



République algérienne démocratique et populaire
Ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche scientifique

Université Echahid Hamma Lakhdar - El Oued

Faculté de Technologie

Département de Génie mécanique

Mémoire en vue de l'obtention du diplôme de

MASTER ACADÉMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Électromécanique

Spécialité: Électromécanique

Présenté par:

1. **RAMZI LAGOUBI**
2. **OTHMANE CHOUCANI**
3. **SAIF EDDINE GHADI**

Intitulé:

ETUDE DE FRAISAGE D'UNE PIECE A PAROIS MINCES

Soutenu publiquement le : .../09/2025

Devant le jury :

Dr. DJOKHRAB A.	Président	Université d'Eloued
Dr. KHECHANA M.	Encadreur	Université d'Eloued
Dr. BABOUKHA A.	Examineur	Université d'Eloued

Année universitaire: 2024/2025

Résumé

Étude de l'usinage par fraisage des pièces à parois minces, caractérisées par une faible rigidité et confrontées à divers défis techniques. Le travail se concentre sur l'analyse des vibrations et des déformations influençant la précision et la qualité de l'usinage sur machines CNC, tout en proposant des stratégies efficaces pour les réduire. Les aspects liés à la conception et au renforcement de la rigidité ont été abordés, ainsi que l'utilisation de simulations numériques afin d'évaluer l'effet des forces de coupe et d'identifier des solutions permettant de diminuer considérablement les déformations. L'étude inclut également les conditions de coupe, les méthodes de fixation adaptées, ainsi que les facteurs thermiques et mécaniques influençant le processus. L'importance d'une approche intégrée combinant conception, simulation et fabrication est mise en évidence, contribuant à améliorer la précision et la qualité, notamment dans les applications industrielles avancées telles que l'aéronautique.

Mots-clés : Fraisage, pièces à parois minces, vibrations, déformations, simulation, usinage CNC.

Abstract

Study of milling thin-walled parts, which are characterized by low rigidity and face various technical challenges. The work focuses on analyzing vibrations and deformations that affect machining accuracy and quality on CNC machines, while proposing effective strategies to reduce them. Design aspects and methods to enhance rigidity were considered, along with the use of numerical simulations to evaluate the influence of cutting forces and to identify solutions that significantly reduce deformations. The study also covers cutting parameters, suitable fixturing methods, and both thermal and mechanical effects on the process. Emphasis is placed on an integrated approach combining design, simulation, and manufacturing, contributing to improved precision and quality, particularly in advanced industrial applications such as aerospace.

Keywords: Milling, thin-walled parts, vibrations, deformations, simulation, CNC machining.

المخلص

دراسة عملية التفريز للأجزاء رقيقة الجدران، التي تتميز بضعف صلابتها وما يرافق ذلك من تحديات تقنية. يركز العمل على تحليل الاهتزازات والتشوهات التي تؤثر على دقة وجودة التشغيل على آلات الـ CNC، مع اقتراح استراتيجيات فعالة للحد منها. تمت معالجة الجوانب التصميمية لهذه الأجزاء وطرق تعزيز صلابتها، إلى جانب استخدام المحاكاة العددية لتقييم تأثير قوى القطع وإيجاد حلول تقلل من التشوهات بشكل ملحوظ. كما شملت الدراسة شروط القطع وطرق التثبيت المناسبة، مع معالجة العوامل الحرارية والميكانيكية المؤثرة على العملية. يبرز العمل أهمية اتباع نهج متكامل يجمع بين التصميم والمحاكاة والتصنيع، بما يسهم في تحسين الدقة والجودة، خاصة في التطبيقات الصناعية المتقدمة مثل صناعة الطيران.

الكلمات المفتاحية: التفريز، الأجزاء رقيقة الجدران، الاهتزازات، التشوهات، المحاكاة، التشغيل على آلات CNC.

III

الإهداء

إلى والديّ العزيزين، النبراس الذي أضاء دربي، والسند الذي لم يخذلني يوماً، شكري
وامتتاني لن يوفيكما حقكما مهما كتبت.

إلى أُمي الحبيبة، قلبٌ نابض بالحب والدعاء، وإلى أبي الغالي، رمز القوة والعطاء، أهديكما
ثمرة سنوات من التعب والكفاح.

إلى إخوتي وأخواتي، رفاق الدرب منذ الصغر، الذين كانوا دوماً عوناً وسنداً في كل مراحل
حياتي.

إلى أساتذتي الأفاضل، الذين غرسوا فيّ حب العلم، ووجّهوني بخبرتهم ونصحهم حتى
وصلت إلى هذه المحطة الهامة.

