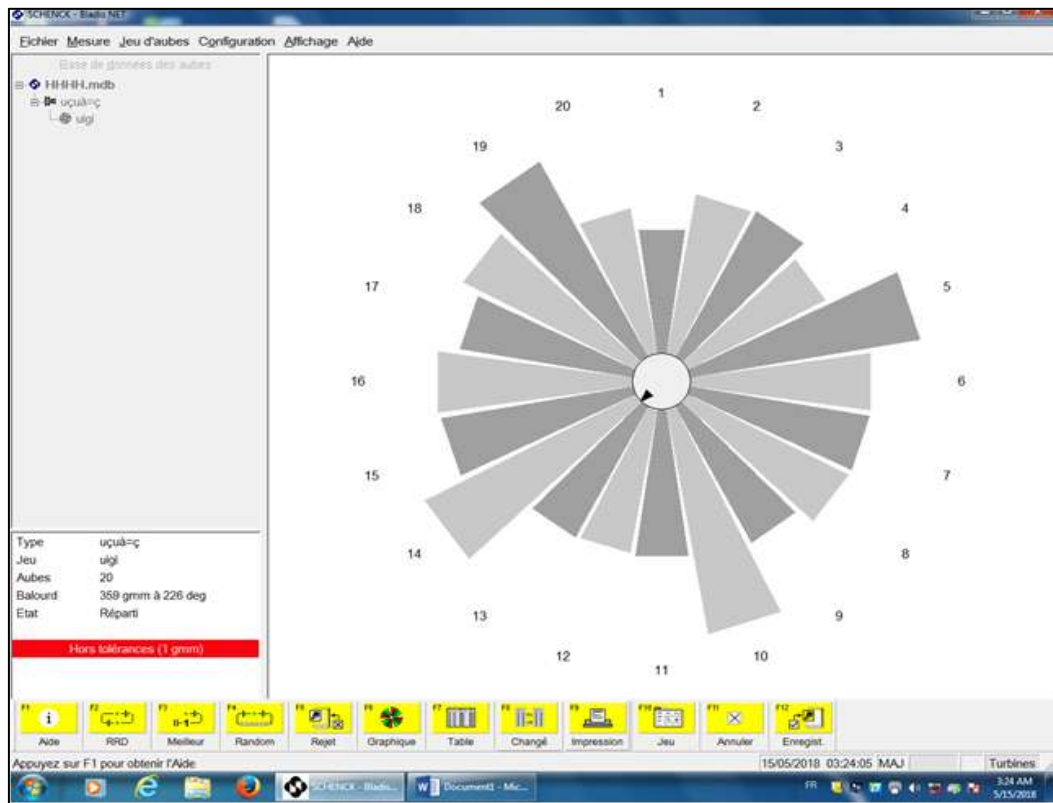


Figure IV.6 : Résultats hors tolérance avec un système d'affichage vectoriel.

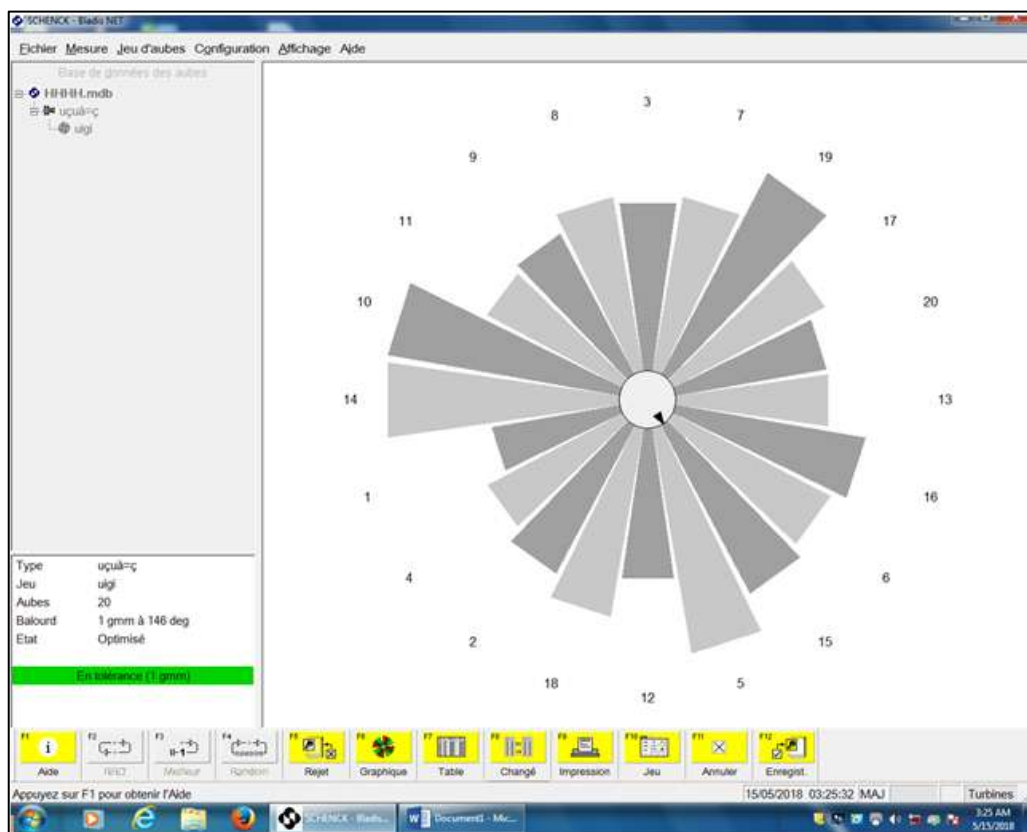


Figure IV.7 : Résultats en tolérance avec un système d'affichage vectoriel.

IV.5. Organigramme de programme de répartition d'aubes

Les étapes de calcul de l'application sont données par l'organigramme suivant:

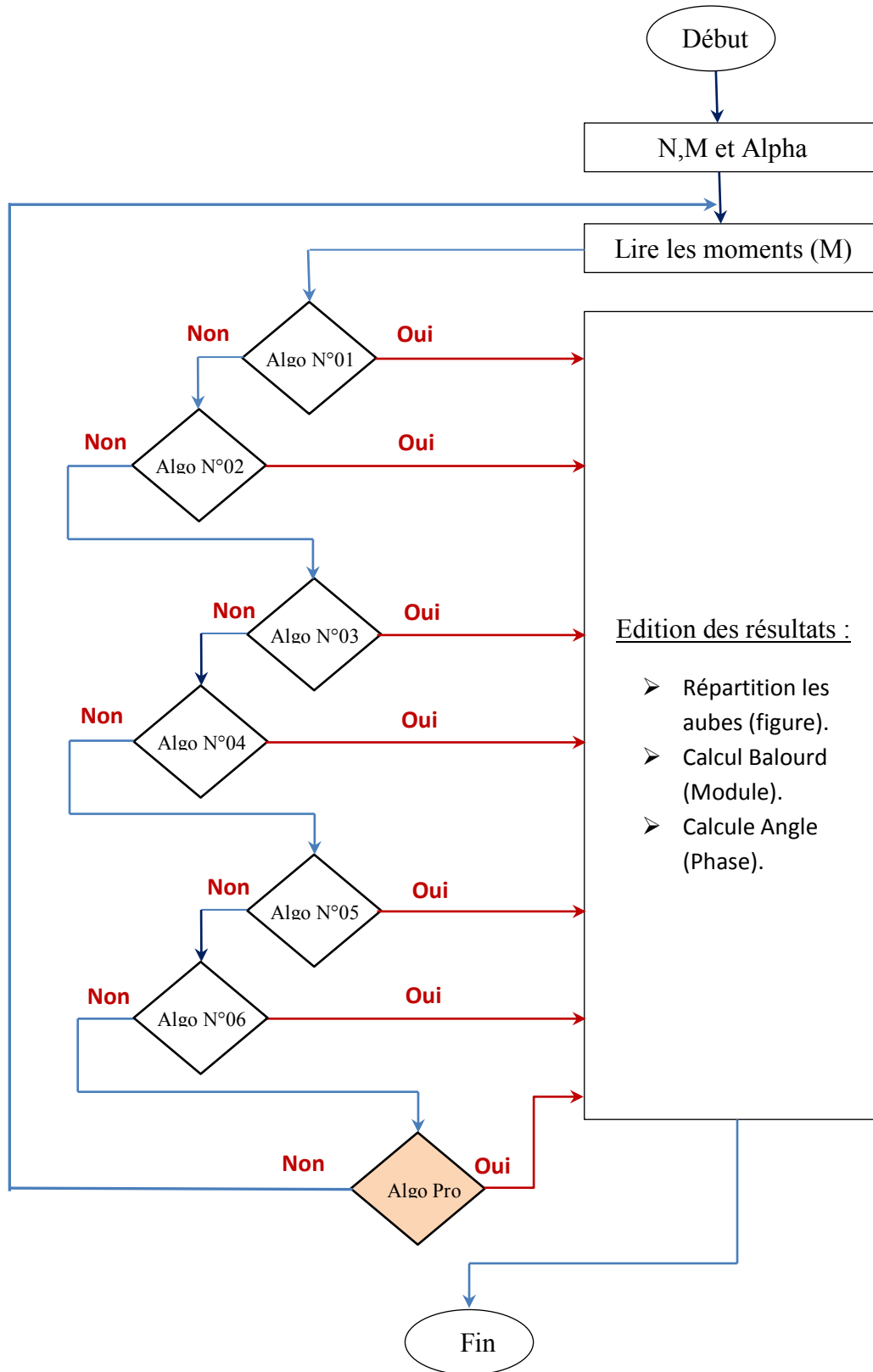


Figure IV.8: Organigramme de l'application.

IV.6. Les résultats de la répartition des aubes sous-programme MATLAB

Le balourd c'est la masse à ajouter ou à enlever pour faire une correction dans une opération d'équilibrage, pour calculer le balourd et l'angle de correction on utilise deux formules :

Les données sont : $U_x = m_i \cdot r \cdot \cos(\alpha_i)$ et $U_y = m_i \cdot r \cdot \sin(\alpha_i)$, $\alpha = 360/n$ donc :

- Argument (messe de correction)

$$U_{cor} = \sqrt{(\sum_{i=k}^n U_x)^2 + (\sum_{i=k}^n U_y)^2} \dots \dots \dots (\text{equ.IV.1})$$

- Phase (l'angle de correction) :

$$\alpha_{cor} = \text{arctg} \frac{\sum_{i=k}^n U_y}{\sum_{i=k}^n U_x} \dots \dots \dots (\text{equ.IV.2})$$

On suppose que :

N : le nombre d'aubes.

M : la valeur du moment statique.

α : angle (la position de la masse par rapport au repère tournant de référence).

Notre contribution propose une nouvelle algorithme bien déterminé pour une répartition d'aubes d'un étage d'une turbine avec quatre secteurs décroissant lourds, c'est la première valeur maximal du moment occupe la position (90°), la deuxième valeur maximale occupe la position (270°), la troisième valeur maximal occupe la position (180°) et la quatrième valeur occupe la position (0°) (**figure IV.9**).

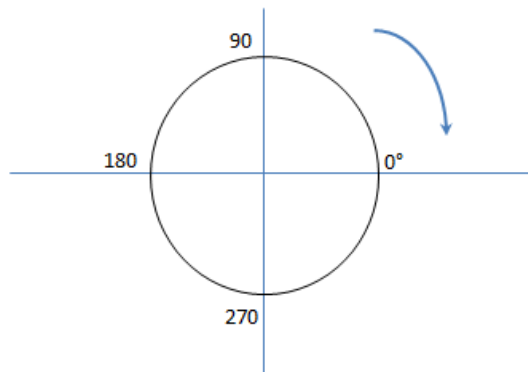


Figure IV.9 : Le sens pour la mesure de l'angle (α).

IV.6.1. Les algorithmes de répartition

Nous avons présenté les logigrammes des 07 algorithmes de nos travaux pour comprendre notre programme (Annexe A).

IV.6.1.1. Algorithme de répartition N°01

Deux secteurs décroissants c'est-à-dire en divise le nombre d'aube (N) sur deux, la valeur maximale du moment $M_1(max)$ occupe la premier position N (90°), puis la deuxième valeur $M_2(max)$ occupe la position N/2+1 (270°).

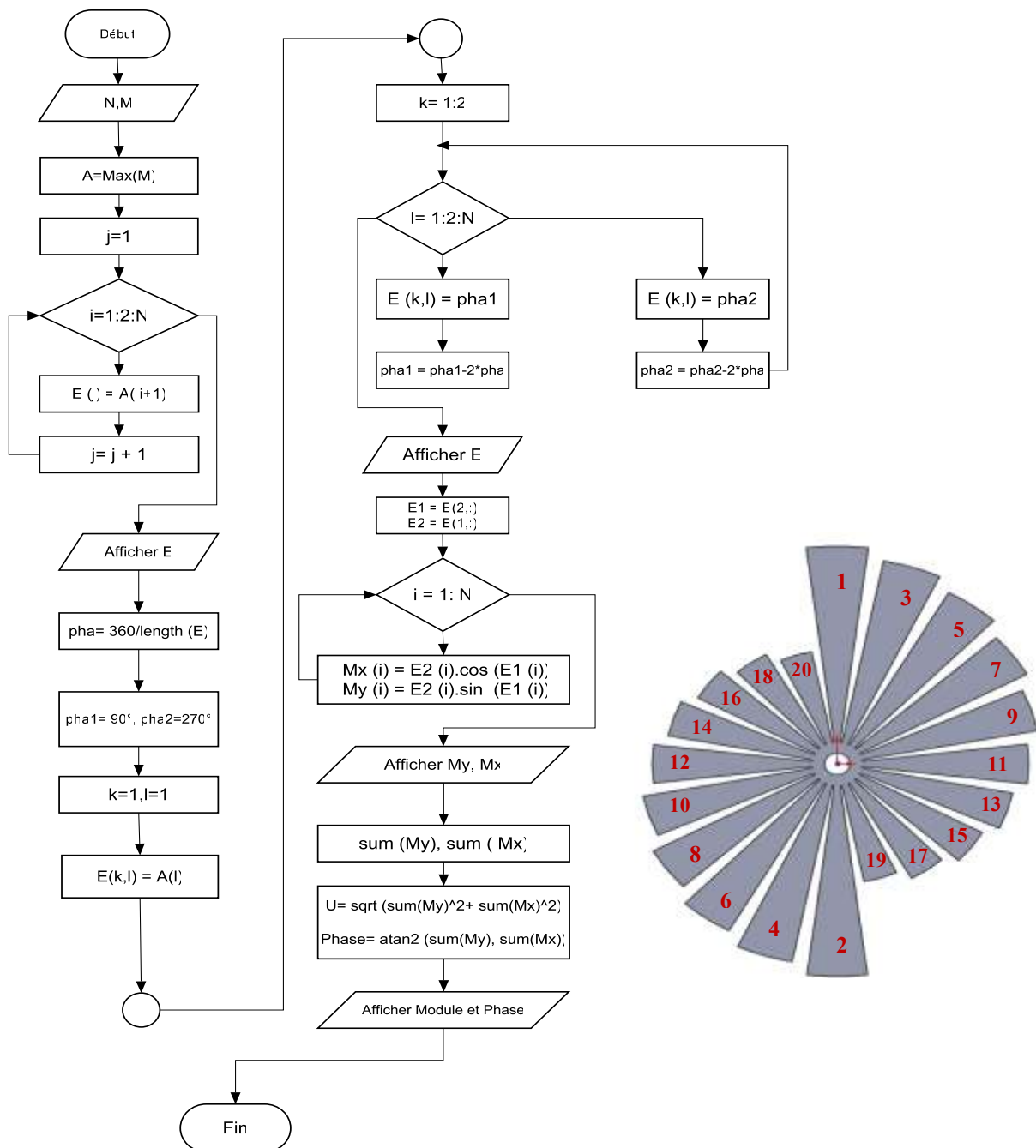


Figure IV.10. Logigramme représente l'algorithme de répartition des aubes N°01.

IV.6.1.2. Algorithme de répartition N°02

Un secteur décroissant en alternant aubes lourds et aubes légères.

