



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

Laboratoire des structures

Projet de Fin d'Etudes
Pour l'obtention du Diplôme de Master en
Fabrication mécanique et productique

Titre
**Etude de Conception et fabrication des aubes d'une turbine
axiale (turbine de forage)**

Proposé et encadré par :
MR SAHNOUNE KHALED

Réalisé par :
LAKEHAL NOUR EDDINE

Le co-promoteur :
Mr M.AZINE

REMERCIEMENTS

Je remercie ALLAH Le Tout Puissant de m'avoir donné le courage, la volonté et la patience de terminer ce modeste travail.

J'adresse mes remerciements au professeur Le vice-recteur

SNOUSSI SID-AHMED

Professeur Le Chef de Département

M.TEMMAR

Pour m'avoir accueilli au sein d'université Saad d'ahlab blida1

Mes remerciements Mr Khaled Sahnoune pour l'encadrement et la direction de mes travaux et pour ses précieux conseils qui m'ont permis de réaliser les travaux dans de bonnes conditions.

Je remercie les membres de jury pour leurs contributions, leurs conseils et le temps qu'ils m'ont consacré.

Que toute personne ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail trouve ici toute ma gratitude surtout Mr Guerras Abdelkrim.

Je remercie ma famille sans laquelle rien n'aurait été possible.

DEDICACE

Enfin, j'ai l'honneur de dédier ce modeste travail à :

Nos très chers parents

Tous mes frères et sœurs et mon petit enfant Marouane

A tous mes amis auxquelles j'ai partagé les meilleurs moments de ma vie
spécialement Faycal Badri, Abdelghani Seffal, Abdelkader Dermas, Moussa

Achour et fares denidni

A la mémoire de mon défunt ami Kadi Wali

A tous ceux que nous aimons et qui nous aiment

ملخص

في الصناعة الميكانيكية (وخاصة في مجال النفط)، من ناحية يتطلب تصميم المنتج وفقا لدفتر شروط المنتج الاصيلي دراسة المواصفات من قبل علماء الديناميكا المائية مدة طويلة وهذا ما يؤثر على تكلفة المنتج، من ناحية أخرى، ونظرا للأشكال الهندسية المعقدة لبعض القطع يتطلب إنشاء برامج المعالجة الآلية لإنتاج القطعة مهارات عالية جدًا. لهذا الغرض من الضروري استخدام أنظمة مساعدة خاصة للتصميم والتصنيع بمساعدة الكمبيوتر.

حاولت إعطاء بعض المفاهيم الأساسية حول مثقاب التبرو وتصنيفاتها، بعد ذلك قمت بعرض برنامج التصميم ansys والتصنيع camworks ونظرة عامة على التصميم والتصنيع بمساعدة الكمبيوتر وتطوره بالإضافة إلى المراحل المختلفة لتصميم ريش الشفرات التوربينية المحوري.

في الأخير قمت بإجراء دراسة تصنيع لجزء من هذا التوربين (الدوار) لتحديد الاستراتيجيات المتاحة والحلول الممكنة لتصنيع الاجزاء المعقدة.

الكلمات المفتاحية: النمذجة الهندسية، شيفرة-G، التصميم والتصنيع المدعم بالحاسوب، الماكينات المبرمجة اليا، آلة الخراطة المتعددة المحاور، camworks، ansys.

RESUME

Dans l'industrie mécanique (surtout dans le domaine pétrolier), d'un côté la conception des produits initiée par l'étude du cahier des charges par des hydrodynamiciens requiert une longue durée et influe sur le coût du produit. De l'autre coté la génération des programmes CN pour la fabrication du produit exige une compétence très élevé. Pour cela il est nécessaire d'utiliser des systèmes d'aide informatiques spécialisés pour la conception et la fabrication assistées par ordinateur (ansys).

Dans notre travail, nous avons essayé de donner quelques notions fondamentales sur les turbo foreuses et leur classification

Ensuite une partie CAO/FAO a était présentée et un aperçu général sur la conception et la fabrication assisté par ordinateur et leur évolution suivi par une présentation du logiciel ansys version 2018 ainsi que les différentes étapes pour la conception du désing des aubes d'une turbine axiale.

Enfin une étude de fabrication d'une partie (rotor) qui compose cette turbine a été faite afin de déterminer les processus d'usinage.

Mots clés : Systèmes CFAO, CAO, FAO, Programmation CNC, Code-G, modélisation géométrique, usinage multiaxial, camworks, ansys.

ABSTRACT

In the mechanical industry (especially in the oil field), on the one hand the product design initiated by the study of the specifications by hydrodynamicists requires a long duration and influences the cost of the product. On the other hand, the generation of NC programs for the production of the product requires a very high skill. For this purpose it is necessary to use specialized computer-aided help systems for computer-aided design and manufacturing (ansys). In our work, we tried to give some basic notions about turbo drills and their classification. Then a part CAD / CAM was presented and a general overview on the design and the computer-aided manufacturing and their evolution followed by a presentation of the software ansys version 2018 as well as the different stages for the design of the blades of a turbine blades axial. Finally a manufacturing study of a part that makes up this turbine was made to determine the machining process.

Keywords: CAD / CAM systems, CAD, CNC programming, G-Code, geometric modeling, multiaxial machining, camworks, ansys

Liste d'abréviation

B		inches16
BLADEGEN		ISO
Blade Génération1		International Organization for Standardization ...61
BSA		K
bearing section assembly17		kg
C		kilograms16
CAD		kg/L Kilograms Per Litre24
computer aided design2		kW
CAO		Kilowatt7
conception assistée par ordinateur2		L
CFD		lbm
computational fluid dynamics1		Lean body mass16
CN		M
commande numérique2		mm
CW		millimètre16
CAMWorks65		N
D		N.m
dég		Newton-Meters16
degré71		O
DFM		OM
Design For Manufacturing3		<i>origine machine</i>63
F		P
FAO		PDM
Fabrication assistée par ordinateur2		Positive Déplacement Motors1
FBS		PSI
flexible bearing section17		pound per square inch7
FSI		6
Fluid structure interaction1		S
ft		SR
feet16		<i>DES SURFACES REGLEES</i>58
ft-lbf		SRD
foot pound-force16		Surface Réglée Développable58
G		SRND
gal		DES SURFACES REGLEES NON
gallon16		DEVLOPPABLES58
H		SURFACES REGLEES NON DEVLOPPABLES
hp	58
horsepower16		T
I		TPM tour/min6
in		

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS	I
DEDICACE	II
RESUME	III
Liste d'abréviation	V
TABLE DES MATIERES.....	VI
LISTE DES FIGURES	VIII
LISTE DES TABLEAUX	X
INTRODUCTION	1
CHAPITRE I: NOTIONS SUR LES TURBOFOREUSE	4
I.1 Description:	4
I.2 Historique de la Turboforeuse :	4
I.3 Principales applications :	5
I.3.1.Turboforeuse pour les Puits vertical - turbo forage de haute performance :	5
I.3.2.Turboforeuse pour les puits déviés <i>Turboforage directionnel et horizontal</i>	5
I.3.3. Turboforeuse pour les puits de petit diamètre (Thru-tubing turbodrilling)	5
I.4 Performance de la turboforeuse :	6
I.5.Les caractéristiques de la turboforeuse :	6
I.6.Compositions:.....	7
I.6.1 Section puissance (motrice) :	8
I.6.1.1 L'étage de turboforeuse :	9
I.6.1.1.1 Le stator :	10
I.6.1.1.2. Le rotor :	10
I.6.1.2. Les aubes du rotor et stator :	11
I.6.2. Section d'appui (bearing section) :	13
I.6.3. L'arbre de transmission (Le Bent Housing) :	13
I.7. Principe de fonctionnement :	13
CHAPITRE II: THEORIE DE CONCEPTION ET SIMULATION:	15
Description	15
II.1. Partie théorique de conception.....	16
II.1.1.Caractéristiques principales du turboforeuse :	16
II.1.1.1 Les données de départ :	19
II.1.1.2 Calcul manuel :	19
II.1.2 Rappels théoriques :	19
II.1.2 .1 Le triangle de vitesse :	20
II.1.2.2 Définition des variables nécessaire pour l'étude :	21

II.1.2.3 Equation d'Euler pour les turbines :	22
II.1.2.4 Le couple développé :	22
II.1.2.5 L'équation de couple en fonction de la vitesse de rotation N:	23
II.1.2.6 L'équation de la puissance en fonction des de la vitesse de rotation N:	23
II.2 Parties simulation (modélisation géométrique)	25
II.2.1.BLADEGEN:	26
II.2.1.1. Courbe de Bézier :	26
II.2.1.2 Construction de stator :	27
II.2.1.2.1. Configuration géométrique de stator :	27
II.2.1.2.2. Configuration du profil de l'aube :	28
II.2.1.3. Construction de rotor :	34
II.2.1.3.1. Configuration géométrique de rotor :	34
II.2.2 TURBOGRID :	35
II.2.3. CFX Simulation:	36
II.2.3.1 Setup (Configuration):	37
II.2.3.1.1 Démarrage du mode Turbo	38
II.2.3.2. CFX Solution:	40
II.2.3.3 Les résultats de CFX	41
II.2.4 Static Structural:	48
II.2.4.1 Effectuer l'analyse static structural sur l'aube de stator :	49
II.2.4.2. Effectuer l'analyse static structural sur l'aube de rotor :	50
CHAPITRE III : STRATEGIE D'USINAGE	54
III.1 INTRODUCTION	54
III.2- CONFIGURATIONS DES MACHINES multiaxial	54
III.2.1. CRITERES DE CHOIX D'UNE MACHINE MULTIAXIAL:	55
III.2.2 MACHINE A PLATEAU TILTING	55
III.2.3 LE FRAISAGE multiaxial	55
III.2.4- POSITIONNEMENT DE L'OUTIL EN USINAGE MULTIAXIAL	56
III.2.5 LES OUTILS POUR L'USINAGE DES FORMES COMPLEXES	56
III.3.1 LES SURFACES REGLEES	57
III.3.2 SURFACES REGLEES REMARQUABLES	57
III.3.3 SURFACES REGLEES DEVLOPPABLES	57
III.3.4- USINAGE DES PIECES DE FORME SURFACE GAUCHE	58
III.3.5 USINAGES DES SURFACES REGLEES DEVLOPPABLES	58
III.3.6 USINAGES DES SURFACES REGLEES NON DEVLOPPABLES	58
III.4 USINAGE A 4 AXES SUR LE FLANC	59
III.4.1 LE CHOIX DE L'OUTIL	59

III.4.2 USINAGE MULTIAXIALE D'UNE SURFACE EN SUR LE FLANC	59
III.4.3 LA CHAINE NUMERIQUE EN FRAISAGE A 4 AXES.....	60
III.5 application sur le model.....	61
III.5.1 LES LOGICIELS DE FAO :	61
III.5.2 GAMME D'USINAGE EN USINAGE MULTIAXIALE.....	62
III.5.3- STRATGIE D'USINAGE DE MODEL.....	62
III.5.4 OBTENTION DU MODELE BRUT :	62
III.5.5 Choix de machine	62
III.5.6 Identifié les coordonne de système	63
III.5.6.1 Origine machine G45 (OM) :.....	63
III.5.7 Gestionnaire de pièce.....	64
III.5.8 définir de brut	64
III.5.9 Configuration pièce fraisage 1	66
III.5.10 EXTRAIRE LES FORMES USINABLES	66
III.5.11 LES PARAMETRES DE REGLAGE DES OPERATIONS	67
III.5.11.1 Changement d'outils.....	67
5.11.2 CONTROLE DE COLLISION:.....	70
III.6 Stratégie d'ébauche (application sur le model).....	72
III.6.1- STRATEGIE : OFFSET FROM SURFACE.....	72
III.6.2 STRATEGIE: EBAUCHE DES SURFACES DE MOYEU.....	73
III.6.3 STRATEGIE: FINITION DE L'AUBE USINAGE EN ROULANT	73
III.6.4 STRATEGIE:FINITION PAR BALAYAGE DU FOND.....	73
III.6.5 STRATEGIE D'USNAGE COMPLEMENTAIRES	74
III.6.5.1 Usinage des bords d'attaque et de fuite.....	74
III.6.5.2 Usinage des rayons de pied de l'aube	74
III.7 simulation d'usinage.....	75
III.7.1 CALCUL DES TRAJECTOIRES D'USINAGE DE LA PIECE	75
III.7.2 VERIFICATION DE L'USINAGE DANS L'ESPACE MACHINE	75
CONCLUSION GENERALE :	77
BIBLIOGRAPHIE :	78
ANNEXES :	79

LISTE DES FIGURES

Figure 1: les défèrent types des turboforeuse	6	
Figure 2 : Turboforeuse	8	
Figure 3 : Section puissance d'une turboforeuse.	9	
Figure 4Deux étages d'une turboforeuse	Figure 5Etage d'une turboforeuse.....	9
Figure 6 Stator d'un étage d'une turboforeuse	10	

Figure 7 Rotor d'un étage d'une turbo- foreuse.....	10	
Figure 8 Stator – Rotor d'un étage d'une turboforeuse.....	11	
Figure 9 Les profils d'aube utilisée par la turboforeuse de Schlumberger.....	12	
Figure 10 Fonctionnement des aubes de stator-rotor.....	12	
Figure 11 Section d'appui avec palier en élastomère.....	13	
Figure 12 Arbre de transmission flexible en Titane.....	13	
Figure 13 Caractéristiques géométrique de la turbo-foreuse TSH-MK2.....	18	
Figure 14 Les données de l'entreprise.....	19	
Figure 15 Triangle de vitesse d'un étage d'une turboforeuse.....	20	
Figure 16 Volume de contrôle pour le rotor.....	22	
Figure 17 Courbe des caractéristiques mécaniques des turbines de forage.....	24	
Figure 18 Vue générale de l'étude ANSYS.....	26	
Figure 19 Courbe de Bézier.....	27	
Figure 20 Le profil d'aube MK2	Figure 21 Etage de turboforeuse TSH-MK2.....	27
Figure 22 Position de l'aube de stator.....	28	
Figure 23 Position de stator.....	28	
Figure 24 Les paramètres caractéristiques de la courbe de Bézier.....	29	
Figure 25 Les angles caractéristiques de l'aube.....	29	
Figure 26 II.14.Les paramètres géométriques de l'aube.....	30	
Figure 27 Les points de Bézier de l'extrados.....	30	
Figure 28 Les points de Bézier de l'intrados.....	31	
Figure 29 Les propriétés de modèle.....	31	
Figure 30 Le nombre d'aube.....	31	
Figure 31 La forme finale de stator.....	32	
Figure 32 Vue 2D de deux aubes consécutives du stator.....	32	
Figure 33 Vue 3D de stator (Shroud caché).....	33	
Figure 34 La variation de l'épaisseur en fonction de la ligne moyenne.....	33	
Figure 35 Position de l'aube de rotor.....	34	
Figure 36 Position de rotor.....	34	
Figure 37 Vue 3D de rotor.....	35	
Figure 38 Vue 2D de deux aubes consécutives du rotor.....	35	
Figure 39 Le maillage de stator.....	36	
Figure 40 Vue 3D de stator-rotor :.....	37	
Figure 42 Spécification du type de machine et type de l'analyse.....	38	
Figure 43 Vitesse de rotation sélectionnée.....	38	
Figure 44 Les paramètres physiques.....	38	
Figure 45 Type de l'interface : étage.....	39	
Figure 46 L'interface axiale entre le stator et rotor.....	39	
Figure 47 Type de l'interface : périodique.....	39	
Figure 48 L'interface radiale de rotor.....	39	
Figure 49 Vue de la rugosité de surface.....	39	
Figure 50 L'erreur résiduelle globale en fonction du nombre d'itérations.....	40	
Figure 51 La distribution de la pression sur la surface de l'aube.....	41	
Figure 52 Présentation 3D de la distribution de la pression du fluide.....	41	
Figure 53 Présentation 2D de la distribution de la pression du fluide.....	42	
Figure 54 Présentation 3D de la distribution de vitesse du fluide.....	42	
Figure 55 Présentation 2D de la distribution de vitesse du fluide.....	43	

Figure 56 La variation de la pression au niveau de l'étage	43
Figure 57 La variation de la vitesse au niveau de l'étage.....	44
Figure 58 La variation de la vitesse tangentielle au niveau de l'étage.....	45
Figure 59 La variation de la vitesse axiale au niveau de l'étage	46
Figure 60 Rapport de turbine	46
Figure 61 Stator de la turboforeuse	49
Figure 62 Maillage réalisée sur la surface stator	50
Figure 63 Le rotor de la turboforeuse	50
Figure 64 Le maillage de rotor	51
Figure 65 Les déplacements totale au niveau de l'aube de stator et rotor	51
Figure 66 Les déformations au niveau de l'aube de stator et rotor	52
Figure 67 Les contraintes équivalent (Von-Misses) au niveau de l'aube de stator et rotor	52
Figure 68 chaîne numérique	54
Figure 69 Usinage en bout et en flanc [Takeuchi et al 1995].....	56
Figure 70 Position du centre outil suivant la forme de l'outil.....	57
Figure 71 Surface réglée.....	57
Figure 72 Interférences lors d'un posage sur la règle [REHSTEINER 93].....	58
Figure 73 Posage d'un outil en 4 axes par une courbe et une surface	60
Figure 74 Posage d'un outil en 5 axes par une surface réglée et une deuxième surface	60
Figure 75 Posage d'un outil en multiaxe par deux courbes	60
Figure 76 la chaîne numérique en 5 axes [TOURNIER et al 2005]	61
Figure 77 modèle prêt à l'usinage multiaxiale.....	62
Figure 78 Définir le nombre d'Axe.....	63
Figure 79 DEFINIR LES ORIGINES PIECE	64
Figure 80 Définir le model CAO	64
Figure 81 Profil de brut adapté au model CAO.....	65
Figure 82 Définir le brut	65
Figure 83 Choix de plant d'usinage.....	66
Figure 84 DEFINIR LES PLANS D'APPROCHE	67
Figure 85 PARAMETRAGE D'USINAGE	68
Figure 86 PARAMETRER LES OUTILS.....	69
Figure 87 réglage de paramètre d'ébauche et finition	70
Figure 88 vérification les collisions entre la surface usinée et les autres surfaces	71
Figure 89 réglage paramètres de contrôle des axes.....	71
Figure 90 génération de trajectoire sur le fond.....	72
Figure 91 stratégie d'ébauche par plan décalé.....	72
Figure 92 modèle isoparamètre entre les courbes.....	73
Figure 93 génération l'ensemble des séquences d'usinage.....	74
Figure 94 espace « outil- pièce »	75
Figure 95 espace « machine- pièce ».....	76

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Les caractéristiques de la turboforeuse	7
Tableau 2 Caractéristiques principales du turboforeuse	16
Tableau 3 Paramètres caractéristiques de l'aube.....	30
Tableau 4 Comparaison de valeurs.....	48

Introduction

INTRODUCTION :

Les moteurs de fond désignent principalement soit des PDM (Positive Déplacement Motors), moteurs volumétriques qui ne sont autres que des pompes Moineau à l'envers, soit des turbines. Ils convertissent la puissance hydraulique, transporté par le fluide de forage, en une énergie mécanique de rotation. Cette conversion a lieux directement au-dessus de l'outil de forage.

Les pertes et les problèmes liés à la rotation du train de tige en particulier sont ainsi éliminés.

L'efficacité de la turboforeuse est dépendante de la **forme des aubes**, ces derniers sont les composants hydrauliques les plus importants, par conséquent, il est important d'analyser l'impact du liquide de forage sur les aubes de la turboforeuse.

Chaque type de turboforeuse est évalué à un débit donné appelé débit nominal. Les caractéristiques mécaniques sont mesurées et décrites au **débit nominal**. Les caractéristiques aux autres valeurs de débit sont généralement calculées sur la base des valeurs mesurées du débit nominal. Calcul des vitesses de rotation, des couples de sortie, puissance, efficacité de l'outil, et la chute de pression à travers une turbine de forage cette donnée consiste principalement à rassembler les données nécessaires à la définition géométrique de la partie section motrice de turboforeuse en utilisant des modèles **connu** et des hypothèses de conception

Turboforeuse utilise des aubes de turbine axiales pour convertir l'énergie hydraulique (Pression et de débit) en énergie mécanique qui peut être appliquée à l'outil sous la forme de couple.

Ce projet représente une:

Modélisation géométrique: méthodologie pour la conception de la section motrice à plusieurs étages de la turboforeuse, cette méthodologie de l'étude sera basée sur l'utilisation d'une simulation avec logiciel ANSYS qui utilise les outils : BLADEGEN, TURBO-GRID, CFX, CFD, Static Structural et FSI.

Usinage : La production automatisée a connu ses dernières années un développement considérable dans toutes les phases de la conception au contrôle en passant par la fabrication. De ce fait, la conception et la fabrication des surfaces gauches sont devenues une pratique courante dans le milieu industriel, ainsi la problématique de la conformité des pièces de géométrie complexe se fait ressentir de plus en plus. L'automatisation poussée et la souplesse des outils de

Introduction

numérisations avec ou sans contact a permis de réduire considérablement le temps d'acquisition et le traitement des mesures en vue de la vérification des spécifications imposées par le concepteur (c'est la retro conception: particulièrement avantageuse de reconstruire un modèle numérique CAO pour les **objets physiques** qui possèdent une géométrie ou une forme complexe difficilement modélisable, et fournit des solutions rapides pour des problèmes proposés.

Cette technique offre des avantages intéressants parmi lesquels :

- La possibilité d'extrapoler facilement plusieurs versions à partir du modèle informatique (surtout dans le cas de la fabrication d'un produit industriel),
- Amélioration de la performance et/ou les fonctionnalités de produit.

Quelque différentes raisons pour utiliser la rétro conception (dans le cas où on a un objet physique):

- La conception originale n'est pas supportée par une documentation suffisante ou adéquate
- Le fabricant original n'existe plus ou ne fabrique plus le produit, mais il y a des besoins pour le produit.
- Composants usés ou cassés pour lesquels il n'y a aucune source d'approvisionnement.
- Manque pièces additionnelles-pièces de rechange-).

Le processus d'élaboration des pièces de forme complexe se découple en une activité de conception et une activité de fabrication. On construit tout d'abord un modèle géométrique à partir des spécifications fonctionnelles. Il constitue le modèle de référence de la maquette numérique. Les trajectoires de l'outil permettant l'usinage de la pièce ou de son empreinte sont calculées par le module de FAO. Finalement la pièce est usinée selon les trajectoires précédemment calculées.

La roue à aubes (**rotor**) contient des pièces à forte valeur ajoutée¹, les aubes. Celles-ci présentent une géométrie assez complexe qui nécessite des machines CN multiaxial pour leur usinage afin de répondre aux problèmes d'accessibilité et améliorer l'état de surface.

PROCESSUS D'OBTENTION DE MODELE CAO 3D

L'industrialisation souhaitant a réalisé un modèle type à partir d'un modèle CAO.

L'obtention du modèle CAO et les profils des pièces sont générés a partir simulation avec logiciel ANSYS ou solidworks...ces logiciels sont connu sous le nom (CAD ou CAO).

¹ Un produit à valeur ajoutée est un produit dont la transformation va faire augmenter de façon considérable la valeur commerciale

Introduction

La conception assistée par ordinateur ou CAO (en anglais, computer aided design-CAD-) comprend l'ensemble des logiciels et des techniques de modélisation géométrique permettant de concevoir, de tester virtuellement – à l'aide d'un ordinateur et des techniques de simulation numérique – et de réaliser des produits manufacturés et les outils pour les fabriquer.

Ces profils servent de support à la construction de surfaces, Partant des surfaces caractérisant les bords d'attaque et de fuite, ainsi que les surfaces **extrados** et **intrados** pour toutes les pièces de la roue, les concepteurs du bureau d'étude génèrent toute la géométrie de la roue à aube en CAO on applique le principe de la Conception Pour la Fabrication ou Design For Manufacturing (DFM) pour la modélisation finale. Les modèles 3D validée transmis directement au logiciel de FAO.

PROCESSUS DE FABRICATION DE LA ROUE A AUBE

La Roue à aube contient des pièces à **forte valeur ajoutée**, les aubes. Celles-ci présentent une géométrie assez complexe qui nécessite des machines CN multiaxes pour leur usinage afin de répondre aux problèmes d'accessibilité et améliorer l'état de surface.

L'ingénieur du Structure Engineering est alors pour but de générer les trajectoires outils qui permettent d'usiner la pièce à partir d'un **brut**. Toutes les informations nécessaires à l'usinage sont connues de la FAO : les outils, les trajectoires outils, les vitesses caractéristiques, les repères d'usinage. Mais tout ceci se fait dans le **repère pièce**, sans connaître la cinématique de la machine et dans un langage qui n'est pas connu de la machine.

Il faut donc associer au système de FAO un **post-processeur** qui traduit le programme issu de la FAO pour la **machine-outil** considérée. Une fois les programmes sont calculés en FAO et traduits par le post-processeur, les pièces sont usinées sur la machine considérée

Nous utilisons logiciel *CAMWorks*.

CAMWorks est complètement intégré à *SolidWorks* et peut être démarré automatiquement chaque fois que vous démarrez *SolidWorks*.

OBJECTIF DE MON TRAVAIL EST D'ETUDIER

- Effectuer une étude de conception des aubes d'une turbine axiale
- Effectuer une étude d'écoulement et de calcul de structure sur un étage de la turbine
- la faisabilité de l'usinage de ces pièces dans le cadre de l'usinage multiaxes à grande vitesse. c'est plus spécifiquement attaché à la:
 - La machine retenue a été **choisie** afin d'obtenir tous les conditions des coupes tel que la charge sur la table, vitesses de coupe, et l'encombrement géométriques...etc.
 - l'étude des **stratégies d'usinage** à la masse de la totalité de l'aube dans le cadre de l'Usinage à Grande Vitesse.

CHAPITRE I: NOTIONS SUR LES TURBOFOREUSE**I.1 DESCRIPTION:**

La Turboforeuse est un moteur hydraulique utilisé pour le forage de puits vertical ou horizontal de pétrole et de gaz. Elle **convertit** l'énergie contenue dans le fluide hydraulique (boue), sous la forme de **pression et de débit**, en énergie mécanique sous forme de **rotation**. Cette conversion a lieu dans les **étages de la turbine** (un étage comprend un rotor et un stator), situés dans la section motrice. (On **s'intéresse** avec partie rotor et stator -étage- dans la partie simulation et étude de performance et dans la partie usinage avec le rotor)

La puissance fournit par la turbine est composée des puissances fournies par tous les étages de la turbine (généralement 75 à 125 par section), dans une ou plusieurs sections motrices.

Plus précisément, l'énergie emmagasinée dans le fluide hydraulique est convertie en vitesse de rotation et en couple. La vitesse de rotation de la turbine est proportionnelle au débit du fluide hydraulique. Le couple lui est une fonction du débit de fluides hydrauliques, la densité du fluide hydraulique (poids de la boue), et le nombre des étages employé dans la turbine.

I.2 Historique de la Turboforeuse :

L'idée d'utiliser des moteurs de fond animé par le fluide de forage pour faire tourner l'outil directement n'est pas une idée nouvelle, Le premier brevet pour un turboforage été déposé en 1873 soit 30ans avant l'introduction du forage rotary dans l'industrie pétrolière. Cependant il faudra attendre 1924 pour voir les premières applications pratiques de ce concept lorsque des ingénieurs russes et américains testèrent des turbines de forage sur le terrain, ces premiers tests n'étaient pas concluant et les recherches ne continueront que du coté russe pour aboutir 1934 à une première turbine utilisable. Ces outils continueront à se développer à telle point que dans le milieu des années 1950 près de 80% des puits forés en union soviétique avec des turbines. Une licence pour la fabrication d'un outil russe a été accordée à une compagnie d'ingénieur française, Neyrpic, en 1956. Neyrpic est le prédécesseur à Sii-Neyrfor qui représente plus de 90% de ventes Turbodrill mondiales pour l'instant, (en dehors du marché Russe).

Le développement des moteurs PDM a commencé dans la fin des années 1950. Le développement initial était le résultat d'un brevet américain déposé par W. Clark en 1957.

Ce moteur de fond été basé sur le travail original d'un ingénieur français, René Monineau, sur des pompes. Le travail initial aux États-Unis a aboutie à des PDM à un seul lobe qui ont connu un très grand succès. Depuis cette époque il y a eu plusieurs versions de PDM développées et

présentées. Aujourd'hui on dispose d'une très large gamme de PDM avec des caractéristiques différentes et pouvant opérer dans différent milieux.

Pour des raisons naguères techniques (flexibilité, longueur et coude intégré) et aujourd'hui essentiellement commerciales, les PDMs sont plus employés que les turbines dans le forage dirigé.

Dans cette partie nous essayerons de voir la composition de chaque type de moteur, leur principe de fonctionnement.

I.3 Principales applications :

Il existe des configurations personnalisées pour chaque application :

I.3.1. Turboforeuse pour les Puits vertical - turbo forage de haute performance :

Application en puits vertical (straight-hole application), cette tendance fournit une solution haute performance de forage qui maximise la vitesse d'avancement, produit un puits de haute qualité et le maintien très verticalement, ce qui rend le turboforeuse le choix évident pour les opérateurs qui cherchent à réduire le temps de forage et de réduire les coûts d'exploitation.

I.3.2. Turboforeuse pour les puits déviés *Turboforage directionnel et horizontal*

Smith turboforeuse est un leader dans le forage directionnel et horizontal, avec la possibilité d'offrir les taux de construction uniformes et prévisibles, combinée avec incomparable contrôle de surface de l'outil, la turboforeuse assure que les objectifs directionnels peuvent être atteints dans les applications les plus exigeantes.

I.3.3. Turboforeuse pour les puits de petit diamètre (Thru-tubing turbo drilling)

Offres à l'opérateur la possibilité d'obtenir des performances maximales avec une turboforeuse de petit diamètre. La supériorité de la conception des turboforeuses les rend la solution préférée pour fournir un avantage de performance dans des environnements de production à faibles diamètre et pression et à haute température.



Figure 1: les différents types des turboforeuses

I.4 Performance de la turboforeuse :

La section motrice de la turbine comporte plusieurs étages de rotors et de stators, de 75 jusqu'à 300. Pour une géométrie de base du moteur avec un débit donné, une augmentation du nombre d'étages du moteur se traduira par une augmentation de couple et une augmentation de la puissance de turbine. Cette amélioration du rendement est toutefois accompagnée d'une augmentation de la pression différentielle à travers la section de motrice.

I.5. Les caractéristiques de la turboforeuse :

- Le couple et la vitesse de rotation (TPM) sont inversement proportionnels (à savoir que TPM augmente, couple diminue et vice versa).
- La vitesse de rotation est directement proportionnelle au débit (à couple constant).
- Le couple est une fonction du :
 - Débit.
 - La densité de la boue.
 - L'angle de l'aube.
 - Le nombre d'étages.
 - Le poids sur le trépan.
- La puissance de sortie optimale a lieu lorsque des paliers de butée sont équilibrés.
- Off bottom «le trépan ne touche pas le fond » la vitesse de rotation est maximale et le couple égale à zéro.
- On bottom «le trépan posé sur le fond » et juste au décrochage, la turbine atteint un couple maximal et la vitesse de rotation est zéro.

- Une performance optimale est à la moitié du couple de décrochage et à la moitié de la vitesse d'emballage, la turbine réalise alors une puissance maximale.