إلى زملائي وأصدقائي، الذين تقاسمت معهم لحظات التعب والجد والاجتهاد، والذين جعلوا
طريق الدراسة أكثر إشراقاً.

إلى كل من ساعدني بكلمة، أو بدعاء صادق، أو بمساندة في الخفاء، إلى كل من له بصمة
في مسيرتي العلمية والعملية،

أهدي هذا العمل المتواضع عربون وفاء وتقدير.

IV

شكر وتقدير

أتقدم بجزيل الشكر والامتنان إلى كل من ساهم في إنجاز هذا العمل المتواضع، من قريب أو بعيد.

أخص بالشكر أساتذتي الكرام على ما قدموه من علم وتوجيه ودعم طيلة فترة دراستي، فقد كانوا خير معين وخير قدوة.

كما أتوجه بخالص التقدير إلى كل من مدّ لي يد العون، سواء بكلمة طيبة، أو نصيحة صادقة، أو دعاء مستجاب.

ولا أنسى زملائي وأصدقائي الذين شاركوني مسيرة الكفاح، وكان لهم دور في تذليل الصعاب
وجعل هذه الرحلة أكثر سهولة وبهجة.

وأخيراً، شكري موصول إلى كل من له فضل عليّ، أكان ذلك ظاهراً أو خفياً، فبفضل الله
أولاً ثم بدعمكم، وصلت إلى هذه المحطة الهامة من حياتي العلمية.

V

Table des matières

Résumé	I
Abstract	II
Résumé en arabe	III
Dédicaces	IV
Remerciements	V

Introduction1

Chapitre I: Étude Bibliographique sur le fraisage des pièces à parois minces

1. Introduction au fraisage des pièces à parois minces... ..	4
2. Phénomènes critiques lors du fraisage des parois minces.....	5
2.1 Vibrations en usinage.....	5
2.2. Déformations statiques et dynamiques.....	6
2.2.1. Déformations statiques.....	6
2.2.2. Déformations dynamiques.....	7
3. Stratégies de mitigation.....	7

Chapitre II: Choix d'une pièce à paroi mince et conception

1. Choix d'une pièce à paroi mince et conception

1.1. Contexte et objectif.....	10
1.2. Critères de choix de la pièce.....	10
1.3. Pièce retenue.....	11
2. Matériau de l'hélice.....	13

Chapitre III: Simulation de la pièce choisie sous différents chargements

1.Introduction.....	15
2. Simulation par éléments finis (FEA).....	15
3.Simulation.....	15
4. Résultats de la simulation.....	17

Chapitre IV: Etude du processus de fraisage CN de la pièce choisie

1.Introduction.....20

1.1. Objectif du chapitre.....	20
1.2.Choix de l'atelier de fabrication sous CATIA.....	22
2.Mise en place du contexte.....	22
2.1. Création de l'opération-pièce.....	22

2. 2. Définition du repère d'usinage.....	22
3. Définition du brute et stratégie de maintien de rigidité.....	22
3.1. Définition du brute.....	22
3. 2. Approche “rigidité d’abord”.....	22
4. Choix du système de serrage (Montage) et modélisation dans CATIA.....	23
4.1. Rôle du serrage pour les parois minces.....	23
4. 2.Représentation du montage dans CATIA.....	24
5. Création du Programme d’usinage et planification des operations.....	25
6. Outils, conditions de coupe et génération des trajectoires	25
6.1.Définition des outils.....	27
6. 2.Définition des conditions technologiques.....	26
6. 3.. Génération et analyse des trajectoires.....	26
7. Vérification et simulation de l’enlèvement de matière.....	26
7.1.Vérification cinématique	26
7.2.. Simulation d’enlèvement de matière.....	27
8. Génération du programme NC et préparation pour la machine CN.....	27
9. Résultats attendus et recommandations finales	28
Conclusion	30
Références bibliographiques	33

Liste des tableaux

Tableau	Page
Tableau 1.1 : Types et caractéristiques des vibrations en fraisage (Chapitre I)	6
Tableau 2.1 : Propriétés mécaniques et thermiques de l'alliage d'aluminium (Chapitre II)	13