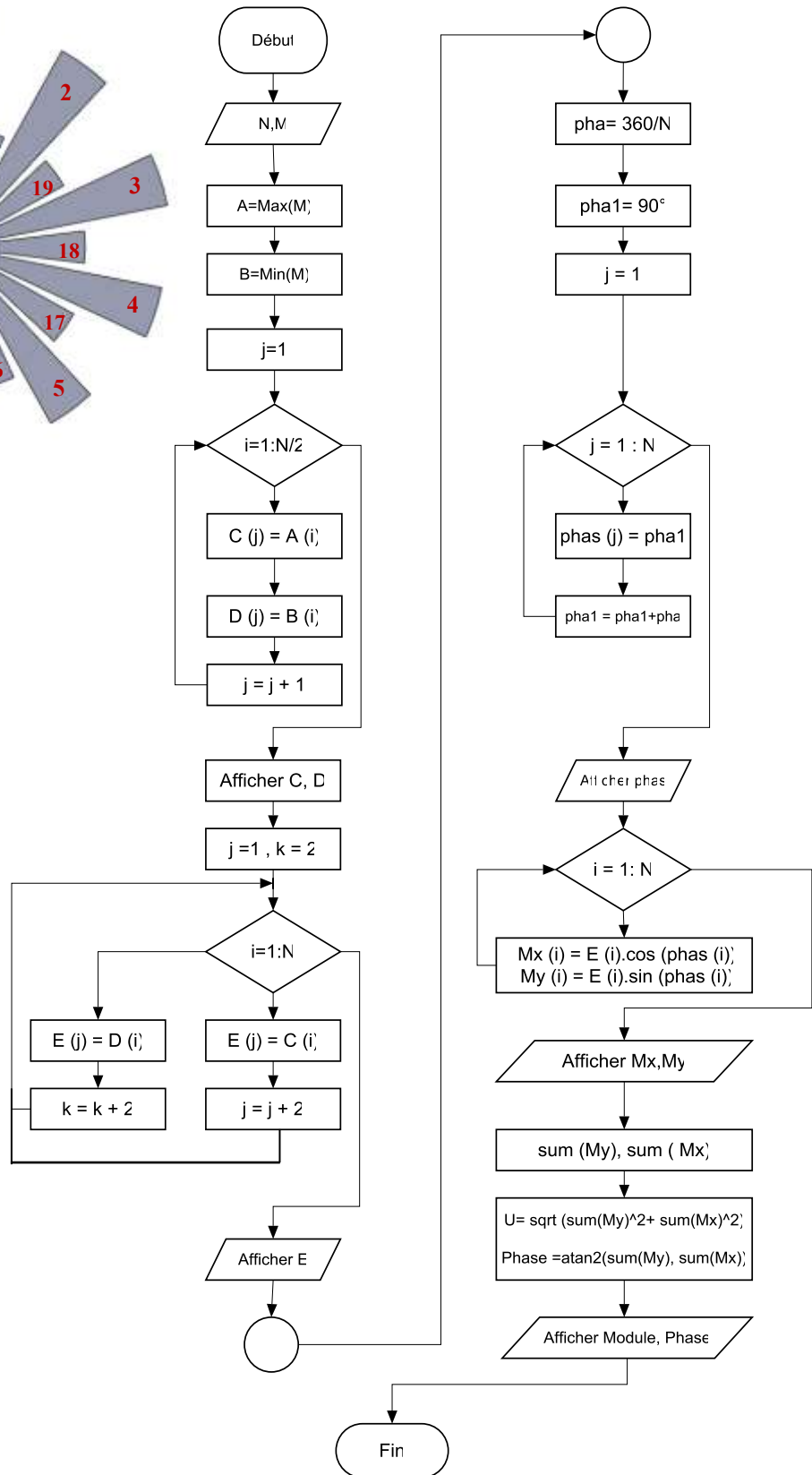
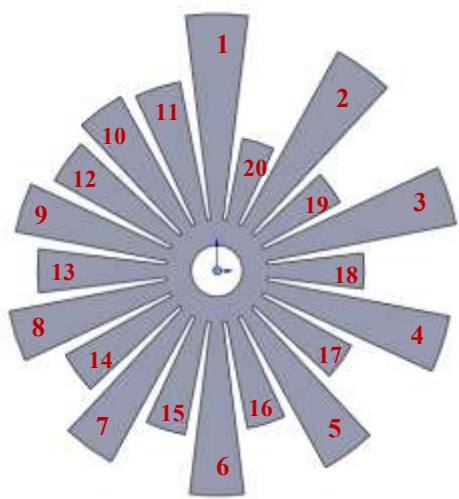


Figure IV.11. Logigramme représente l'algorithme de répartition des aubes N°02.

IV.6.1.3. Algorithme de répartition N°03

Deux secteurs décroissants en alternants et aubes lourds et aubes légères.

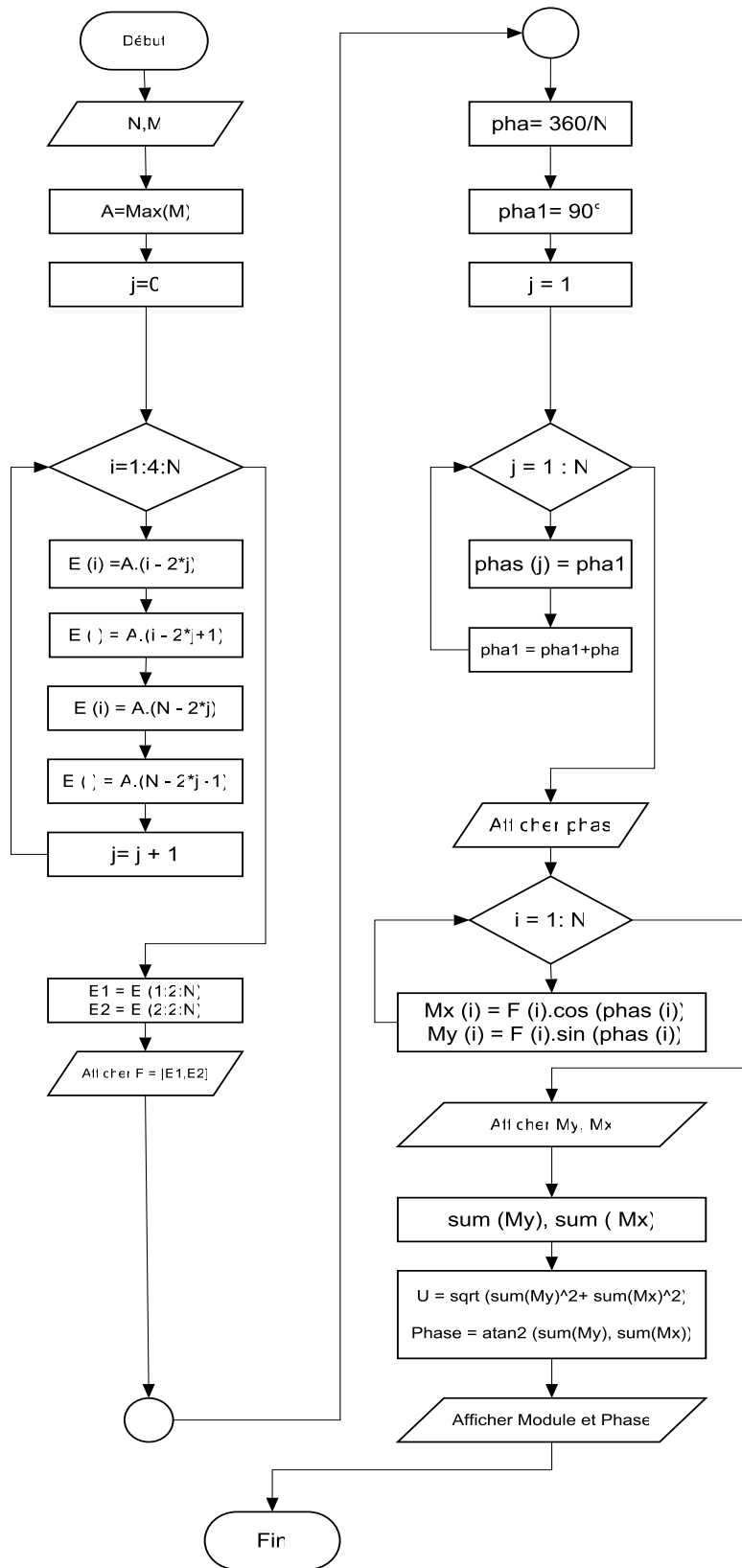
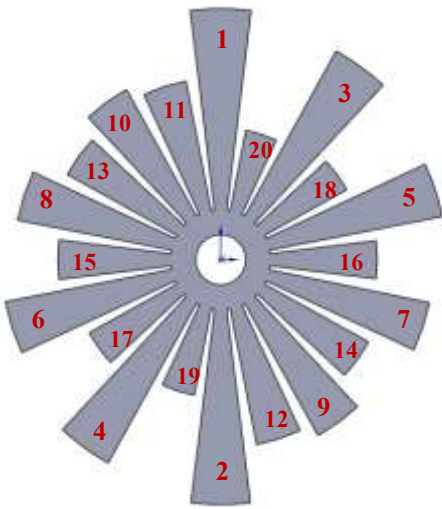


Figure IV.12. Logigramme représente l'algorithme de répartition des aubes N°03.

IV.6.1.4. Algorithme de répartition N°04

Quatre secteurs décroissants en alternant aubes lourdes et aubes légères.

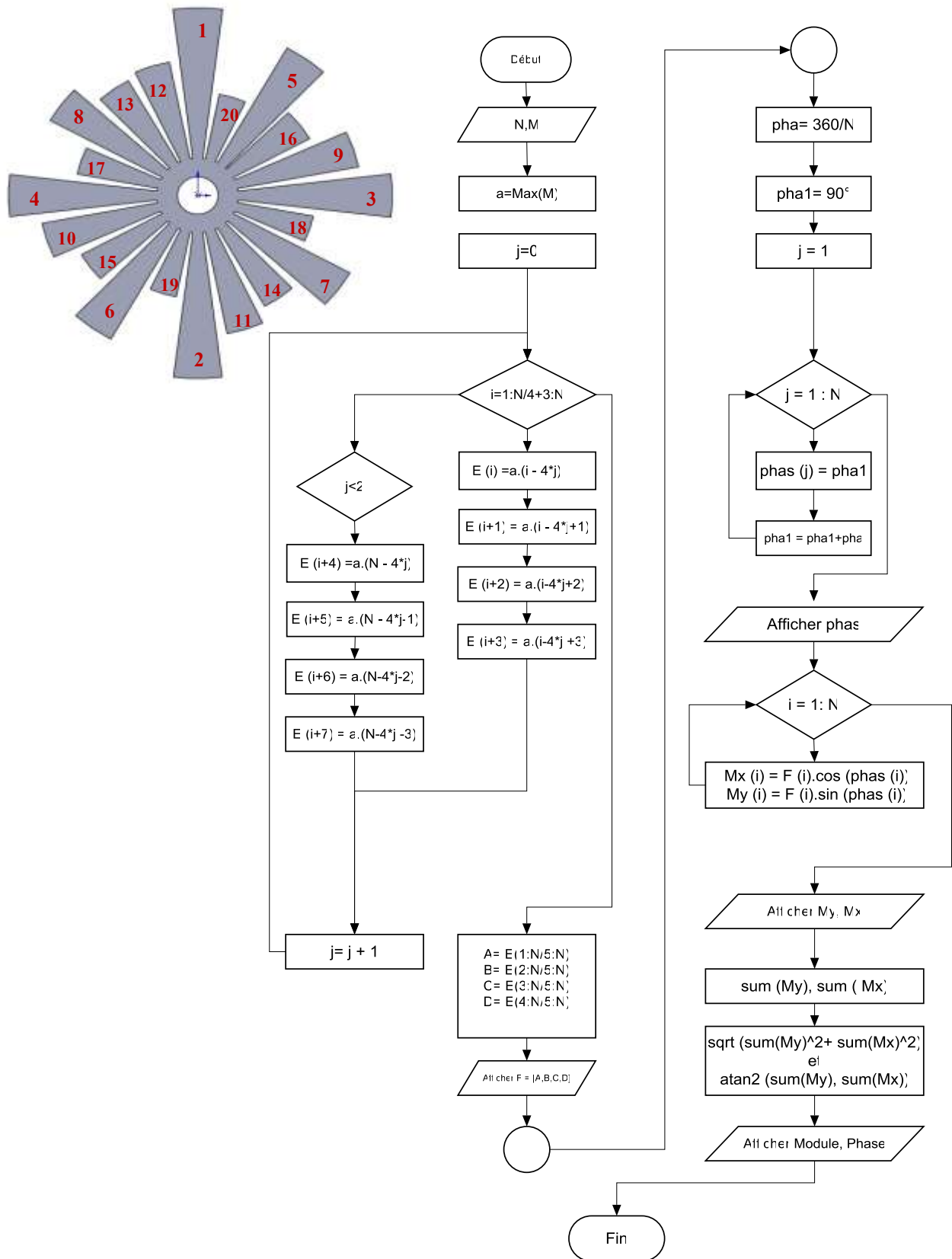


Figure IV.13 : Logigramme représente l'algorithme de répartition des aubes N°04.

IV.6.1.5. Algorithme de répartition N°05

Quatre secteurs décroissants en sens horaires/antihoraire :

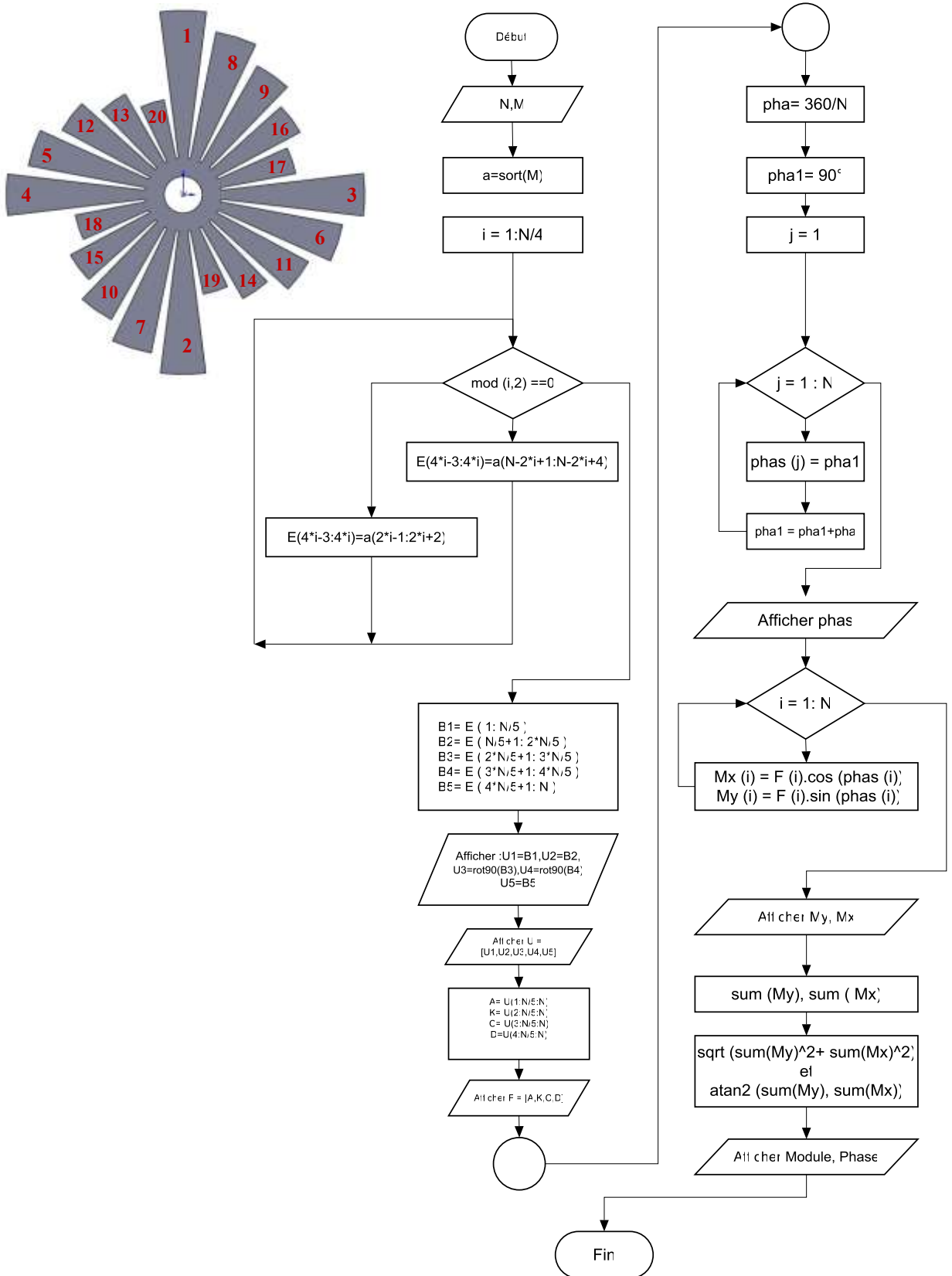


Figure IV.14 : Logigramme représente l'algorithme de répartition des aubes N°05.

IV.6.1.6. Algorithme de répartition N°06

Trois secteurs décroissants en alternant aubes lourds et aubes légères.