Turboforeuse	Nombre d'étage	Vitesse de rotation (TPM)	Couple (Ft.lbs)	Pression différentielle (PSI)	Puissance (kW)
T1-MK2	75	1000	745	1000	142
TSH-MK2	100	1000	961	1230	183
T1-MK1	86	1172	670	1100	149
T2-MK1	172	1172	1255	1800	280

Tableau 1: Les caractéristiques de la turboforeuse

I.6.Compositions:

Une turboforeuse est constituée d'une :

- 1) Section puissance (motrice) composée de plusieurs étages :
 - Un étage est constitué d'un rotor et stator de profil identique.
 - Les stators sont stationnaires, fixés au corps de la turbine, et dévient le flux du fluide de forage vers les rotors.
 - Les rotors sont fixés à l'arbre de transmission, comme les rotors sont forcés à tourner, l'arbre de transmission est aussi forcé à tourner, entraînant la rotation de l'outil.
- 2) Section d'appui (bearing section).
- 3) Un arbre de transmission pour faire tourner l'outil.

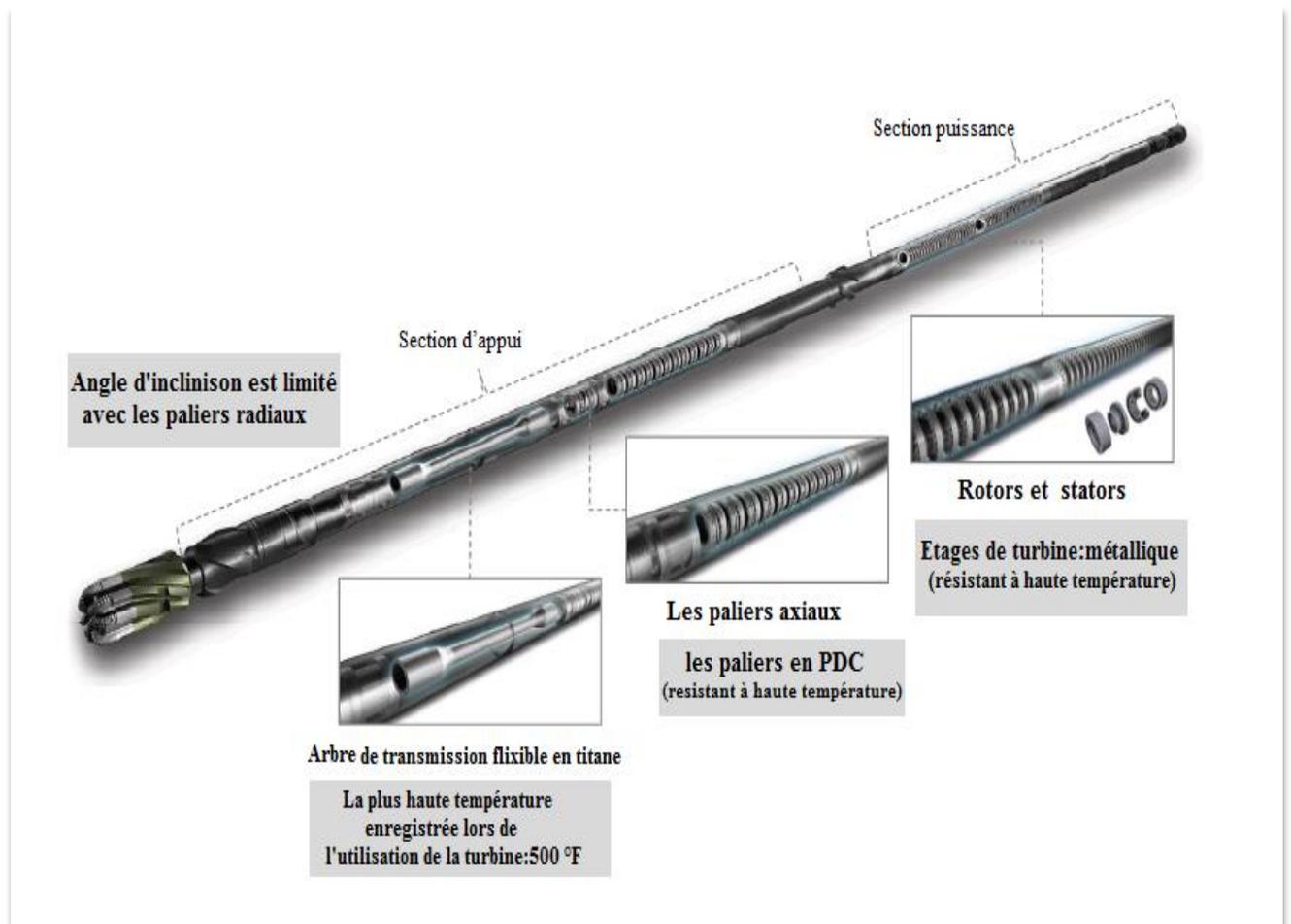


Figure 2 : Turboforeuse

I.6.1 Section puissance (motrice) :

Une turbine de forage peut avoir une ou plusieurs sections motrices, selon les exigences de puissance, toutes les sections sont composées d'un grand nombre d'étages de turbine, (typiquement 75 à 125 par section).

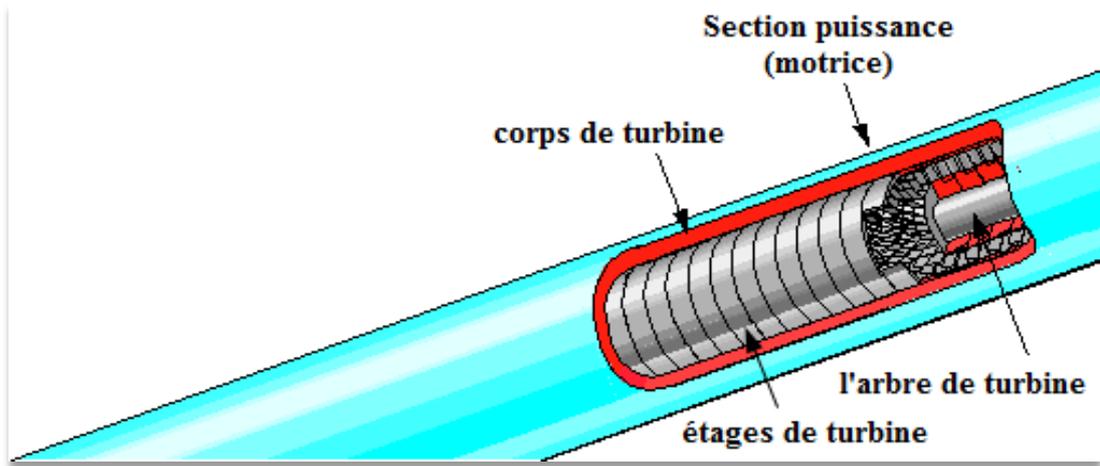


Figure 3 : Section puissance d'une turboforeuse.

I.6.1.1 L'étage de turboforeuse :

L'étage de turbine est la machine de base de conversion de l'énergie dans une Turboforeuse. Ils sont empilés les uns sur les autres dans la section motrice. La somme des puissances délivrées par tous les étages qui composent une turbine est égale à la puissance de la turbine elle-même. La puissance fournie par la turbine peut donc être modifiée en changeant le nombre d'étages incorporés. Ceci signifie qu'en augmentant le nombre d'étage, la capacité de la turbine augmente. Cependant en réalité ceci augmentera l'énergie hydraulique exigée par la Turboforeuse pour délivrer une telle puissance.



Figure 4 Deux étages d'une turboforeuse

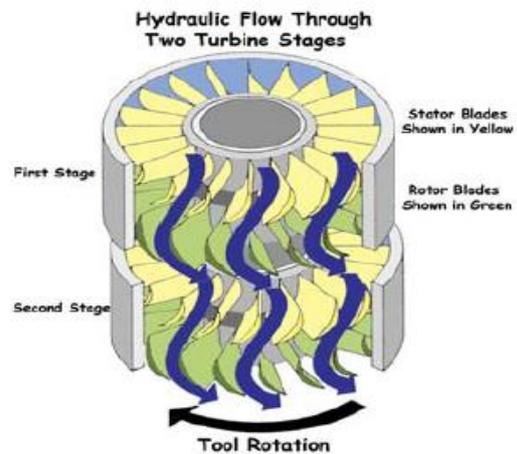


Figure 5 Etage d'une turboforeuse

Un étage de turbine est composé de :

I.6.1.1.1 Le stator :

Il est pressé de manière très serrée et colle parfaitement à l'intérieur du corps de la Turbine et ne peut pas tourner par rapport au corps. Ce serrage est très important. Si un stator pouvait tourner quand il reçoit un courant de fluide, il dissiperait l'énergie hydraulique contenu dans celui-ci. Le serrage prévient aussi les fuites de fluide entre le stator et le corps de la turbine le long de la paroi. Les fuites dissipent l'énergie hydraulique lorsqu'elles sont possibles.



Figure 6 Stator d'un étage d'une turboforeuse

La fonction du stator est de collecter le flux semi-turbulent entrant à l'étage, de le réintroduire en courant laminaire, et diriger ce courant "amélioré" dans le rotor. Pour diriger le courant dans le rotor, la direction du courant est changée d'axial à semi-radial exigé par le rotor pour forcer la rotation. L'efficacité du stator est déterminée par:

- le degré auquel le courant axial est redirigé en un courant radial.
- L'ampleur à laquelle les conditions de l'écoulement laminaire sont rétablies dans le courant de décharge du rotor.
- L'importance des turbulences de sillage auto générées en aval dès l'aube du rotor.

I.6.1.1.2. Le rotor :

Il est fixé à l'arbre de rotation de la turbine. Il reçoit le courant de fluide oblique (semi-radial) sortant du stator, ce courant donne un mouvement de rotation à l'arbre de la turbine. Les rotors (en dehors du rotor du dernier l'étage) déchargent le fluide directement à l'entrée du stator de l'étage suivant.



Figure 7 Rotor d'un étage d'une turboforeuse.

L'efficacité du rotor est dépendante de la forme des aubes et du degré auquel le courant à travers le rotor est laminaire. Comme avec le stator, l'ampleur des turbulences de sillage auto générées est aussi importante. Des larges turbulences à la sortie du rotor entraineront d'importantes turbulences au rotor de l'étage suivant et par conséquent une baisse du rendement de l'étage en question.

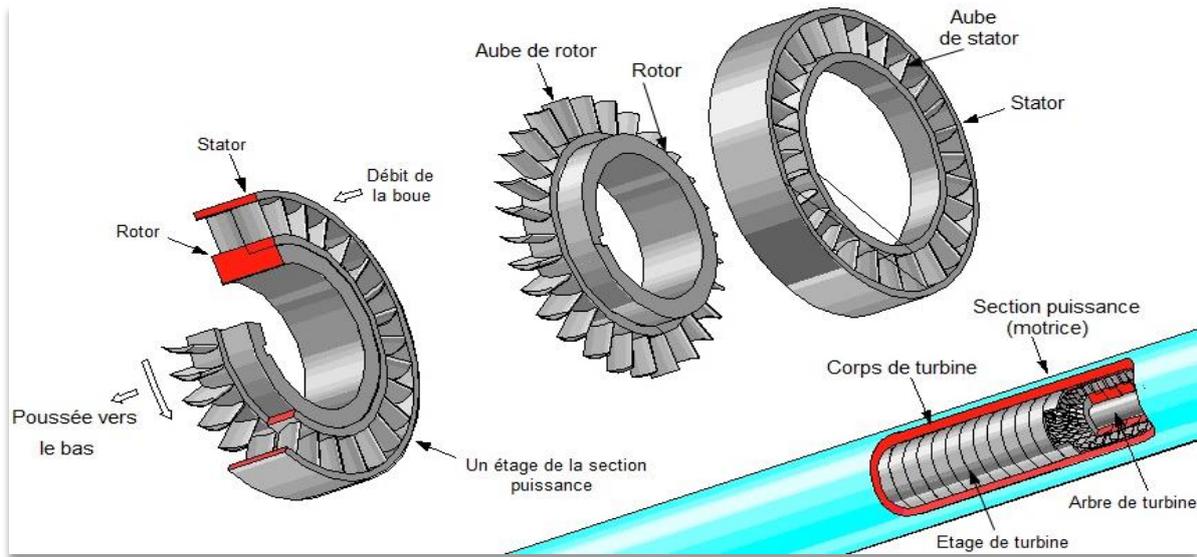


Figure 8 Stator – Rotor d'un étage d'une turboforeuse.

I.6.1.2. Les aubes du rotor et stator :

À première vue, les aubes des rotors et stators peuvent paraître très semblables. Tous les deux sont un arrangement d'aubes, disposées radialement autour de l'axe vertical de la turboforeuse. Cette similitude suggère un fonctionnement semblable des deux. Le profil de l'aube du stator est conçu pour éliminer les turbulences de l'écoulement. L'efficacité globale de la turbine s'améliore de manière significative avec la réduction des turbulences. Les aubes du stator changent aussi le sens d'écoulement indépendamment du fait qu'il soit laminaire ou turbulent de sorte à ce que l'écoulement sortant de chaque aube agisse tangentiellement au diamètre du rotor.

Dans le rotor, l'intention est de créer une force, tout comme dans une aile d'avion cette force résulte des différences de pression entre le dessus et le dessous de l'aube. Ces pressions poussent du côté inférieur de la aube et tirent du côté supérieur et causent le mouvement de rotation autour du centre du rotor. Il y a toujours des turbulences à la sortie d'une aile. Celles-ci sont appelées les turbulences de sillage. La turbulence de sillage du stator perturbe l'écoulement d'admission du rotor et celle du rotor perturbe l'écoulement d'admission du stator de l'étage suivant. La plus grande partie des recherches actuelles sur les aubes de turbine sont destinées à minimiser leurs turbulences de sillage.

L'importance de la force agissant sur les rotors est influencée par la forme des aubes et leur angle d'attaque par rapport à l'écoulement du fluide. L'angle d'attaque influence également la

turbulence de sillage, des angles d'attaques plus élevés produisent des plus grandes et plus longues turbulences de sillage.

Plusieurs modèles de section motrice ayant différents types d'aubes sont mis à disposition par les fabricants. Sii-Neyrfor par exemple emploie trois géométries d'aubes différentes : MK1, cette géométrie fournit une chute de pression constante indépendamment de la vitesse de rotation. Ces aubes ont le plus grand rendement de la gamme, Ils sont principalement employés pour le forage des puits verticaux. Les géométries MK2 et MK3 présentent une diminution de la pression en surface lorsque la vitesse de rotation diminue mais leur rendement est inférieur à celui des aubes MK1, ces géométries fournissent plus d'indication sur l'état de l'outil et sont employées dans la plupart des applications directionnelles. La géométrie MK3 diffère principalement du MK2 dans la résistance de la structure accrue permettant son utilisation dans les environnements à haute pression et débit.

Les aubes de turbine, comme les ailes d'avion, peuvent décrocher. Le décrochage est une situation en laquelle des turbulences extrêmement élevées sont créées dans les rotors avec comme conséquence une importante chute de puissance. Le décrochage des aubes peut être provoqué par un angle d'attaque excessif. Les aubes plus fortement incurvées tolèrent des débits inférieurs sans décrochage mais tendent à créer de plus grandes turbulences de sillages.

Au décrochage, la pression différentielle chute, les turbulences sont maximales et la puissance fournie est sensiblement réduite. Le profil des aubes choisies doit éviter le décrochage dans les débits de l'intervalle de fonctionnement normal de la turbine.

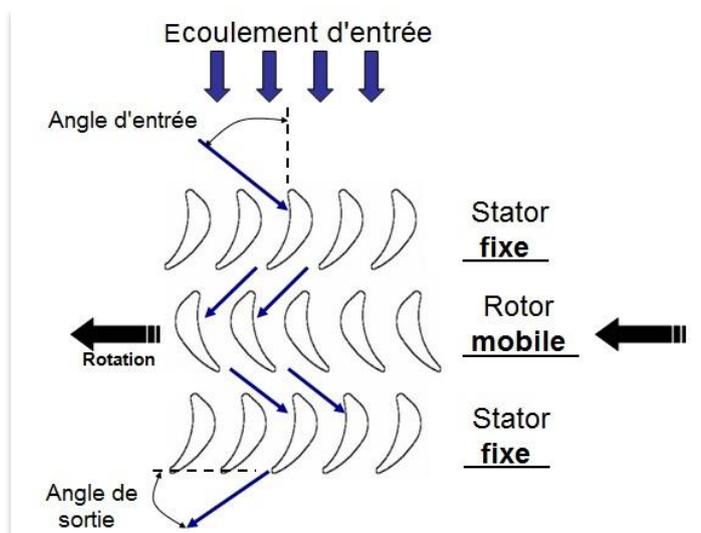


Figure 10 Fonctionnement des aubes de stator-rotor

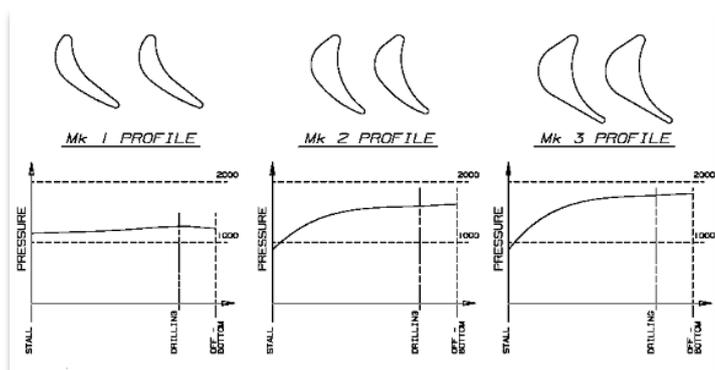


Figure 9 Les profils d'aube utilisée par la turboforeuse de Schlumberger.

I.6.2. Section d'appui (bearing section) :

Bien qu'elles soit moins importantes, les forces de poussée sur les rotors sont plus difficiles à supporter en raison de la mobilité des rotors. Le manque de support pour ses charges dans les rotors mènera à leur déplacement et provoquera des défaillances catastrophiques. Les supports des charges de poussée sur les rotors est un problème majeur lors de la conception d'une turbine. La charge radiale est initialement supportée par l'arbre, ensuite transférée au corps grâce à des paliers de friction radiaux. La composante axiale agissant sur les rotors est supportée par le nombre adéquat de butée et de roulement contenu dans un compartiment spécial situé au-dessous de la section motrice.

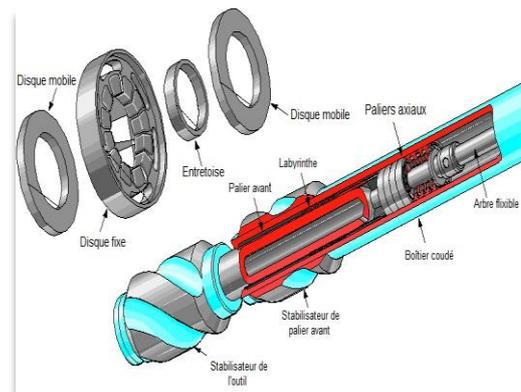


Figure 11 Section d'appui avec palier en élastomère.

I.6.3. L'arbre de transmission (Le Bent Housing) :

La clé de l'intégration d'un coude dans la Turbo-foreuse a été le développement d'un moyen par lequel la puissance transmise à l'arbre pourrait être réorientée à travers l'angle du coude sur plusieurs cycles de rotation. Les conceptions initiales ont employé un "joint universel" qui est un axe rigide avec une rotule à chaque extrémité. Aujourd'hui, la majorité des turbines modernes intègrent un bent housing équipé d'un arbre de transmission flexible en titane. Ceux-ci ont la solidité et l'élasticité physiquement nécessaire pour tolérer la réorientation du couple et de la rotation de l'arbre d'entraînement sur des milliards des cycles de rotation.

Les angles de flexion induits dans l'arbre d'entraînement par le bent housing varient entre 0° et 1,5°, selon les besoins directionnels. Cet angle est réglable sur le terrain.



Figure 12 Arbre de transmission flexible en Titane.

I.7. Principe de fonctionnement :

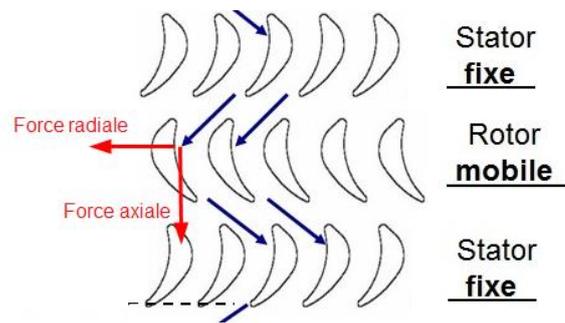
Le moteur à turbine de fond (turboforeuse) se compose de deux sections: section de moteur à turbine et section d'appui (paliers axiaux - paliers radiaux), la section de moteur de turbine est un type de turbomachines hydrauliques axiales qui présente plusieurs étages de rotors et de stators et convertit la puissance hydraulique fournie par le fluide de forage (Pompé depuis la surface) à

une puissance mécanique tout en en dirigeant l'écoulement de fluide à travers les aubes de stator aux aubes du rotor.

La turboforeuse est relié à une tige de forage, le trépan de forage est relié à une tige sur une extrémité inférieure de la turboforeuse. En fonctionnement, le fluide de forage est pompé à travers le train de tiges de forage jusqu'à ce qu'il pénètre dans la turboforeuse.

Lorsque le fluide de forage pénètre dans la turboforeuse, le flux est sensiblement dans la direction axiale en ligne avec l'axe de la turboforeuse, le fluide de forage passe à travers le stator, il accélère et la direction d'écoulement est changée, la direction de l'écoulement résultant est hélicoïdale par rapport à l'axe.

Après le passage à travers le stator, le fluide de forage passe à travers le rotor, l'énergie nécessaire pour changer la direction du fluide de forage est transformé en (poussée) force axiale radiale, ce transfert d'énergie est considérée comme une chute de pression dans le fluide de forage, la force axiale est généralement absorbé par palier axiale, et la force radiale provoque la rotation de rotor par rapport au corps de turbine. Chaque étage génère une quantité de puissance et de couple, et se traduit par une chute de pression correspondante à un débit donné, dans la pratique, plusieurs étages sont empilés co-axialement jusqu'à ce que la puissance souhaitée et le couple est atteint.



Puisque chaque étage nous donne une chute de pression, la chute de pression totale doit être prise en considération en fonction de la capacité de pompage des pompes utilisées pour transporter le fluide de forage. Les paliers axiaux et radiaux maintiennent la position des aubes de turbine axialement et radialement et leur permettant de réaliser une rotation concentrique. Le fluide traverse la turboforeuse et les buses de l'outil assurent le refroidissement de trépan et le nettoyage des déblais générés par le trépan, il va enfin transporter les déblais à l'intérieur de l'espace annulaire entre la turbine de forage et le trou à la surface.

CHAPITRE II: THEORIE DE CONCEPTION ET SIMULATION:

Description :

La conception d'une hélice est habituellement initiée par l'étude du cahier de charge . Le cahier des charges comprend notamment les caractéristiques et le régime de fonctionnement souhaité (**vitesse de rotation, pression, température**).

Lors de la conception et de la simulation de la turboforeuse à plusieurs étages, on a supposé que chaque étage est identique et que : le débit, la chute de pression, la vitesse de rotation, le couple généré et la puissance transmise à l'arbre sont les mêmes pour chacun des étages. Par conséquent, la performance de turboforeuse est composée de performance de plusieurs étages identiques empilés relié à l'arbre de turboforeuse.

Concentration du chapitre :

Le **chapitre** se **concentre sur la partie puissance de la turboforeuse**, elle est la source d'énergie qui active l'action de forage, elle est la partie la plus intéressante dans la turbine.

Le concept général de l'étude sera concentré sur l'optimisation du comportement de cette section en contrôlant la performance de ses étages. Cette performance dépend fortement du profil des aubes dans le stator et le rotor de chaque étage.

Le but du chapitre :

Le but du chapitre est d'améliorer la conception des aubes, l'étude publiera des profils différents de nouvelles aubes conçues du rotor et du stator pour réaliser les objectifs suivants :

- 1) La diminution du nombre d'étages dans la section puissance avec une augmentation de la puissance totale à la sortie à une même chute de pression totale pour le même débit.
- 2) Diminuer la poussée axiale pour le même débit.

Méthodologie :

La méthodologie de l'étude sera basée sur l'utilisation d'une simulation avec logiciel ANSYS qui utilise les outils : BLADEGEN, TURBO-GRID, CFX, CFD et Static Structural.

Le calcul manuel sera accompagné par une simulation bien expliqué du système **d'aubage** pour réaliser les concepts touchant les objectifs du projet.

La simulation avec ANSYS représente la performance réelle de la section de puissance, il est utilisé pour avoir des résultats précis sur la réalité.

II.1. Partie théorique de conception

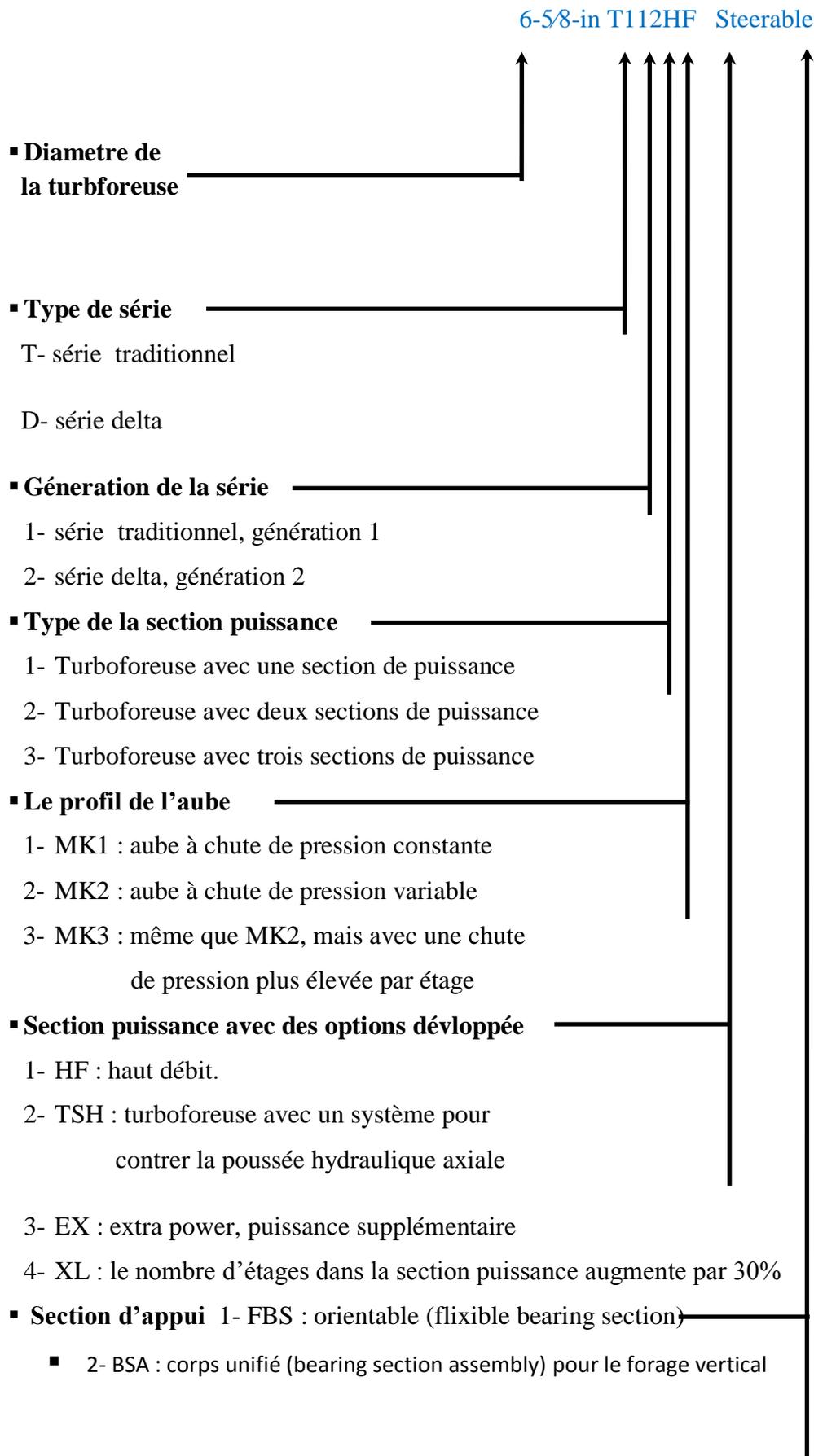
II.1.1. Caractéristiques principales du turboforeuse :

6-58-in T112HF Steerable

6-5/8-in TSH-MK2 FBS (ancien nomenclature)

Caractéristiques		
Diamètre de la turbine	6.625 in	168.28 mm
(A) La longueur totale	38.56 ft	11.76 m
(B) Distance entre l'outil et le centre de stabilisateur B	15.69 ft	4.78 m
(C) Distance entre l'outil et le boîtier d'orientation	5.7 ft	1.74 m
(D) Distance entre l'outil et le centre de stabilisateur D	0.77 ft	0.24 m
Connexion sur l'extrémité supérieure	4-1/2 IF box	4-1/2 IF box
Connexion sur l'extrémité inférieure	4-1/2 API Reg pin	4 1/2 API Reg pin
Le poids total	3750 lbm	1701 kg
Configuration d'inclinaison	0° à 1.5°	0° à 1.5°
Les outils recommandés	7-1/2 in à 9-7/8 in	
Données opérationnelles		
La vitesse de rotation : tour/gallon	690 à 1550 TPM	2.22 tour/gal
La chute de pression	1,050 à 3,200 psi	1,050 à 3,200 psi
La puissance de sortie maximale	595 hp	444 Kw
Le couple maximal	4,142 ft-lbf	5,616 N.m

Tableau 2 Caractéristiques principales du turboforeuse



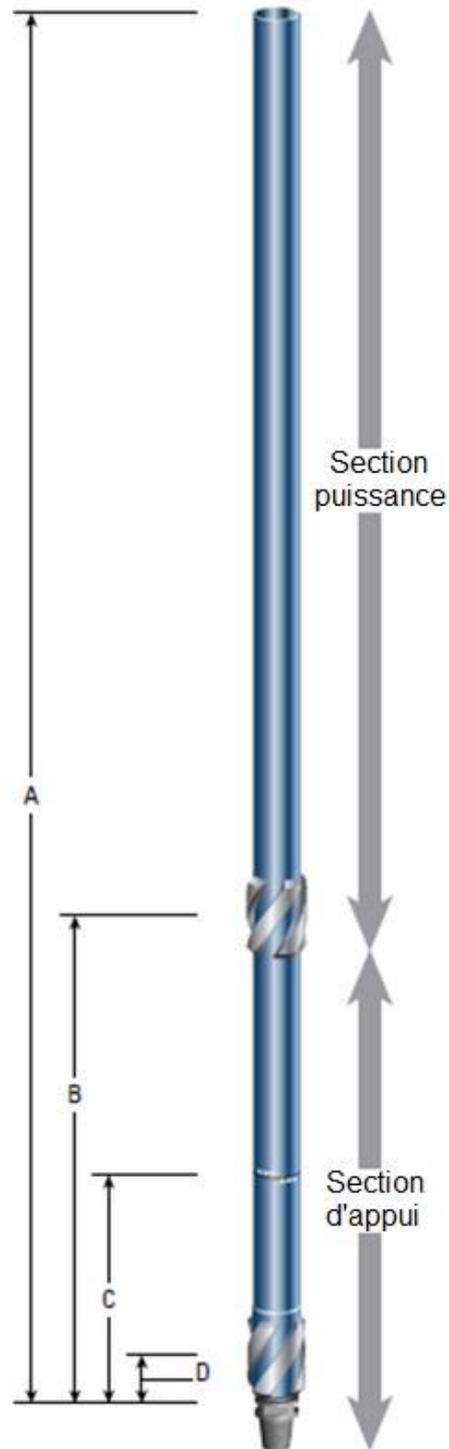


Figure 13 Caractéristiques géométrique de la turbo-foreuse TSH-MK2

Le concept d'optimisation à besoin de données départ de la société générés à partir des aubes d'origine, ces données comprennent tous les paramètres nécessaires pour l'étude.