Liste des figures

Figure	Page
Figure 1.1 : Exemple de pièce à paroi mince utilisée en aéronautique	4
Figure 1.2 : Types de vibrations en fraisage (libres, forcées, régénératives)	6
Figure 2.1 : Construction d'une pale de l'hélice	11
Figure 2.2 : Vue de l'hélice conçue.	12
Figure.2.3. : Mise en plan de l'hélice	12
Figure 3.1 : L'hélice importée dans Design modeler.	16
Figure 3.2 : L'hélice maillée	16
Figure 3.3 : Distribution des déformations	17
Figure 3.4 : Distribution des contraintes	17
Figure 3.5 : Distribution des déplacements	18
Figure 4.1 : Sélection de l'atelier usinage multiaxes	21
Figure 4.2 : L'Arbre PPR montrant le triplet : Process-Produit-Resources	21
Figure 4.3 : Définition/visualisation du brut (pièce jaune) autour de la pièce finie	23
Figure 4.4 : Représentation des trajectoires de l'outil pour l'usinage des 3 faces des aubes	24
Figure 4.5 : : Visualisation de la simulation de l'usinage des 3 faces des aubes	25
Figure 4.6 : Parametrage pour la sortie du code ISO	27

Liste des symboles

Symbole	Désignation	Unité
CNC	Commande Numérique par Calculateur	–
Hz	Hertz – fréquence	s ⁻¹
mm	Millimètre – unité de longueur	–
(f _z)	Avance par dent	mm/dent
(V _c)	Vitesse de coupe	m/min
(a _p)	Profondeur de passe radiale	mm
(a _e)	Profondeur de passe axiale	mm
(F _c)	Force de coupe	N
(ω)	Fréquence angulaire	rad/s
(ζ)	Facteur d'amortissement	–
STF	Fluide à viscosité augmentée sous cisaillement	–
Modal shape	Forme modale	–

Introduction

Introduction

Les pièces à parois minces sont des composants essentiels dans de nombreuses industries avancées, telles que l'aéronautique, l'automobile, l'électronique et les équipements médicaux, en raison de leurs propriétés uniques telles que la légèreté, la haute résistance et l'efficacité dans l'utilisation des matériaux. Par exemple, dans l'aéronautique, ces pièces sont utilisées dans la fabrication des structures d'avions, des moteurs et des composants structurels, où le taux d'enlèvement de matière peut atteindre 80 à 90 % lors du processus d'usinage, ce qui les rend particulièrement vulnérables aux déformations et aux vibrations. Cependant, leur faible rigidité (incluant la rigidité en cisaillement, en flexion et en torsion) entraîne des défis majeurs lors du fraisage, tels que les vibrations (chatter ou régénératives), les déformations statiques et dynamiques, ainsi que des imprécisions dimensionnelles et géométriques. Ces défis affectent négativement la qualité de surface, la précision géométrique et l'efficacité de production, pouvant entraîner une augmentation des coûts et des retards dans la production.

Dans le contexte du fraisage, en particulier le fraisage latéral ou le fraisage à grande vitesse, les pièces à parois minces sont sujettes à des déformations causées par les forces de coupe, la chaleur générée par le frottement et les contraintes résiduelles dans le matériau. Par exemple, les forces de coupe (atteignant 25 à 50 N) peuvent provoquer des déformations élastiques ou élastoplastiques, entraînant des écarts dimensionnels de 0,1 à 0,15 mm. De plus, les vibrations, qu'elles soient forcées ou auto-entretenues (comme le chatter régénératif), augmentent l'usure des outils et réduisent la qualité de surface. Selon des études récentes, ces pièces peuvent être classées en quatre types principaux : les pièces intégrées, radiales, annulaires et les surfaces courbes complexes, chaque type étant affecté différemment par les déformations.

Ce mémoire vise une étude approfondie du fraisage d'une pièce à parois minces, en se concentrant sur l'analyse des défis liés aux vibrations, aux déformations et aux processus de fraisage à commande numérique (CNC). Des solutions pratiques seront proposées pour minimiser ces problèmes et améliorer la précision et la qualité, en s'appuyant sur des études scientifiques récentes et des modèles analytiques. La méthodologie adoptée comprend une revue bibliographique, le choix et la conception d'une pièce, sa simulation sous différentes charges, et l'analyse du processus de fraisage CNC. Cette étude devrait contribuer au développement de techniques d'usinage plus efficaces, notamment dans les domaines de l'aéronautique et des industries de précision, où l'utilisation de ces pièces devrait croître avec l'évolution de la fabrication intelligente et des jumeaux numériques.