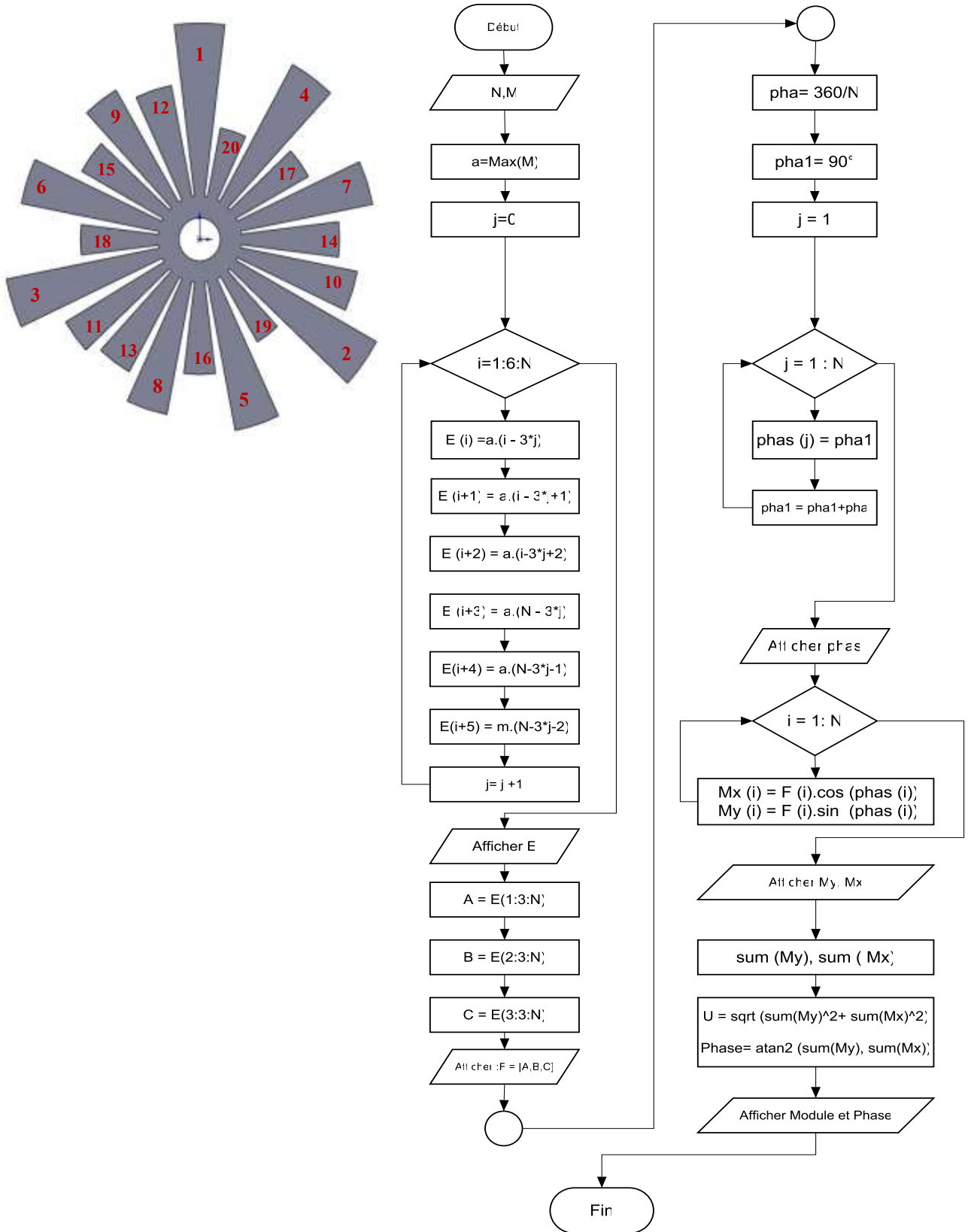


Figure IV.15 : Logigramme représente l'algorithme de répartition des aubes N°06.

IV.6.1.7. Algorithme Proposé

Quatre secteurs décroissant lourds, c'est la première valeur maximal du moment occupe la position (90°), la deuxième valeur maximale occupe la position (270°), la troisième valeur maximal occupe la position (180°) et la quatrième valeur occupe la position (0°)

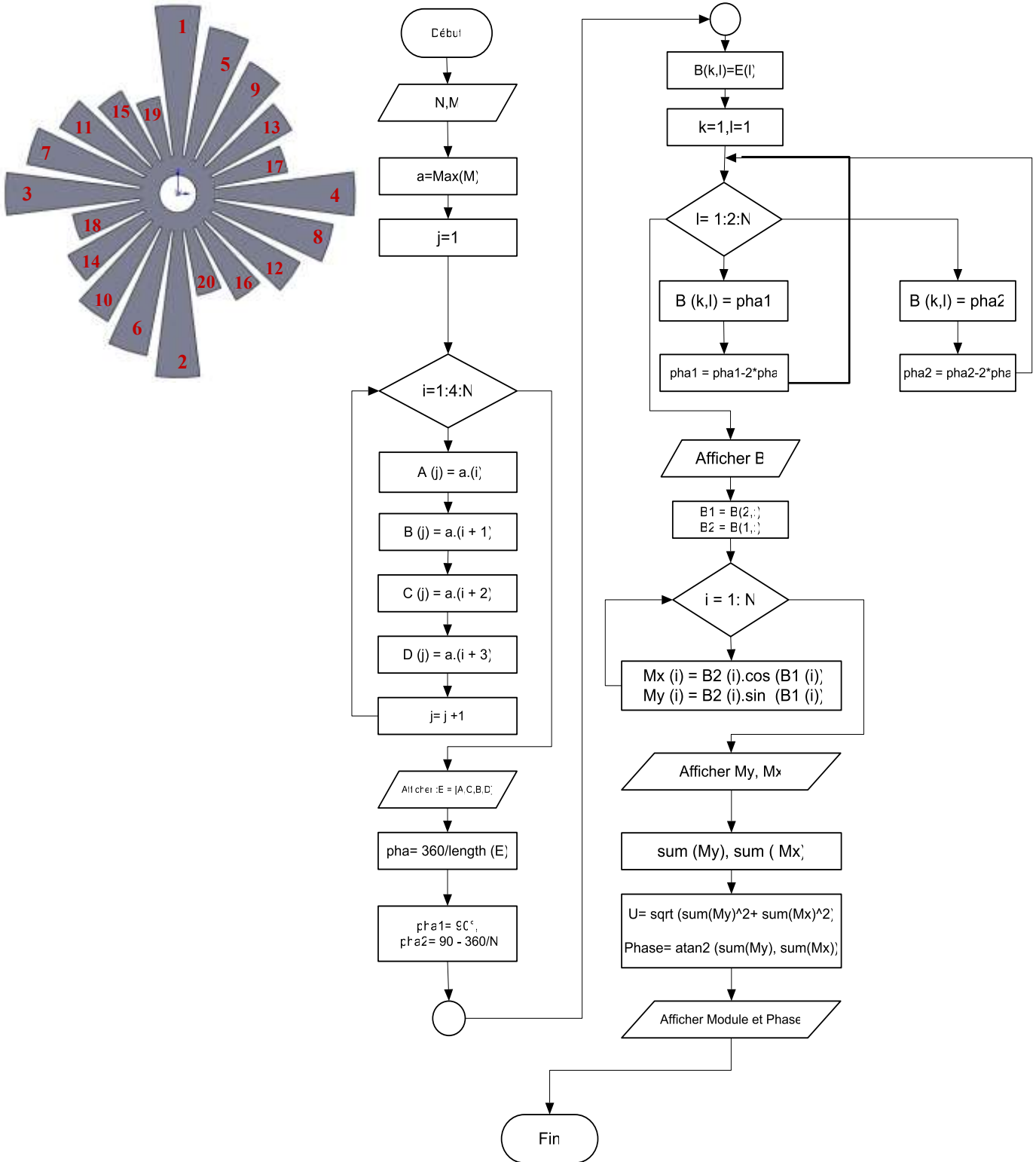


Figure IV.16 : Logigramme représente l'algorithme de répartition des aubes proposé.

IV.6.2. Résultat de code MATLAB

Avant d'effectuer les calculs de balourd, Pour chaque combinaison de répartition, nous avons choisis les six algorithmes avec notre algorithme de contribution pour cette étude.

A partir des résultats données et des figures enregistrées lors de la programmation (**figures : 17 à 23, 24 à 30 et 31 à 37**), on tire directement les corrections des masses et ses angles qui se traduisent par la suite des modules et phases à l'aide de la formule (*équ IV.1 et IV.2*). On résume les valeurs trouvées dans les tableaux suivants :

Le premier tableau représente les Résultats des différents algorithmes pour la répartition de 20 aubes.

Nombre aubes		Algo. N°01	Algo. N°02	Algo. N°03	Algo. N°04	Algo. N°05	Algo. N°06	Algo. proposé	Bladis.Net Pesage
20	$U_c (g.mm)$	0.43	1.028	0.35	0.354	0.38	0.53	0.42	1
	$a_c (deg)$	52	50.6	90	86	71.58	70.5	92	0 (90°)

Tableau IV.1 : Balourd et son angle obtenu par expérience de 20 aubes.

Ces résultats montrent que :

D'après la lecture de tableau précédent on observe que les masses des corrections obtenues appartiennent à la plage de Balourd mentionné dans le Procès-verbal de BLADIS.NET (**Annexe C**). Donc la meilleure permutation entre les algorithmes est l'algorithme N°03 et l'algorithme Proposé (**figure IV.19 et IV.23**).

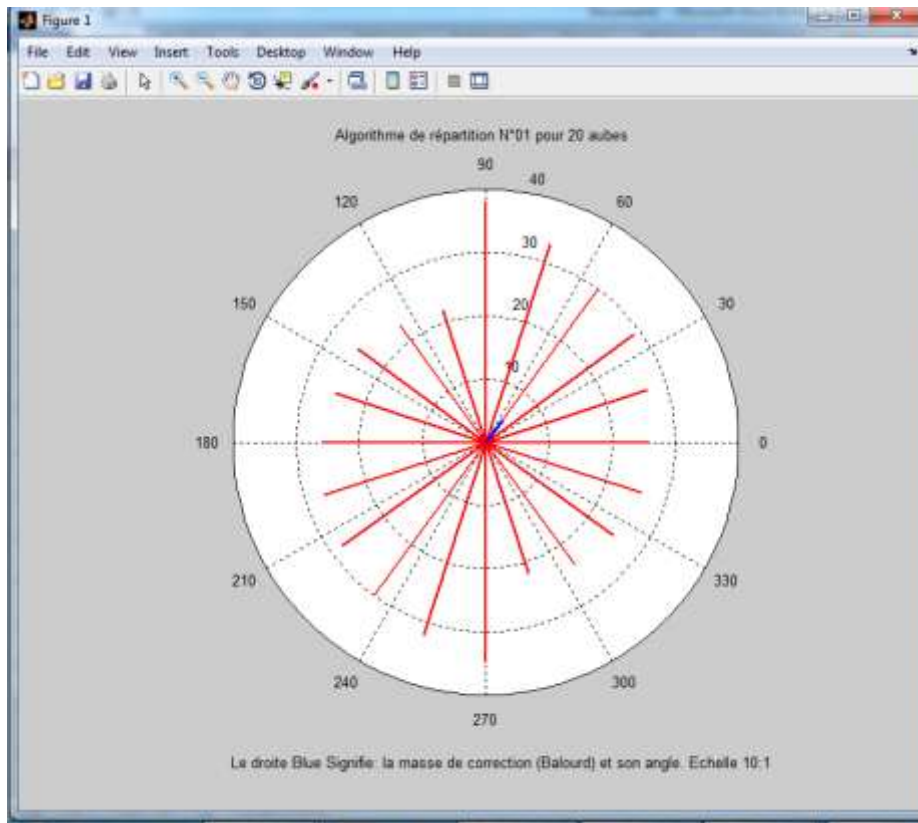


Figure IV.17 : Représentation graphique de l'Algorithme de répartition N°1 pour 20 aubes.

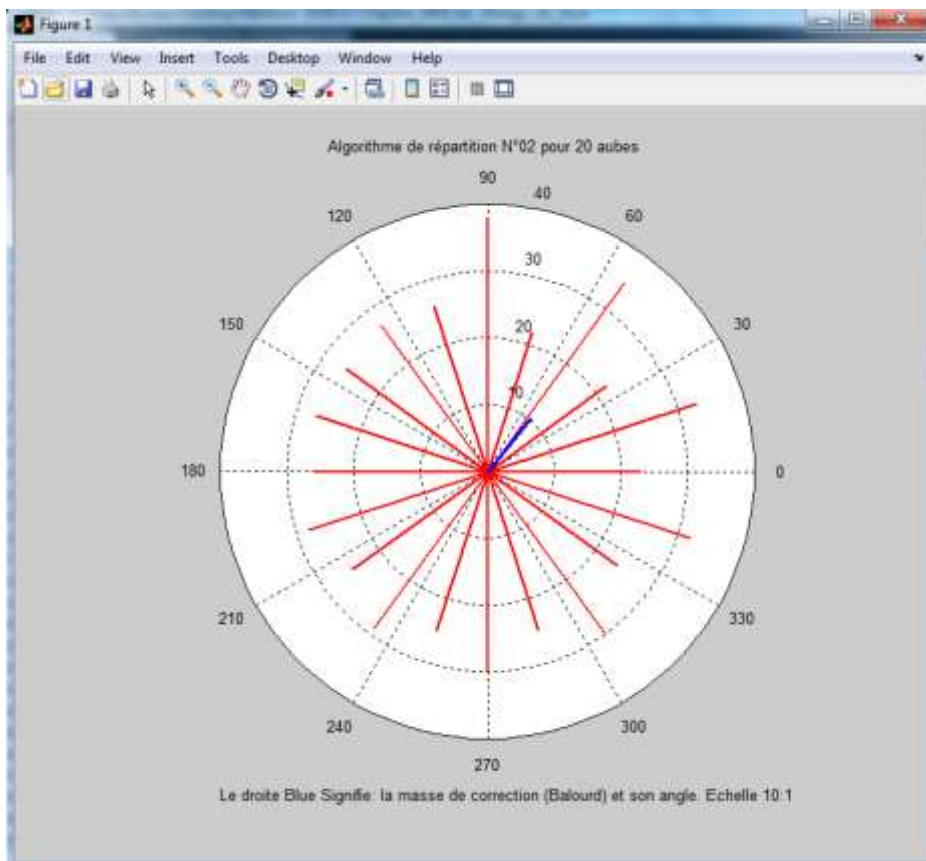


Figure IV.18 : Représentation graphique de l'Algorithme de répartition N°2 pour 20 aubes.

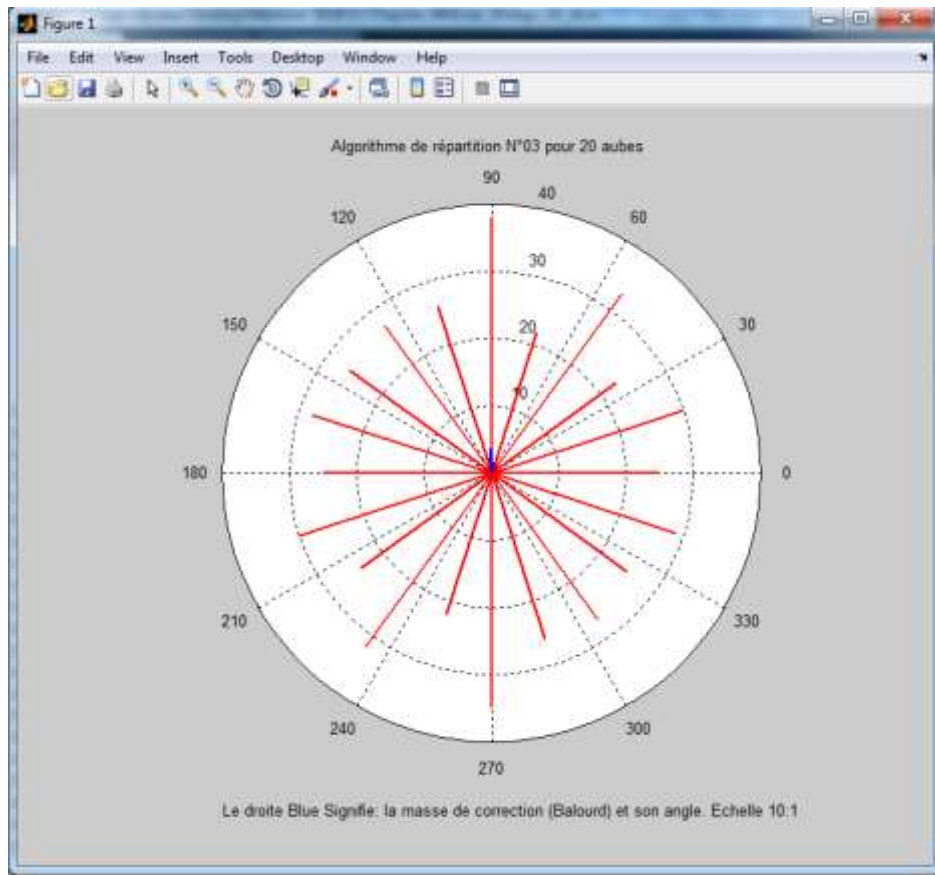


Figure IV.19: Représentation graphique de l'Algorithme de répartition N°3 pour 20 aubes.