II.1.1.1 Les données de départ :**Schlumberger : Turboforeuse 6-58 – TSH-MK2**

Paramètre	Unité	Type de paramètre	
Nombre d'étage	Nb	Paramètre d'entrée	100
Débit	Kg/s	Paramètre d'entrée	33.97
Densité	Kg/m ³	Paramètre d'entrée	1196.82
Rendement hydraulique	%	Paramètre d'entrée	56
Vitesse de rotation	TPM	Valeur calculée	1000
Puissance / étage	W	Valeur calculée	1364.63
Couple / étage	N.m	Valeur calculée	13.03
Chute de pression / étage	Pa	Valeur calculée	84895.51
Chute de pression / étage	mètre	Valeur calculée	7.22

Figure 14 Les données de l'entreprise.**II.1.1.2 Calcul manuel¹ :**

Le calcul manuel a pour but de déterminer les performances du turboforeuse:

- 1) Le couple.
- 2) La puissance.
- 3) La chute de pression.
- 4) La vitesse de rotation optimale.

II.1.2 Rappels théoriques :

L'analyse d'une turbomachine requiert à la connaissance de la vitesse de l'écoulement dans le passage inter-aube. Traditionnellement cette étude s'effectue à l'aide du diagramme ou triangle de vitesses. Ce concept permet d'obtenir représentation graphique compact du champ de l'écoulement étroitement lié à la géométrie des aubes.

¹ Dixon, S. L. (1998). Fluid Mechanics, Thermodynamics of Turbomachinery. Linacre House, Jordan Hill, Oxford OX2 8DP: pergamon Press.

Dans ce chapitre, on garde spécifiquement les détails du mécanisme de transfert d'énergie de notre turbomachine axiale "la turboforeuse". On rappelle que pour les turbomachines axiales, l'écoulement est principalement parallèle à l'axe de la machine, donc ne possède que très peu de vitesse radiale, par contre la vitesse tangentielle (de rotation autour de l'axe) peut être appréciable.

II.1.2 .1 Le triangle de vitesse :

Les machines axiales disposent d'une ou plusieurs ensembles de couronnes d'aubes fixes et mobiles, **une couronne d'aube fixes** reçoit le nom de stator et celle d'aube mobiles est appelée le rotor, l'ensemble rotor-stator est connu sous le nom d'étage.

D'une manière générale, le débit dans une turbomachine présente des composantes de vitesse le long de trois axes cylindriques (axial x , radial r et tangential θ).

L'étude classique des turbomachines axiales considère l'écoulement bidimensionnel, comme la turboforeuse est une machine axiale et pour simplifier l'étude on suppose que le débit ne varie que dans la direction axiale et tangentielle. Par la suite on construit un diagramme vectoriel en fonction de la vitesse de rotation et des vitesses relative et absolue de l'écoulement à l'entrée et à la sortie du stator et du rotor.

Cette méthode est utile pour visualiser les changements dans la vitesse et la direction de l'écoulement de fluide en raison de son interaction avec le système d'aube. Ce diagramme est nommée le triangle de vitesse et représenté sur la figure 15

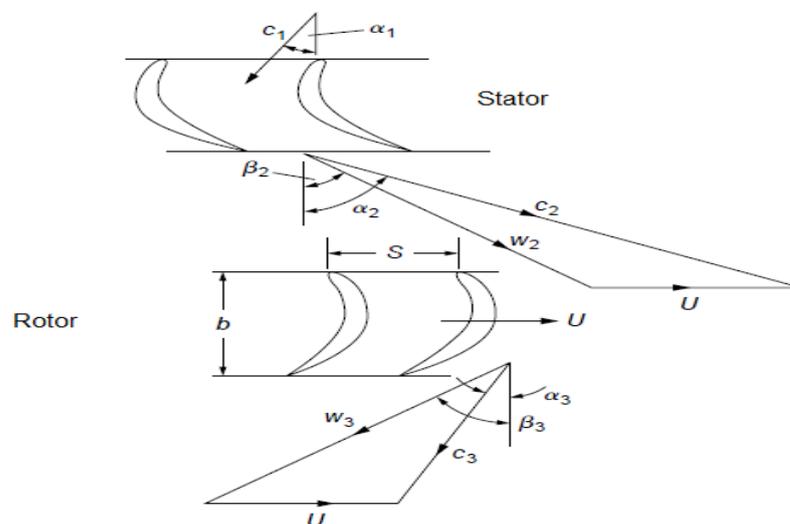


Figure 15 Triangle de vitesse d'un étage d'une turboforeuse

Le fluide entre dans le stator avec une vitesse absolue $C1$ à un angle absolu $\alpha1$ et accélère à une vitesse absolue $C2$ avec un angle absolu $\alpha2$.

La vitesse relative $W2$ à l'entrée de rotor se trouve en **soustrayant**, vectoriellement la vitesse de rotation de rotor U de la vitesse absolue $C2$.

L'écoulement relatif dans le rotor accélère à la vitesse $W3$ avec l'angle relative $\beta3$ à la sortie de rotor.

Tous les angles sont mesurés à partir de la direction verticale.

$\alpha2$ et $\beta3$ sont les angles caractéristiques de fluide à la sortie de stator et de rotor respectivement qui restent toujours constante avec la vitesse de rotation, et leurs variations affectent les performances de la turbine.

II.1.2.2 Définition des variables nécessaire pour l'étude :

➤ Cx : la composante axiale de la vitesse absolue, elle reste constante pour un débit donné.

$$Cx = \frac{Q}{A} \quad \text{avec} \quad A = \pi (r^2_{shroud} - r^2_{hub})$$

A : la surface axiale de la région générée par la l'aube.

Q : débit volumique.

r_{shroud} : la distance radiale de l'axe de rotation jusqu'à la limite supérieure de la l'aube.

r_{hub} : la distance radiale de l'axe de rotation jusqu'à la limite inférieure de la l'aube.

➤ \dot{m} : Le débit massique en kg /s.

$$\dot{m} = \rho . Q$$

r_m : Le rayon moyenne avec

$$r_m = \sqrt{\frac{r^2_{shroud} + r^2_{hub}}{2}}$$

$W2u$: La composante tangentielle de la vitesse relative du fluide à l'entrée du rotor.

$W3u$: La composante tangentielle de la vitesse relative du fluide à la sortie du rotor.

$C2u$: La composante tangentielle de la vitesse absolue du fluide à la sortie stator.

$C3u$: La composante tangentielle de la vitesse absolue du fluide à la sortie rotor.

N : La vitesse de rotation de rotor en TPM.

ω : La vitesse angulaire

$$\omega = \left(\frac{\pi}{30} \right) . N$$

T : Le couple développé par un seul étage.

P : La puissance développé par un seul étage.

$$P = T \cdot \omega$$

ΔP étage : La chute de pression au niveau d'un étage.

$$\Delta P \text{ étage} = \rho \cdot g \cdot H$$

H : La chute de pression en mètre.

η : Rendement hydraulique.

$$\eta = \frac{P}{\rho \cdot g \cdot H \cdot Q}$$

II.1.2.3 Equation d'Euler pour les turbines :

Les turbomachines fonctionnent selon le principe d'Euler, en écoulement radial ou axial.

L'équation d'Euler est obtenue à partir de l'équation de la conservation de la quantité de mouvement.

$$\iint_S \rho \vec{v} (\vec{v} \cdot \vec{n}) ds = \sum F_{ext}$$

Le flux de quantité de mouvement à travers une surface de contrôle fixe d'un écoulement permanent est égal à la résultante des forces extérieures appliquées au fluide inclus dans le domaine limité par cette surface.

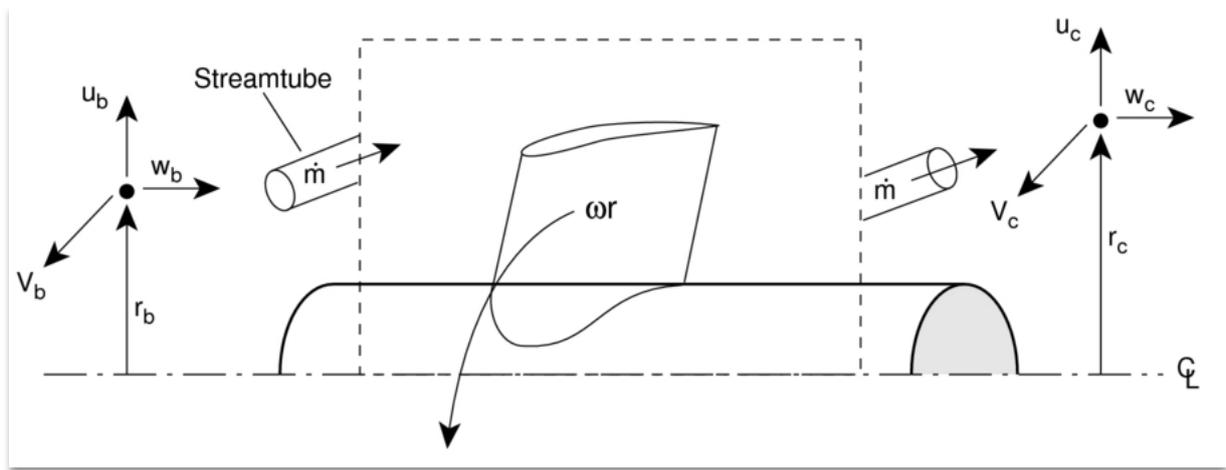


Figure 16 Volume de contrôle pour le rotor.

II.1.2.4 Le couple développé :

$$\iint_S \vec{z} \cdot (OM \wedge \rho \vec{v}) (\vec{v} \cdot \vec{n}) ds = \sum M_{ext}$$

$$T = \dot{m} (V_b \cdot r_b - V_c \cdot r_c)$$

Selon la direction V_c par rapport à V_b le sign (-) peut devenir (+) .

Le moment de la variation de la quantité de mouvement de débit massique de fluide égal au moment extérieur.

V_b et V_c sont les composantes tangentielles de la vitesse absolue à l'entrée et à la sortie de rotor respectivement.

$\dot{m}V_b$ et $\dot{m}V_c$ sont les quantité de mouvement de débit massique à l'entrée et à la sortie de rotor respectivement.

$\dot{m}V_b . r_b$ et $\dot{m}V_c . r_c$ sont le moment de quantité de mouvement de débit massique à l'entrée et à la sortie de rotor respectivement.

Revenant au triangle de vitesse, le couple développé par notre turbine est :

$$T = \dot{m} . rm (C_{2u} + C_{3u})$$

C_{2u} et C_{3u} sont les composantes tangentielles de la vitesse absolue du fluide à l'entrée et à la sortie de rotor respectivement.

II.1.2.5 L'équation de couple en fonction de la vitesse de rotation N:

$$T = \dot{m} . rm (C_x . \tan(\alpha_2) + C_x . \tan(\alpha_3))$$

$$\tan(\alpha_3) = \tan(\beta_3) - \frac{U}{C_x}$$

$$T = \dot{m} . rm [(C_x . \tan\alpha_2 + C_x (\tan\beta_3 - \frac{U}{C_x})]$$

$$T = \dot{m} . rm (C_x . \tan\alpha_2 + C_x \tan\beta_3 - U) \quad \text{on a : } \dot{m} = \rho . Q$$

$$T = \rho . Q . rm . C_x . \tan\alpha_2 + \rho . Q . rm . C_x \tan\beta_3 - \rho . Q . rm . U$$

$$\text{avec : } U = rm . \omega \quad \text{et} \quad \omega = \left(\frac{\pi}{30} \right) . N$$

Alors la formule finale de couple en fonction de la vitesse de rotation N devient :

$$T = \rho . Q . rm . C_x . (\tan\alpha_2 + \tan\beta_3) - \left(\frac{\pi}{30} \right) . \rho . Q . rm^2 . N$$

II.1.2.6 L'équation de la puissance en fonction des de la vitesse de rotation N:

$$P = T . \omega = [\rho . Q . rm . C_x . (\tan\alpha_2 + \tan\beta_3) - \left(\frac{\pi}{30} \right) . \rho . Q . rm^2 . N] . \left(\frac{\pi}{30} \right) . N$$

Alors la formule finale de la puissance en fonction de la vitesse de rotation N devient :

$$P = \left(\frac{\pi}{30}\right) \cdot \rho \cdot Q \cdot r m \cdot Cx \cdot (\tan\alpha_2 + \tan\beta_3) \cdot N - \left(\frac{\pi}{30}\right)^2 \cdot P \cdot Q \cdot r m^2 \cdot N^2$$

La variation de la puissance et du couple au niveau de la turboforeuse est présenté en fonction de la vitesse de rotation N (donnée d'entreprise). (figure17)

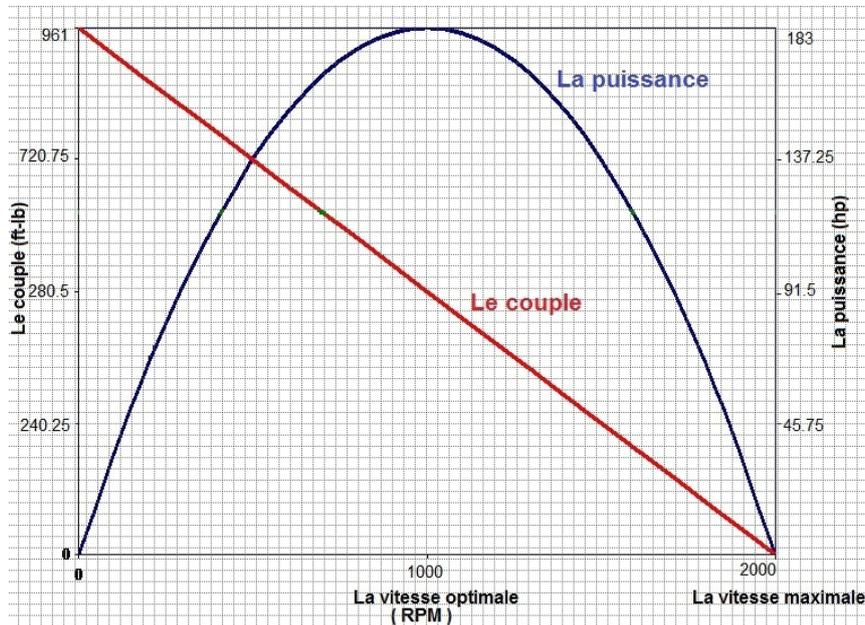


Figure 17 Courbe des caractéristiques mécaniques des turbines de forage

Les caractéristiques mécaniques sont mesurées et décrites pour un débit donné (Q)= 102.206118 m³/heure, et une densité (ρ) de fluide hydraulique donnée ρ = 1.2 kg/L.

Dans ce graphe on voit que la puissance nominale est définie comme la puissance maximale délivrée au débit nominal, le couple et la vitesse de rotation correspondant sont appelés couple nominal et vitesse nominale. Pour un débit donné, la puissance est égale à zéro au calage (début de rotation N≅0), et égale à zéro à la vitesse de rotation d'emballement (maximale) et la puissance maximale est obtenue lorsque la vitesse de rotation est la moitié de la vitesse d'emballement (maximale).

Le couple moteur varie de zéro avec l'outil au-dessus du fond (vitesse d'emballement) à une valeur maximale lorsque la turboforeuse est calée. Le couple d'entraînement d'un outil particulier est directement proportionnel au nombre d'étages de la turbine, il est proportionnel aussi au débit de la boue, de la densité de la boue et au rayon des aubes de turbine

II.2 Parties simulation (modélisation géométrique)**Plan d'Etude ANSYS :**

La simulation ANSYS comprend :

- 1) Le design de l'aube d'origine de l'entreprise avec ANSYS et effectuer une simulation sur un étage avec les mêmes conditions que celles utilisées par la société (la vitesse rotation, pression d'entrée et le débit de fluide).
- 2) Le calcul par CFX qui donne les valeurs à la sortie de:
 - Couple.
 - Puissance.
 - La chute de pression.
 - Le rendement hydraulique.

Avec 2D et 3D distributions de pression, des vitesses sur la surface de l'aube.

- 3) Etude sur la distribution des charges sur les surfaces des aubes comprend:
 - Les déplacements.
 - Les contraintes équivalentes (Von-mises).
 - Les déformations relatives.

Après avoir obtenu les résultats d'ANSYS et de calculs manuels pour les mêmes aubes, nous aurons l'occasion de comparer ces résultats avec les valeurs calculées par la société concernant : le couple, la puissance, la chute de pression, le rendement hydraulique.

Ce concept conduit à avoir confiance dans les calculs manuels et la simulation ANSYS effectuée, lorsque tous les résultats comparés sont très proches.

La simulation ANSYS sera concentrée sur l'étude d'un seul étage.

Définition de différentes parties de la simulation (Figure18):

- a) BLADEGEN de stator et rotor : responsable de la construction d'un étage complet de stator et rotor.
- b) TURBOGRID: responsable de générer un maillage pour le stator et rotor.
- c) CFX simulation: prend l'étage construit avec tous les conditions aux limites nécessaires, il active une simulation pour tout l'étage et nous donne les résultats à la sortie de : couple, puissance, chute de pression, des distributions avec des chartes graphiques, et représentations en 2D e 3D de vitesses, pression.

- d) Static structural : responsable d'étudier les contraintes et les déformations dans les surfaces des aubes.

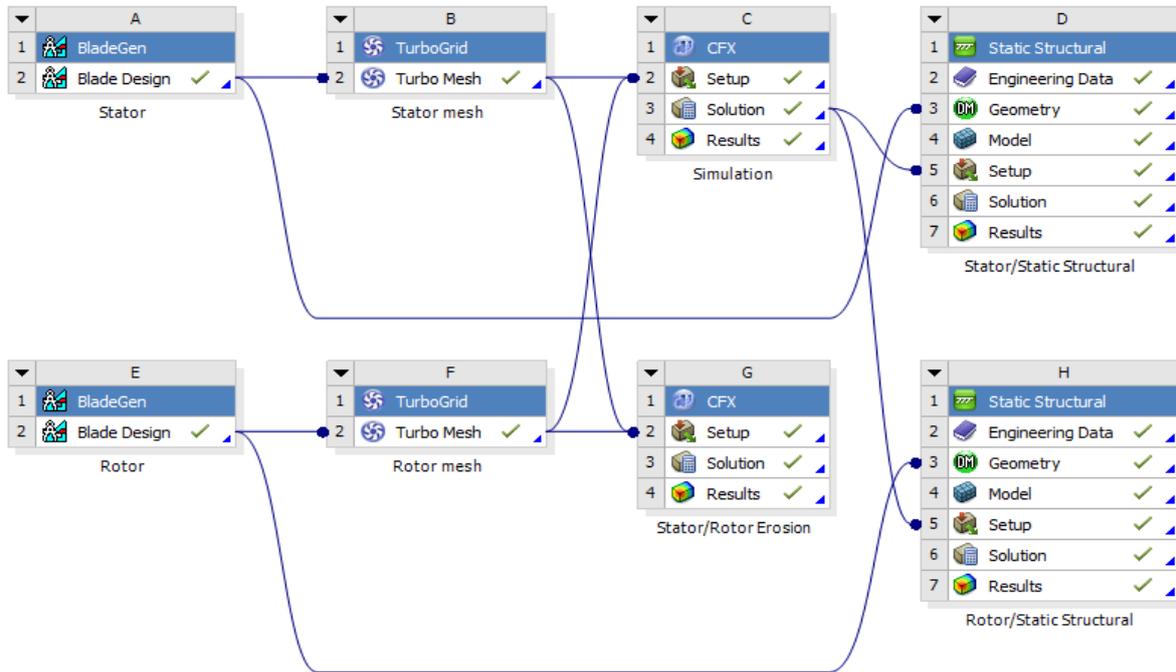


Figure 18 Vue générale de l'étude ANSYS.

II.2.1.BLADEGEN:

BLADEGEN (Blade Génération), est un outil de création de géométrie pour les turbomachines, il intègre une vaste expertise de turbomachines dans un environnement graphique.

C'est un outil spécialisé pour la conception 3D des composants rotatifs de machines, il est utilisé pour créer une forme 3D d'une aube et construire le stator et rotor.

La construction de stator et rotor commence par le design de la forme d'aube en 2D pour chaque rangée, les aubes de stators et rotors sont symétriques.

II.2.1.1. Courbe de Bézier :

Les courbes de Bézier sont des courbes paramétriques composées de point d'origine (P0), point final (P3) et des points d'interpolation (P1, P2 ...).

Ces courbes sont principalement utilisées dans l'interpolation et le rapprochement des courbes.

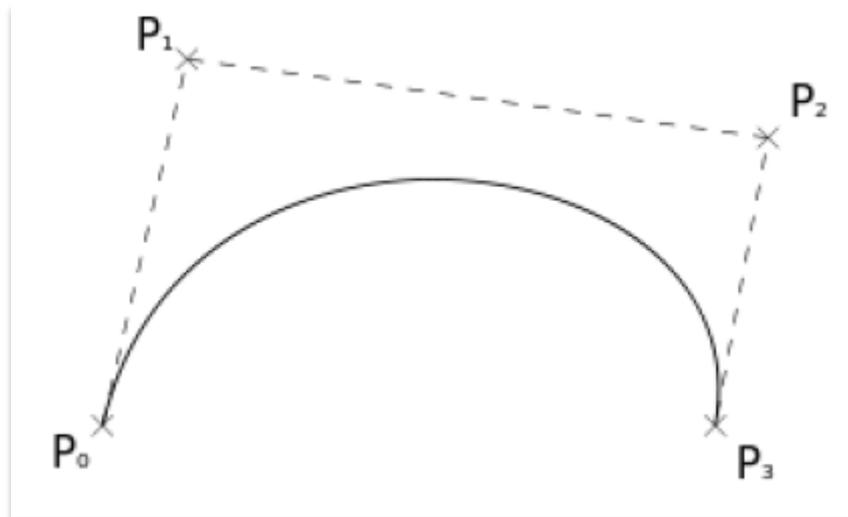


Figure 19 Courbe de Bézier

[P1; P0] et [P2; P3] ces segments restent tangents aux bords extrêmes de la courbe, modifier les positions de P1 et P2 conduit à modifier le comportement général de la courbe.

Ce type de courbe est largement utilisé pour la détermination et le contrôle de la forme générale des courbes d'une façon rapide et facile.

II.2.1.2 Construction de stator :

Le profil d'aube donnée par l'entreprise pour la turbine TSH-MK2 :



Figure 20 Le profil d'aube MK2

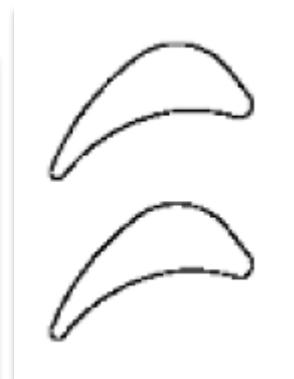


Figure 21 Etage de turboforeuse TSH-MK2

II.2.1.2.1. Configuration géométrique de stator :

Pour réaliser la configuration géométrique de stator il faut d'abord sélectionner :

- Le type de machine comme une machine axiale.
- Les dimensions de stator.

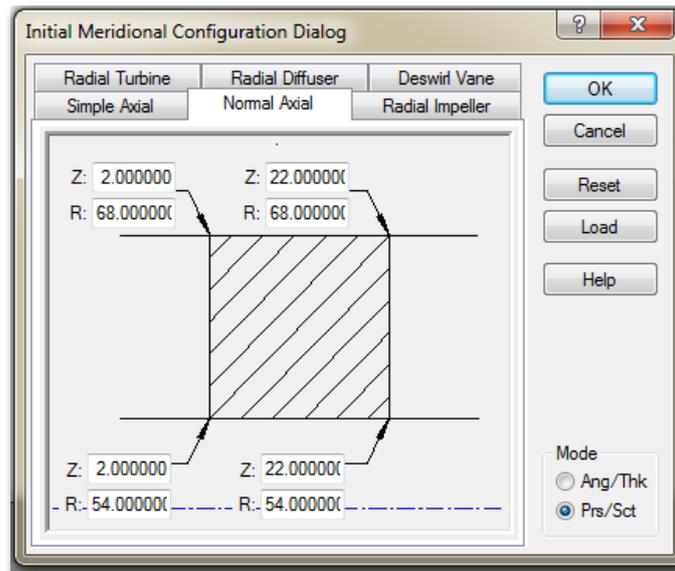


Figure 22 Position de l'aube de stator

- L'entrée de stator : $Z = 0$ mm
- La sortie de stator : $Z = 23.395$ mm
- L'entrée de l'aube : $Z = 2$ mm
- La sortie de l'aube : $Z = 22$ mm
- Stator shroud : $R = 68$ mm
- Stator hub : $R = 54$ mm

II.2.1.2.2. Configuration du profil de l'aube :

Bladegen donne la possibilité de réaliser ce profil grâce à la courbe de Bézier :

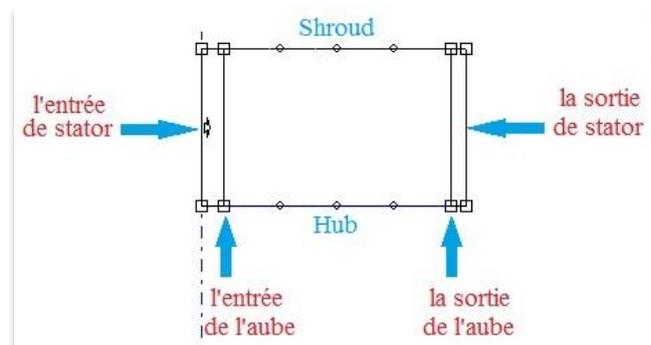


Figure 23 Position de stator.

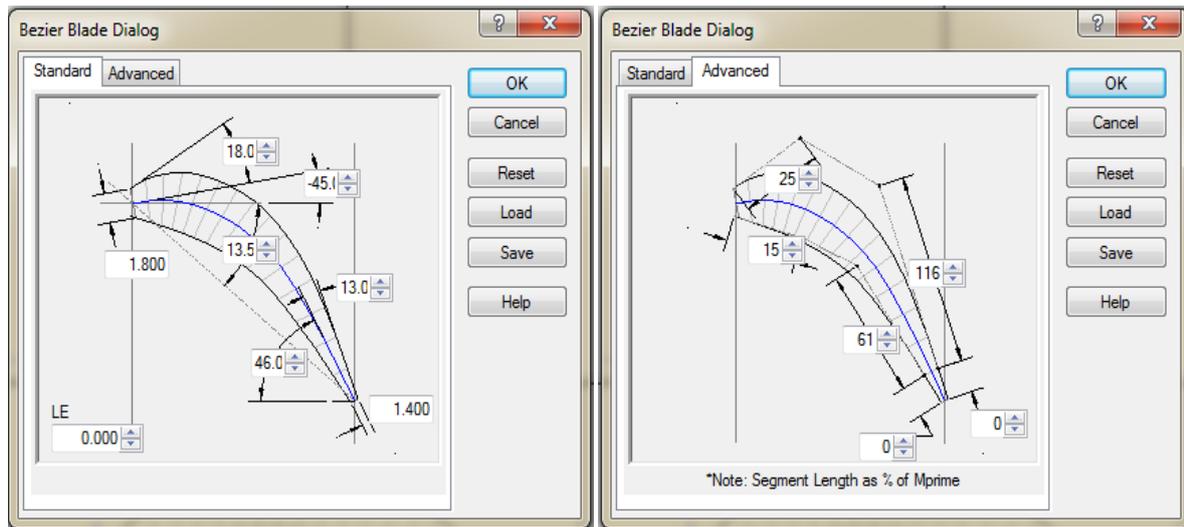


Figure 24 Les paramètres caractéristiques de la courbe de Bézier.

Définition des différents paramètres de la courbe de Bézier :

- (LE) Leading edge : le bord d'attaque de profil (amont de l'aube).
- (LE) Thickness : l'épaisseur de bord d'attaque.
- (LE) Wedge angle : l'angle entre la ligne moyenne du profil et la partie supérieure de bord d'attaque.
- (LE) Beta angle : l'angle du profil d'entrée, angle entre la ligne de ligne moyenne du profil et l'axe central de bord d'attaque.
- (TE) Trailing edge : le bord de fuite (l'aval de l'aube)
- (TE) Thickness : l'épaisseur de bord de fuite.
- (TE) Wedge angle : l'angle entre la ligne moyenne du profil et le profile de bord de fuite.
- (TE) Beta angle : l'angle du profil de sortie, angle entre la ligne de ligne moyenne de profil (squelette) et l'axe central de bord de fuite.
- Stagger Angle : angle de calage, angle entre la corde et la direction axiale.

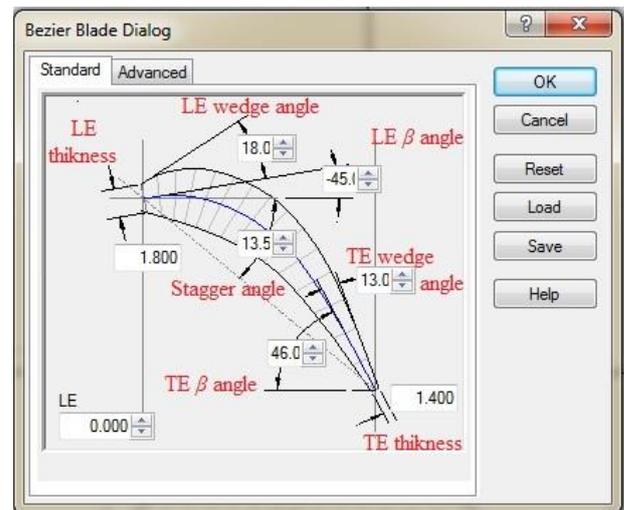


Figure 25 Les angles caractéristiques de l'aube

- Camber Length : la longueur de la ligne moyenne du profil (le squelette).
- Cord length : la corde du profil (C), distance entre le bord d'attaque et le bord de fuite.
- Meridional Length : la corde axiale (b) , corde projeté selon la direction axiale.
- Solidity : la solidité, le rapport C/S qui control l'espacement des aubes, S est la distance entre les aubes.