Chapitre I: Étude bibliographique sur le fraisage des pièces à parois minces

1. Introduction au fraisage des pièces à parois minces

Le fraisage des pièces à parois minces constitue un défi technique majeur en raison de leur faible rigidité. Ces pièces, fréquemment réalisées en alliages d'aluminium (ex. 7075) ou en titane, se caractérisent par une faible épaisseur (souvent inférieure à 2–3 mm) et/ou par un rapport hauteur/épaisseur élevé (souvent supérieur à 10:1). Cette configuration géométrique les rend particulièrement sensibles aux efforts de coupe, à l'échauffement local et aux vibrations, ce qui dégrade la précision dimensionnelle et géométrique.

Le fraisage latéral de finition est particulièrement critique, car l'enlèvement important de matière modifie progressivement la masse, la rigidité et donc le comportement dynamique de la pièce. L'usinage CNC de ce type de pièces s'est développé à partir des années 1980, et s'oriente aujourd'hui vers des approches plus intelligentes intégrant la modélisation avancée et des stratégies de compensation.

Les facteurs influençant la précision incluent notamment : erreurs cinématiques et thermiques de la machine, usure et géométrie de l'outil, forme de la pièce brute, propriétés du matériau, choix du serrage et des appuis, rigidité machine-outil, ainsi que les conditions environnementales (température, humidité).



Figure 1.1 : Exemple de pièce à paroi mince utilisée en aéronautique

2. Phénomènes critiques lors du fraisage des parois minces

2.1 Vibrations en usinage

Les vibrations observées pendant le fraisage se classent généralement en trois catégories:

- Vibrations libres, dues à une perturbation initiale.
- Vibrations forcées, causées par des excitations périodiques (forces de coupe, déséquilibre, coupe interrompue).
- Vibrations auto-entretenues, principalement le chatter régénératif, résultant de variations de l'épaisseur du copeau liées à la surface déjà usinée.

Dans les pièces à parois minces, la faible rigidité et la coupe souvent interrompue favorisent des vibrations à haute fréquence. La réponse vibratoire dépend de la position d'excitation, de la fréquence des efforts de coupe et de leur intensité. La forme modale de la pièce influence fortement l'amplitude des vibrations ; ainsi, le changement de zone de contact outil/pièce au cours de l'usinage rend la prédiction du chatter plus complexe.

Pour analyser ces phénomènes, on utilise des modèles dynamiques (poutre en console/cantilever pour des géométries simples) ainsi que des modèles par éléments finis, en intégrant l'effet de l'enlèvement de matière sur la rigidité et les modes propres.

Aspect des vibrations	Détails	Exemples
Types	Libres, forcées, auto-entretenues	Chatter régénératif dû aux variations de copeau
Causes	Variations d'épaisseur, couplage de modes, position de coupe	Fréquence de la force de coupe modifie le mode vibratoire
Fréquences observées	992 Hz à 3996 Hz	Impact sur la qualité de surface

Tableau 1 : Types et caractéristiques des vibrations en fraisage

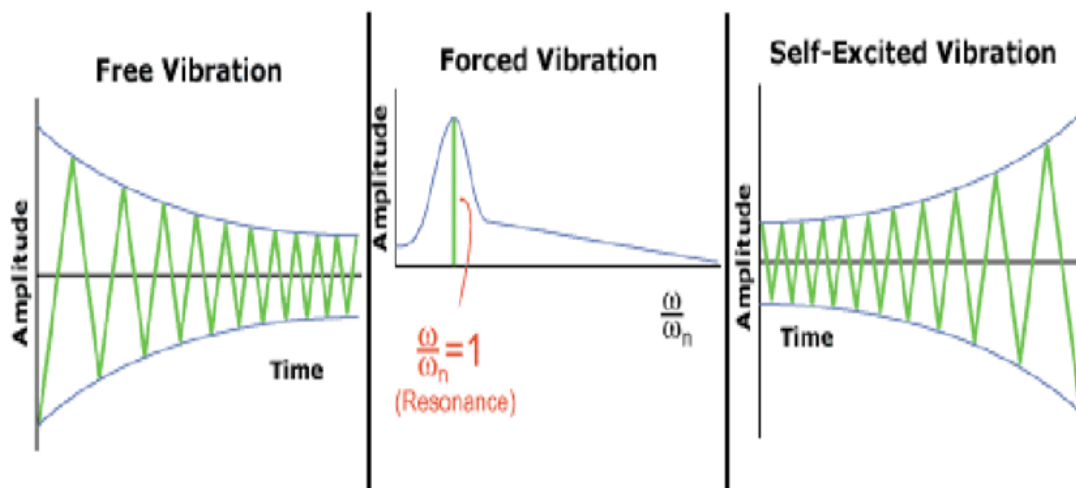


Figure 1.2 : Types de vibrations en fraisage (libres, forcées, régénératives)

2.2. Déformations statiques et dynamiques

2.2.1. Déformations statiques

Les déformations statiques apparaissent sous l'effet des forces de coupe continues. Les forces radiales sont souvent les plus critiques car elles induisent un flambage local ou un fléchissement de la paroi. La répartition non uniforme des efforts (souvent plus marquée près des bords) conduit à des déplacements pouvant être :

Élastiques (réversibles).