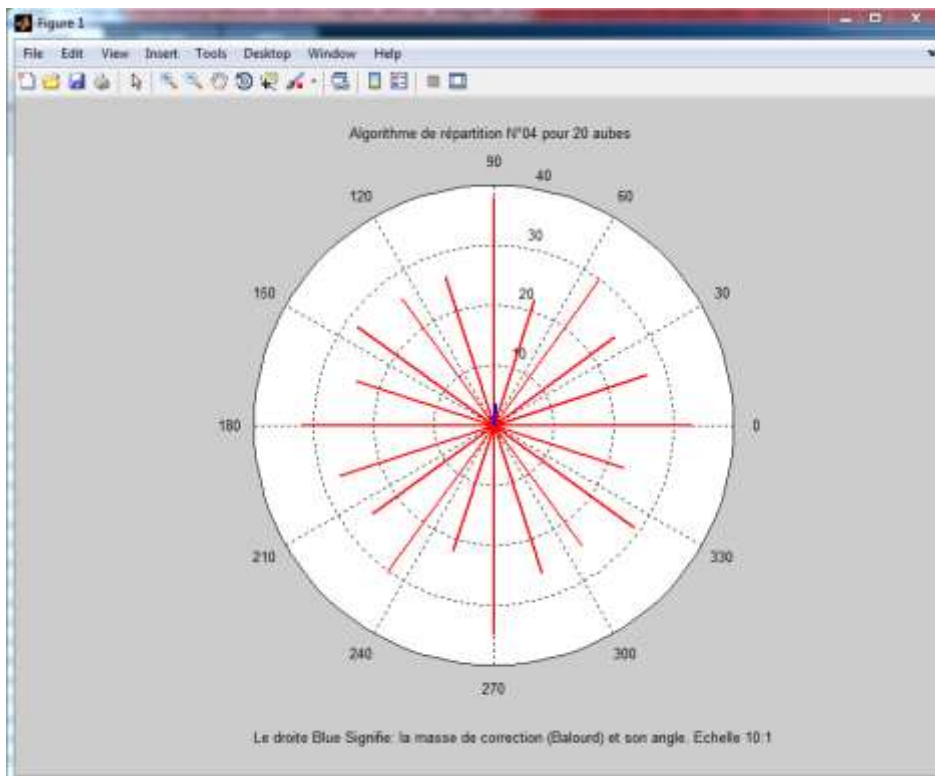


Figure IV.20 : Représentation graphique de l'Algorithme de répartition N°4 pour 20 aubes.

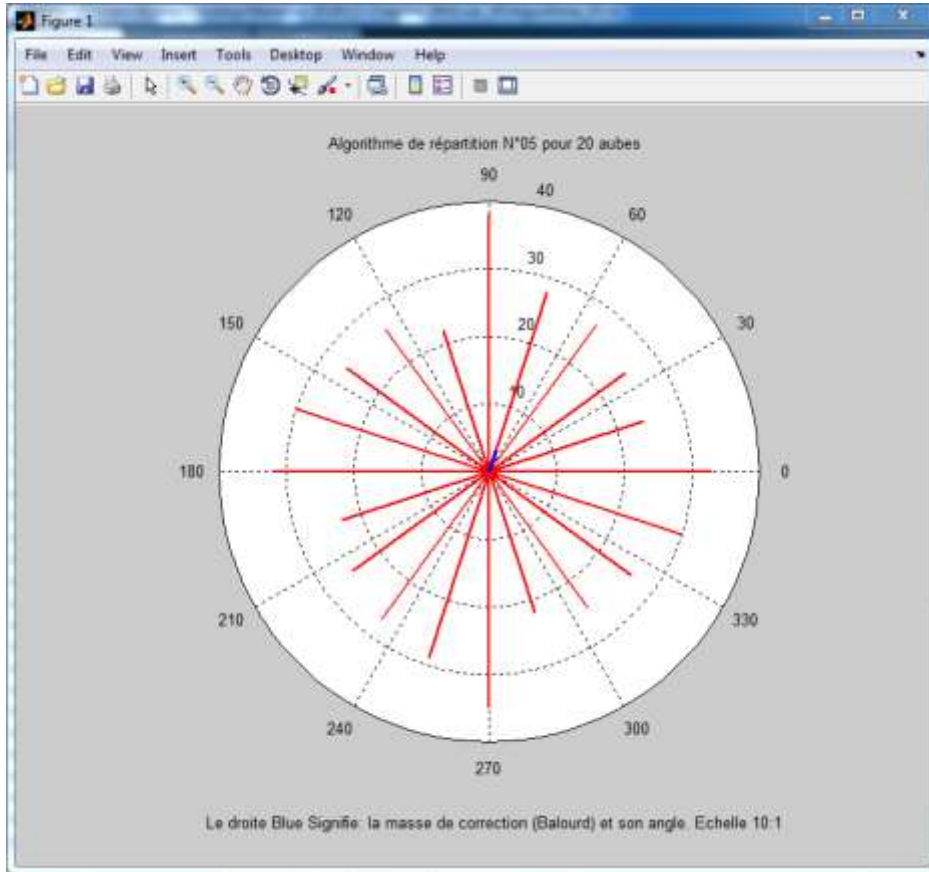


Figure IV.21 Représentation graphique de l'Algorithme de répartition N°5 pour 20 aubes.

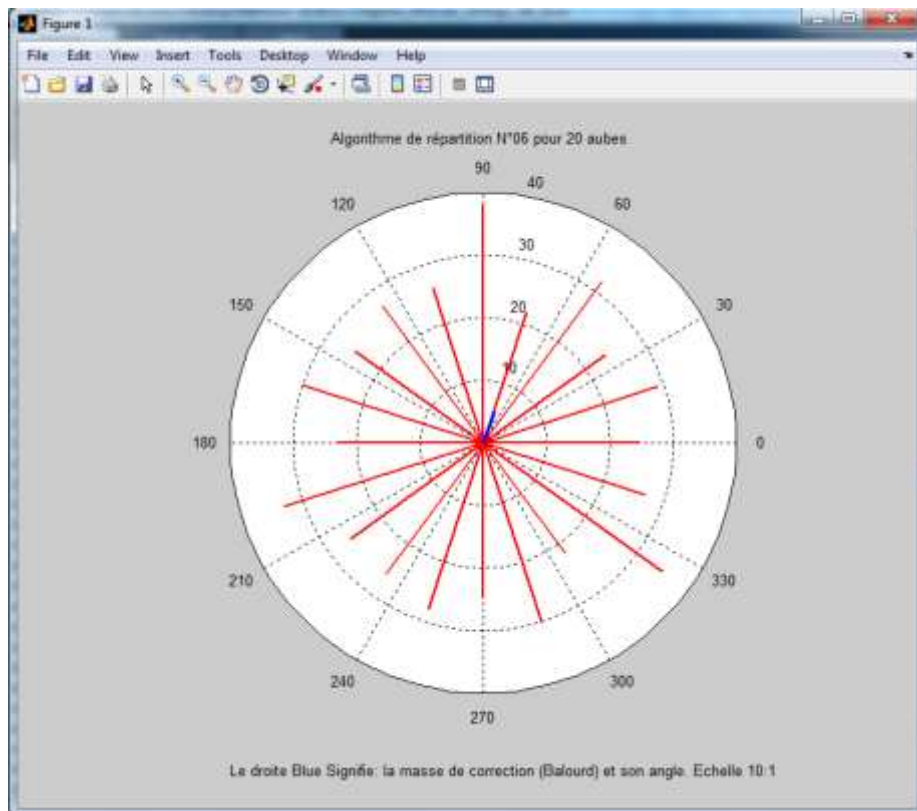


Figure IV.22 : Représentation graphique de l'Algorithme de répartition N°6 pour 20 aubes.

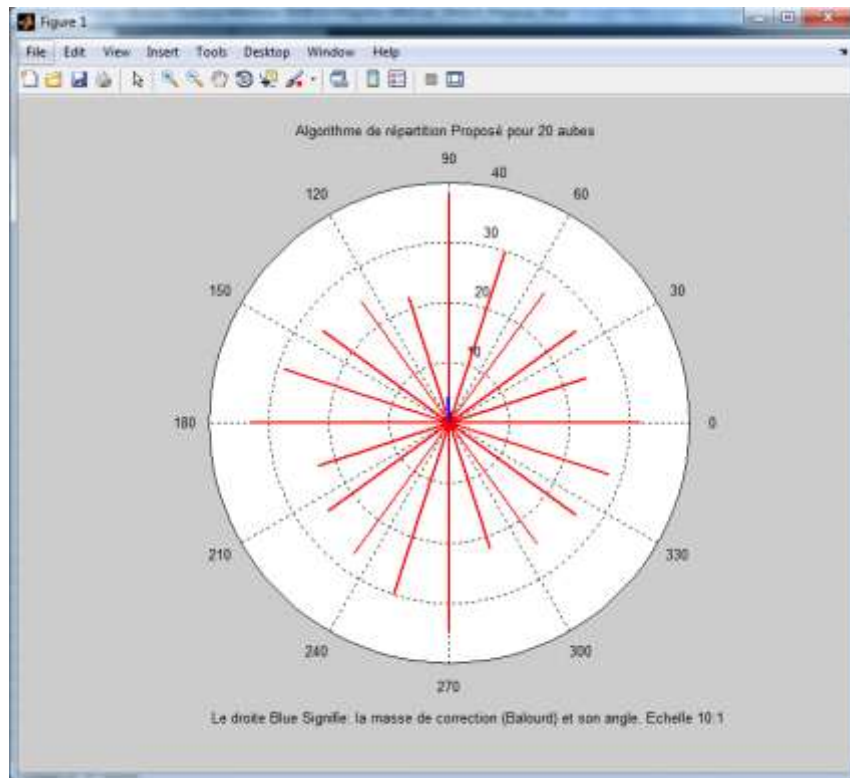


Figure IV.23 : Représentation graphique de l'Algorithme de répartition proposé pour 20 aubes.

Le deuxième tableau représente les Résultats des différents algorithmes pour la répartition de 70 aubes.

Nombre aubes		Algo. N°01	Algo. N°02	Algo. N°03	Algo. N°04	Algo. N°05	Algo. N°06	Algo. proposé	Bladis.Net Pesage
70	U_c (g.mm)	508	564	53.5	19	349	116	386	26
	α_c (deg)	7	-78	82.5	-14	46	53	-1.3	103 (-13)

Tableau.IV.2 : Balourd et son angle obtenu par expérience de 70 aubes.

Ces résultats montrent que :

D'après la lecture de tableau précédent les algorithmes N°01, N°02, N°05, N°06 et l'algorithme proposé sont hors tolérance alors que les masses des corrections des deux algorithmes N° 03 et N° 04 obtenus appartiennent à la plage de Balourd mentionné dans le Procès-verbal de BLADIS.NET (**Annexe C**).

Donc la meilleure permutation entre les algorithmes est l'algorithme N°04, Ceci permet d'obtenir le meilleur aubage possible pour un étage (**figure IV.27**).

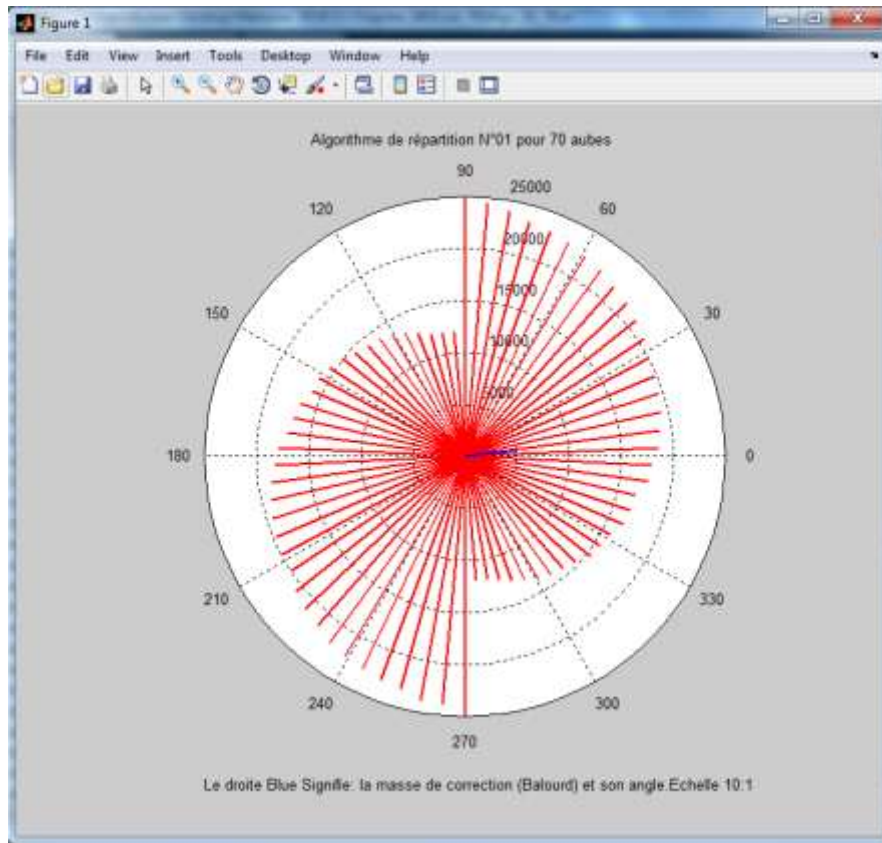


Figure IV.24: Représentation graphique de l'Algorithme de répartition N°1 pour 70 aubes.

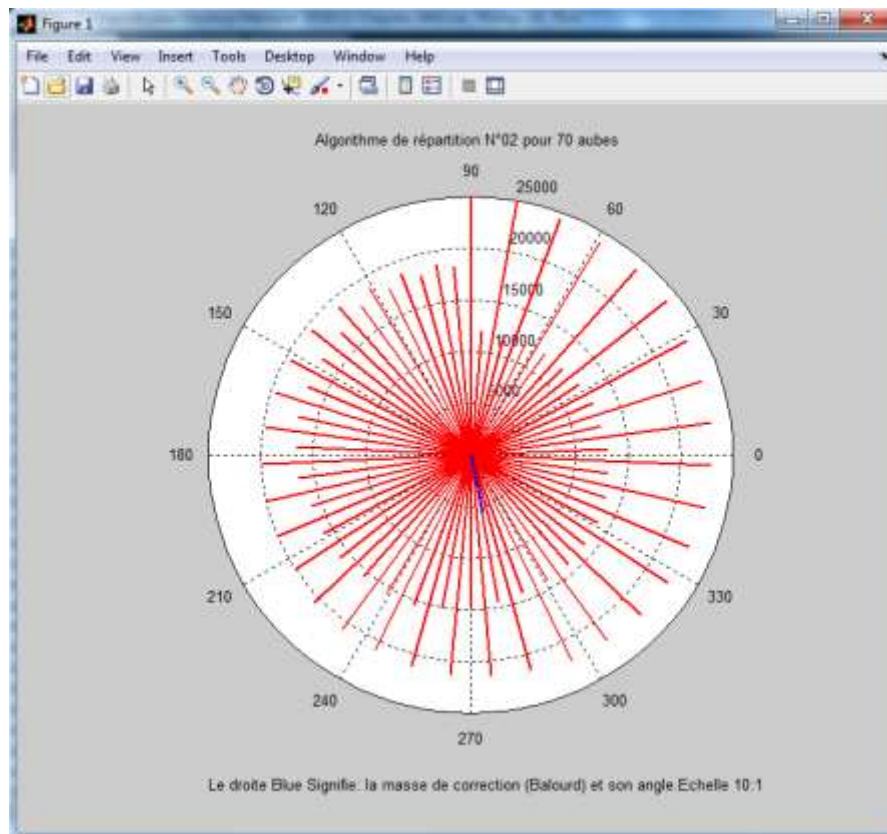


Figure IV.25: Représentation graphique de l'Algorithme de répartition N°2 pour 70 aubes.