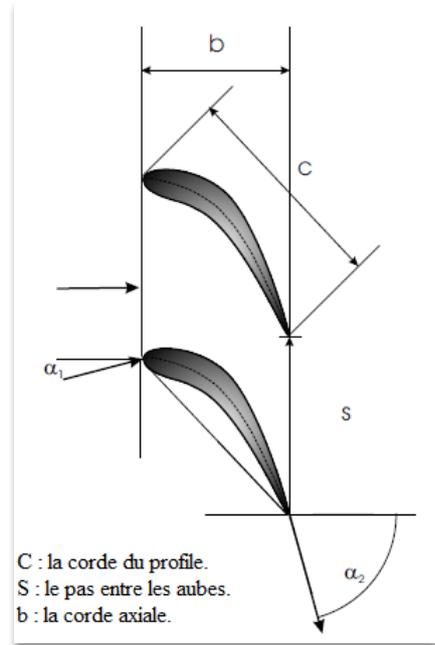


Figure 26 II.14. Les paramètres géométriques de l'aube

Paramètre de l'aube	Paramètre de Bézier
La ligne moyenne = 23.981mm	Angle de calage = 13.5°
Corde du profil (C) = 20.5685 mm	LE Beta angle : l'angle du profil d'entrée = 45°
Corde axiale = 20 mm	TE Beta angle : l'angle du profil de sortie = 46°
Solidité C/S = 1.81866	LE Wedge angle = 18°
Le pas entre les aubes(S) = 11.3mm	TE Wedge angle = 13°
	LE Thickness : l'épaisseur de bord d'attaque = 1.8 mm
	TE Thickness : l'épaisseur de bord de fuite = 1.4 mm

Tableau 3 Paramètres caractéristiques de l'aube.

a) Les points caractéristiques de l'aube :

- Les points de l'extrados :

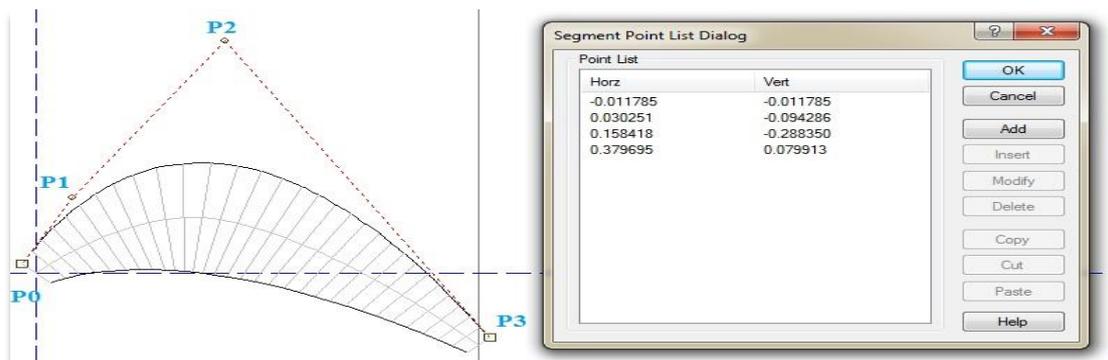


Figure 27 Les points de Bézier de l'extrados.

Les points caractéristiques de l'intrados :

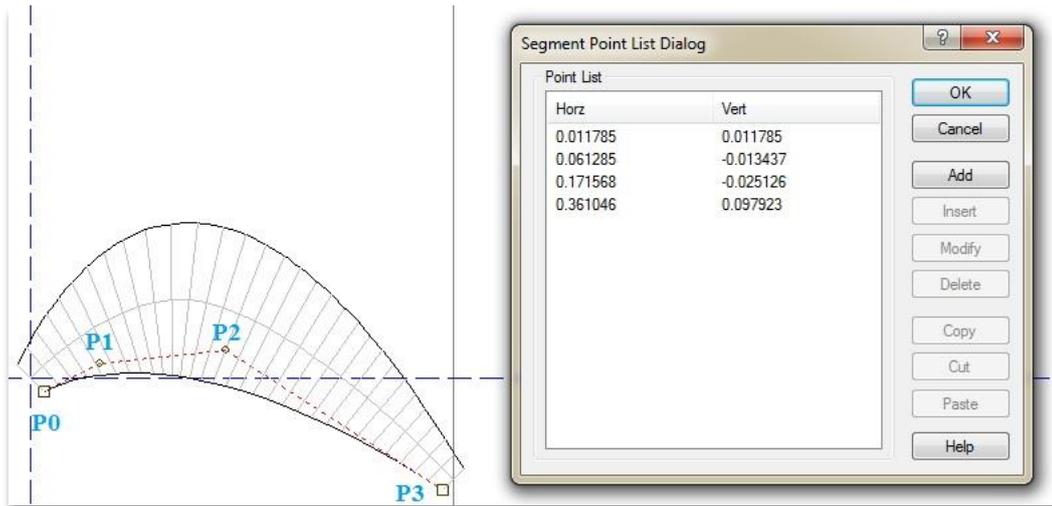


Figure 28 Les points de Bézier de l'intrados

b) Les propriétés de modèle :

Le modèle turbine est choisi avec une configuration axiale, le type de rotation comme stationnaire, l'unité définit en millimètres.

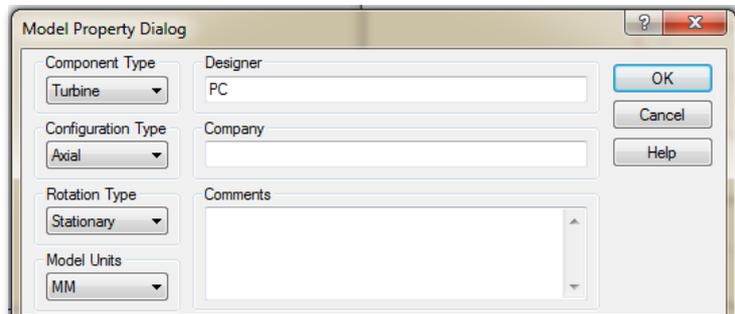


Figure 29 Les propriétés de modèle

c) Le nombre d'aube :

Le nombre d'aube choisi est 30 aubes.

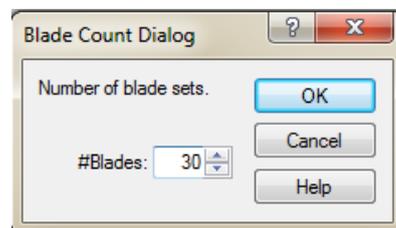


Figure 30 Le nombre d'aube

Après la réalisation de ces étapes, nous arrivons à la forme finale de stator :

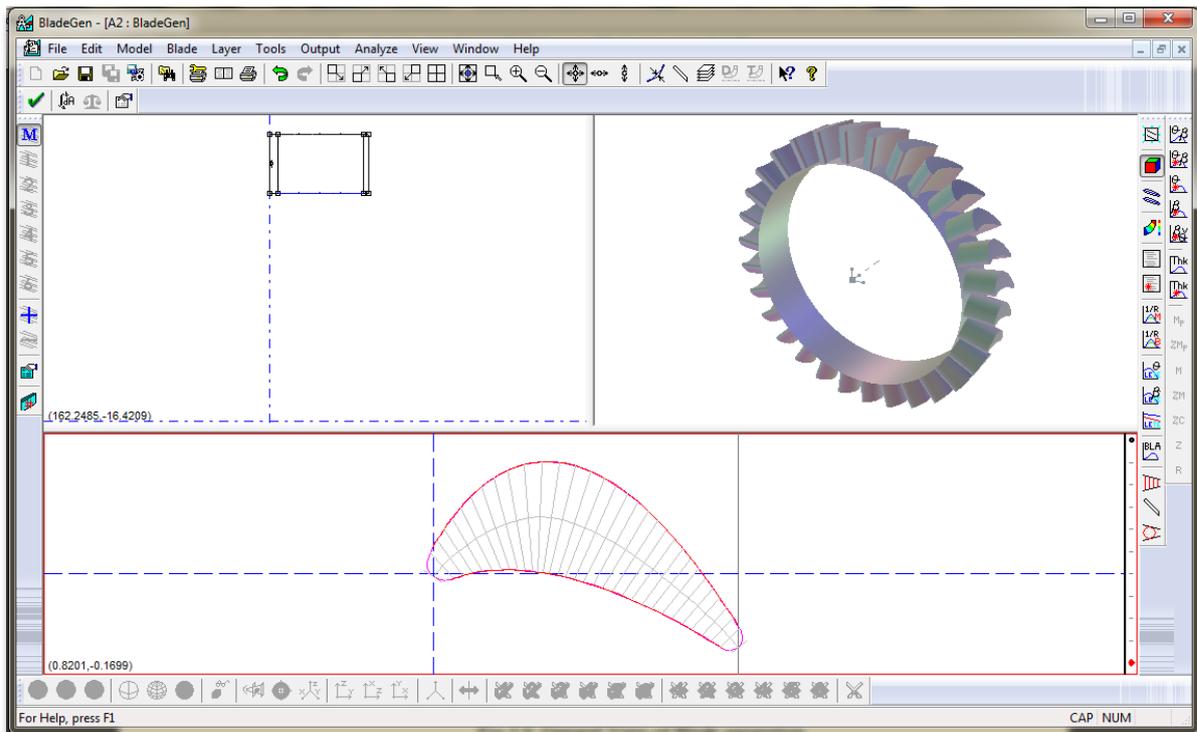


Figure 31 La forme finale de stator

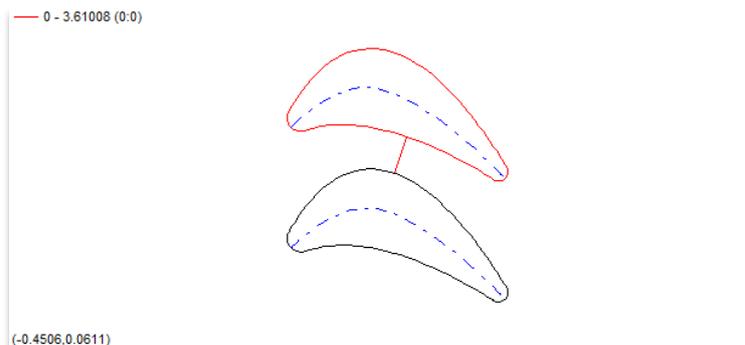


Figure 32 Vue 2D de deux aubes consécutives du stator

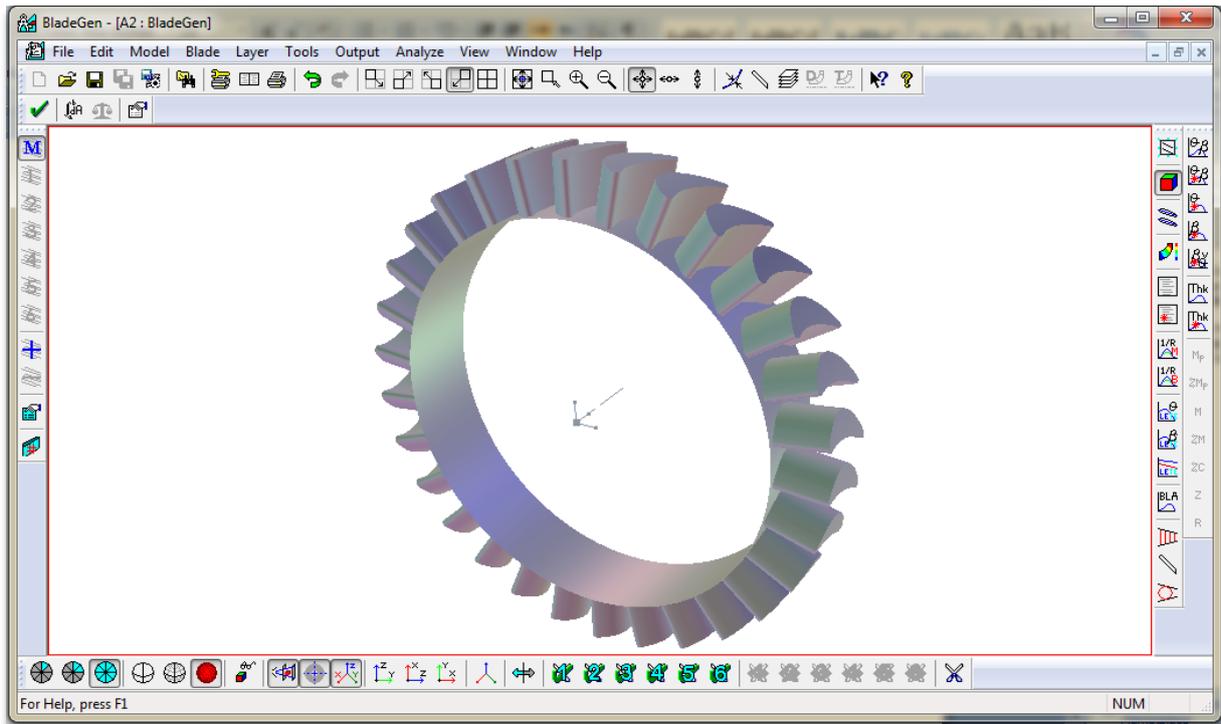


Figure 33 Vue 3D de stator (Shroud caché)

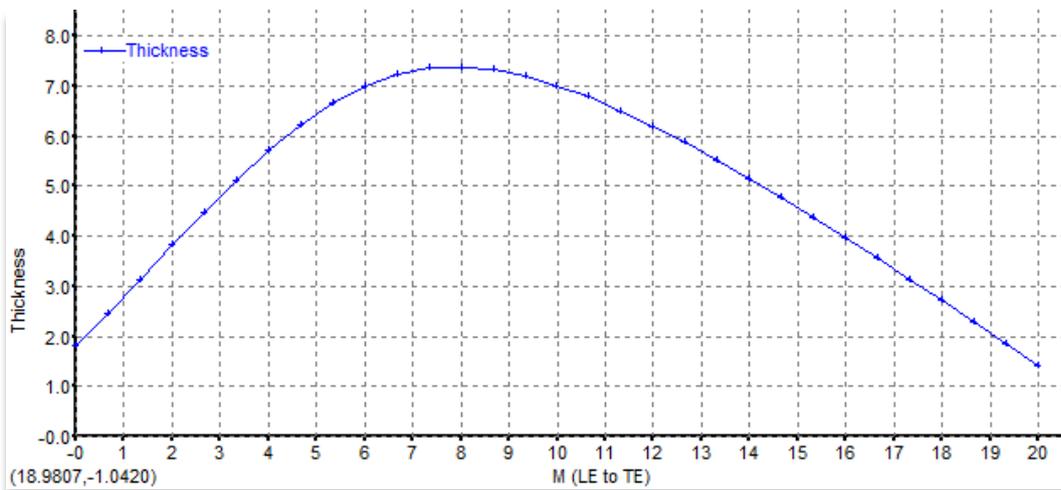


Figure 34 La variation de l'épaisseur en fonction de la ligne moyenne

Explication de la courbe :

Cette courbe montre la variation de l'épaisseur de l'aube en fonction de la ligne moyenne, au niveau de bord d'attaque l'épaisseur est 1.8 mm, et à la sortie de l'aube sa valeur est 1.4 mm. La valeur maximale de l'épaisseur est 7.4 mm et elle est obtenue lorsque la longueur de la ligne moyenne est 8 mm.

II.2.1.3. Construction de rotor :

La construction de rotor aura la même méthodologie utilisée avec la construction de stator, mais avec une action supplémentaire d'inverser la géométrie des aubes de rotor, et éditer la position de rotor.

II.2.1.3.1. Configuration géométrique de rotor :

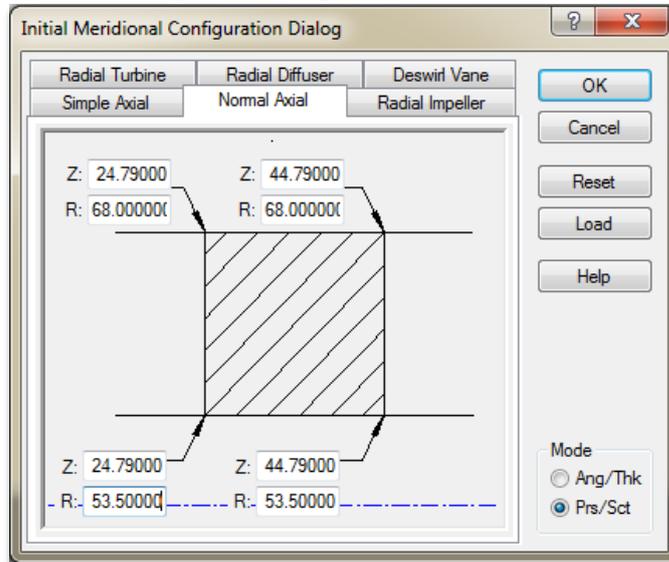


Figure 35 Position de l'aube de rotor

- L'entrée de rotor : $Z = 23.395$ mm
- La sortie de rotor : $Z = 46.79$ mm
- L'entrée de l'aube : $Z = 24.79$ mm
- La sortie de l'aube : $Z = 44.79$ mm
- Rotor shroud : $R = 68$ mm
- Rotor hub : $R = 53.5$ mm

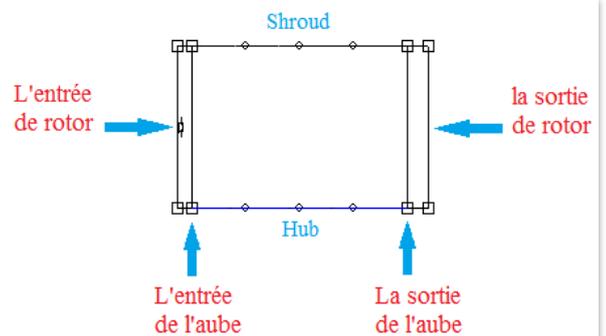


Figure 36 Position de rotor

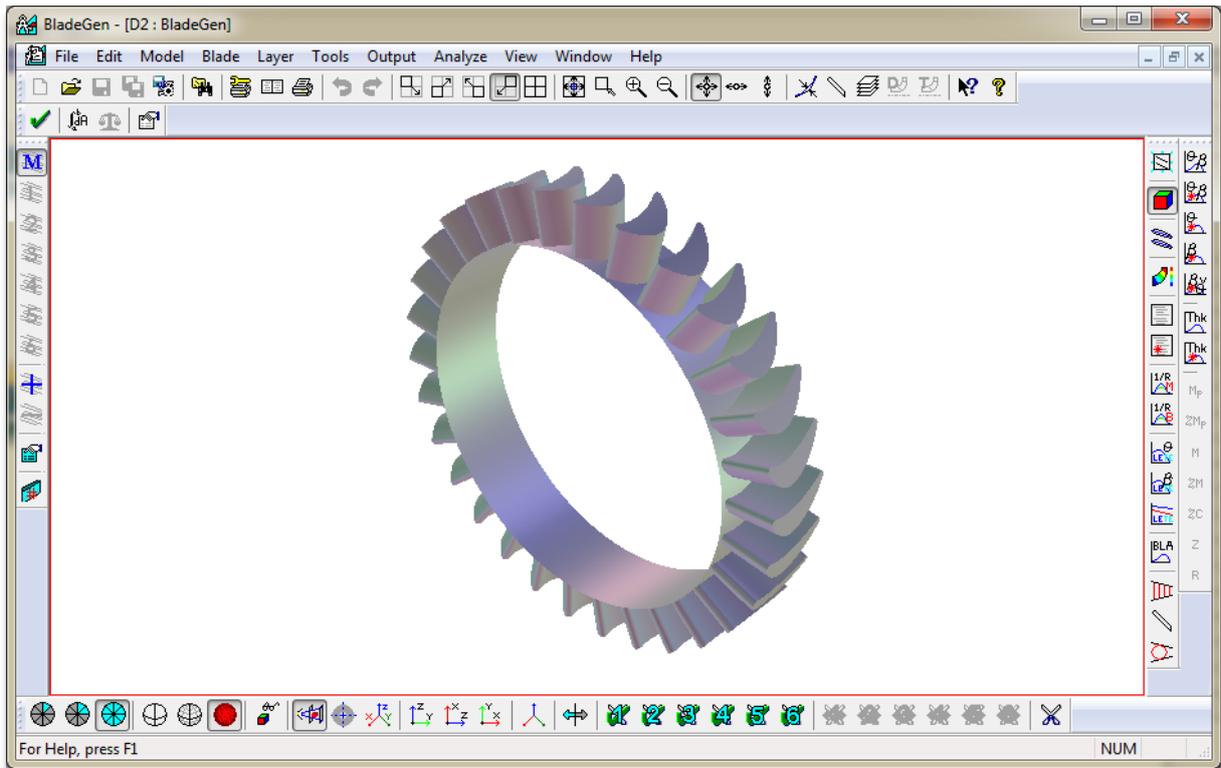


Figure 37 Vue 3D de rotor

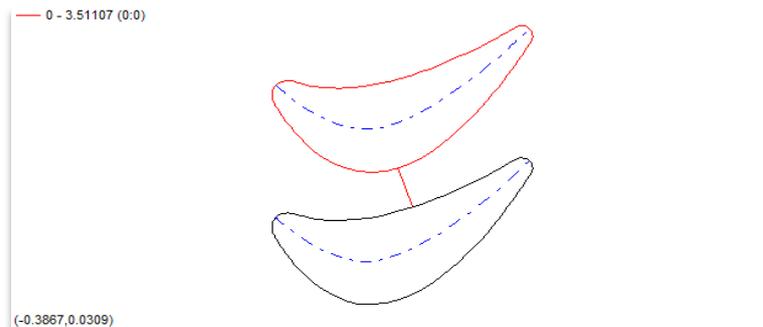


Figure 38 Vue 2D de deux aubes consécutives du rotor

II.2.2 TURBOGRID :

TURBOGRID est un outil puissant qui crée des maillages de haute qualité, en utilisant une topologie qui permet de créer automatiquement le maillage sur la géométrie de l'aube : (ATM) technology, il nous donne un maillage lisse de hautes résolutions qui nous assure une analyse rapide et précise de la dynamique des fluides.

TURBOGRID vient après la construction de stator et rotor. Il utilise la géométrie déjà créée par BLADGEN. TURBOGRID est responsable de générer le maillage l'étage (stator-rotor) qui est nécessaire pour les simulations.

En cliquant sur la mise à jour de TURBOGRID (update), le maillage est automatiquement créé pour le stator et le rotor. Le maillage de stator et rotor est réalisé de la même manière.

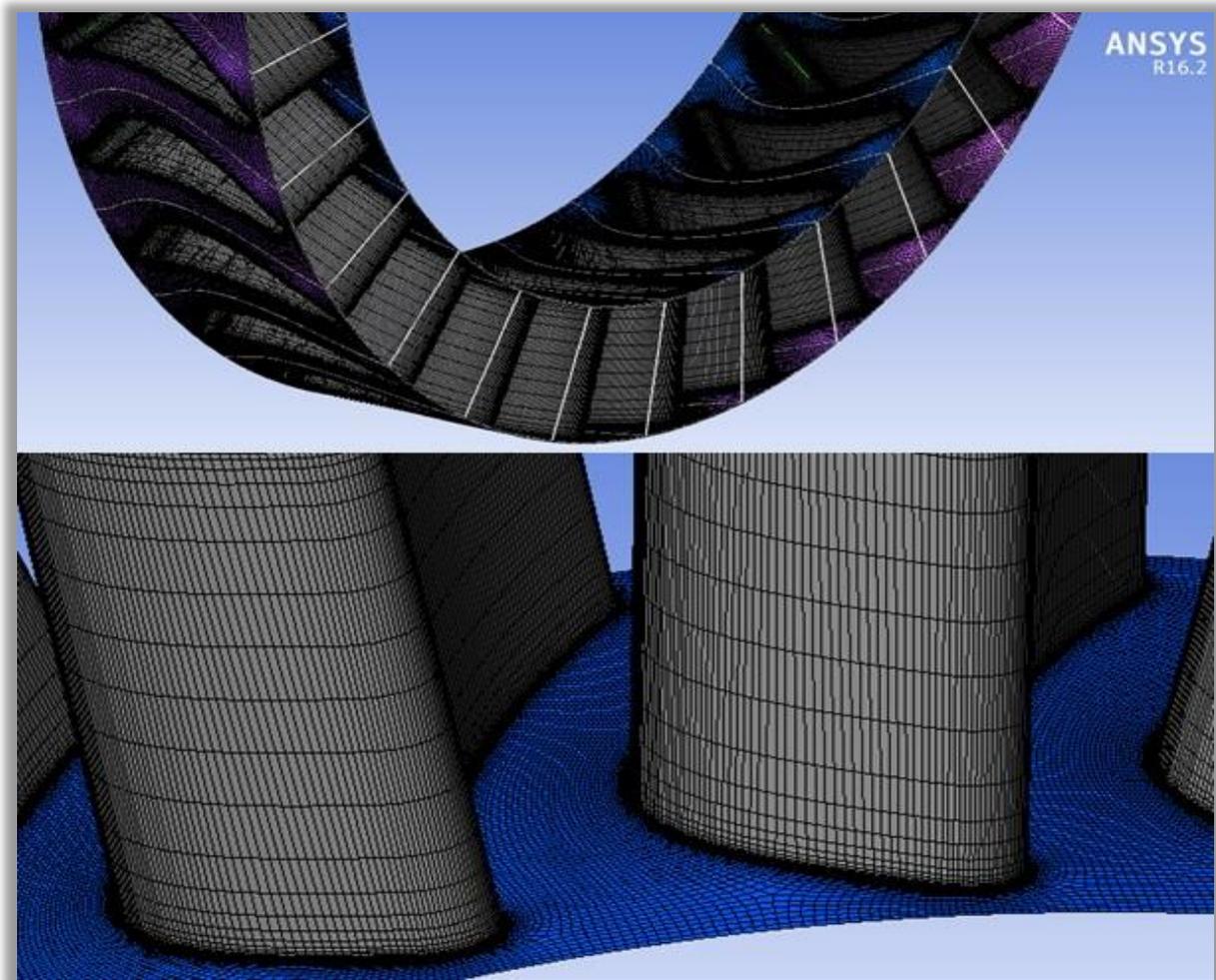


Figure 39 Le maillage de stator

II.2.3. CFX Simulation:

Après la création de maillage pour le stator et le rotor par TURBOGRID, l'initiation de la simulation commence par ANSYS CFX pour le calcul de dynamique des fluides dans l'étage turbine.

Il permet d'effectuer une analyse d'écoulement du fluide incompressible à travers la géométrie des aubes, de plus le maillage réalisé par TURBOGRID, on va spécifier les conditions aux limites et CFX va résoudre les calculs et afficher les résultats correspondants.

Trois composants de simulation sont présentés à l'intérieur de CFX :

- 1) Setup (Configuration).
- 2) Solution.

3) Résultats (résultats).

II.2.3.1 Setup (Configuration):

La simulation commence par sélectionner le mode TURBO dans la configuration, un mode spécialisé permettant de mettre en place des simulations de turbomachines.

Chaque composant du Stator-Rotor est défini par l'importation de leur maillage à partir du turbogrid, puis l'identification des paramètres de base et des conditions aux limites.

Basé sur le modèle - etage interface- (l'interface de l'étage) inclus dans CFX-Setup, où le champ d'écoulement est répété dans plusieurs régions de rotation identiques, alors une seule région doit être résolu et les limites sont spécifiés comme –Periodic (périodique).

Par conséquent, une seule aube de stator et une aube de rotor sont présentés pour la simulation, cette méthode est efficace et les calculs seront réduits de manière significative.

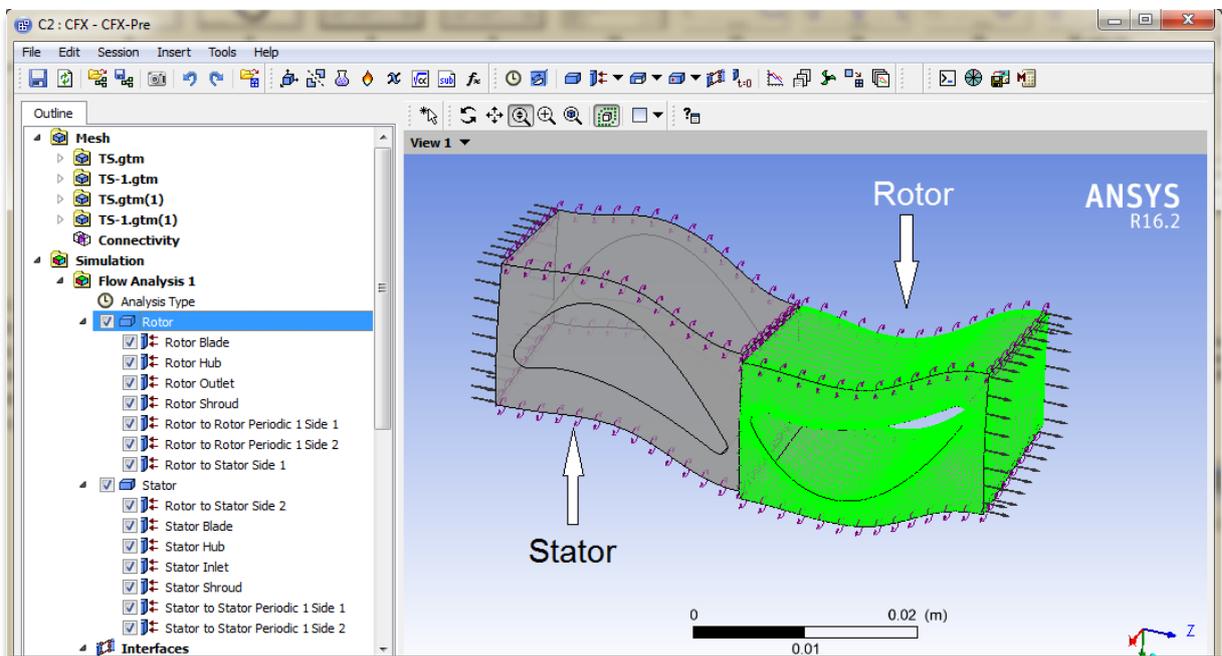


Figure 40 Vue 3D de stator-rotor :

seulement deux aubes de rotor et stator sont présentés pour la simulation

Remarque : Propriétés de fluide

Le type de fluide utilisé est un liquide possèdent les mêmes caractéristiques que l'eau mais avec une densité déferente. Ce liquide est considéré comme le fluide de forage principal.

- Viscosité dynamique : 8.899×10^{-4} (kg/m·s).
- Densité : 1196.82 (kg/m3).

- Masse molaire : 18.02 (kg/kmol).
- La capacité thermique spécifique : 4181.7 (J/kg·K).
- Conductivité thermique : 0.6069 (W/m·K).
- Coefficient de dilatation : 2.57×10^{-4} (1/K).

II.2.3.1.1 Démarrage du mode Turbo

a) Paramètres de base :

- Spécification du type de machine comme une turbine axiale.
- Le type d'analyse : régime stationnaire (steady state).

La dépendance temporelle des caractéristiques de débit peut être spécifiée comme état stationnaire ou transitoire, la simulation en régime stationnaire, par définition, considère les caractéristiques de l'écoulement ne changent pas avec le temps, elle nécessite aucune information en temps réel pour la décrire.

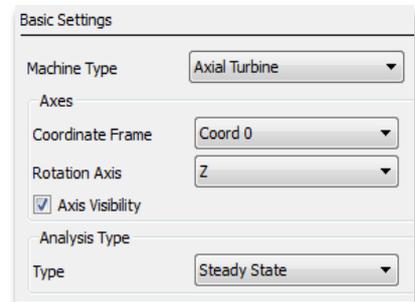


Figure 41 Spécification du type de machine et type de l'analyse

b) La création d'un système composé de stator et rotor :

- 1) Le premier composant 'le stator' est spécifié avec un statut stationnaire.
- 2) Le deuxième composant 'le rotor' est ajouté avec un état de rotation.
- 3) La vitesse de rotation sélectionnée est 1000 TPM (c'est la vitesse de rotation donné par l'entreprise).

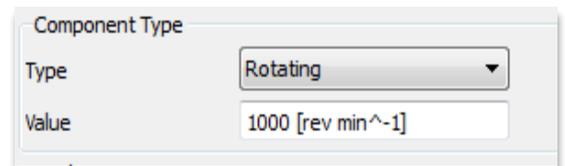


Figure 42 Vitesse de rotation sélectionnée

c) Définition Physique :

Les équations relatives à l'écoulement de fluide peuvent être fermées (numériquement) par la spécification des conditions sur les limites extérieures du domaine de calcul.

Il faut spécifier toutes les variables possibles au niveau de l'endroit de l'étude afin de placer des restrictions dans la formulation mathématique qui permettent d'obtenir une solution résultante unique.

Les conditions aux limites spécifiées devraient être suffisantes pour assurer une solution unique. Pour réaliser notre simulation, les conditions aux limites sont fixées par :

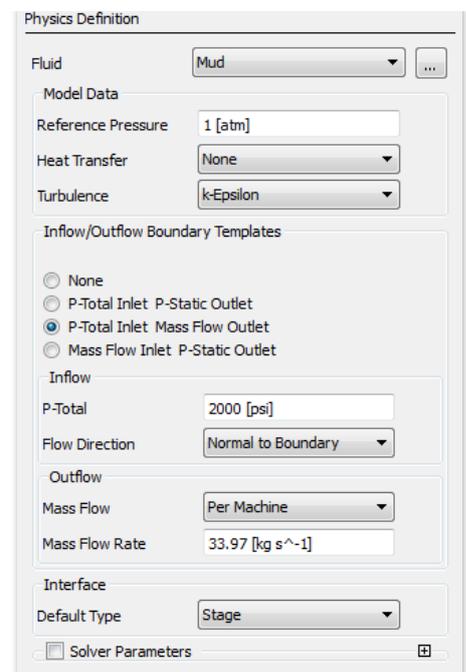


Figure 43 Les paramètres physiques

- Une pression totale à l'entré de stator 2000 PSI.
- Un débit massique à la sortie de rotor 33.97 kg /s.

Le transfert de chaleur n'est pas inclus dans l'analyse. La turbulence sélectionnée comme K-epsilon.

d) Définitions de l'interface :

Elle représente les connexions appliquées entre le rotor et le stator.

- **l'interface axiale entre rotor et stator est sélectionnée par :**

Face 1: Stator outflow (la sortie de stator).

- Face 2: Rotor Inflow (l'entrée de rotor).
- Type de l'interface : Stage (étage).

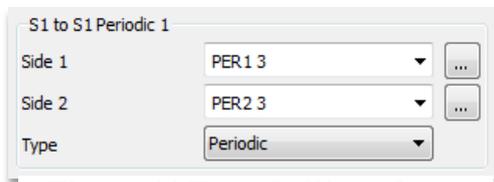


Figure 44 Type de l'interface : étage

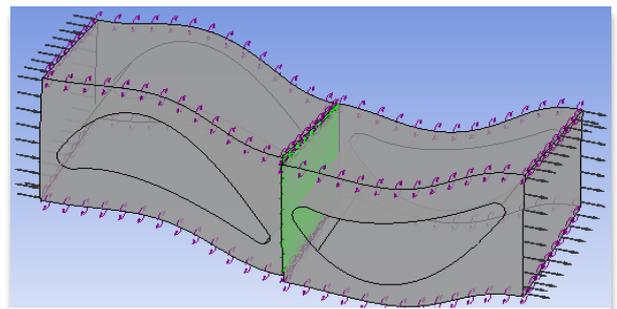


Figure 45 L'interface axiale entre le stator et rotor

- **l'interface rotationnelle (radiale) au niveau de stator et rotor est sélectionnée par :**
Interfaces radiales périodiques pour chaque élément.

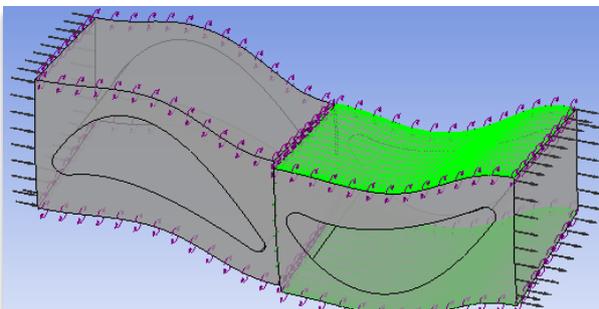


Figure 47 L'interface radiale de rotor

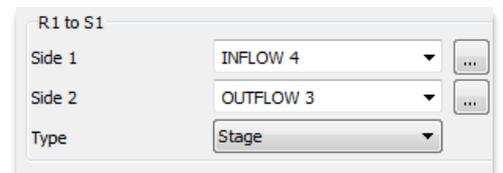


Figure 46 Type de l'interface : périodique

- e) **Insertion des surfaces de rugosité en sélectionnant une rugosité de 24 micromètres pour chacun des :**

- 1) L'aube de rotor.
- 2) Rotor Hub.
- 3) L'aube de Stator.
- 4) Stator Hub.
- 5) Stator Shroud.

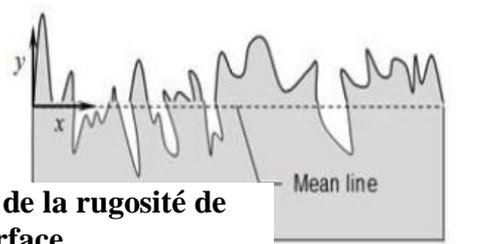


Figure 48 Vue de la rugosité de surface

II.2.3.2. CFX Solution:

CFX Solution effectue un certain nombre d'itérations pour obtenir les résultats, avec une erreur résiduelle global entre deux itérations consécutives.

La solution donne sa convergence idéale lorsque le résidu global converge vers zéro, résidus faibles signifient une solution plus précise.

Dans cette étude, en vue de réaliser la convergence de la solution à un niveau acceptable, un certain nombre d'itérations a été réglé à une valeur de 100 Itérations

Après l'exécution de 100 itérations, une solution de convergente a été remarquée avec des résidus minimaux.

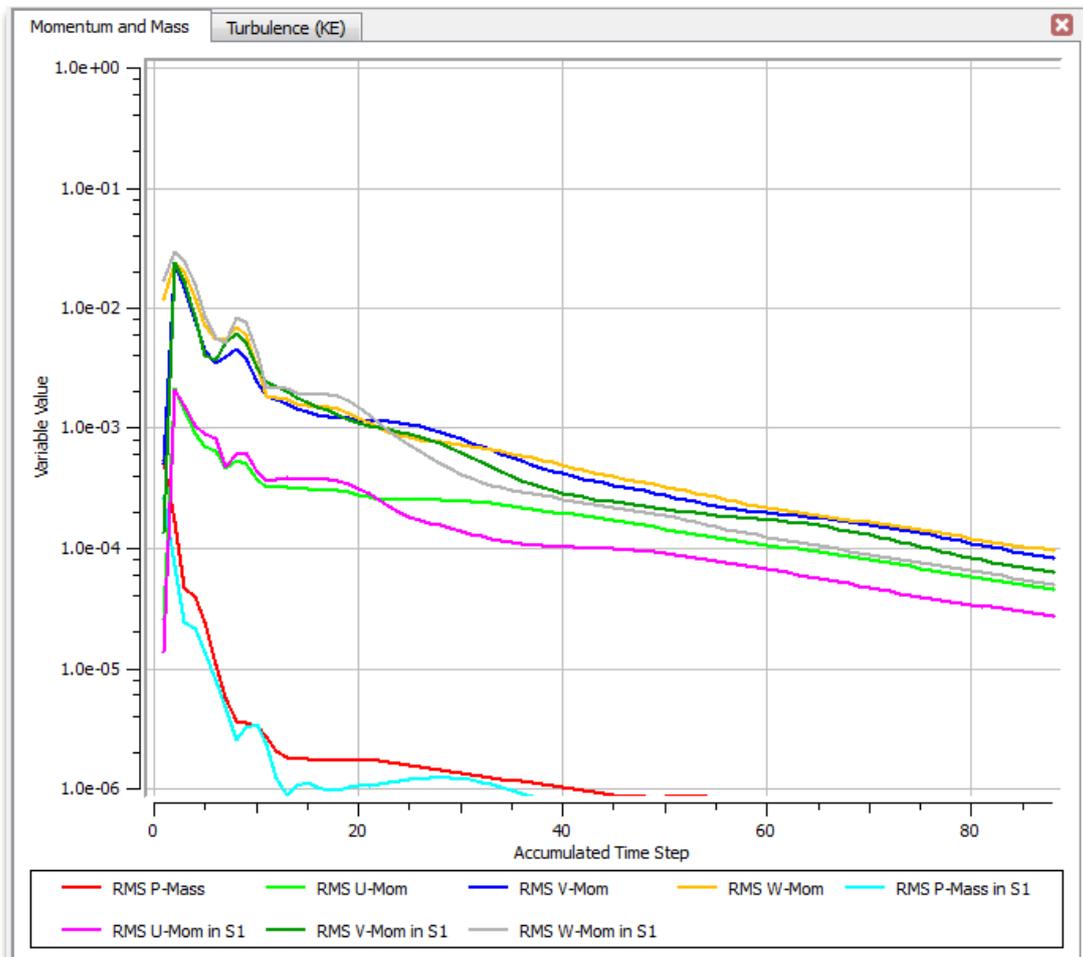


Figure 49 L'erreur résiduelle globale en fonction du nombre d'itérations

II.2.3.3 Les résultats de CFX

Après avoir une solution convergente, les résultats CFD permet de visualiser les différents paramètres, y compris la vitesse, la distribution de pression de fluide sur l'ensemble rotor-stator.

Ces paramètres peuvent être visualisés sous forme de 2D, 3D et des graphes avec un rapport de la turbine.

a) Présentation graphique des résultats de CFX:

- Présentation 3D pour la surface de l'aube :

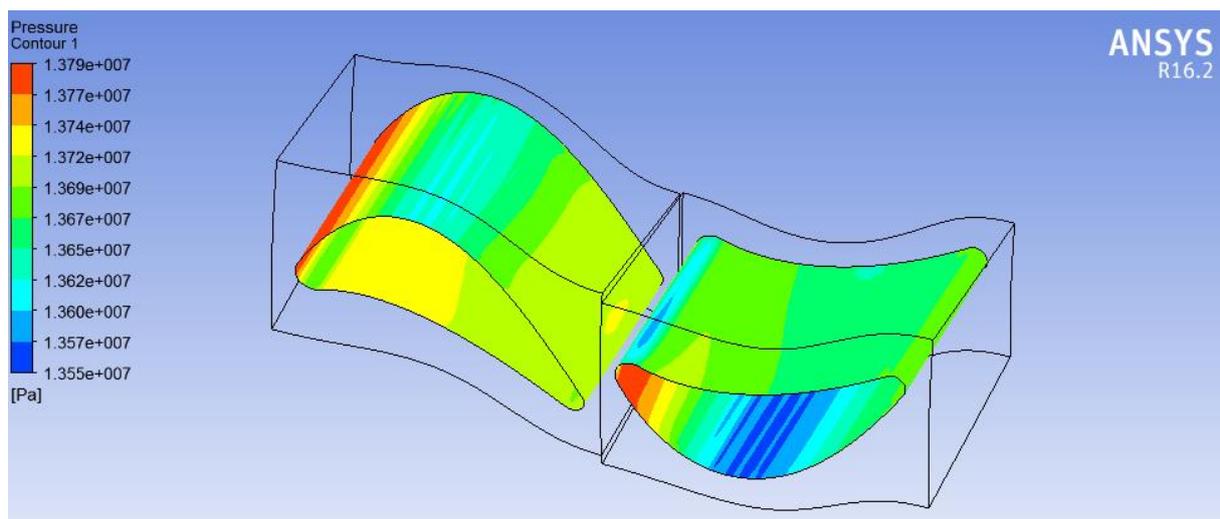


Figure 50 La distribution de la pression sur la surface de l'aube

- Présentation 3D concernant le domaine de fluide :

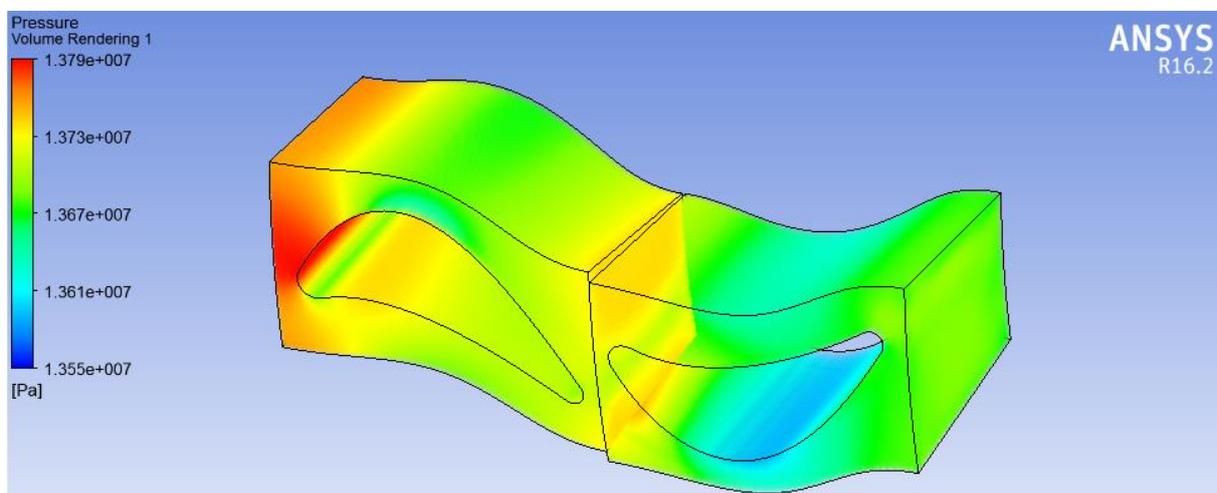


Figure 51 Présentation 3D de la distribution de la pression du fluide

- **Présentation 2D concernant le domaine de fluide :**

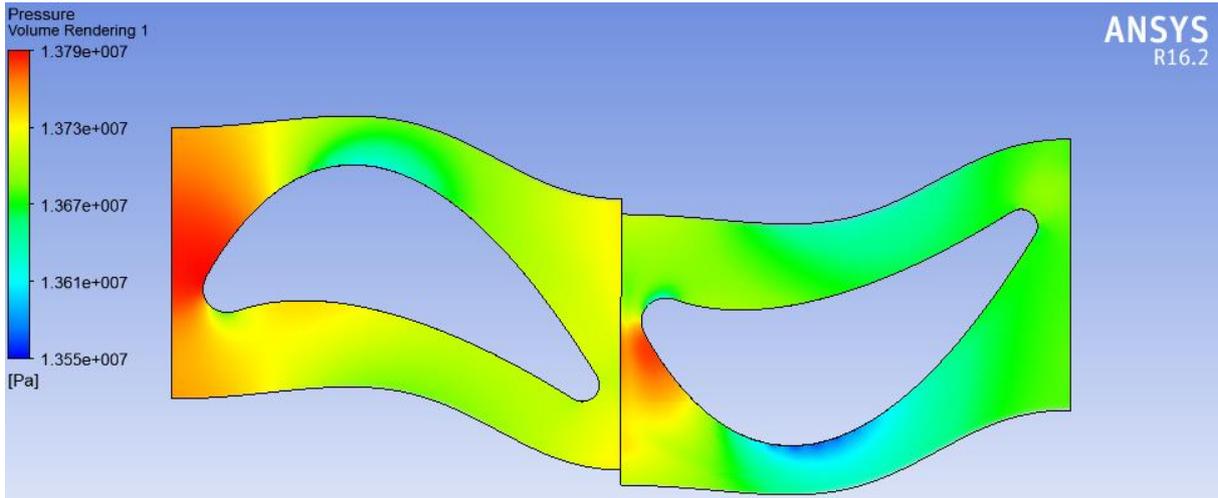


Figure 52 Présentation 2D de la distribution de la pression du fluide

Cette figure montre que la pression de fluide est maximale au niveau de bord d’attaque de stator et de rotor, c’est ta dire à l’entrée de stator et rotor et sa valeur 1.379×10^7 Pa, et elle est minimale au niveau de la partie empruntant (supérieure) de l’extrados de stator et de rotor à une valeur environ de 1.361×10^7 Pa, on voit aussi que la pression de l’intrados varie entre 1.367×10^7 Pa et 1.373×10^7 Pa et elle est supérieure à celle de l’extrados.

- **Présentation 3D concernant distribution de vitesse du fluide**

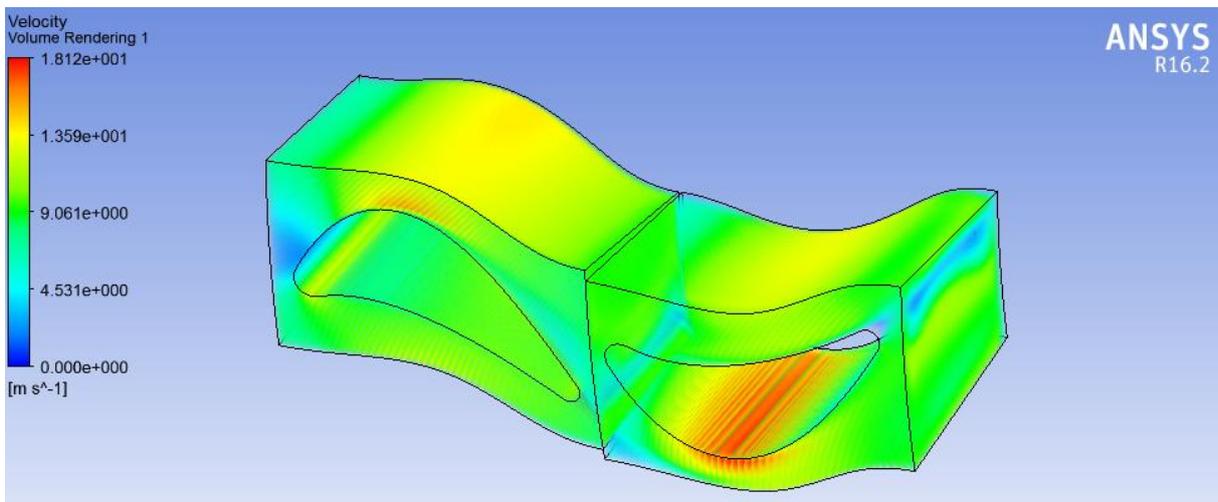


Figure 53 Présentation 3D de la distribution de vitesse du fluide

- Présentation 2D concernant distribution de vitesse du fluide

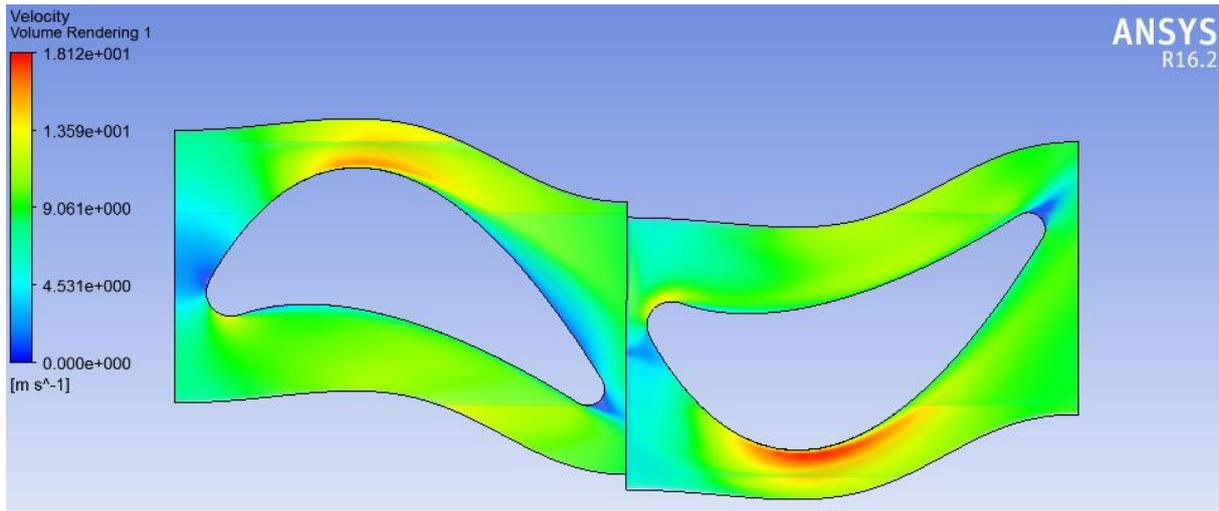


Figure 54 Présentation 2D de la distribution de vitesse du fluide

Cette figure montre que la vitesse l’écoulement est maximale au niveau de la partie empruntant (supérieure) l’extrados de stator et rotor sa valeur est environ 18 m/s, et minimale au niveau de bord d’attaque et le bord de fuite de stator et de rotor environ 2 m/s. La vitesse au niveau de l’intrados environ de 9 m/s et elle est inférieure par rapport à la vitesse de l’extrados.

b) Les graphes de différents paramètres en fonction de la distance entre l’entrée et la sortie de l’étage :

- 0 – 1 représente les limites de stator, -1 – 2 représente les limites de rotor

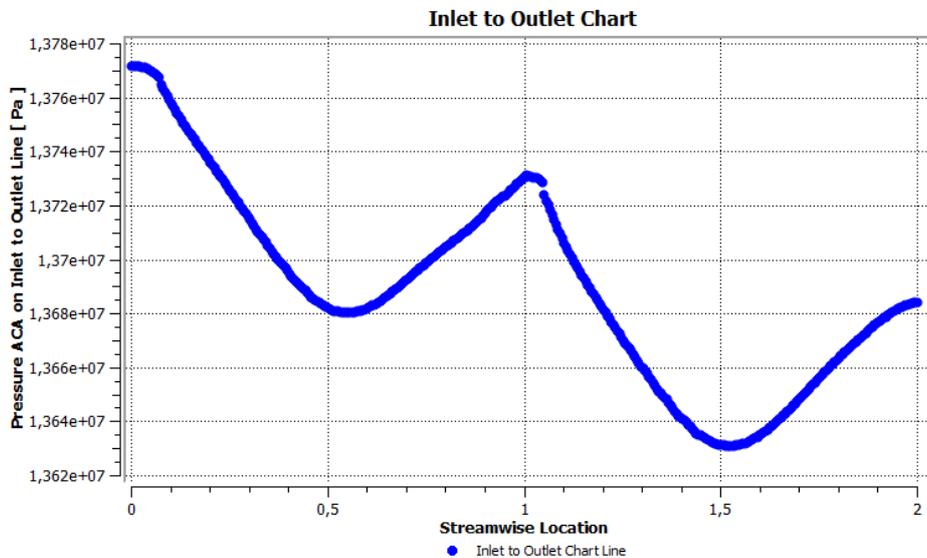


Figure 55 La variation de la pression au niveau de l’étage

Ce graphe montre la distribution de la pression de fluide au niveau de l'étage du turboforeuse, on remarque que la pression à l'entrée de stator est supérieure à la pression de fluide entre le stator et rotor, et cette dernière est supérieure à celle de sortie de rotor.

On a : $P_0 > P_1 > P_2$ C'est une caractéristique d'un étage à réaction.

On remarque aussi que la pression est minimale au niveau de la partie empruntant (supérieure) l'extrados.

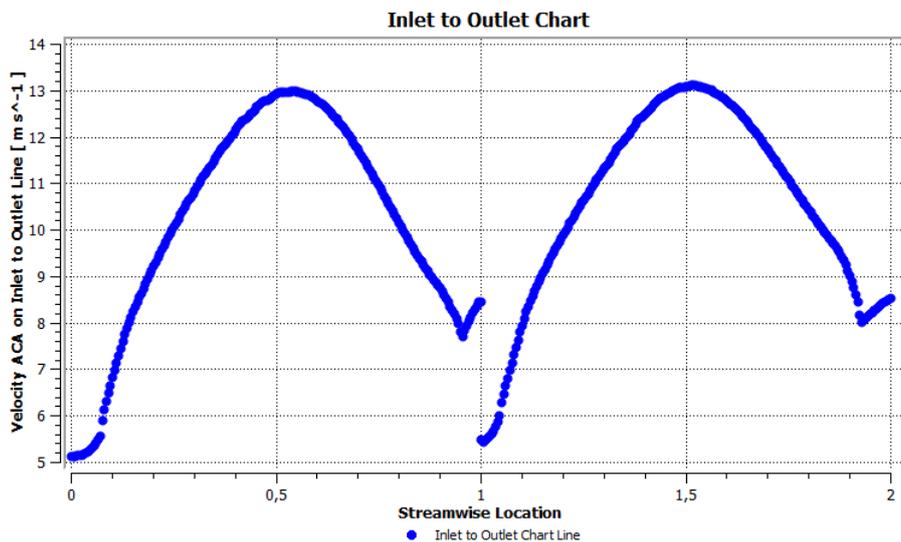


Figure 56 La variation de la vitesse au niveau de l'étage

Ce graphe montre que la vitesse à travers le stator et le rotor augmente, et cette augmentation due à la convergence des aubes de ces derniers, et la vitesse est maximale au niveau de la partie empruntant (supérieure) l'extrados.

Conclusion :

Les figures. 50 jusque a figures 56 confirme le théorème de Bernoulli qui énonce que dans le flux d'un fluide, une accélération se produit simultanément avec la diminution de la pression, dans notre cas, l'augmentation de la vitesse sur l'extrados (accélération) s'accompagne par une diminution de la pression sur ce coté du profil.

- Graphes montrent la variation de la vitesse tangentielle et axiale :

L'analyse des turbomachines nécessite la connaissance de la vitesse de l'écoulement dans le passage inter-aube. Traditionnellement, cet étude s'effectue à l'aide de triangle de vitesses, on construit un diagramme vectoriel en fonction de la vitesse de rotation, des vitesses absolue et des

vitesse relative de l'écoulement à l'entrée et la sortie de stator et du rotor, figure 14 page 19 représente le triangle de vitesse.

Ce concept permet d'obtenir une représentation graphique compacte du champ de l'écoulement étroitement lié à la géométrie des aubes. Ces de deux dernier graphe fig 58- fig. 59 représentent la variation de la vitesse tangentielle absolue et tangentielle relative et la vitesse axiale de l'écoulement à travers l'étage.

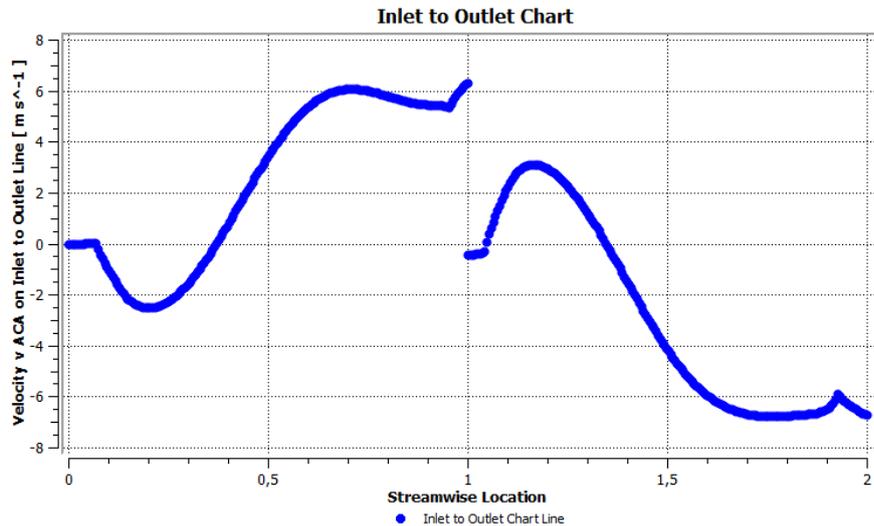


Figure 57 La variation de la vitesse tangentielle au niveau de l'étage

La variation de la vitesse tangentielle absolue au niveau de stator 0 – 1 on remarque que:

- A l'entrée de stator la vitesse tangentielle absolue C_u est nulle.
- A la sortie de stator cette vitesse égale à 6.28 m /s.

La variation de la vitesse tangentielle relative au niveau de rotor 1 – 2 on remarque que:

- A l'entrée de rotor la vitesse tangentielle relative W_u est 0.44 m /s.
- A la sortie de rotor cette vitesse égale à 6.70 m /s.

Conclusion :

L'augmentation de vitesse remarqué au niveau de stator et rotor est une caractéristique de l'étage à réaction et due à la convergence des profils d'aubes de stator et rotor.

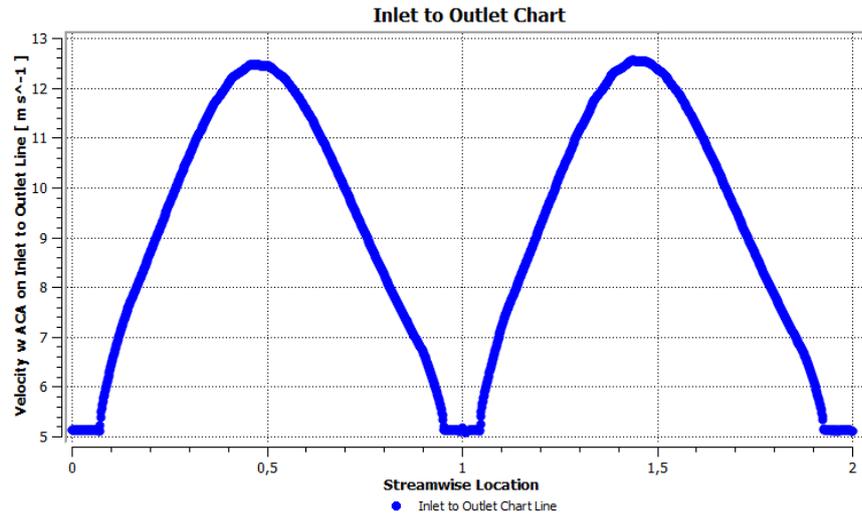


Figure 58 La variation de la vitesse axiale au niveau de l'étage

Dans cette figure on observe que la vitesse axiale reste constante à travers tout l'étage, à l'entrée et la sortie de stator et du rotor est sa valeur égale à 5.11 m/s.