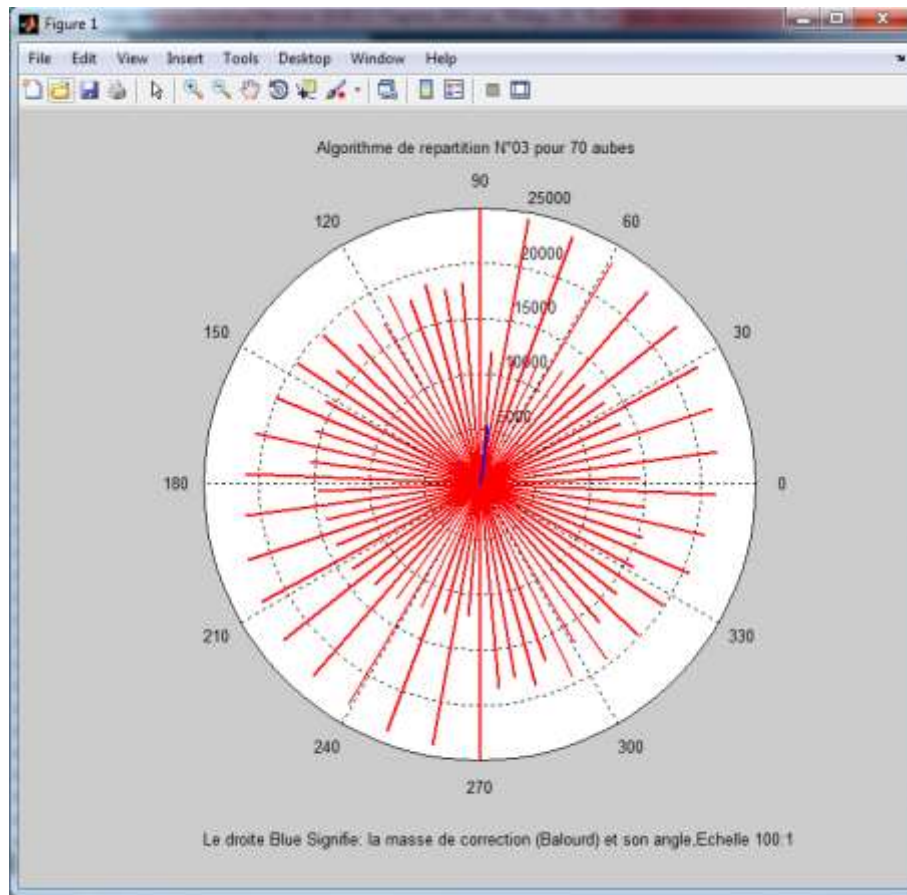


Figure IV.26: Représentation graphique de l'Algorithme de répartition N°3 pour 70 aubes.

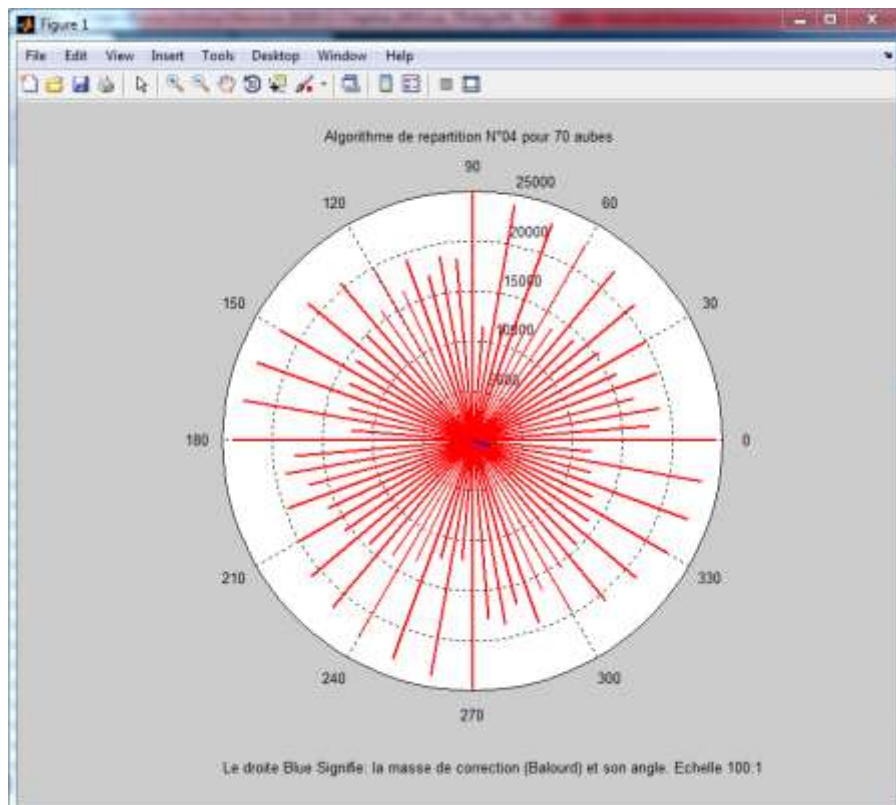


Figure IV.27: Représentation graphique de l'Algorithme de répartition N°4 pour 70 aubes.

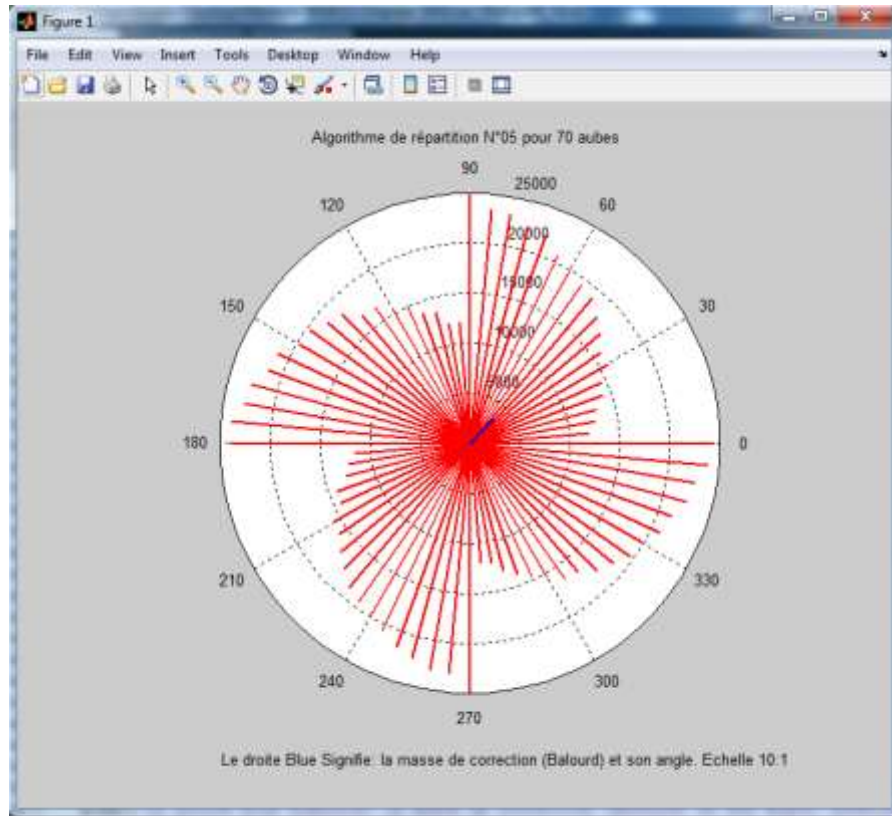


Figure IV.28: Représentation graphique de l'Algorithme de répartition N°5 pour 70 aubes.

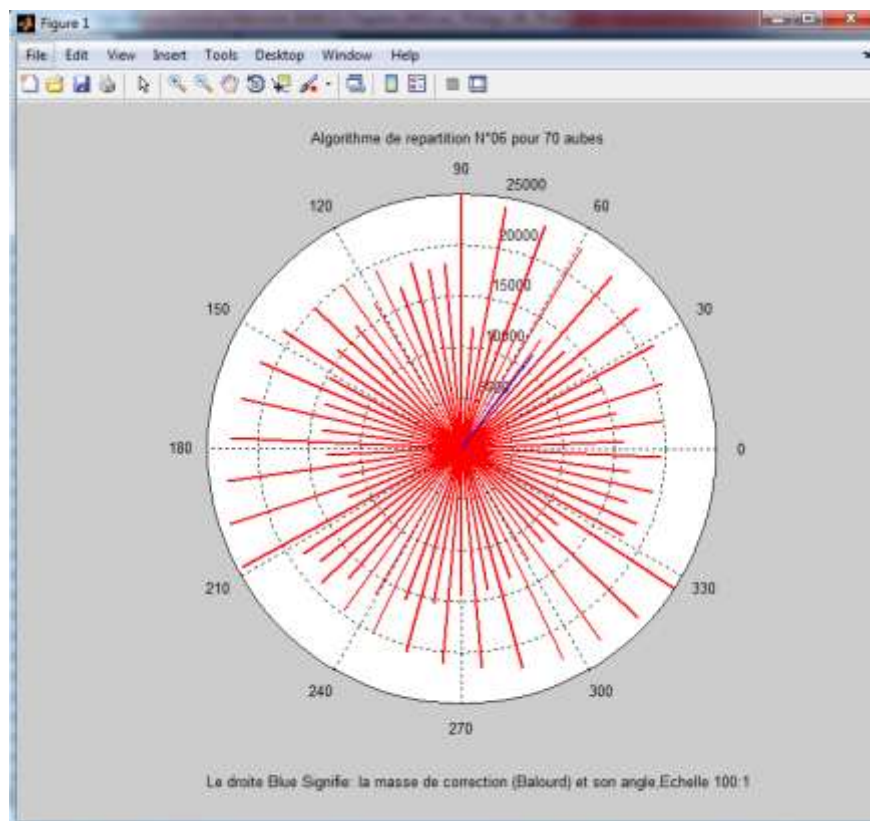


Figure IV.29: Représentation graphique de l'Algorithme de répartition N°6 pour 70 aubes

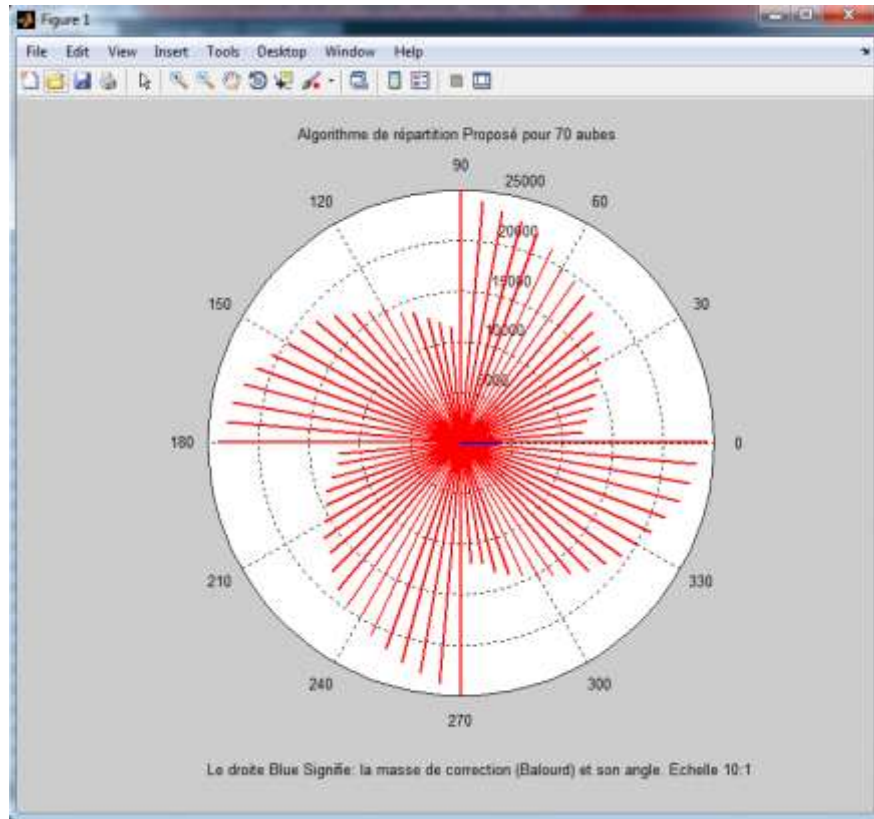


Figure IV.30 : Représentation graphique de l'Algorithme de répartition proposé pour 70 aubes.

Le tableau suivant représente les résultats de répartition de 120 aubes des différents algorithmes :

Nombre aubes		Algo. N°01	Algo. N°02	Algo. N°03	Algo. N°04	Algo. N°05	Algo. N°06	Algo. proposé	Bladis.Net Pesage
120	$U_c (g.mm)$	69.5	178	43.6	0.73	78.48	58	69	1
	$\alpha_c (deg)$	42	31	76.9	79	67.6	63.5	38.7	76 (14°)

Tableau IV.3 : Balourd et son angle obtenu par expérience de 120 aubes.

Ces résultats montrent que :

D'après la lecture de tableau précédent on observe que tous les algorithmes sont hors tolérance excepté la masse de correction de l'algorithme N°06 obtenue appartient à la plage de Balourd mentionné dans le P.V de **BLADIS.NET (Annexe C)**. Donc la meilleure permutation entre les algorithmes est l'algorithme **N°04 (figure IV.36)**.

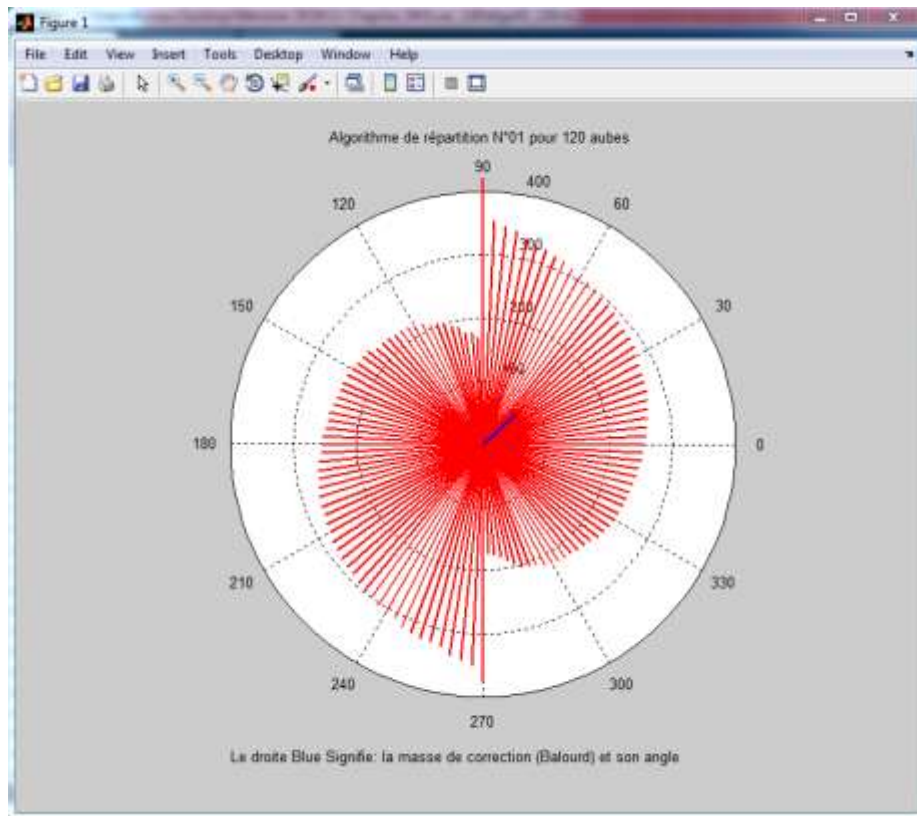


Figure IV.31 : Représentation graphique de l'Algorithme de répartition N°1 pour 120 aubes.

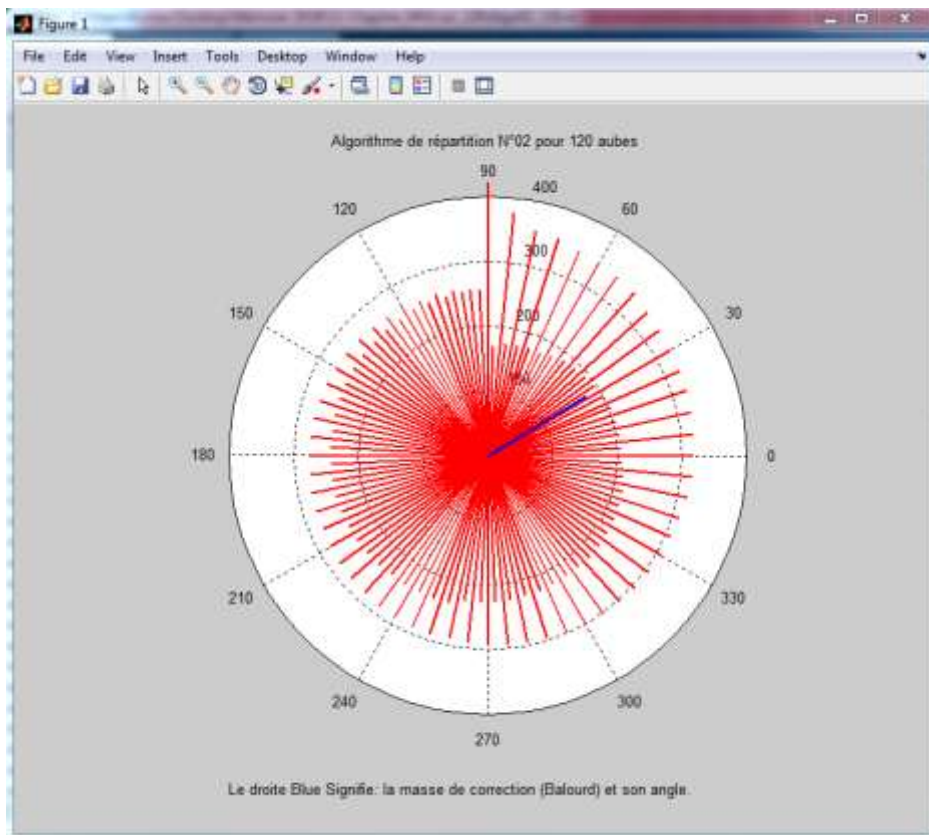


Figure IV.32 : Représentation graphique de l'Algorithme de répartition N°2 pour 120 aubes.