Conclusion :

Puisque la turboforeuse est une machine à écoulement axiale, la vitesse périphérique de rotor U demeure constante et que la composante axiale de la vitesse reste aussi constante entre l'entrée et la sortie des aubages : $C0x = C1x = C2x = \text{constante}$.

c) Le rapport de turbine :

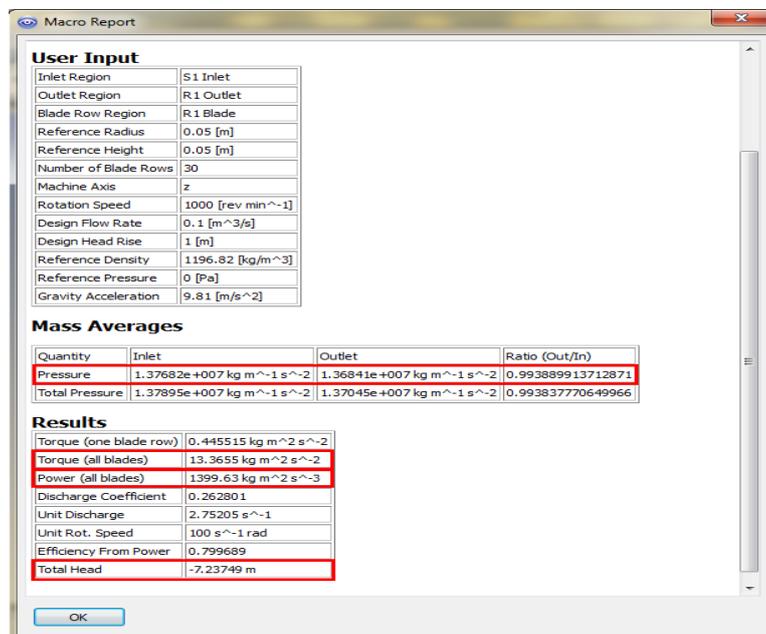


Figure 59 Rapport de turbine

Avec ce rapport, ANSYS nous donne les performances d'un étage de turbine :

- a) La chute de pression : $\Delta P = (1.37682 - 1.36841) \cdot 10^7 = 84100 \text{ Pa}$
- b) La chute de pression en mètre : $H = 7.23 \text{ m}$
- c) Le couple : $T = 13.36 \text{ N.m}$
- d) La puissance : $P = 1399.63 \text{ W}$
- e) A partir de ces données on peut calculer le rendement hydraulique :

$$\eta = \frac{\text{Puissance mécanique}}{\text{Puissance hydraulique}} = \frac{P}{\rho \cdot g \cdot H \cdot Q} = \frac{1399.63}{1196.82 \times 9.81 \times 7.23 \times 0.02839} = 58.07\%$$

- f) La chute de pression dans le stator : $\Delta P \text{ Stator} = 41300 \text{ Pa}$

La chute de pression dans le rotor : $\Delta P \text{ Rotor} = 46400 \text{ Pa}$ (la figure 56).

Revenant au calcul manuel :

Pour calculer le couple T et la puissance mécanique P développé par la turboforeuse, on doit d'abord trouvé les angles qui caractérisent l'écoulement α_2 et β_3 , ils sont obtenus à partir des graphes de la vitesse tangentielle et axiale (figure. 58-59)

- $\tan \alpha_2 = \frac{C_{2u}}{C_x} = \frac{6.28}{5.11} \quad \alpha_2 = 50.8^\circ$
- $\tan \beta_3 = \frac{W_{3u}}{C_x} = \frac{6.70}{5.11} \quad \beta_3 = 52.4^\circ$

- 1) On calcul le couple T (la démonstration de cette formule page 23) :

On a : $T = \rho \cdot Q \cdot r m \cdot C_x \cdot (\tan \alpha_2 + \tan \beta_3) - \left(\frac{\pi}{30}\right) \cdot \rho \cdot Q \cdot r m^2 \cdot N$

$$T = 1196.82 \times 0.02839 \times 0.0611 \times 5.11 [\tan (50.8) + \tan (52.4)] - \left(\frac{3.14}{30}\right) 1196.82 \times 0.02839 \times 0.0611^2 \times 1000$$

Alors :

$T = 13.35 \text{ N.m}$

- 2) On calcule la puissance P (la démonstration de cette formule page 24) :

On a : $P = \left(\frac{\pi}{30}\right) \cdot \rho \cdot Q \cdot r m \cdot C_x (\tan \alpha_2 + \tan \beta_3) \cdot N - \left(\frac{\pi}{30}\right)^2 \cdot \rho \cdot Q \cdot r m^2 \cdot N^2$

$$P = \left(\frac{3.14}{30}\right)^2 \times 1196.82 \times 0.02839 \times 0.0611 \times 5.11 [\tan(50.8) + \tan(52.4)] 1000 - \left(\frac{3.14}{30}\right)^2 \times 1196.82 \times 0.02839 \times 0.0611^2 \times 1000^2$$

Alors :

$$P = 1397.39 \text{ W}$$

En comparant les résultats d'ANSYS avec données de l'entreprise et les valeurs de calcul manuel :

	Valeurs données par l'entreprise	Valeurs d'ANSYS	Valeurs de calcul manuel
Puissance (W)	1364.63	1399.63	1397.39
Couple (N.m)	13.03	13.36	13.35
Chute de pression (Pa)	84895.51	84100	--
Chute de pression (m)	7.22	7.23	--
Rendement hydraulique (%)	56.73	58.07	--

Tableau 4 Comparaison de valeurs

On remarque que tout les valeurs comparées sont presque les mêmes.

Conclusion :

Après la comparaison de ces résultats, on conclut qu'ANSYS réalise une simulation précise et plus proche à la réalité, ce qui explique leur utilisation par la majorité des entreprises de conception : TOYOTA, [Boeing](#), NASA.

Puisque ANSYS et les calculs manuels nous donnent des résultats identiques avec celles donnée par l'entreprise, on peut faire confiance à ces deux méthodes pour réaliser les prochaines optimisations.

II.2.4 Static Structural:

L'analyse de Static Structural donne la possibilité de déterminer :

- 1) Les déplacements.
- 2) Les contraintes équivalent (Von-Misses).
- 3) Les déformations relatives.

Causés par la pression de fluide à travers les étages de la turboforeuse, et permet aussi de visualiser la distribution de ses paramètres sur les surfaces des aubes de stator et rotor.

Il utilise l'analyse par éléments finis des contraintes qui sont effectuées sur la base de distribution de pression calculé à partir de la modélisation CFX.

La cellule static structural est composé de :

- 1) La géométrie (geometry) : on importe le stator et le rotor à partir de BLADEGEN.
- 2) Modèle (Model) : pour faire le maillage de l'étage.
- 3) Configuration (setup) : pour définir des conditions aux limites.
- 4) Solution : pour effectuer les itérations.
- 5) Résultats : permet de visualiser les valeurs de contraintes, déplacement et déformation relative et visualiser leur distribution.

L'étude sera concentrée sur une aube de stator et une aube de rotor où les charges sont identiques à tous les aubes de l'étage, cette méthode est avantageuse pour diminuer le temps de simulation.

II.2.4.1 Effectuer l'analyse static structural sur l'aube de stator :

- a) On importe la géométrie de stator à partir de BLADEGEN à la cellule de la géométrie dans la static structural, le hub et shroud (le moyeu et l'enveloppe) sont conçus et modélisés comme un support fixe. (figure 61)

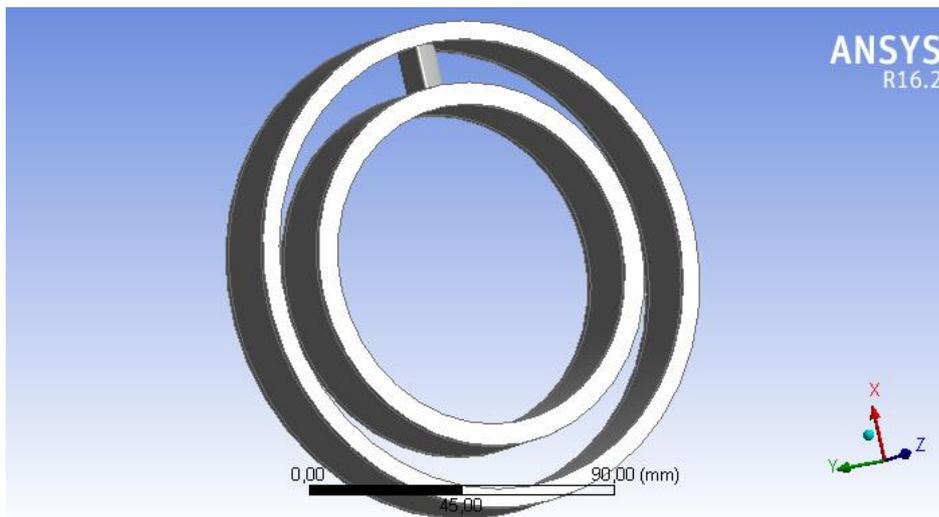


Figure 60 Stator de la turboforeuse

- On effectuer le maillage sur la surface de stator. (figure 62)

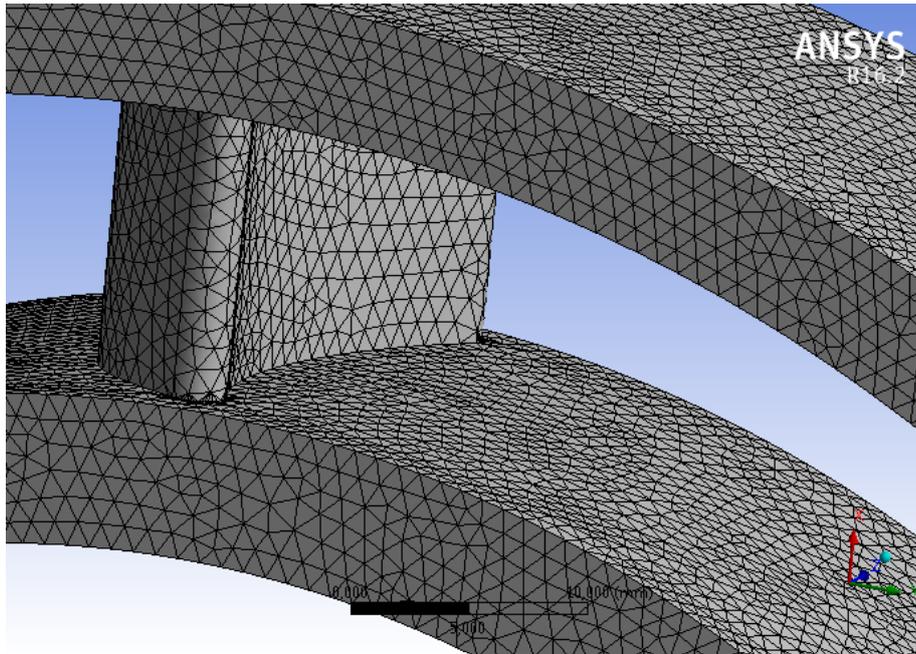


Figure 61 Maillage réalisée sur la surface stator

- On importe les données de distribution de pression sur l'aube de stator à partir de CFX-Solution, en activant un lien entre la cellule de CFX-Solution et la cellule de configuration (setup) en static structural.

II.2.4.2. Effectuer l'analyse static structural sur l'aube de rotor :

La même méthodologie est utilisée pour simuler les charges structurales sur les surfaces des aubes de rotor, les aubes de rotor sont reliées uniquement au moyeu (hub), on considère que moyeu comme un support fixe avec absence de l'enveloppe (shroud). (figure 63)

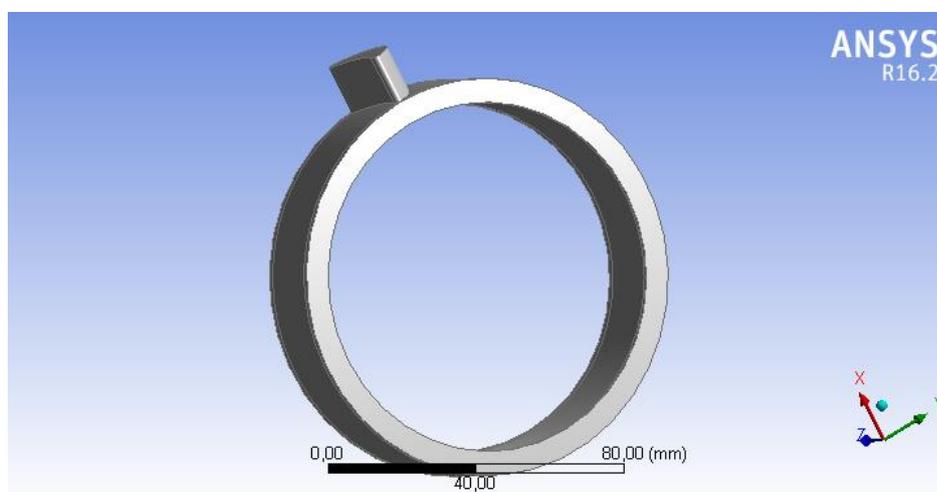


Figure 62 Le rotor de la turboforeuse

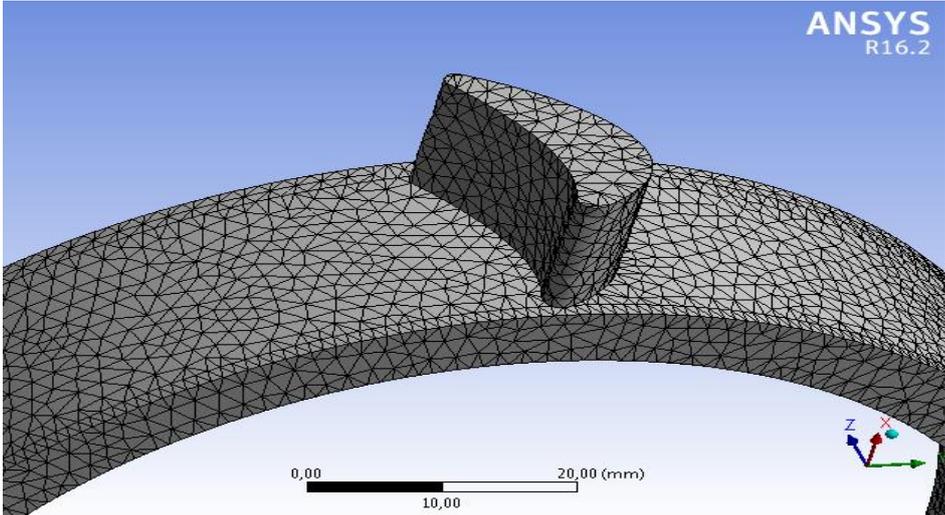


Figure 63 Le maillage de rotor

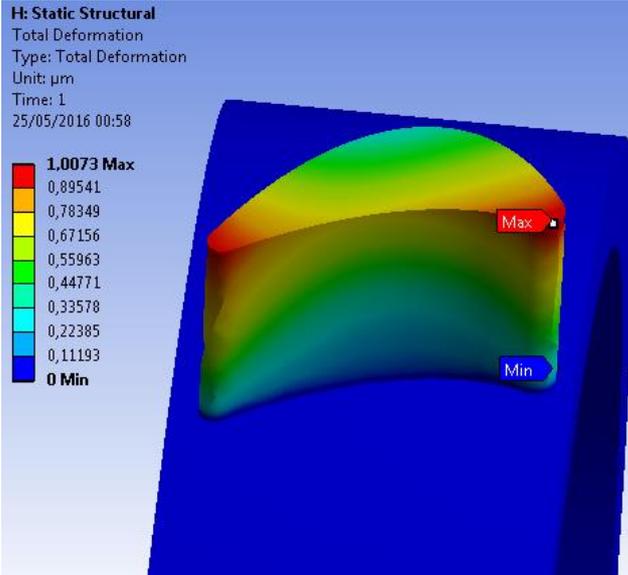
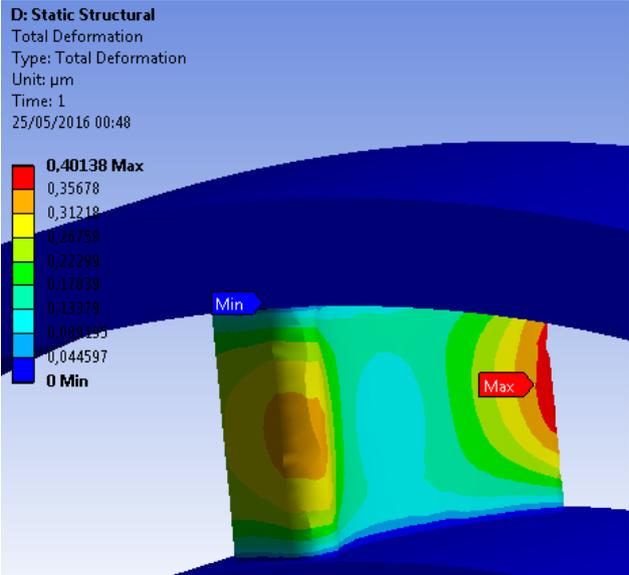


Figure 64 Les déplacements totale au niveau de l'aube de stator et rotor

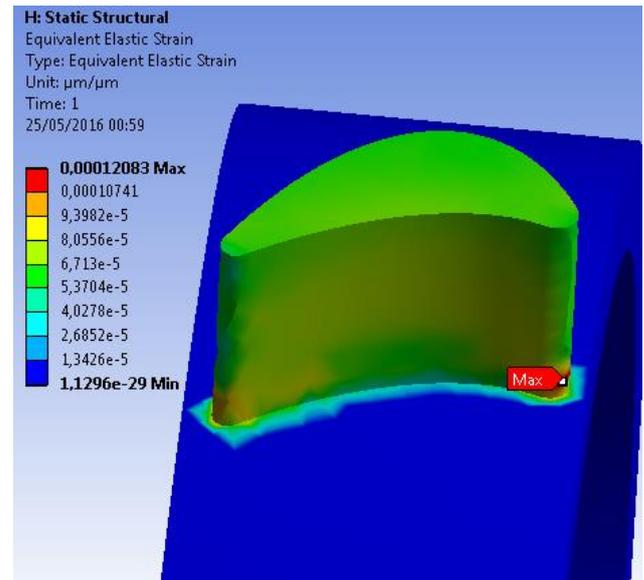
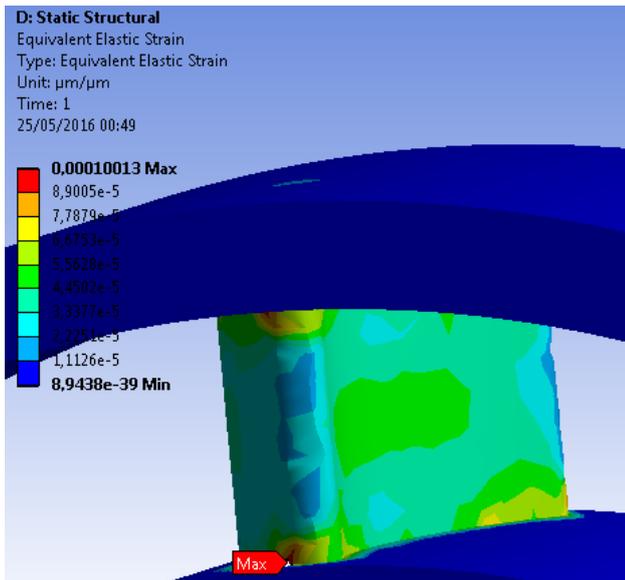


Figure 65 Les déformations au niveau de l'aube de stator et rotor

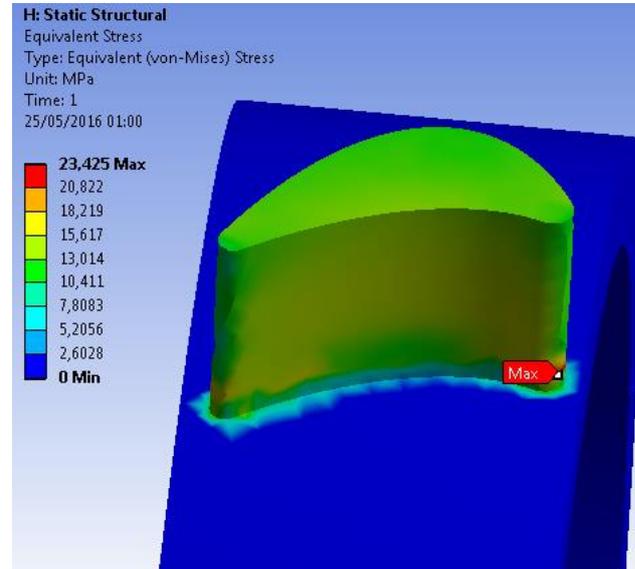
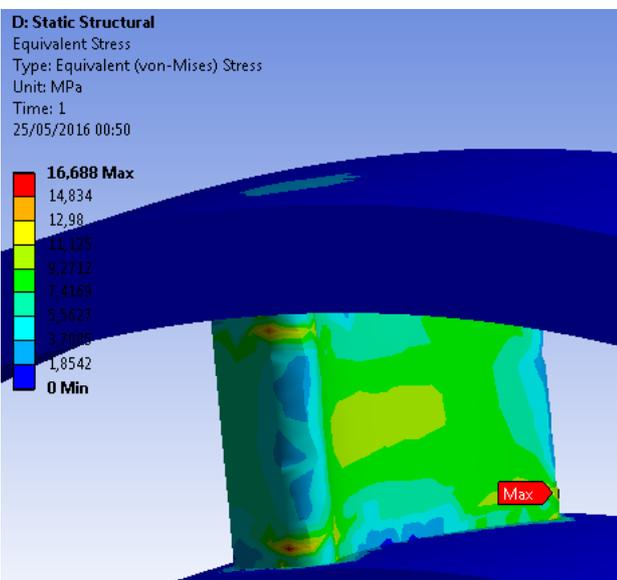


Figure 66 Les contraintes équivalent (Von-Misses) au niveau de l'aube de stator et rotor

Pour le stator, on voit que :

- Le déplacement est maximal au niveau de bord de fuite de l'aube et le bord d'attaque et sa valeur maximale $0.40138\mu\text{m}$.
- Les déformations relatives sont maximales au niveau de la partie inférieure de bord D'attaque avec une valeur maximale de $0.0001 \mu\text{m}/\mu\text{m}$.
- Les contraintes équivalentes de Von-Misses sont maximales au niveau de la partie Inferieure de bord de fuite avec une valeur de 16.68 MPa et les contraintes au niveau de la surface latérale environ de 9.27 MPa.

Pour le rotor, on voit que :

- Le déplacement est maximal au niveau de la partie supérieure de bord de fuite et de bord d'attaque de l'aube et sa valeur maximale est $1.007 \mu\text{m}$.
- Les déformations relatives sont maximales au niveau de la partie inférieure de bord d'attaque avec une valeur maximale de $0.00012 \mu\text{m}/\mu\text{m}$.
- Les contraintes équivalentes de Von-Mises sont maximales au niveau de la partie inférieure de bord d'attaque avec une valeur de 23.42 MPa et la surface latérale reçoit des contraintes de valeurs environ 13.01 MPa .

Chapitre III : Stratégie d'usinage

III.1 INTRODUCTION

Dans cette partie Nous nous sommes attachés à l'étude de la faisabilité de l'usinage dans le cadre de l'usinage multiaxial, nous présentons l'étude des stratégies d'usinage de notre modèle CAO, depuis la génération des trajectoires jusqu'à la réalisation du modèle FAO possédant les meilleures qualités dimensionnelles.

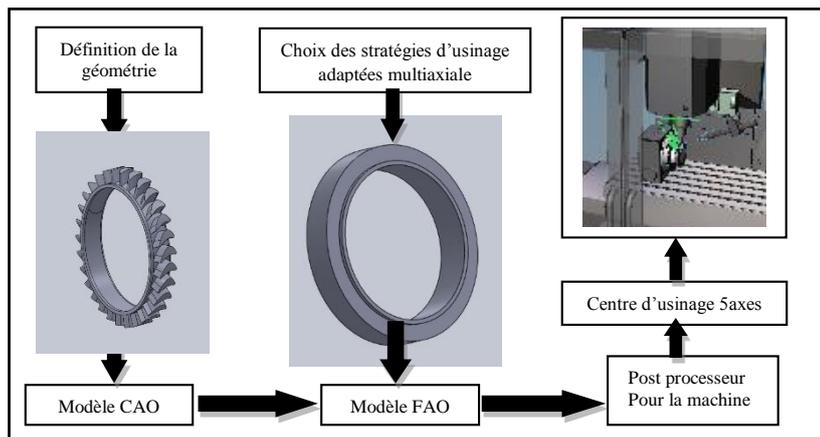


Figure 67 chaîne numérique

III.2- CONFIGURATIONS DES MACHINES MULTIAXIAL

Un centre de fraisage multiaxial est en mesure de commander le déplacement d'un outil dans 5 axes. Il s'agit des 3 axes linéaires connus et de 1 axe rotatif supplémentaire. Il existe différentes solutions cinématiques pour la mise en œuvre de ces deux axes rotatifs. Les solutions cinématiques proposées par les constructeurs de machines-outils pour répondre aux différents besoins.

- la tête "*twist*", qui oriente la broche en conjuguant deux axes de rotation. Cette architecture se rencontre essentiellement sur les centres de grandes dimensions ;
- le dispositif "*tilting*", dans lequel c'est la pièce qui est placée dans un berceau avec plateau rotatif et inclinable, ce qui associe également deux axes rotatifs. On rencontre ceci notamment sur les centres polyvalents.
- des dispositifs dont un axe concernent la tête et l'autre le plateau.

III.2.1. CRITERES DE CHOIX D'UNE MACHINE MULTIAXIAL:

Le choix va s'effectuer en fonction des caractéristiques des pièces à usiner et des données quantitatives et économiques. Ces données sont, la plupart du temps, élaborées par le bureau des méthodes et reposent sur les fabrications actuelles ou déjà prévues pour la machine.

Le type de machine est sélectionné en fonction des données parmi laquelle:

- Opération d'usinage.
- Dimensions et poids des pièces à usiner.
- Morphologie des pièces à usiner.
- Précisions d'usinage demandées.
- Complexité et diversité des usinages.
- Dureté des matériaux à usiner.
- Quantités de pièces à usiner.

III.2.2 MACHINE A PLATEAU TILTING

La machine proposée pour usiner notre modèle, une machine 4 axes avec dispositif tilting qui permet une grande accessibilité pour les pièces petites et moyennes dimensions (c'est le cas de notre pièce 135 × Hauteur de 24,61mm).

Cette configuration de machine multiaxiale permettant une bonne compacité, est à table bi-rotative. Cette cinématique n'a pas d'influence en 5 axes sur la position relative outil/pièce selon les longueurs outils. Seule la position de la pièce par rapport à l'origine machine devra être prise en compte pour le calcul des trajectoires outil.

Pour conserver ici des conditions de coupe optimales, il est nécessaire de basculer la table. Et pour usiner intégralement une surface gauche, il est nécessaire de basculer plusieurs fois la table dans des directions différentes.

III.2.3 LE FRAISAGE multiaxial

La complexité des formes élaborées en CAO pour les pièces d'aérodynamique ou d'hydrodynamique rend leur usinage très difficile voir impossible sur des machines à 3 axes. On utilise alors des machines à 5 et 4 axes permettant d'obtenir une plus grande liberté dans le positionnement de l'outil afin d'éviter les collisions. C'est également le cas pour des pièces prismatiques plus simples lorsque certaines parties d'une pièce ne sont pas accessibles en usinage à 3 axes sans démonter la pièce. La machine multiaxiale permet de diminuer le nombre de posages donc de diminuer les erreurs de remise en position, l'usinage à 5 axes peut être très avantageux.

Les principaux avantages de l'usinage à multi-axiale sont de pouvoir :

- usiner des surfaces présentant des contre-dépouilles,
- imposer et maintenir des conditions de coupe en modifiant l'orientation de l'outil,
- obtenir un meilleur état de surface ce qui permet de réduire le temps de polissage,
- usiner sur le flanc de l'outil ce qui permet d'enlever plus de matière à chaque passe,
- minimiser le nombre de pose sur la machine.

III.2.4- POSITIONNEMENT DE L'OUTIL EN USINAGE MULTI-AXIAL

L'obtention des pièces de forme gauche se fait soit en fraisage en bout par balayage, soit en fraisage par le flanc d'un outil cylindrique ou conique.

Avec l'usinage à 4 axes en bout, le contact entre l'outil et la pièce est ponctuelle et la surface de la pièce est obtenue par balayage comme en usinage à 3 axes. Il apparaît alors des crêtes dont la hauteur dépend de la distance entre les passes (figure 68). Il existe alors un compromis à faire entre qualité et temps d'usinage. En usinage multi-axial sur le flanc de l'outil (encore appelé usinage en roulant), l'outil touche tangentiellement la surface de la pièce (contact linéique) perpendiculairement à la direction d'avance. Il permet d'augmenter le taux d'enlèvement de matière et d'obtenir de meilleurs états de surface comparé à l'usinage en bout [TÖNSHOFF 2000].

La génération de trajectoires en multi-axe se décompose en plusieurs étapes :

- Construction d'une position outil optimale sans interférence,
- Agencement des positions le long d'une passe,
- Distribution des passes pour couvrir la pièce et test d'interférence global entre l'outil et la pièce.

On distingue les interférences dites locales entre l'extrémité de l'outil et la pièce et les interférences globales qui mettent en jeu l'outil en entier, le porte-outil ainsi que la pièce et son montage d'usinage.

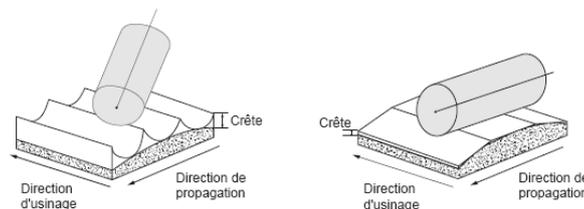


Figure 68 Usinage en bout et en flanc [Takeuchi et al 1995]

III.2.5 LES OUTILS POUR L'USINAGE DES FORMES COMPLEXES

Il existe plusieurs outils capables d'usiner une surface complexe en fraisage :

- **la fraise hémisphérique ou fraise boule** : le rayon de la fraise doit être inférieur ou égal au plus petit rayon concave de la surface,

- **la fraise cylindrique** : cette fraise doit être utilisée avec un angle de dépinçage afin de ne pas usiner avec le plan inférieur de la fraise mais avec un point de sa périphérie,
- **la fraise torique** : la fraise torique présente l'avantage d'avoir un petit rayon de coin afin d'usiner les petits rayons concaves et un grand rayon de corps afin d'enlever plus de matière qu'une fraise boule,

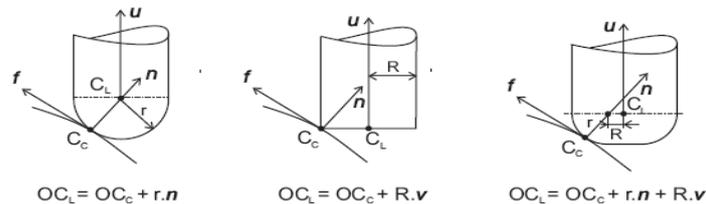


Figure 69 Position du centre outil suivant la forme de l'outil

III.3.1 LES SURFACES REGLEES

Une surface est réglée si et seulement si par tout point de la surface il passe au moins une droite entièrement contenue dans la surface. On définit une surface réglée par deux courbes directrices $c1(u)$ et $c2(u)$ sur lesquelles s'appuient les droites de la surface.

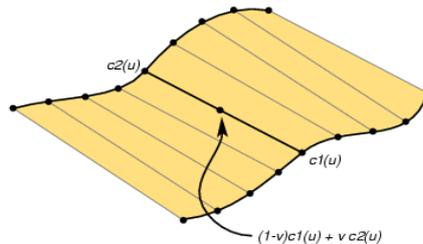


Figure 70 Surface réglée

III.3.2 SURFACES REGLEES REMARQUABLES

La surface cylindrique est un cas particulier des surfaces réglées. Le cylindre de révolution est une surface réglée dont toutes les droites sont parallèles à l'axe. Le cône est une surface réglée dont toutes les droites (appelées directrices) sont concourantes au sommet. Les directrices s'appuient sur le sommet et sur un cercle non coplanaire avec le sommet. Le parabololoïde hyperbolique (selle de cheval) est également une surface réglée.

III.3.3 SURFACES REGLEES DEVELOPPABLES

Une surface réglée est dite développable si les normales à la surface aux deux extrémités d'une règle sont colinéaires. Les surfaces cylindriques, le cylindre de révolution et le cône sont des surfaces développables. Le qualificatif développable vient de la propriété de ces surfaces de pouvoir être développé sur un plan sans être étirées ou tordues. De telles surfaces sont telles que leur courbure Gaussienne K est nulle en tout point.

III.3.4- USINAGE DES PIÈCES DE FORME SURFACE GAUCHE

La réalisation des pièces en usinage sur le flanc s'avère d'une très grande rentabilité par rapport à l'usinage en bout par balayage des formes complexes.

Le développement de l'Usinage Grande Vitesse à 4 axes des surfaces complexes et le recours systématique à la chaîne numérique permettent d'améliorer la productivité et la qualité des produits réalisés. Plus particulièrement.

L'usinage multiaxial sur le flanc de l'outil permet d'augmenter le taux d'enlèvement de matière et d'obtenir de meilleurs états de surface comparativement à l'usinage en bout. Ce procédé est largement employé pour l'usinage de pièces de machines hydrodynamiques ou aérodynamiques.

III.3.5 USINAGES DES SURFACES REGLEES DEVELOPPABLES

L'outil est positionné tangent à une des deux courbes directrices et son axe est orienté parallèlement à la règle considérée. L'usinage de surfaces développables sur le flanc s'effectue sans interférences si le rayon de l'outil est plus petit que le plus petit rayon concave de la surface à usiner.

III.3.6 USINAGES DES SURFACES REGLEES NON DEVELOPPABLES

On comprend bien que lors de l'usinage d'une surface avec le flanc d'un outil cylindrique on laisse à chaque instant une ligne sur la pièce (cette ligne est une génératrice de notre cylindre), la surface qui sera générée sera donc forcément réglée. Mais toutes les surfaces réglées ne sont pas forcément usinables. Si l'on considère une Surface Réglée Non Développable (SRND) elle ne peut être parfaitement usinée sans avoir un outil de rayon nul [REHSTEINER 93]. Pour cela, on considère l'usinage d'une surface réglée SR (Figure 71), dans un premier temps on pose une génératrice du cylindre de l'outil sur une règle g de la surface. On s'intéresse aux projections suivant la règle dans un plan E normal à celle-ci. Dans ce plan g devient un point A , l'outil devient un cercle et les deux directrices de la surface donnent deux courbes $P'1$ et $P'2$ qui se croisent en A .

De par les propriétés des SRND les normales des directrices forment un angle non nul ce qui implique des interférences entre l'outil et la pièce si le rayon de l'outil n'est pas nul.

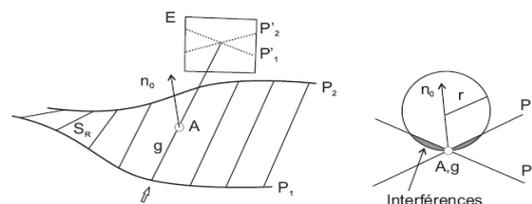


Figure 71 Interférences lors d'un posage sur la règle [REHSTEINER 93]

On vient donc de voir que les SRND ne peuvent être usinées sans interférence. On en déduit donc que seul les SRD (Surface Réglée Développable) peuvent être usinées sans interférences. Pour poser un outil sur une SRD, on procède de la façon suivante : L'outil est donc orienté suivant une

règle de la surface et est tangent à l'une de ses deux génératrices (et donc de par les propriétés des SRD aussi tangent à la deuxième). De cette façon si le rayon de courbure de la surface est plus grand que le rayon outil il n'y a pas d'interférence (positive ou négative) entre l'outil et la surface.

On s'intéresse maintenant aux solutions proposées par la littérature pour l'usinage de surface sur le flanc. Elles sont de deux sortes :

- la première concerne les SRND. Elle consiste à trouver un positionnement de l'outil sophistiqué de manière à réduire les interférences entre l'outil et la pièce ;
- la deuxième consiste en l'approximation de la surface par une SRD qui elle pourra être usinée sur le flanc sans interférence (à condition que son plus petit rayon de courbure soit supérieur au rayon outil).

Dans le cas des surfaces réglées non développables, il est donc impossible d'usiner la pièce sans interférences si le diamètre de l'outil est non nul. Ces surfaces ne peuvent donc être usinées parfaitement selon les règles qu'en électro-érosion à fil.

III.4 USINAGE A 4 AXES SUR LE FLANC

III.4.1 LE CHOIX DE L'OUTIL

L'outil hémisphérique est l'outil le plus utilisé de part la simplicité de sa géométrie qui le mathématiquement plus facile à positionner pour l'usinage. De plus, il génère des sillons réguliers qui conviennent parfaitement pour les opérations de polissage.

L'inconvénient est que la valeur de la vitesse de coupe n'est pas constante le long du profil de l'outil, s'annulant en son extrémité. Aussi, pour les surfaces tendues, on emploie de plus en plus les outils cylindriques ou toriques qui assurent une vitesse de coupe constante ou peu variable sur la périphérie.

Dans ce cas, les outils toriques et cylindriques présentent l'avantage d'enlever plus de matière qu'un outil hémisphérique de diamètre égal [VICKERS, QUAN 1989]. Plus l'angle entre l'axe de l'outil et la normale à la surface est petit et plus la largeur coupée est grande.

III.4.2 USINAGE MULTIAXIALE D'UNE SURFACE EN SUR LE FLANC

Contrairement à l'usinage à 3 axes, qui ne nécessite qu'un point pour positionner l'outil par rapport à la pièce (car l'axe outil est fixe par rapport à la pièce), l'usinage à 5 ou 4 axes a besoin lui d'un point et d'une direction. Ce qui correspond à 6 coordonnées, 3 coordonnées d'un point et les 3 cosinus directeurs de l'axe outil. Pour obtenir ces informations le logiciel FAO utilisé propose plusieurs possibilités :

➤ **Courbe avec surface**

La courbe fournie à chaque instant les coordonnées d'un point de l'outil (ce point suivra donc cette courbe). Pour ce qui est de l'orientation de l'outil, elle est obtenue grâce à deux angles par rapport à la normale à la surface (Figure 72).

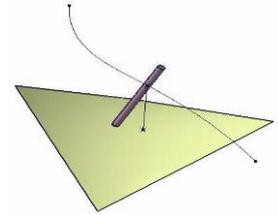


Figure 72 Posage d'un outil en 4 axes par une courbe et une surface

Flanc réglé et une surface

L'outil est d'abord posé suivant une règle à la surface (avec éventuellement un décalage du rayon de l'outil suivant la normale) puis il est positionné suivant son axe grâce à la deuxième surface (Figure 73). Ici un problème va se poser quand les deux surfaces auront la même normale, dans ce cas l'outil n'aura pas de position définie suivant son axe.

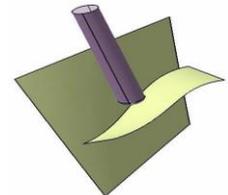


Figure 73 Posage d'un outil en 5 axes par une surface réglée et une deuxième surface

➤ **Deux courbes**

Comme dans le premier cas, l'outil est d'abord posé sur une des deux courbes et la deuxième courbe servira à fournir un deuxième point et l'axe de l'outil sera donc colinéaire à la droite re liant les deux points (Figure 74). Pour ce qui est du décalage du rayon outil il peut se faire suivant la normale à une des deux courbes.

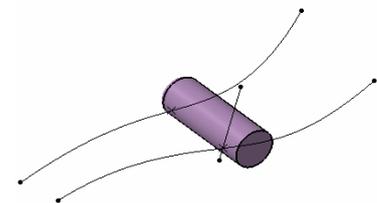


Figure 74 Posage d'un outil en multiaxe par deux courbes

III.4.3 LA CHAÎNE NUMÉRIQUE EN FRAISAGE A 4 AXES

La génération des trajectoires d'usinage en fraisage multiaxial dans le logiciel de Fabrication Assistée par Ordinateur permet de décrire le parcours de l'outil dans le repère de programmation attaché à la pièce, c'est à dire dans l'espace des tâches. La position du point piloté de l'outil (son extrémité) est donnée par (X_p, Y_p, Z_p) et l'orientation de l'axe outil par (i, j, k) les cosinus directeurs, c'est à dire les projections du vecteur directeur de l'axe outil sur les axes du repère de programmation.

Par ailleurs, on associe à la structure de la machine-outil 5 axes un espace articulaire à cinq dimensions composées de trois axes de translation et de deux axes de rotation.

Il est donc nécessaire d'introduire dans la chaîne numérique une transformation de coordonnées afin d'établir les ordres de déplacement de chacun des axes de la machine $(X_m, Y_m, Z_m, A/B$ ou A/C ou $B/C)$.

Selon la commande numérique, plusieurs solutions s'offrent alors à nous pour décrire les mouvements de l'outil qui seront communiqués à la commande numérique (figure 75). On peut envoyer la trajectoire décrite dans l'espace pièce directement à la CN. Dans ce cas le rôle du post-processeur

est de traduire le programme en code ISO 6983. L'avantage est la portabilité du programme sur n'importe quelle machine. Nous l'appellerons le mode TRAORI, en référence au nom de la fonction dans la commande numérique Siemens 840D.

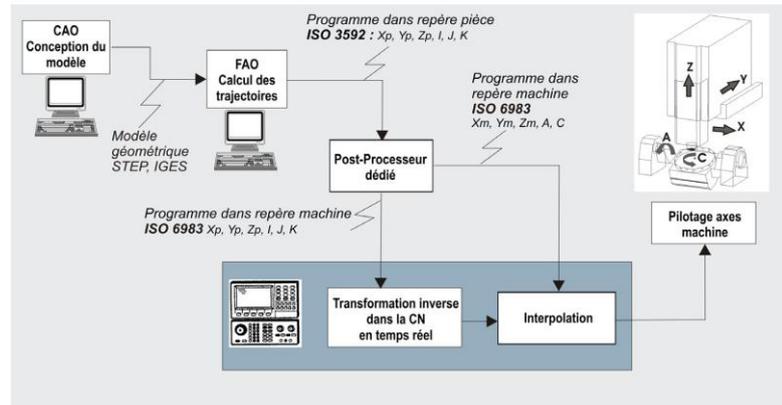


Figure 75 la chaîne numérique en 5 axes [TOURNIER et al 2005]

L'autre approche est de faire calculer les consignes de déplacement dans l'espace articulaire de la machine par un post-processeur dédié. Il s'agit du mode TRAF00F. Dans ce cas le programme d'usinage ne fonctionne que sur une machine donnée. Il existe un mode intermédiaire (que nous appellerons TRAORI AC) pour lequel les instructions de déplacement communiquées au DCN contiennent X_p , Y_p , Z_p , et les deux angles caractéristiques de la machine (A/B ou A/C ou B/C). Le calcul des angles est alors déjà effectué par le post-processeur.

III.5 application sur le model

Il existe plusieurs stratégies d'usinage possibles pour une même forme. Ce choix reste pour l'instant du domaine de l'expert. Effectivement il n'existe pas actuellement de règles précises permettant un choix automatique d'une stratégie d'usinage à partir de l'analyse des spécifications de la pièce et du modèle numérique.

Pour l'usinage de notre modèle nous utilisons logiciel *CAMWorks*.

CAMWorks est complètement intégré à *SolidWorks* et peut être démarré automatiquement chaque fois que vous démarrez *SolidWorks*.

III.5.1 LES LOGICIELS DE FAO :

L'utilisation de logiciels de FAO (Fabrication Assistée par Ordinateur), actuels permettent de gérer un grand nombre de modes de génération de trajectoires basés sur la géométrie de la pièce à réaliser. Logiciels de FAO doit être capable à partir d'un modèle CAO (Conception assistée par Ordinateur) de la pièce, de **générer les trajets de l'outil** qui permettent d'usiner la pièce, et éventuellement de transformer ces trajets en un programme compréhensible par le directeur de commande numérique.

Générer des trajets outil, c'est trouver **les positions de l'outil** successives qui permettent d'usiner une surface selon des trajectoires définies par le programmeur machine outil. Les trajectoires sont en général des courbes 3D, intersections entre les surfaces à usiner et les surfaces de guidage de l'outil. **La stratégie d'usinage** définit les surfaces de guidage qui sont le plus souvent des plans parallèles entre eux.

III.5.2 GAMME D'USINAGE EN USINAGE MULTIAXIALE

La gamme d'usinage pour notre modèle consiste tout d'abord à usiner les surfaces de l'aube avec la stratégie d'usinage en roulant. Puis nous utilisons la stratégie d'usinage en bout pour usiner la surface de fond.

En fin nous avons usiné les bords d'attaque et les bords de fuite avec l'usinage en roulant.

III.5.3- STRATGIE D'USINAGE DE MODEL

Une stratégie d'usinage est une méthodologie utilisée pour générer une ou une série d'opérations, dans le but de réaliser une forme donnée. Elle permet d'associer un processus d'usinage à une entité géométrique.

On va s'intéresser à l'usinage de l'hélice spirale à partir d'une stratégie d'usinage en 4 axes. Le pack turbine intègre des automatismes qui réduisent le nombre de paramètres à saisir. Le contrôle des collisions permet de sécuriser le processus. L'utilisation d'outils coniques plus rigides permet de fraiser avec des paramètres de rotation et d'avance plus importants. la génération de trajectoire dans l'espace pièce, pour usiner l'hélice spirale.

III.5.4 OBTENTION DU MODELE BRUT :

Dans un premier temps, par l'usinage d'ébauche nous avons défini, le modèle brut prêt à l'usinage multiaxial.

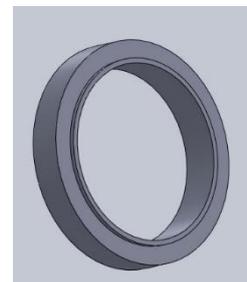


Figure 76 modèle prêt à l'usinage multiaxiale

III.5.5 Choix de machine

Les machines outils considérées possèdent 4 ou 5 axes. Comme pour toute machine à commande numérique, les déplacements sont assurés à partir de consignes de vitesse, elles mêmes élaborées à partir des consignes de position. Pour atteindre les vitesses, une machine passe par des phases successives d'accélération et de décélération. Précision, vitesses et accélérations constituent les premières caractéristiques qu'il faut identifier sur les machines outils d'Usinage Grande Vitesse (UGV). Pour mesurer l'importance de chaque caractéristique, il convient de la mettre en relation avec les besoins industriels,

- J'ai sélectionné dans notre cas sur machine à 4 axes comme montré sur la figure 77

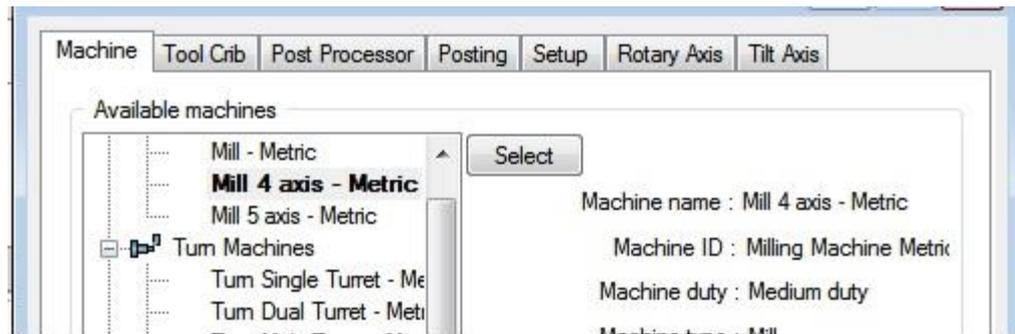


Figure 77 Définir le nombre d'Axe

III.5.6 Identifier les coordonnées de système

III.5.6.1 Origine machine G45 (OM) :

C'est la référence des déplacements de la machine. C'est un point défini (sur chaque axe) par le constructeur qui permet de définir l'origine absolue de la machine.

Le processeur CN calcule tous les déplacements par rapport au point d'origine mesure de la machine.

A la mise sous tension le système ne connaît pas l'origine mesure, les courses mécaniques accessibles sur chacun des axes de la machine sont limitées par des butées fin de course mini et maxi.

Lorsque j'ai créé le système de coordonnées, je lui donne un nom descriptif G45 pour expliquer son but (G-cod) Voir figure 78

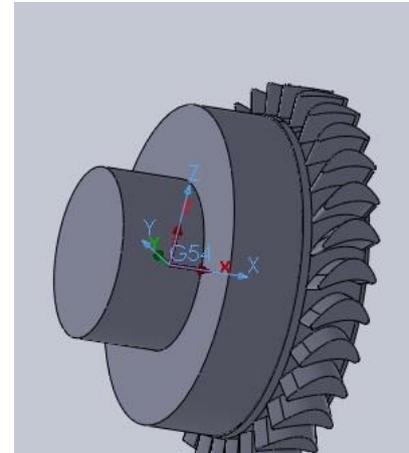
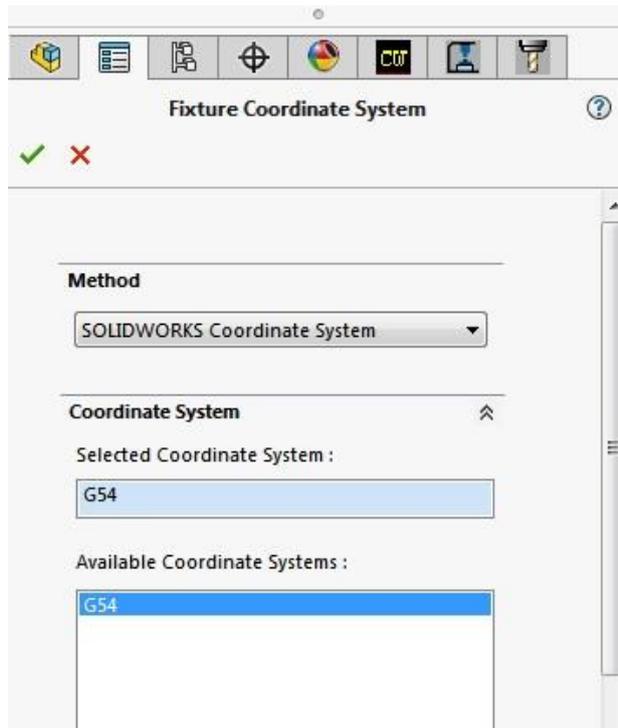


Figure 78 DEFINIR LES ORIGINES PIECE

III.5.7 Gestionnaire de pièce

Sur laquelle on suivi la trajectoire d'usinage



Figure 79 Définir le model CAO

III.5.8 définir de brut

- Créer une esquisse comme montre sur Le plan de face

- En utilise la fonction Bossage avec révolution par a pour axe de construction en construire le model brut qui port les mesure de la pièce a usiné

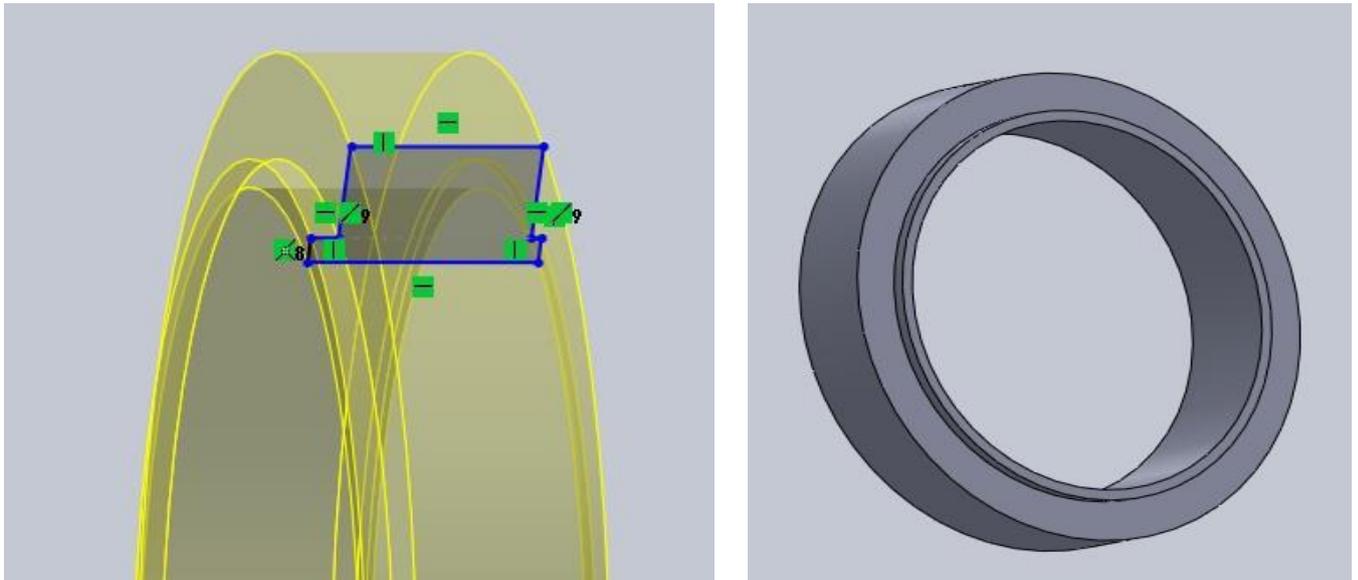


Figure 80 Profil de brut adapté au model CAO

Cliquer sur l'arbre de formes de **CAMWorks** « CW »

Dans l'onglet « CW » en Clic droit sur l'icône «**Gestionnaire de brut** » puis édit définition pour définir la **matière (Alliages d'aluminium)** et les **paramètres de d'esquisse** correspondant au brut

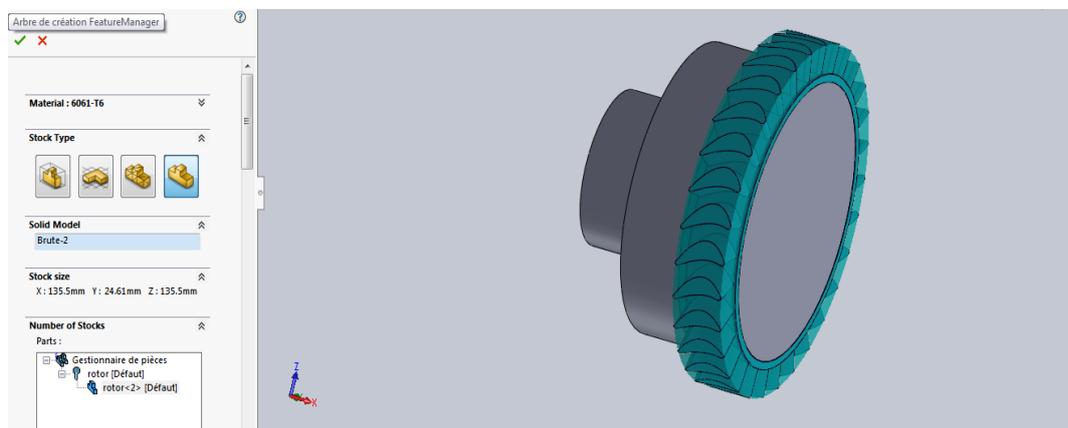


Figure 81 Définir le brut

III.5.9 Configuration pièce fraisage 1

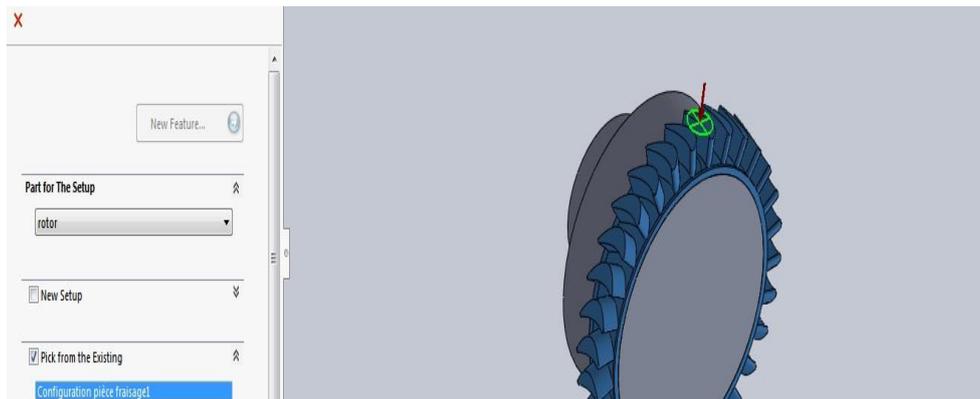


Figure 82 Choix de plant d'usinage

III.5.10 EXTRAIRE LES FORMES USINABLES

Reconnaissance des usinages sur la pièce : dans notre model en va choisie les surface a usine manuellement a cause de complicité géométrique

Ajout d'un contournage :

Nous allons générer le contour de la pièce manuellement dans l'arbre de formes de CamWorks

- Cliquer sur « Configuration pièce fraisage » new operation: multiaxis mill

-puis sur (Insérer forme) et clic sur les arrête du surface a usine (Elle devient alors verte)
figure 83

-Dans « type » (feature type) cliquer sur «4 axis»

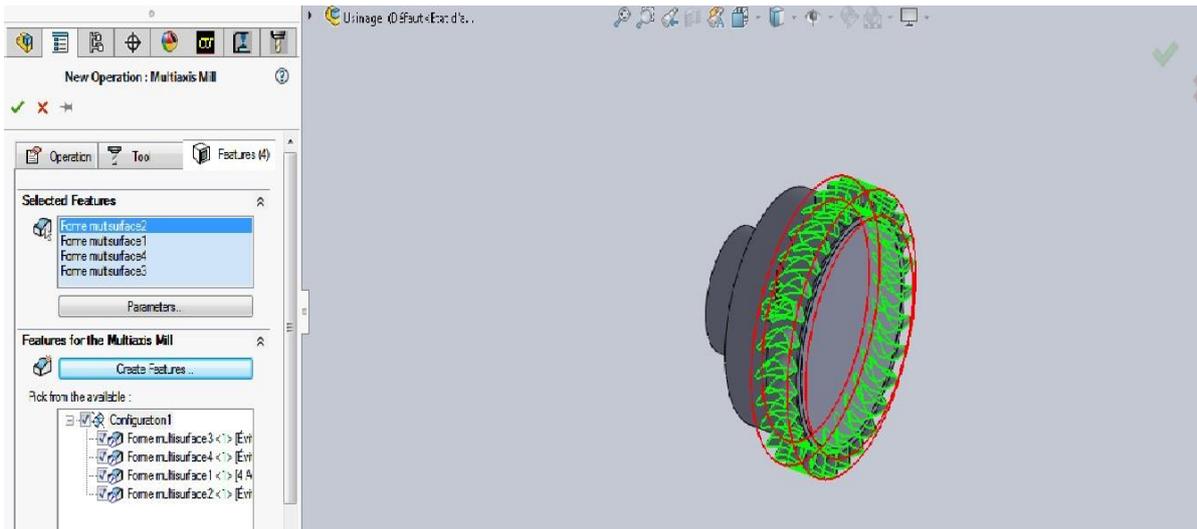


Figure 83 DEFINIR LES PLANS D'APPROCHE

III.5.11 LES PARAMETRES DE REGLAGE DES OPERATIONS

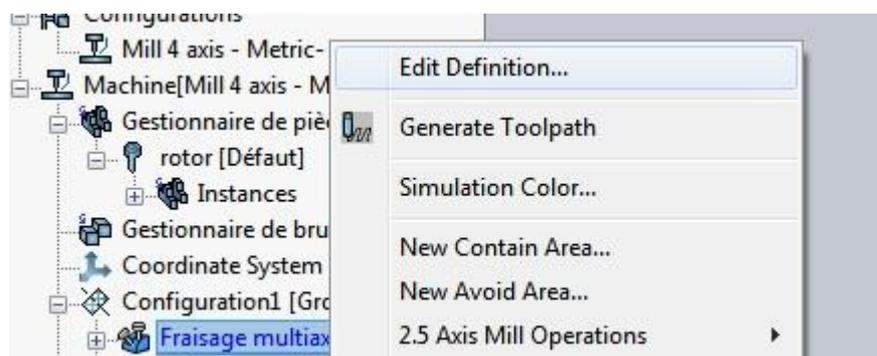
Nous avons tout d'abord défini la géométrie de l'outil le plus précisément possible pour générer la trajectoire sans collision avec les autres surfaces. Dans notre cas la géométrie des outils utilisés se sont des outils toriques, Pour mettre en œuvre ce parcours.

Dans les opérations d'ébauche et de finition notre stratégie consiste à usiner des surfaces suivant les paramètres d'ébauche présentée sur les figures suivantes.