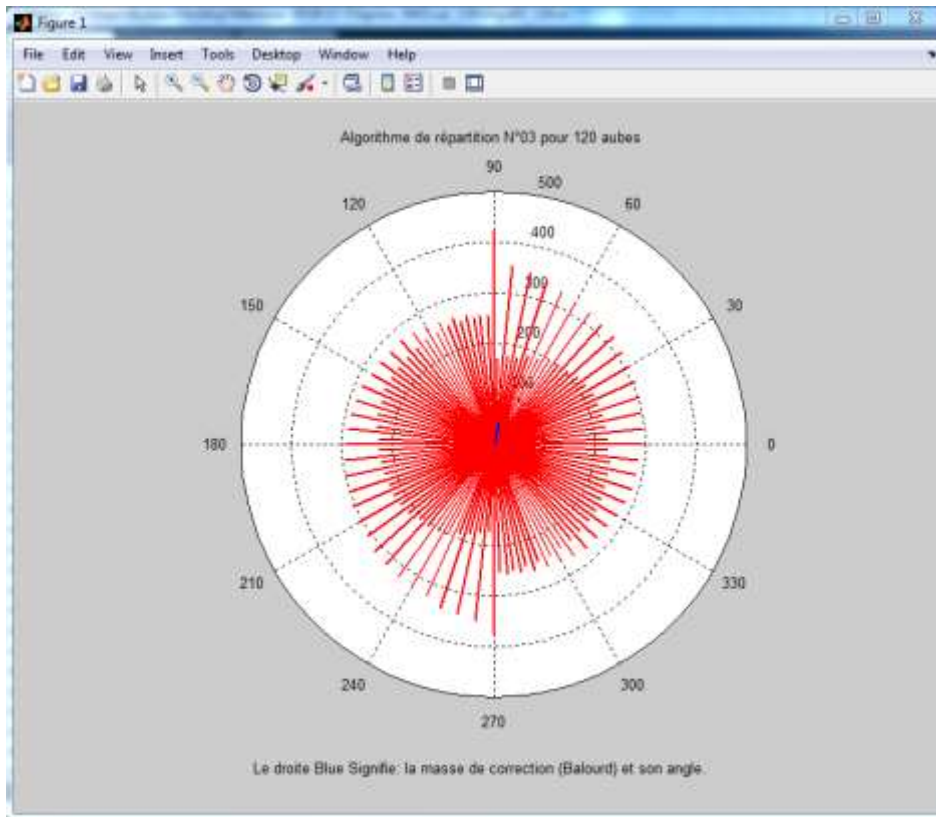


Figure IV.33 : Représentation graphique de l'Algorithme de répartition N°3 pour 120 aubes.

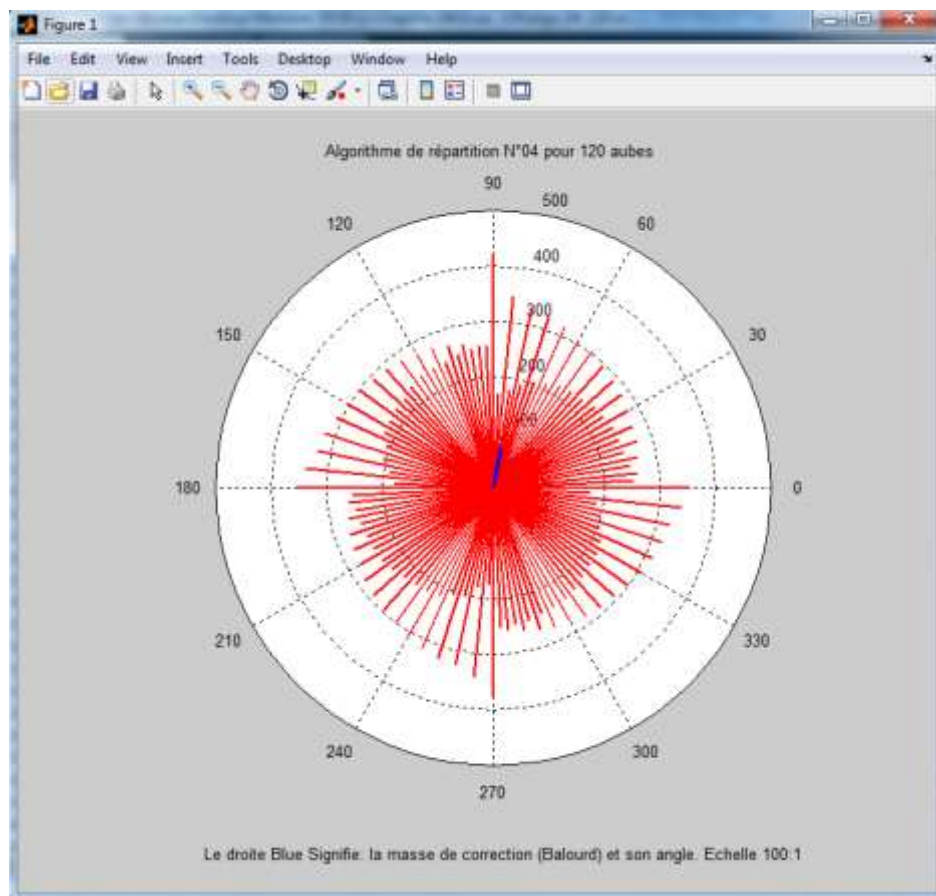


Figure IV.34 : Représentation graphique de l'Algorithme de répartition N°4 pour 120 aubes.

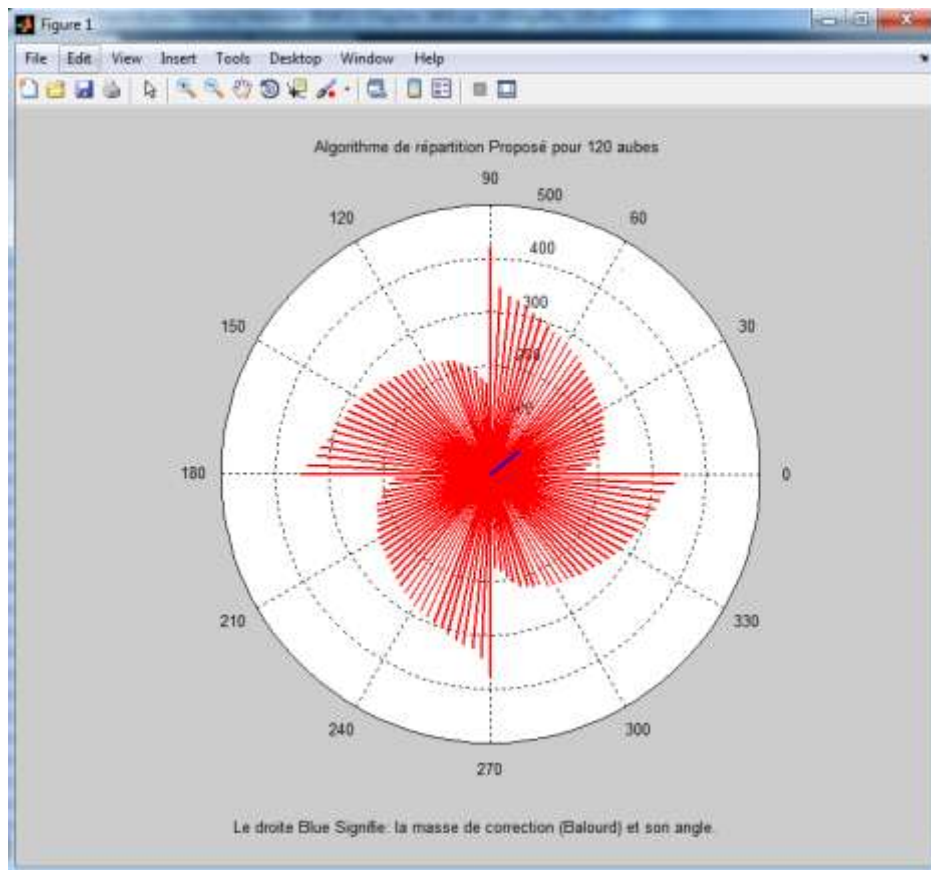


Figure IV.37 : Représentation graphique de l'Algorithme de répartition proposé pour 120 aubes.

IV.7.Montage des aubes d'une Turbine à gaz

Après l'obtention des résultats de l'équilibrage statique sur un PV, on a passé à l'étape de montage des aubes sur un disque de rotor par ordre de la calculé trouvées.



Figure IV.38: Numérotation des aubes par ordre de résultat.

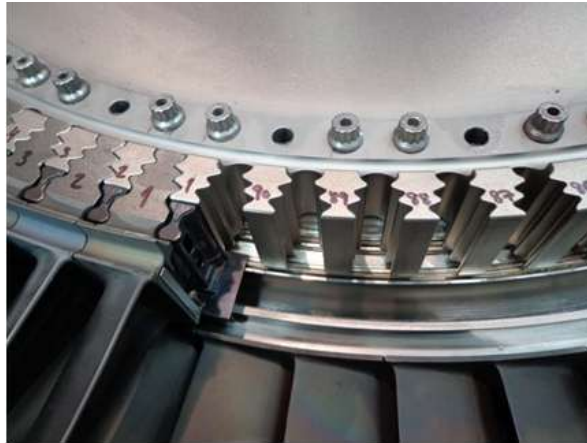


Figure IV.39 : Répartition des aubes sur le disque par Numérotation des aubes par ordre des résultats.



Figure IV.40: Vue d'un disque rotor en cours de montage des aubes par ordre des résultats de la répartition statique.

IV.8.Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté les résultats obtenus à partir de la simulation graphique de MATLAB pour la masse de correction (Balourd) et son angle en fonction de sept algorithmes qui sont en bon accord avec les résultats de logiciel BLADIS.NET. Donc on confirme la validation de nos résultats.

Programme MATLAB diminue de façon importante la mise au point de l'aubage d'un étage et réduit au minimum le balourd résiduel avec une nouvelle contribution d'un algorithme crédible.

Conclusion générale

Conclusion générale

A travers cette étude qui nous a permis de faire des essais expérimentaux qui ont pour but d'optimiser une répartition des aubes d'un étage des rotors des turbines afin de réduire la masse de correction (balourd). Nous avons alors fait le choix des différents algorithmes de répartition prédéterminé avec notre contribution d'algorithme proposé. Ensuite, nous avons analysé les possibilités de répartition des aubes avec un code MATLAB.

Trois 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 au programme MATLAB montrent que le balourd enregistré d'un étage de rotor se trouve dans les tolérances même dans le cas d'un grand nombre d'aubes. Une répartition qui a été optimisée peut afficher un balourd dépassant les limites de tolérance donc cela est très souvent nécessaire pour changer la position d'un grand nombre d'aubes avec les permutations des algorithmes.

On peut conclure que le programme élaboré et l'algorithme proposé donnent des résultats similaire au programme de répartition BLADIS.

Il reste à signaler qu'il y a possibilité de faire une extension dans notre programme pour assurer la liaison directe entre la balance électronique et le PC. Cette connexion n'est pas établie et il fera l'objet d'un projet de fin d'étude de master pour les futures promotions.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] Michel Pluviôse, Ingénierie des turbomachines: Circuits, aubages, vibrations, effets instationnaires et des exercices résolus, 2eme édition 2012, p30, Ellipses, Français.
- [2] H. Sitterding, Gesch. Construction de turbomachines en Suisse. Perspective, dans NZZ, 22.6.1955.
- [3] Ingénieur des ARTS et manufactures, Société CAMILLE DUMONT, 1832.
- [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] Manuel de société SCHENCK.
- [6] ENSPM, formation industrie IFP Training, France, 2004.
- [7] KETTANI Sid Ahmed et SEBIH Mohamed, étude d'une turbine à gaz de puissance 120KW, Université Abou BEKRBELKAID – Tlemcen, 1996.
- [8] [Www.Zionmarketresearch.Com/Report/Gas-Turbines-Market](http://www.Zionmarketresearch.Com/Report/Gas-Turbines-Market).
- [9] Cours Thermodynamique applique au système énergétique, Université Numérique Thématique en Sciences de l'Ingénieur et Technologie, Mines Paris 2011.
- [10] www.enegieplus-lesite.be
- [11] Renaud Gicquel, La Thermodynamique appliquée aux systèmes énergétiques, Tome 01, Presses de l'Ecole des Mines de Paris, p141, 2005, France.
- [12] International Standard ISO1941, Specification and verification of balance tolérances, Second édition, 2003-08-15.
- [13] Jean-Marc PUGNET, Équilibrage des rotors rigides et flexibles, BM 5130, Technique de l'ingénieur, 2^{ème} Edition, p02, 7/2007.
- [14] Hatto Schneide, Technique d'équilibrage, Traduction de la 6 édition allemande, Springer-Verlag France, Paris 2006 , p 124- 07-32-305 et 198.
- [15] <http://mobile.lavionnaire.fr/MobTurbElemCompres.php>.
- [16] Jacques Maunand, Production d'électricité par turbine à gaz, Technique d'ingénieur, D4-001, p11, 2008
- [17] Revue de Société ABB, Technologies de l'énergie et de l'automation, Suisse 5/1998.
- [18] S. K. Sinha, Dynamic characteristics of a flexible bladed-rotor with Coulomb damping Due to tip-rub, Journal of Sound and Vibration, vol. 273, no. 4-5, pp. 875–919, 2004.
- [19] Norme International, Turbine à gaz, ISO 11086, 1996-04-15.

- [20] La seconde aube provient d'une turbine de moteur General Electric J-47-GE qui équipait les avions de chasse F-86 Sabre. Aube de Rolls Royce Avon.
- [21] Olivier Pantale, Machine Mécanique et Turbomachines, Ecole National Ingénieur de Tarbes, p26, 2008, France.
- [22] Aircraft Engineering and Aerospace Technology Emerald Article: Ceramic engine Considerations for future aerospace Propulsion Amir S. Gohardani, Omid Gohardani (2012), Aircraft Engineering and Aerospace Technology, Vol. 84 Iss: 2 pp. 75-86.
- [23] Michael Newnham, Modèle informatique pour l'optimisation de la conception de composants de turbines à gaz coulés, société ABB Production d'énergie SA, CH-5401 Baden/Suisse, revue ABB 1997, p34.
- [24] AMROUNE, S., MOHAMAD, B., MOUSSAOUI, M., et al. Geometric regeneration and mechanical analysis of a gas turbine blade type Frame 9001 GE. Engineering Solid Mechanics, university Mohamed Boudiaf, M'sila, 2018.
- [25] J.D.H. Paul et M. Oehring, Livre Gamma Titanium Alumini de Alloys , Science and Technology , Germany, 2011. Avec 745 pages et 2182 référence.
- [26] ROUSSILLE Jonathan et Goering Julien Mateo, Procède de fabrication d'une aube de turbomachine en matériau composite, aube ainsi obtenue et turbomachine l'incorporant, société Snecma Propulsion, 2008-11-28, journal officiel de l'office Européenne des brevets. France.
- [27] David, Daniel et al, Bloch, Procédé de fabrication de noyaux céramiques de fonderie pour aubes de turbines, document de brevet européen, 10.03.2010 Bulletin 2010/10, Paris.
- [28] Jean P. Mercier, Introduction à la science des matériaux, 3eme Edition, 2002 France, p365.
- [29] Haithem BEN HAMOUDA, Modélisation et Simulation de la structure de solidification dans les superalliages base-nickel, Thèse doctorat le 2012, École nationale supérieure des mines de Paris, p07, 2012, France.
- [30] Julien CHAVES-JACOB, Développement d'une méthodologie de réduction Des défauts géométriques : application à l'usinage 5-axes de composants de turbomachine, Thèse Doctorat le 28 septembre 2009, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers , France.
- [31] France SANDVIK Division COROMANT 4, Avenue Buffon 45100 ORLÉANS 2009.
- [32] HYPERMILL 5 axis Machining, la version 2014.1 de la solution CAM hyper MILL, OPEN MIND Technologies AG Argelsrieder Feld 5 • 82234 Wessling Allemagne.
- [33] <https://www.lavionnaire.fr/motorelements.php>.
- [34] Olivier Cleynen, Thermodynamique de l'ingénieur, p 323, édition Framasoft, 2015.
- [35] www.schenck-rotec.com.