III.5.11.1 Changement d'outils

Faire un clic droit sur l'icône (frisage multiaxe)

- Cliquer sur « Editer définition »



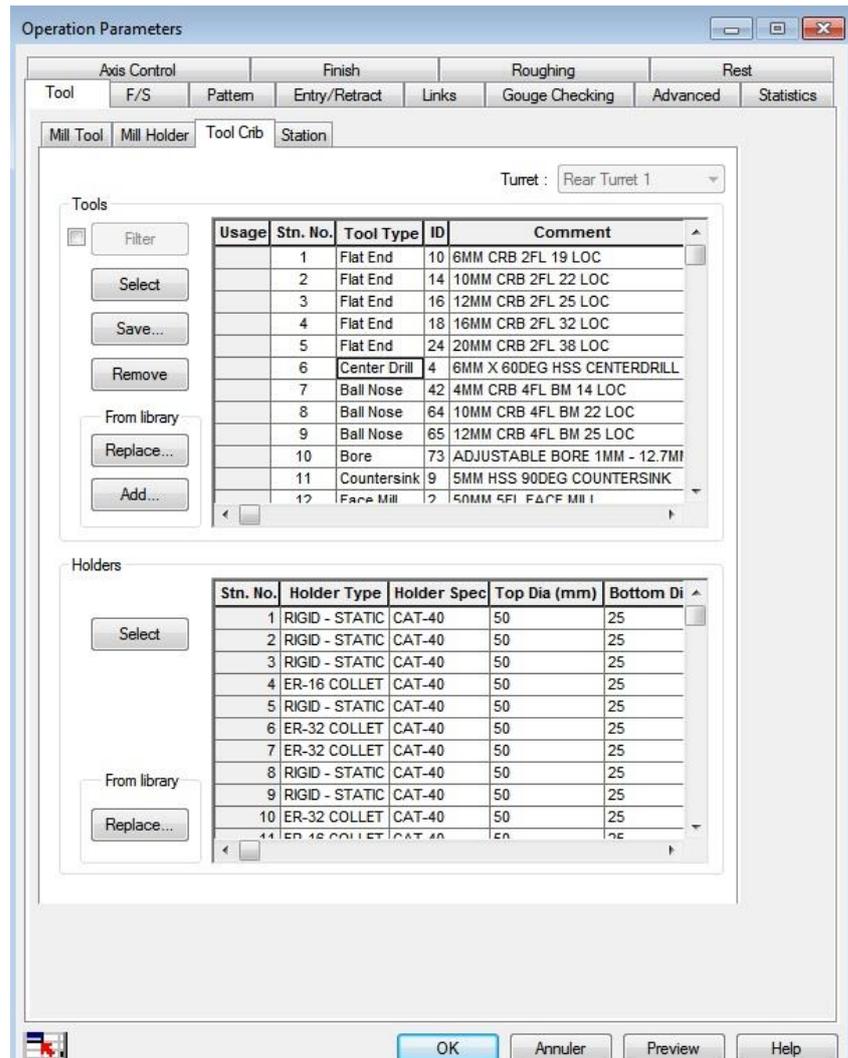


Figure 84 PARAMETRAGE D'USINAGE

Faire un clic droit sur l'icône (fraisage 1)

- Cliquer sur « Editer définition »
- Cliquer sur « **tool crib** »
- Cliquer sur la ligne de la fraise souhaitée
- Cliquer sur « Sélectionner »
- Cliquer sur OK

Choix d'outil

- Cliquer sur «mill tool »

- Cliquer sur l'outil souhaitée
- Cliquer sur « Sélectionner »
- Cliquer sur OK

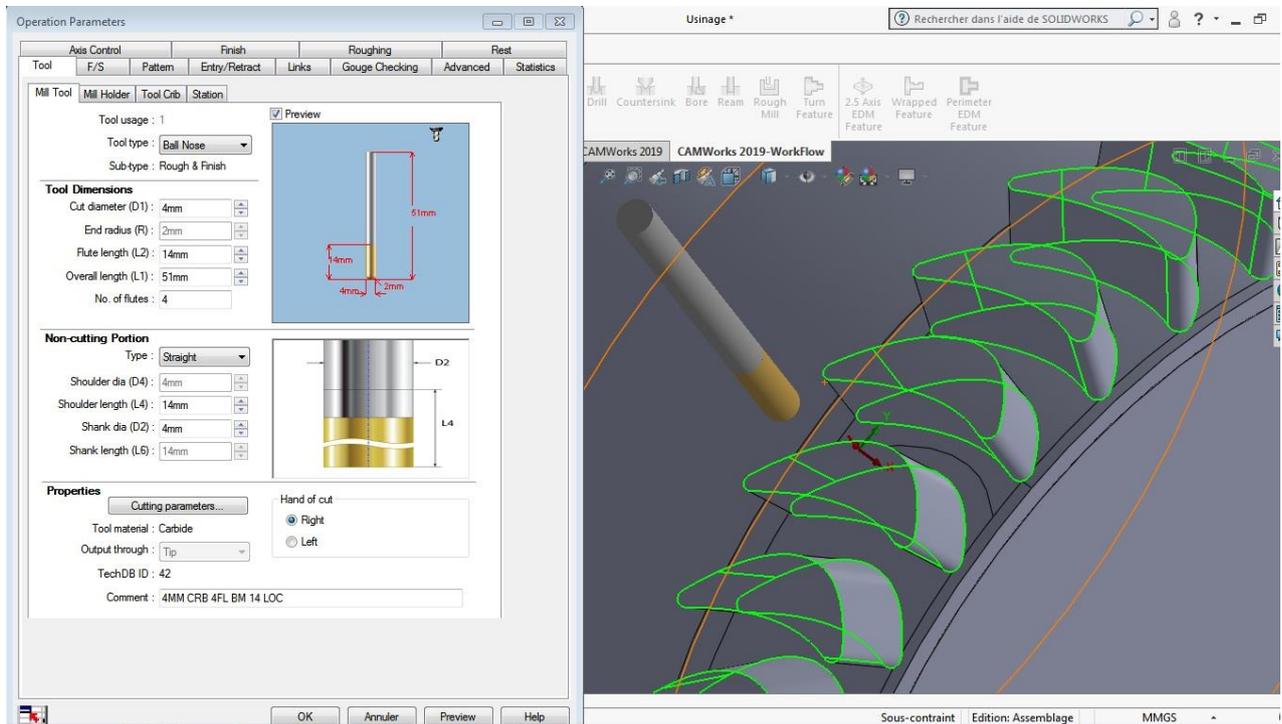


Figure 85 PARAMETRER LES OUTILS

Dans les opérations d'ébauche et de finition notre stratégie consiste à usiner des surfaces suivant les paramètres d'ébauche présentée sur la figure 86.

Cliquer sur paramètre d'ébauche «roughing»

- Cliquer sur par région
- Cliquer sur OK

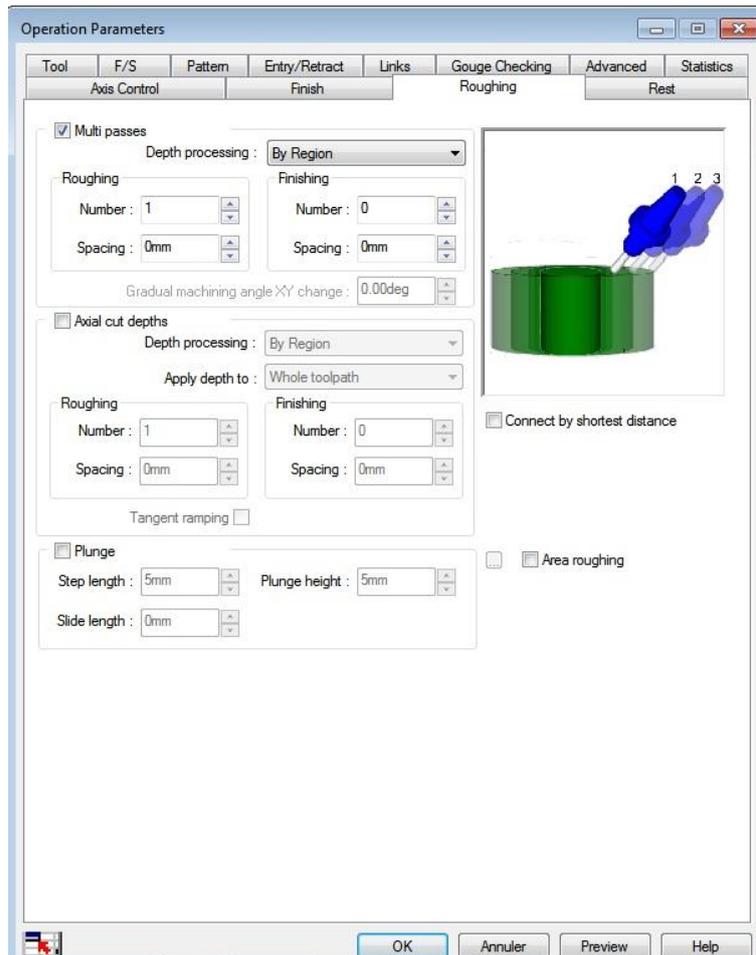


Figure 86 réglage de paramètre d'ébauche et finition

5.11.2 CONTROLE DE COLLISION:

Avant de commencer la simulation d'usinage à l'aide de contrôle de collision, nous vérifions notre surface pour éviter les collisions avec les autres surfaces.

Cliquer sur paramètre contrôle de collision «gouge checking»

- Cliquer sur applique le contrôle de collision à (dent)

- Cliquer sur OK

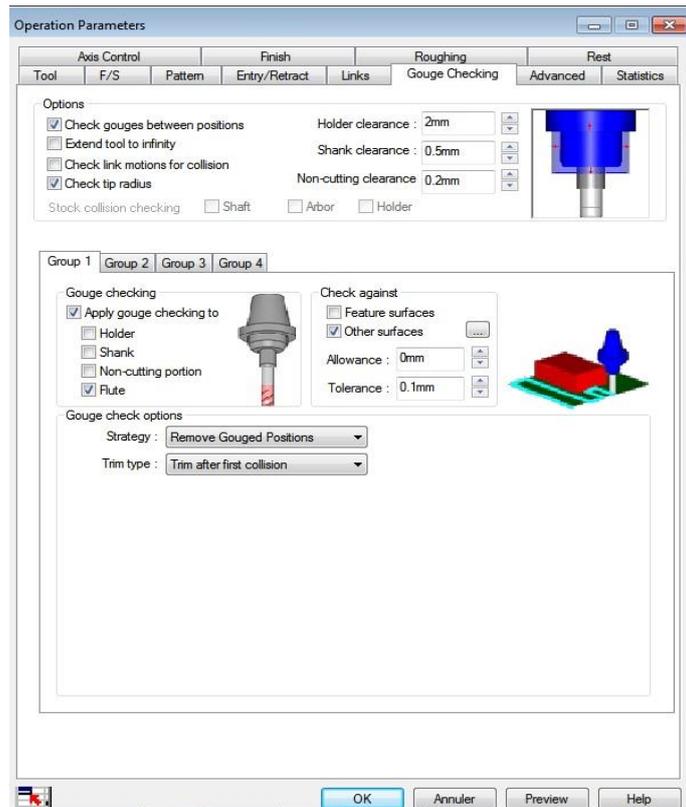


Figure 87 vérification les collisions entre la surface usinée et les autres surfaces

Dans l'opération d'ébauche et l'opération de finition notre stratégie consiste à usiner des surfaces réglées.

Certains travaux se sont intéressés à l'orientation de l'axe de l'outil et à son sens de parcours pour des stratégies de type « plan parallèle ». D'autres travaux concernent un type de stratégie optimisée pour l'usinage de formes complexes ou l'usinage en flanc pour des hélices.

Pour générer les deux surfaces de notre aube, il faut générer le flanc de l'outil tangent aux règles de surface« usinage en roulant », et régler les paramètres de contrôle des axes,

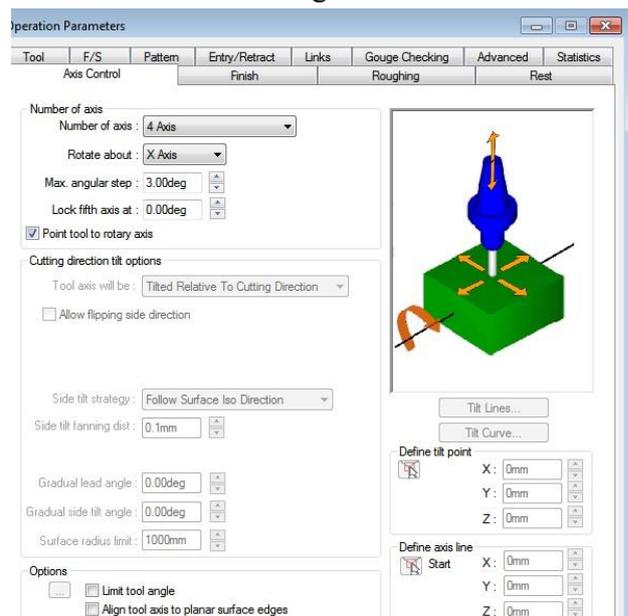


Figure 88 réglage paramètres de contrôle des axes

Remarque : dans le cas de dépouille l'angle d'inclinaison latérale est 90 dég, et le nombre d'axe 5

III.6 Stratégie d'ébauche (application sur le modèle)

III.6.1- STRATEGIE : OFFSET FROM SURFACE

Nous présentons tout d'abord un modèle de génération de trajectoire plus adapté sur l'usinage de surface de fond entre les aubes « usinage par plan parallèle », cette génération de trajectoire basée sur le choix de modèle « offset from surface ».

Dans cette stratégie nous avons défini la géométrie de l'outil le plus précisément possible pour générer la trajectoire sans collision avec les autres surfaces, outil torique de \varnothing 4mm, surépaisseur 1 mm.

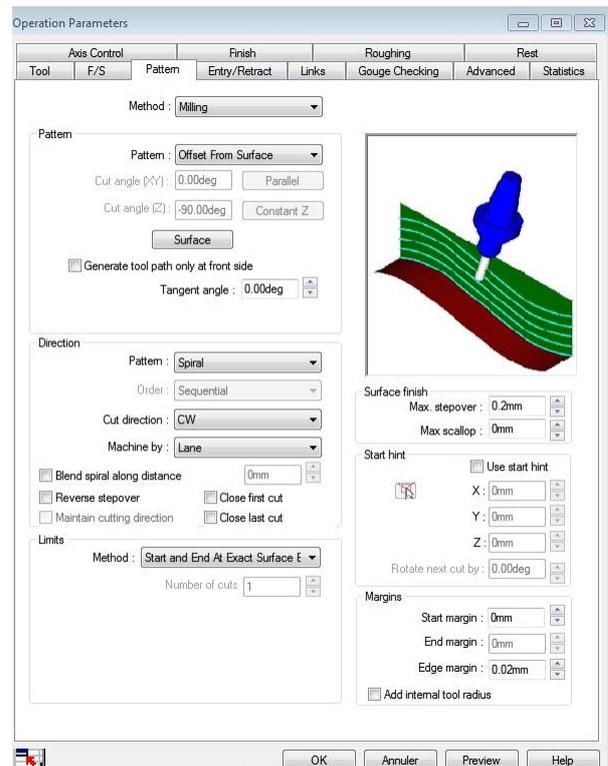


Figure 89 génération de trajectoire sur le fond

➤ Brut ébauché ou pièce pré-usinée

L'usinage s'effectue par décalage de la surface. Cette stratégie d'ébauche permet d'adapter parfaitement la trajectoire, la position de l'outil et les longueurs d'outil à la géométrie.

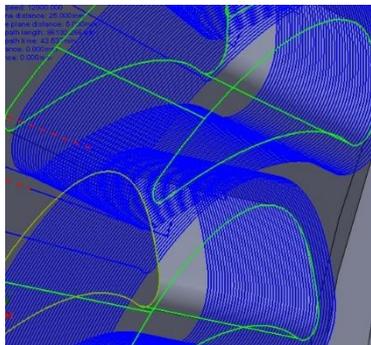


Figure 90 stratégie d'ébauche par plan décalé

III.6.2 STRATEGIE: EBAUCHE DES SURFACES DE MOYEU

Nous avons défini la géométrie de la surface d'usinage, les surfaces d'usinage sont constituées de deux surfaces très courbées. La géométrie de l'outil le plus précisément possible, outil torique \varnothing 4 mm, surépaisseur 1 mm.

La génération de trajectoires en multiaxe se décompose en plusieurs étapes : construction d'une position outil optimale sans interférence, agencement des positions le long d'une passe, distribution des passes pour couvrir la pièce et test d'interférence global entre l'outil et la pièce.

Le modèle de génération de trajectoire le plus adapté pour les deux hélices, c'est le modèle « isoparamètre entre les courbes ».

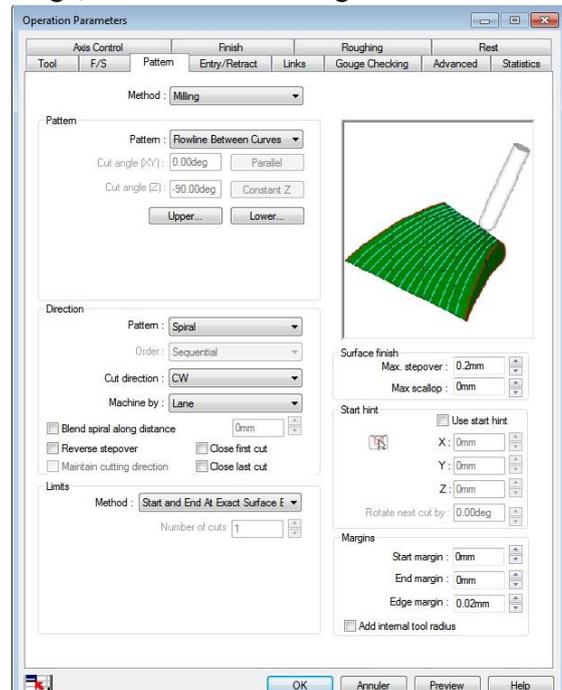


Figure 91 modèle isoparamètre entre les courbes

III.6.3 STRATEGIE: FINITION DE L'AUBE USINAGE EN ROULANT

La surface des aubes permet un usinage des flancs en roulant, cette stratégie raccourcit considérablement la durée de l'usinage. *Camworks* calcule automatiquement l'orientation optimale de l'outil. Nous utilisons dans cette stratégie l'outil torique \varnothing 3 mm.

La ligne de contact à la courbe de l'usinage en roulant réduit le nombre de passes, et donc la durée d'usinage. En plus de définir un meilleur positionnement de l'outil sur la surface. C.à.d. fournit des informations sur la qualité de surface obtenue.

III.6.4 STRATEGIE:FINITION PAR BALAYAGE DU FOND

- Finition du fond et reprise de matière résiduelle à proximité des aubes.

Cette stratégie convient à la finition du fond de turbine. Et s'emploie également pour la reprise de matière résiduelle à proximité des aubes. L'outil torique \varnothing 3 mm le plus précise dans cette stratégie.

III.6.5 STRATEGIE D'USNAGE COMPLEMENTAIRES

III.6.5.1 Usinage des bords d'attaque et de fuite

Lorsque l'usinage des bords d'attaque et/ou de fuite ne peut s'effectuer pour des raisons technologiques dans un usinage de l'aube périphérique continu, la reprise des bords turbine est utilisée. L'usinage des rayons de pieds de l'aube est utilisé lorsque le modèle contient des rayons très petits ou variables.

Cette stratégie d'usinage est utile lorsque les bords d'attaque et/ou de fuite ne peuvent pas être usinés dans la continuité des surfaces d'écoulement.

III.6.5.2 Usinage des rayons de pied de l'aube

La stratégie idéale lorsque les rayons de pied de l'aube entre les surfaces de fond et d'aubes évoluent. Elle permet également de réaliser l'usinage de matière résiduelle, permettant une utilisation optimale des outils.

Une fois ces paramètres fixés, le préparateur va pouvoir générer l'ensemble des séquences d'usinage en faisant varier les paramètres restant libre. Il va pouvoir par exemple faire varier la courbe d'usinage, le diamètre de l'outil ou même changer de type de stratégie d'usinage pour obtenir l'ensemble des modèles F.A.O. pour la pièce usinée.

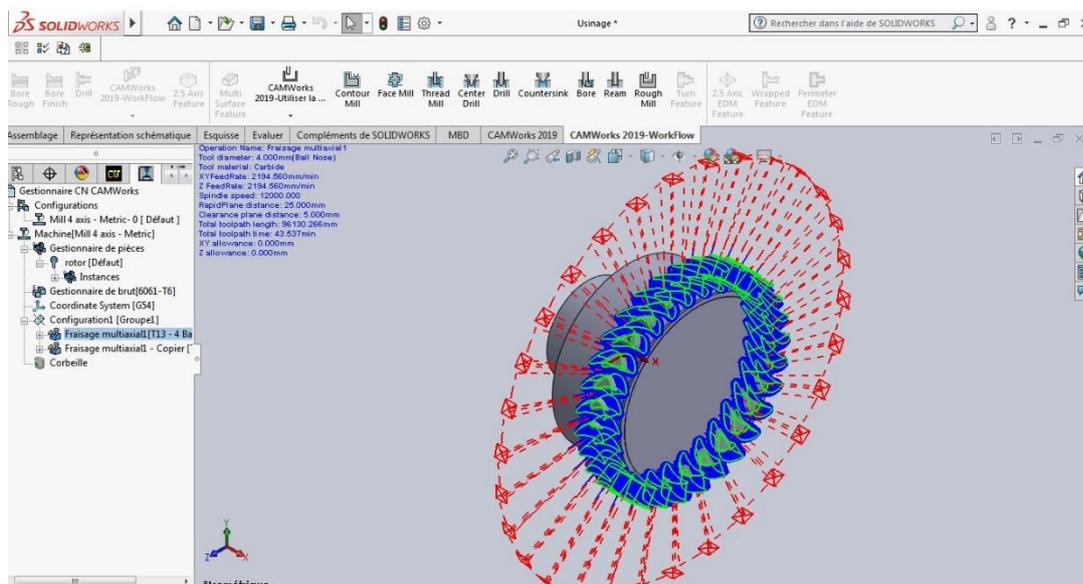


Figure 92 génération l'ensemble des séquences d'usinage

Remarque :

Les traits bleus représentent les passes.

Le carré rouge représente la hauteur d'approche.

Le trait rouge le mouvement de l'outil sur l'axe Z.

III.7 simulation d'usinage

III.7.1 CALCUL DES TRAJECTOIRES D'USINAGE DE LA PIECE

Dans cette partie nous allons intéresser à la génération des trajectoires d'usinage dans l'espace pièce. Le programme ainsi obtenu ne sera pas dédié à une machine. Les principales difficultés que va poser l'usinage de notre aube sont :

- L'usinage de SRND, car chacun des flancs est réglé mais non développable ;
- Le passage entre deux aubes, car notre modèle est composée de 30 aubes.

Le problème du changement d'orientation d'outil entre deux courbes n'a pu être entièrement éliminé et il reste des marques sur la pièce. Il faut vérifier une fois l'usinage réalisé si ce marquage est bien présent sur la pièce physique.

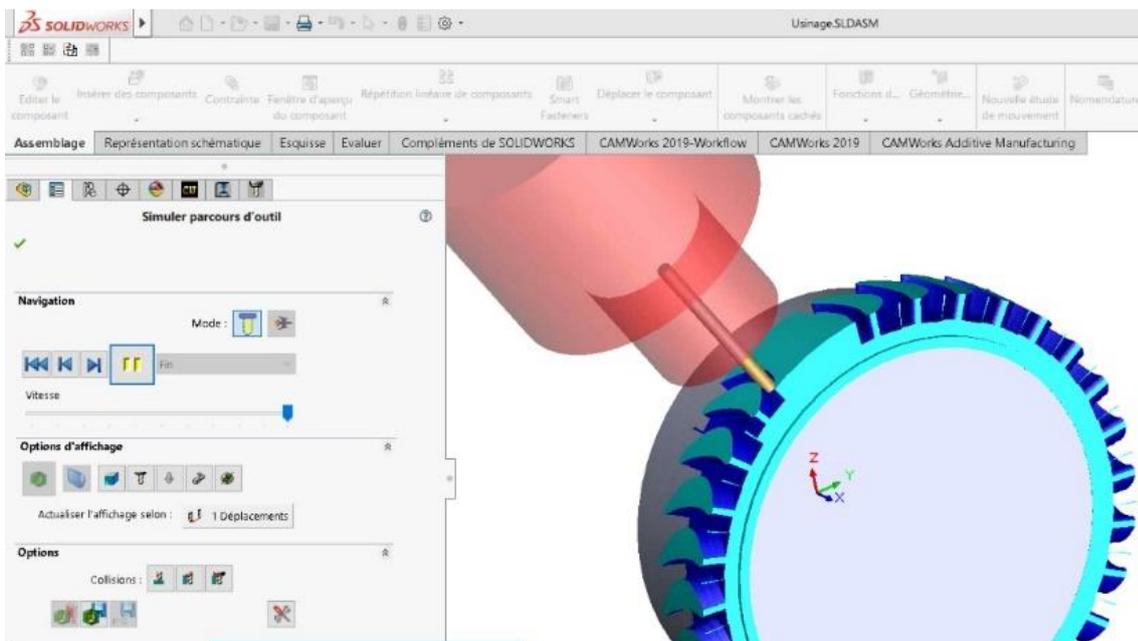


Figure 93 espace « outil- pièce »

III.7.2 VERIFICATION DE L'USINAGE DANS L'ESPACE MACHINE

La seule analyse des trajectoires dans l'espace pièce en FAO est insuffisante pour valider l'usinage sur la machine [TOURNIER et al 06]. Il faut aussi vérifier si l'usinage se passe dans de bonnes conditions du point de vue des mouvements de chacun des axes de la machine. En effet, il est possible de voir apparaître des mouvements incohérents (des oscillations ou des changements brusques de valeur dans les articulations de la machine) sur les axes de la machine alors que le programme, dans le repère pièce, ne présente aucun problème. Ces mouvements incohérents peuvent être dus à deux causes :

- Passage d'un point singulier. Un point singulier est un point où la machine a de nombreux choix de chemin pour en partir tout en atteignant le même point d'arrivée ;

- Changement d'espace de solution. En effet, lorsque la machine atteint une butée physique de l'axe elle doit changer d'espace de solution ce qui entraîne des grands déplacements dans l'espace articulaire alors que les déplacements dans l'espace pièce sont faibles.

Il nous faut donc pour réaliser cette étape choisir tous les paramètres d'usinage (trajectoire, outil, porte pièce, machine, etc.) pour réaliser le calcul d'inversion de coordonnées. Pour réaliser cet usinage on a donc généré, avec notre FAO, la trajectoire d'outil. Cette étape nous permet d'obtenir un fichier *CNC code. Puis on utilise un post processeur pour transformer les coordonnées de l'espace pièce en coordonnées articulaires (x, y, z, A, C). Finalement on utilise un simulateur de mouvement machine pour visualiser les mouvements du berceau et de la table afin de voir s'il n'y a pas de mouvements incohérents.

On a pu voir que la mise en œuvre de 5 axes sur une machine nécessite, suivant la stratégie utilisée, une préparation spécifique : montage, configuration de CN

L'architecture de la machine joue un rôle capital dans le travail de préparation. Dans notre cas, nous avons du relever la pièce de 135 mm au minimum pour éviter les problèmes de collision avec la poche d'outil (Figure 95).



Figure 94 espace « machine- pièce »

Conclusion général

CONCLUSION GENERALE :

A) Conception et simulation de la section puissance :

ANSYS et les calculs manuels nous donnent des résultats identiques avec ceux donnés par l'entreprise, ce qui confirme que notre conception à l'étage de la turboforeuse est réalisée avec succès.

B) Usinage

- 1) Ce travail, nous a permis d'avoir une idée générale sur les machines outil à commande numérique MOCN ainsi qu'un aperçu sur la conception et la fabrication assisté par ordinateur CFAO et leur évolution. Ensuite on a fait une application de la conception de partie motrice pour usinage et une analyse de fabrication de rotor qui composent l'étage turboforeuse afin de déterminer les processus d'usinage, puis on a réalisé les dossiers de fabrication de la pièce rotor (stratégie d'usinage).
- 2) A ce jour, les pièces prototypes réalisées à partir du model virtuel ou en manque des données suffisant pas forcément des propriétés mécaniques suffisantes ni la précision requise pour être placées dans des mécanismes fonctionnels. L'objectif de ce travail est de réaliser des mécanismes prototypes fonctionnels, c'est-à-dire capables de fonctionner sur un banc d'essais ou en service dans son milieu d'utilisation (sur une turboforeuse dans notre exemple).
- 3) C'est tout au long du procédé de fabrication, y compris au moment de la conception, que doit se poser la question de l'état de surface:
 - Au moment de la construction de la gamme d'usinage avec le choix des outils, mais aussi des stratégies et du moyen de production
 - Au moment de générer les trajectoires FAO en réglant correctement les tolérances d'usinage et d'orientation et en choisissant judicieusement les directions de balayage
 - En validant le fonctionnement du post-processeur
 - En s'assurant du choix du posage de la pièce dans le cas de moyens de production à comportement/précision hétérogènes dans l'espace de travail
 - En réglant correctement les paramètres de la commande numérique
 - En choisissant judicieusement l'outil et les conditions de coupe
 - En essayant d'éviter ou au moins de maîtriser l'apparition de phénomènes vibratoires et leur impact sur la surface finie

Bibliographie

BIBLIOGRAPHIE :

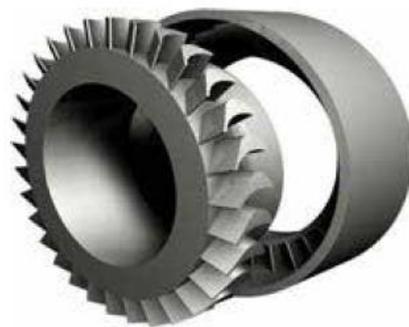
- 1) Standard Handbook of Petroleum & Natural Gas Engineering 2nd edition.
wilyzmsC.Lyons – Gary j.Plisga
- 2) Turbodrill Basics Manual - NEYFOR -6June 2004. David Truax - Bill Wamsley.
- 3) Fluid Mechanics and Thermodynamics of Turbomachinery. S.L. DIXON and C.A.HALL
- 4) Principles of Turbomachinery. second edition R.K. Turton
- 5) Tribologie principes et materiaux SAID BENSAADA- M.T.BOUZIANE
- 6) Drilling-Engineering-Workbook-Baker-Hughes-INTEQ
- 7) ANSYS-Workbench platform.
- 8) Engineering Analysis with ANSYS Software.
A. Turbodrill design and performace analysis. Mokramian- V. Rasouli
- 9) Turbodrill flow investigation through small turbodrill for optimal performance Mechanical Engineering Research, Published by Canadian Center of Science and Education
- 10) Théorie des turbomachines. M.reggio et JY.Tripanier.
- 11) Dixon, S. L. (1998). Fluid Mechanics, Thermodynamics of Turbomachinery. Linacre House, Jordan Hill, Oxford OX2 8DP: pergamon Press.

annexes

ANNEXES :



Etage de turboforeuse



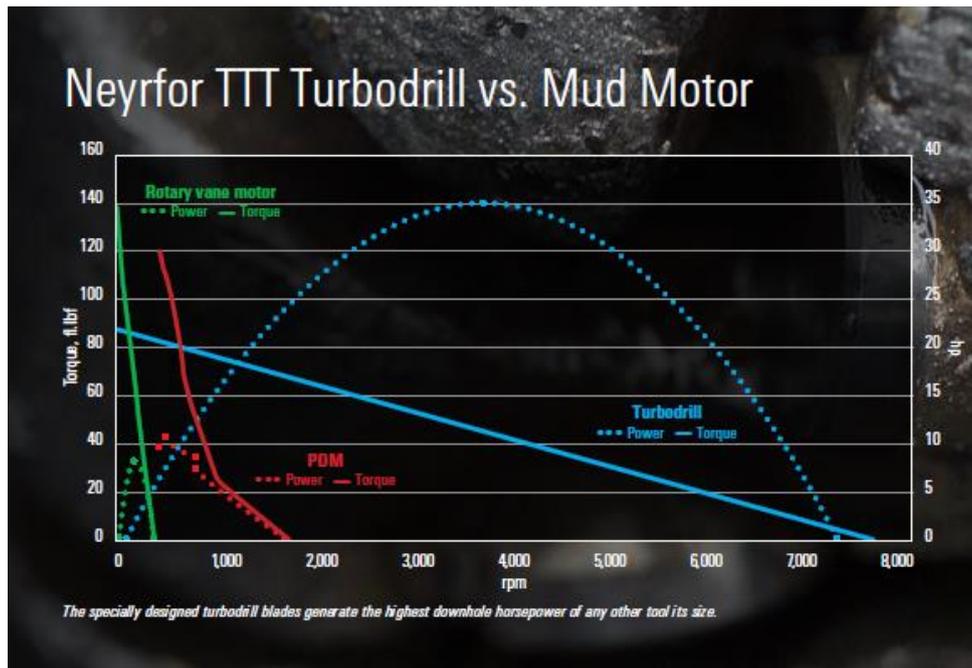
Etage de turboforeuse

Rig Capabilities Power at Bit

	Blade Type	Power Section Configuration				
		T1	TSH	T2		
Mud Weight	Torque at Bit	MK1	Stages = 86 RPM=1172 Torque=670 ft-lb Hp = 149	Stages = 112 RPM = 1172 Torque = 847 ft-lb Hp = 189	Stages = 172 RPM=1172 Torque=1255 ft-lbs Hp = 280	
			MK2	Stages = 75 RPM=1000 Torque=745 ft-lbs Hp = 142	Stages = 100 RPM = 1000 Torque = 961 ft-lb Hp = 183	Stages = 100 RPM=1000 Torque=1391 ft-lbs Hp = 265
				MK3	Stages = 50 RPM=1452 Torque=750 ft-lbs Hp = 207	Stages = 100 RPM = 1452 Torque = 1430 ft-lb Hp = 395

Turbine power values calculated at, 10ppg OBM, 450gpm (nominal),

Les différents types de la turboforeuse



Comparaison entre la turboforeuse et le PDM