- [36] M. Jean-Pierre SAGUIN, Equilibrage & Diagnostic, Manuel SCHENCK, page 7.1991, Darmstadt Allemand.
- [37] Nassim Gougam, Equilibrage dans les Conditions de Service, société Brüel & Kjær, p 04, 2002, France.
- [38] Document Manuel Machine Equilibrage, Bruel et Kjaer Vibro, Equilibrage dans les condition de service, p 06, 2002,France.
- [39] International standard, Mechanical vibration - balance quality Requirements for rotors in a constant (rigid) state, norme iso 1940/1-1986, second édition 2003-08-15.
- [40] ISO 1940-1, Mechanical vibration Balance quality requirements for rotors in a constant (rigid) state , Part 1, 2003/Cor,2005.
- [41] ISO 1925:2001, Mechanical vibration Balancing Vocabulary , 4 Édition , 2001-04-01.
- [42] Jacques MOREL ,Surveillance vibratoireet maintenance prédictive,R 6 100 – 1,p10,Techniques de l'Ingénieur.2002
- [43] www.Shanghai Jianping Dynamic Balancing Machine.2010.Japan
- [44] Fiche Technique de Machine d'équilibrage H-04 SCHENCK. archive MEI. M'sila 2014.
- [45] Document, société MEI, Sonalgaz M'sila,Alger,2018.
- [46] Eugène Hecht ,Physique, 1eme éditions, De boeck Université , page 194, 1999.France.

Annexe

Annexe A :

```
% Programme de répartition d'aubes d'un rotor d'une turbine..
% Algorithme de répartition N°01 pour 20 aubes.
% M: représente la valeur des moments.
% pha: représente l'angle.
clear all
close all
clc
M=[1127 1129 1125 1124 1130 1128 1138 1122 1126 1125 1130 1122 1133 1123
1135 1126 1125 1127 1132 1126]
A=sort(M,'descend');
N=length(M);
pha=360/length(A);
pha1=90;
pha2=270;
k=1;l=1;
for k=1:2                                % indice de ligne
    for l=1:length(A);                    % indice de colonne
        if k==1 E(k,l)= A(l);
        else
            if mod(l,2)==0 E(k,l)= pha2;pha2=pha2-pha;
            else
                E(k,l)= pha1;pha1=pha1-pha;
            end
        end
    end
end
end
end
E;
E1=E(2,:);
E2=E(1,:);
polar(1,40)
hold on
for s=1:length(E1);
    line([0,(E2(s)-1100)*cosd(E1(s))],[0,(E2(s)-
1100)*sind(E1(s))],'Color','red','linewidth',2)
end
    title('Algorithme de répartition N°01 pour 70 aubes ' )

for i=1:length(M);
    Mx(i)=E2(i)*cosd(E1(i));
    My(i)=E2(i)*sind(E1(i));
end

Module=sqrt(sum(My)^2+sum(Mx)^2)
Phase=atand(sum(My)/sum(Mx))
line([0,(Module*10)*cosd(Phase)],[0,(Module*10)*sind(Phase)'],'Color','Blue',
'linewidth',2.5)
gtext('Le droite Blue Signifie: la masse de correction (Balourd) et son
angle.Echelle 10:1')
```

```

% Programme de répartition d'aubes d'un rotor d'une turbine.
% Algorithme de répartition N°02 pour 20 aubes.
% M: représente la valeur des moments.
% pha: représente l'angle.
clear all
close all
clc
M=[1127 1129 1125 1124 1130 1128 1138 1122 1126 1125 1130 1122 1133 1123
1135 1126 1125 1127 1132 1126]
A=sort(M, 'descend');
B=sort(M);
j=1;
for i=1:10;
C(j)=A(i);
D(j)=B(i);
j=j+1;
end
j=1;
k=2;
for i=1:length(C);
E(j)=C(i);
j=j+2;
E(k)=D(i);
k=k+2;
end
E;
pha=360/length(E)
pha1=90;
j=1;
for j=1:length(E);
phas(j)=pha1; pha1=pha1-pha;
end
polar(1,40)
hold on
for s=1:length(E);
line([0,(E(s)-1100)*cosd(phas(s))],[0,(E(s)-
1100)*sind(phas(s))], 'Color', 'red', 'linewidth',2)

end
title('Algorithme de répartition N°02 pour 20 aubes ' )

for i=1:length(E);
Mx(i)=E(i)*cosd(phas(i));
My(i)=E(i)*sind(phas(i));

End

Module=sqrt(sum(My)^2+sum(Mx)^2)
Phase=atan2d(sum(My),sum(Mx))
line([0,(Module*10)*cosd(Phase)],[0,(Module*10)*sind(Phase)], 'Color', 'Blue',
'linewidth',2.5)
gtext('Le droite Blue Signifie: la masse de correction (Balourd) et son
angle. Echelle 10:1')

```

```

% ..Programme de répartition d'aubes d'un rotor d'une turbine.
% Algorithme de répartition N°03 pour 20 aubes.
% M: représente la valeur des moments.
% pha: représente l'angle.
clear all
close all
clc
M=[1127 1129 1125 1124 1130 1128 1138 1122 1126 1125 1130 1122 1133 1123
1135 1126 1125 1127 1132 1126]
A=sort(M, 'descend');
N=length(M);
j=0;
for i=1:4:20;
    E(i)=A(i-2*j);
    E(i+1)=A(i-2*j+1);
    E(i+2)=A(N-2*j);
    E(i+3)=A(N-2*j-1);
    j=j+1;
end
E1=E(1:2:20);
E2=E(2:2:20);
F=[E1,E2]
pha=360/length(M);
pha1=90;
j=1;
for j=1:length(M);
    phas(j)=pha1; pha1=pha1-pha;
end
disp(phas)
polar(1,40)
hold on
for s=1:length(M);
    line([0,(F(s)-1100)*cosd(phas(s))],[0,(F(s)-
1100)*sind(phas(s))], 'Color', 'red', 'linewidth', 2)
end
title('Algorithme de répartition N°03 pour 20 aubes ' )

for i=1:length(M);
    Mx(i)=F(i)*cosd(phas(i));
    My(i)=F(i)*sind(phas(i));
end
Module=sqrt(sum(My)^2+sum(Mx)^2)
Phase=atan2d(sum(My),sum(Mx))
line([0,(Module*10)*cosd(Phase)],[0,(Module*10)*sind(Phase)], 'Color', 'Blue',
'linewidth', 2.5)
gtext('Le droite Blue Signifie: la masse de correction (Balourd) et son
angle. Echelle 10:1')

```

```

% Programme de répartition d'aubes d'un rotor d'une turbine.
% Algorithme de répartition Proposé pour 20 aubes.
% M: représente la valeur des moments.
% pha: représente l'angle.
clear all
close all
clc
M=[1127 1129 1125 1124 1130 1128 1138 1122 1126 1125 1130 1122 1133 1123
1135 1126 1125 1127 1132 1126]
a=sort(M, 'descend');
N=length(M);
j=1;
for i=1:4:length(a);
A(j)=a(i);
K(j)=a(i+1);
C(j)=a(i+2);
D(j)=a(i+3);
j=j+1;
end
E=[A,D,K,C]
pha=360/length(E);
pha1=90;
pha2=90-360/N;
k=1;l=1;
  for k=1:2 ;
      % indice de ligne
      for l=1:length(E);
          % indice de colonne
          if k==1 B(k,l)= E(l);
          else
              if mod(l,2)==0 B(k,l)= pha2;pha2=pha2-2*pha;
              else
                  B(k,l)= pha1;pha1=pha1-2*pha;
              end
          end
      end
  end
  end
  end
B
B1=B(2,:);
B2=B(1,:);
polar(1,40)
hold on
for s=1:length(B1);
    line([0,(B2(s)-1100)*cosd(B1(s))],[0,(B2(s)-
1100)*sind(B1(s))], 'Color', 'red', 'linewidth', 2)
end
    title('Algorithme de répartition Proposé pour 20 aubes ' )

for i=1:length(M);
    Mx(i)=B2(i)*cosd(B1(i));
    My(i)=B2(i)*sind(B1(i));
end
Module=sqrt(sum(My)^2+sum(Mx)^2)
Phase=atan2d(sum(My),sum(Mx))
line([0,(Module*10)*cosd(Phase)],[0,(Module*10)*sind(Phase)], 'Color', 'Blue',
'linewidth', 2.5)
gtext('Le droite Blue Signifie: la masse de correction (Balourd) et son
angle. Echelle 10:1')

```

Annexe B :

Résumé des commandes MATLAB utilise dans programme :

On a regroupe par sujet d'intérêt les différentes commandes et fonction de MATLAB utilise dans notre travail.

Commande Tri par ordre croissant :

MATLAB fournit une fonction appelée SORT pour accomplir cette fonction. Sans tous les autres paramètres, SORT réorganise automatiquement le tableau dans l'ordre croissant.

Définir un tableau en utilisant n'importe quelle méthode. Par exemple, " A = [5 2 7 4] » produit un tableau nommé «A» composé de quatre éléments avec les valeurs séquentielles 5, 2, 7 et 4 .

Type `B = sort (A)` pour réorganiser les éléments de « A » dans l'ordre croissant dans un nouveau tableau nommé « B ».

Notez que, après l'étape précédente, MATLAB va produire l' suivante : B = 2 4 5 7.

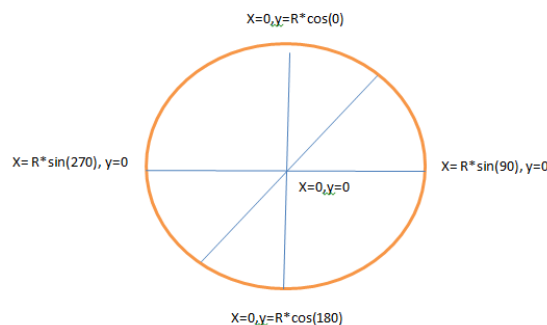
Traçage d'un cercle :

Employer la ligne ou tracer les coordonnées de cercle :

`line([0,xA], [0, yA], 'Color', 'r');`

$$\cos \alpha = \frac{x_A}{R} \text{ donc : } x_A = R \cdot \cos \alpha$$

$$\sin \alpha = \frac{y_A}{R} \text{ donc : } y_A = R \cdot \sin \alpha$$



Annexe C :

❖ Procès-verbal pour 20 aubes :

Opérateur: Administrator	BladisNET Révision 5.12.4 © 2002-2013 Schenck RoTec GmbH Germany	Page 2 02/04/2018 04:10:11
-----------------------------	---	----------------------------------

Type d'aubes: **mémoire2018**

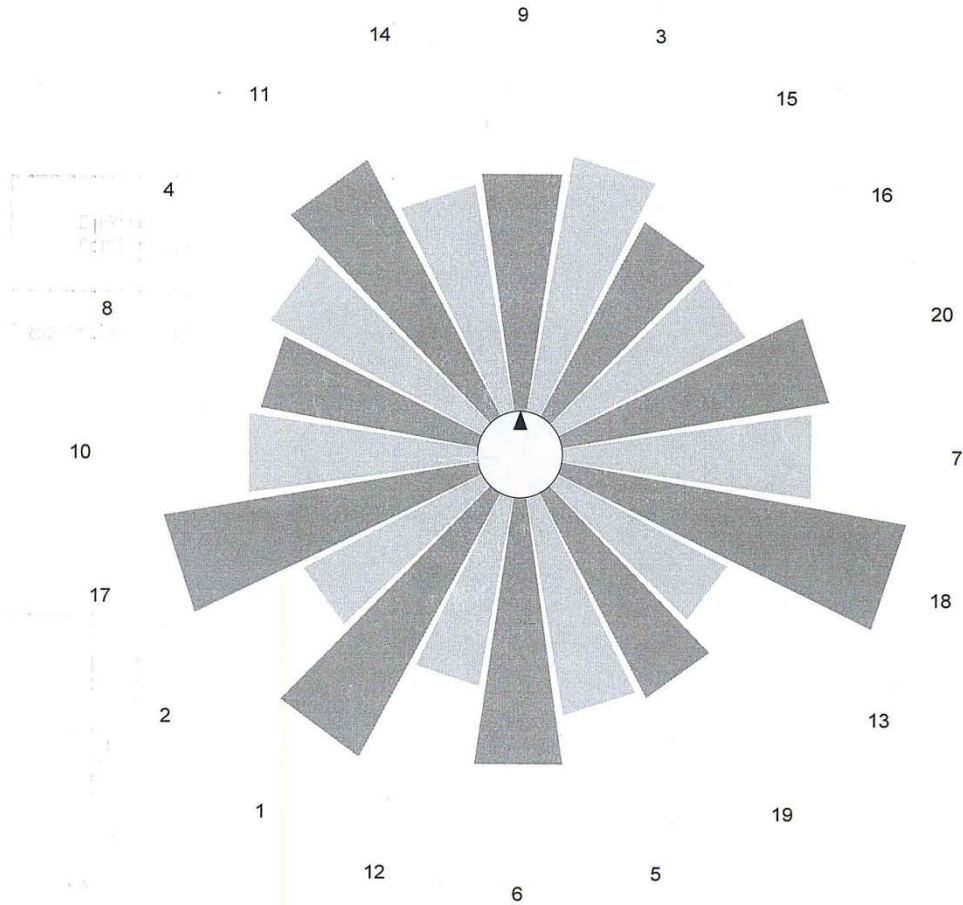
Jeu d'aubes: **haouri-mounir**

Répartition des aubes


Pos. N°	Aube N°	Moment [gmm]	Numéro de série
1	9	1127	
2	3	1129	
3	15	1125	
4	16	1124	
5	20	1130	
6	7	1128	
7	18	1138	
8	13	1122	
9	19	1126	
10	5	1125	
11	6	1130	
12	12	1122	
13	1	1133	
14	2	1123	
15	17	1135	
16	10	1126	
17	8	1125	
18	4	1127	
19	11	1132	
20	14	1126	

Type d'aubes: **mémoire2018**

Jeu d'aubes: **haouri-mounir**



Modèle de prépartition: 7 - Ordre de Pesage
Balourd de calcul: 1 gmm
Position angulaire: 0 deg
Etat du jeu d'aubes: En tolérance (1 gmm)

 Balancing and Diagnostic Systems http://www.schenck-rotec.com/	MEI SPA Societe de Groupe Sonelgaz Z.I. Draa El hadja 28000 M'SILA ALGERIE	 Balancing and Diagnostic Systems http://www.schenck-rotec.com/
Opérateur: Administrator	BladisNET Révision 5.12.4 © 2002-2013 Schenck RoTec GmbH Germany	Page 1 02/04/2018 04:09:30

Type d'aubes: mémoire2018

Type de moteur:	essai
Étage:	1
Nombre d'aubes:	20
Moment de l'aube étalon ou de précompensation:	0 gmm
Amplitude de variation admissible:	1 digits
Type de permutation:	Aucun
Tolérance:	1 gmm
Modèle de prépartition:	7 - Ordre de Pesage

Jeu d'aubes: haouri-mounir

Généré par:	Administrator
Ordre:	1
Nouvelle Tolérance réduite:	1 gmm
Type de permutation:	Aucun
Modèle de prépartition:	7 - Ordre de Pesage
Balourd de calcul:	1 gmm
Position angulaire:	0 deg

Etat:
 La prépartition des aubes a été optimisée.
 Jeu d'aubes en tolérance.

❖ Procès-verbal pour 120 aubes

Opérateur: bladis	BladisNET Révision 5.12.4 © 2002-2013 Schenck RoTec GmbH Germany	Page 2 28/10/2014 09:05:23
----------------------	---	----------------------------------

Type d'aubes: Frame 5001

Jeu d'aubes: 5001

Répartition des aubes

Pos. N°	Aube N°	Moment [gmm]	Numéro de série
1	1	11328	AZ469
2	24	11288	AZ470
3	3	11289	AZ027
4	4	11270	AZ421
5	5	11248	AZ393
6	6	11307	AZ575
7	7	11285	AZ040
8	8	11250	AZ384
9	9	11272	AZ376
10	10	11261	AZ643
11	11	11319	AZ432
12	12	11222	AZ868
13	13	11221	AZ474
14	14	11261	AZ522
15	15	11253	AZ407
16	16	11244	AZ429
17	17	11347	AZ459
18	18	11378	AZ465
19	19	11257	AZ599
20	20	11299	AZ427
21	21	11236	AZ620
22	22	11242	AZ674
23	23	11284	AZ392
24	2	11235	AZ388
25	25	11269	AZ116
26	26	11326	AZ152
27	27	11193	AZ631
28	28	11189	AZ139
29	29	11243	AZ679
30	30	11217	AZ641

Opérateur. bladis	BladisNET Révision 5.12.4 © 2002-2013 Schenck Rotec GmbH Germany	Page 3 28/10/2014 09:05:23
----------------------	---	----------------------------------

Typo d'aubes: **Frame 5001**

Jeu d'aubes: **5001**

Répartition des aubes

Pos. N°	Aube N°	Moment [gmm]	Numéro de série
31	31	11205	AZ583
32	32	11242	AZ435
33	33	11256	AZ440
34	34	11245	AZ129
35	35	11227	AZ445
36	36	11332	AZ414
37	37	11287	AZ383
38	38	11235	AZ138
39	39	11216	AZ634
40	40	11222	AZ158
41	41	11206	AZ673
42	42	11273	AZ579
43	43	11254	AZ562
44	44	11226	AZ419
45	45	11225	AZ525
46	46	11265	AZ156
47	47	11295	AZ532
48	48	11264	AZ531
49	49	11322	AZ426
50	50	11241	AZ134
51	51	11342	AZ038
52	52	11291	AZ428
53	53	11316	AZ411
54	54	11304	AZ030
55	55	11239	AZ587
56	56	11250	AZ489
57	57	11285	AZ022
58	58	11354	AZ147
59	59	11243	AZ565
60	60	11179	AZ475

Opérateur: bladis	BladisNET Révision 5.12.4 © 2002-2013 Schenck RoTec GmbH Germany	Page 4 28/10/2014 09:05:23
----------------------	---	----------------------------------

Type d'aubes: **Frame 5001**

Jeu d'aubes: **5001**

Répartition des aubes

Pos. N°	Aube N°	Moment [gmm]	Numéro de série
61	61	11260	AZ614
62	62	11280	AZ381
63	63	11267	AZ644
64	64	11324	AZ415
65	65	11275	AZ515
66	66	11276	AZ581
67	67	11319	AZ449
68	68	11223	AZ680
69	69	11206	AZ647
70	70	11223	AZ386
71	71	11300	AZ464
72	72	11421	AZ584
73	73	11228	AZ026
74	74	11183	AZ650
75	75	11175	AZ389
76	76	11219	AZ451
77	77	11298	AZ491
78	78	11309	AZ413
79	79	11208	AZ603
80	80	11289	AZ034
81	81	11313	AZ461
82	82	11264	AZ508
83	83	11213	AZ530
84	84	11294	AZ640
85	85	11242	AZ534
86	86	11289	AZ025
87	87	11345	AZ041
88	88	11190	AZ602
89	89	11278	AZ382
90	90	11240	AZ028

Opérateur: bladis	BladisNET Révision 5.12.4 © 2002-2013 Schenck RoTec GmbH Germany	Page 5 28/10/2014 09:05:23
----------------------	---	----------------------------------

Type d'aubes: **Frame 5001**

Jeu d'aubes: **5001**

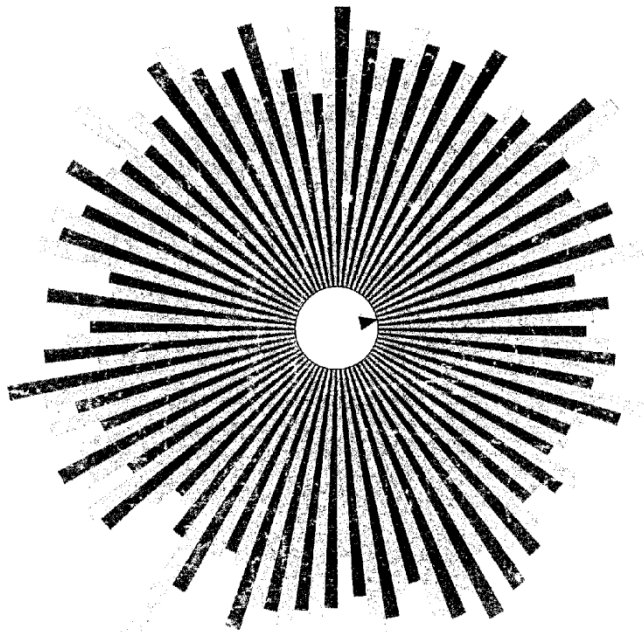
Répartition des aubes

Pos. N°	Aube N°	Moment [gmm]	Numéro de série
91	91	11201	AZ526
92	92	11241	AZ390
93	93	11275	AZ042
94	94	11169	AZ374
95	95	11178	AZ605
96	96	11304	AZ387
97	97	11275	AZ656
98	98	11297	AZ468
99	99	11254	AZ391
100	100	11224	AZ660
101	101	11309	AZ439
102	102	11249	AZ593
103	103	11235	AZ628
104	104	11353	AZ477
105	105	11221	AZ637
106	106	11278	AZ424
107	107	11247	AZ486
108	108	11204	AZ052
109	109	11324	AZ409
110	110	11340	AZ524
111	111	11278	AZ155
112	112	11236	AZ626
113	113	11255	AZ050
114	114	11197	AZ119
115	115	11320	AZ135
116	116	11242	AZ655
117	117	11227	AZ595
118	118	11307	AZ466
119	119	11177	AZ446
120	120	11249	AZ496


Opérateur: bladis	BladisNET Révision 5.12.4 © 2002-2013 Schenck RoTec GmbH Germany	Page 6 28/10/2014 09:05:23
----------------------	---	----------------------------------

Type d'aubes: **Frame 5001**

Jeu d'aubes: **5001**



Modèle de prépartition: 7 - Ordre de Pesage
Balourd de calcul: 1 gmm
Position angulaire: 76 deg
Etat du jeu d'aubes: En tolérance (3 gmm)

<p>Replace this file by your own Logo.bmp file. Logo.bmp must be located under: \\BladisNET\Data\Logo</p>	<p>MEI SPA Societe de Groupe Sonelgaz Z.I. Draa El hadja 28000 M'SILA ALGERIE</p>	 <p>Balancing and Diagnostic Systems http://www.schenck-rotec.com/</p>
<p>Opérateur: bladis</p>	<p>BladisNET Révision 5.12.4 © 2002-2013 Schenck RoTec GmbH Germany</p>	<p>Page 1 28/10/2014 09:05:23</p>

Type d'aubes: Frame 5001

Type de moteur:	TG frame 5001
Etage:	1
Nombre d'aubes:	120
Moment de l'aube étalon ou de précompensation:	0 gmm
Amplitude de variation admissible:	3 digits
Type de permutation:	Aucun
Tolérance:	3 gmm
Modèle de prérépartition:	7 - Ordre de Pesage

Jeu d'aubes: 5001

Généré par:	Bouchelaleg N
Ordre:	1
Nouvelle Tolérance réduite:	3 gmm
Type de permutation:	Aucun
Modèle de prérépartition:	7 - Ordre de Pesage
Balourd de calcul:	1 gmm
Position angulaire:	76 deg

Etat:
La prérépartition des aubes a été optimisée.
Jeu d'aubes en tolérance.

❖ Procès-verbal pour 70 aubes :



International Airlines Overhaul Group		
Opérateur: Alex K. Brown	**** B L A D I S **** Rev.: 2.30 <small>Copyright Carl Schenck AG, D6100 Darmstadt</small>	16-Avr-93 Page 1

Type d'aube: X2000LT5

Type de moteur: CJX2000
 Etage: LT5
 Nb d'aubes: 70
 Moment de l'aube étalon
 ou moment de tarage du contreponds [gmm] : 180000
 Variation de mesure admissible [digits]: 3.0
 Type de permutation (1=Aucune 2=Paire 3=Triplette): 1
 Tolérance [gmm] : 100
 Algorithme de prépartition : 4 - Quadr. Beam,H/L adj.,Decr.

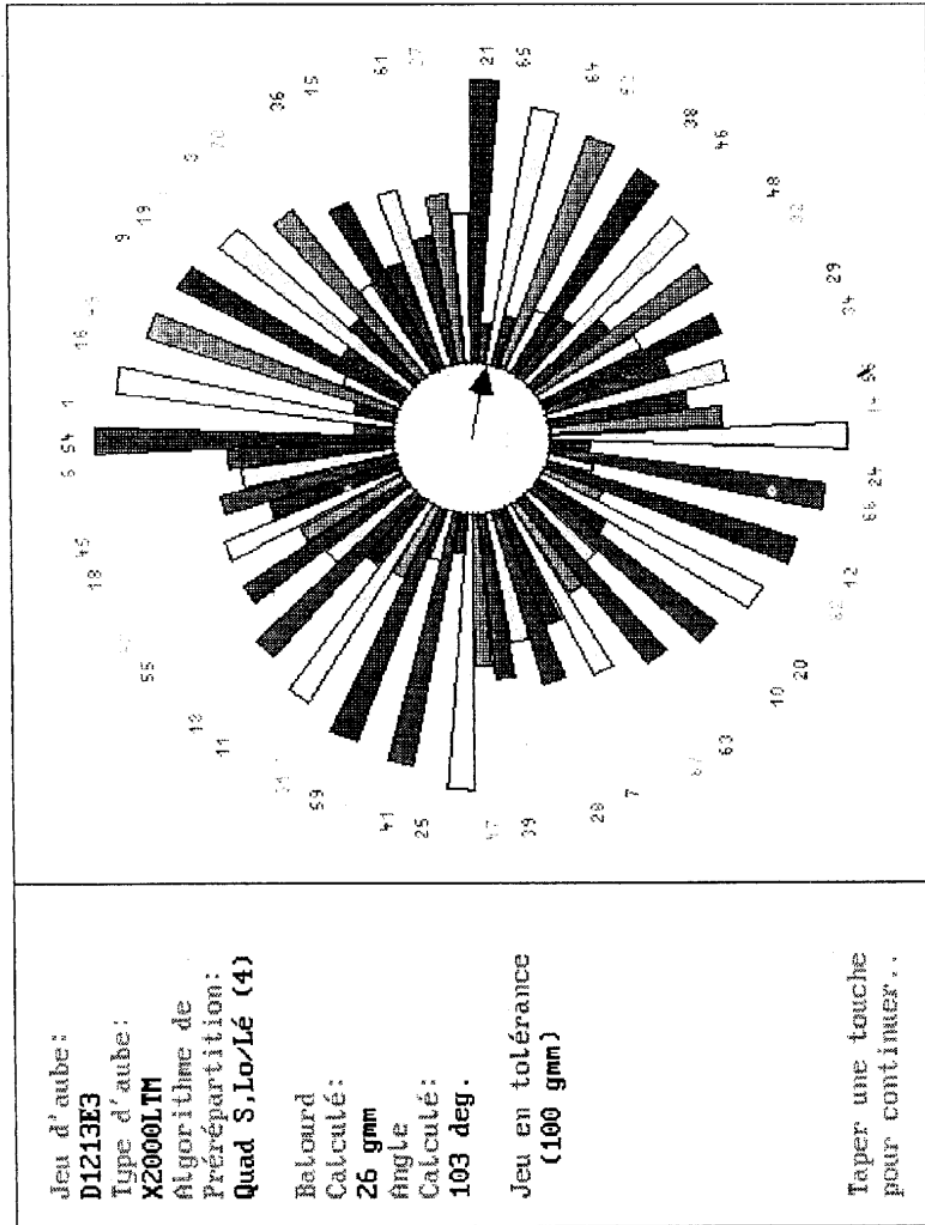
Jeu d'aube: D1212E3

Produit par: Alex K. Brown
 Nouvelle tolérance réduite [gmm] : 100
 Type de permutation (1=Aucune 2=Paire 3=Triplette): 2
 Largeur de classe [gmm] : 250
 Algorithme de prépartition : 4 - Quadr. Beam,H/L adj.,Decr.
 Balourd calculé [gmm] : 56
 Angle calculé deg. : 19
 Valeur du balourd du disque nu [gmm] : 956
 Angle du balourd du disque nu deg. : 96
 Balourd calculé en excentricité du disque [gmm] : 446
 Angle calculé de l'excentricité du disque deg. : 297

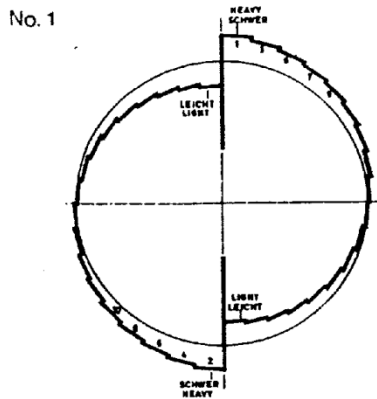
Comment:

Prépartition d'aubes optimisée :
 Jeu en tolérance
 Jeu en tolérance reduite

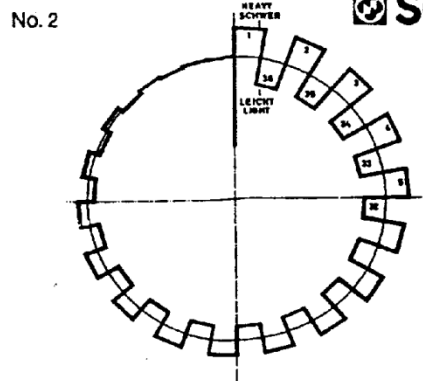
F. 38111 100000 0034 111



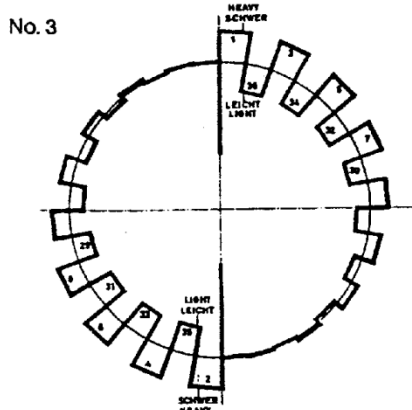
❖ Les algorithmes présélectionné :



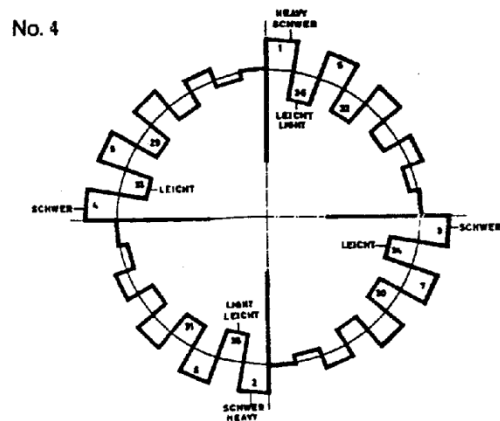
Schaufelzahl durch 2 teilbar
zweistrahlig fallend
2 segments - decreasing



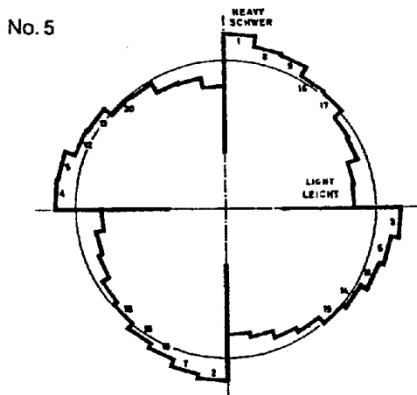
Schaufelzahl durch 2 teilbar
einstrahlig schwer/leicht benachbart, fallend
alternate heavy/light - decreasing



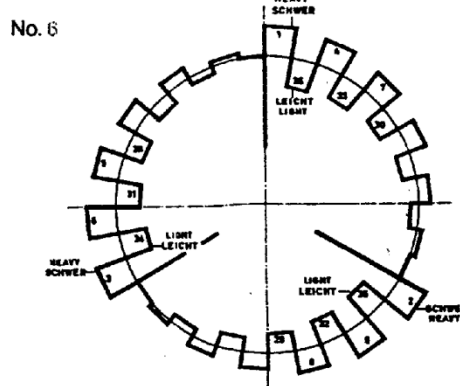
Schaufelzahl durch 2 teilbar -
zweistrahlig schwer/leicht benachbart, fallend
2 segments - alternate heavy/light - decreasing



Schaufelzahl durch 2 teilbar
vierstrahlig schwer/leicht benachbart, fallend
4 segments - CW / CCW alternate heavy/light - decreasing



Schaufelzahl durch 2 teilbar
vierstrahlig vor-/rücklaufend, fallend
4 segments - CW/CCW - decreasing



Schaufelzahl durch 3 teilbar
dreistrahlig schwer/leicht benachbart, fallend
3 segments - alternate heavy/light - decreasing

Bladis, Vers. 2 A 51 119 F
(..waa\..\BLADI20F.W51) - 9 -

Weitergabe sowie Vervielfältigung dieser Unterlage ist nicht gestattet. Alle Eigentums- und Urheberrechte verbleiben bei CARL SCHENCK AG

Transmission to third parties and reproduction of this documentation are not permitted. CARL SCHENCK AG reserves all rights of ownership and copyrights.

Schaufelverteilung
Blade Distribution

AP8 803