Élastoplastiques (partiellement irréversibles).

Ces déformations dégradent directement la conformité dimensionnelle et géométrique. Leur maîtrise nécessite l'optimisation des paramètres de coupe, le choix d'outils adaptés et un système de fixation renforçant la rigidité globale.

2.2.2. Déformations dynamiques

Les déformations dynamiques sont liées à des phénomènes transitoires: vibrations, instabilités (chatter), et effets thermiques. Elles évoluent dans le temps et dépendent des conditions instantanées de coupe, mais aussi de l'évolution de la géométrie (et donc de la rigidité) de la pièce pendant l'enlèvement de matière.

Pour analyser ces instabilités, l'utilisation d'outils de prédiction de stabilité (par exemple les lobes de stabilité, y compris des approches 3D) permet d'identifier des zones de coupe stables et d'ajuster les paramètres (vitesse de rotation, avance, profondeur de passe). Dans le cas des pièces micro-précises, l'étude fine des mécanismes de déformation dynamique devient essentielle pour garantir une précision élevée.

3. Stratégies de mitigation (réduction des vibrations et des déformations)

Plusieurs stratégies peuvent être combinées pour améliorer la stabilité du procédé et réduire les erreurs :

- Amortisseurs actifs (piézoélectriques ou électromagnétiques) pour absorber l'énergie vibratoire.
- Optimisation des conditions de coupe (vitesse, avance, profondeurs de passe, engagement radial) afin d'éviter les zones instables.
- Mesures de champ (ex. corrélation d'images) pour observer les déplacements réels et mieux calibrer les modèles.
- Fluides à viscosité augmentée sous cisaillement (STF) pour réduire les vibrations, notamment forcées, grâce à leur adaptation aux hautes fréquences

- Modèles de prédiction rapides (ex. réseaux neuronaux RBFNN) pour estimer rapidement les déformations et faciliter la compensation.
- Solutions de support/fixation spécifiques (supports magnétiques, supports à vide, appuis temporaires) largement utilisées dans l'aéronautique.
- Usinage adaptatif et compensation d'erreurs, basé sur la prédiction des déformations, la surveillance du procédé et l'ajustement des paramètres

Chapitre II: Choix d'une pièce à paroi mince et conception

1. Choix d'une pièce à paroi mince et conception

1.1 Contexte et objectif

Les pièces à parois minces sont essentielles dans plusieurs secteurs (aéronautique, automobile, électronique, médical) grâce à leur légèreté et leur efficacité matière. Dans l'aéronautique, elles apparaissent dans les structures d'avions, les composants de moteurs et les éléments structurels, avec un taux d'enlèvement de matière pouvant être très élevé, ce qui augmente les risques de déformations et de vibrations.

En fraisage (notamment en fraisage latéral et à grande vitesse), la pièce est soumise aux forces de coupe, à l'échauffement par frottement et aux contraintes résiduelles, ce qui peut causer des défauts dimensionnels et géométriques, dégrader l'état de surface et diminuer la productivité. L'objectif est donc de définir des critères de sélection d'une pièce représentative afin d'étudier et de traiter ces problèmes.

1.2 Critères de choix de la pièce

Le choix d'une pièce pertinente repose sur :

1. Épaisseur et rapports géométriques : faible épaisseur ($2-3\text{ mm}$) et rapport H/T élevé (>10:1).
2. Matériau : Alliage d'aluminium pour sa bonne usinabilité et son coût, ou titane si la résistance thermique/corrosion est prioritaire.
3. Application industrielle réelle : pièce représentative (ex. plaque ventrale, paroi structurelle).
4. Faible rigidité : sensibilité aux déformations et vibrations pour observer clairement les phénomènes.
5. Fabricabilité : compatibilité avec l'usinage CNC, possibilité d'ajouter des appuis/supports temporaires.

1.3. Pièce retenue

Sur la base de ces critères, la pièce choisie est une hélice dont les caractéristiques géométriques sont données par :

**Le pas : 150mm ; La hauteur : 50mm ; Diamètre du moyeu : 60mm ;
Diamètre extérieur : 240mm ; nombre de pales : 3.**

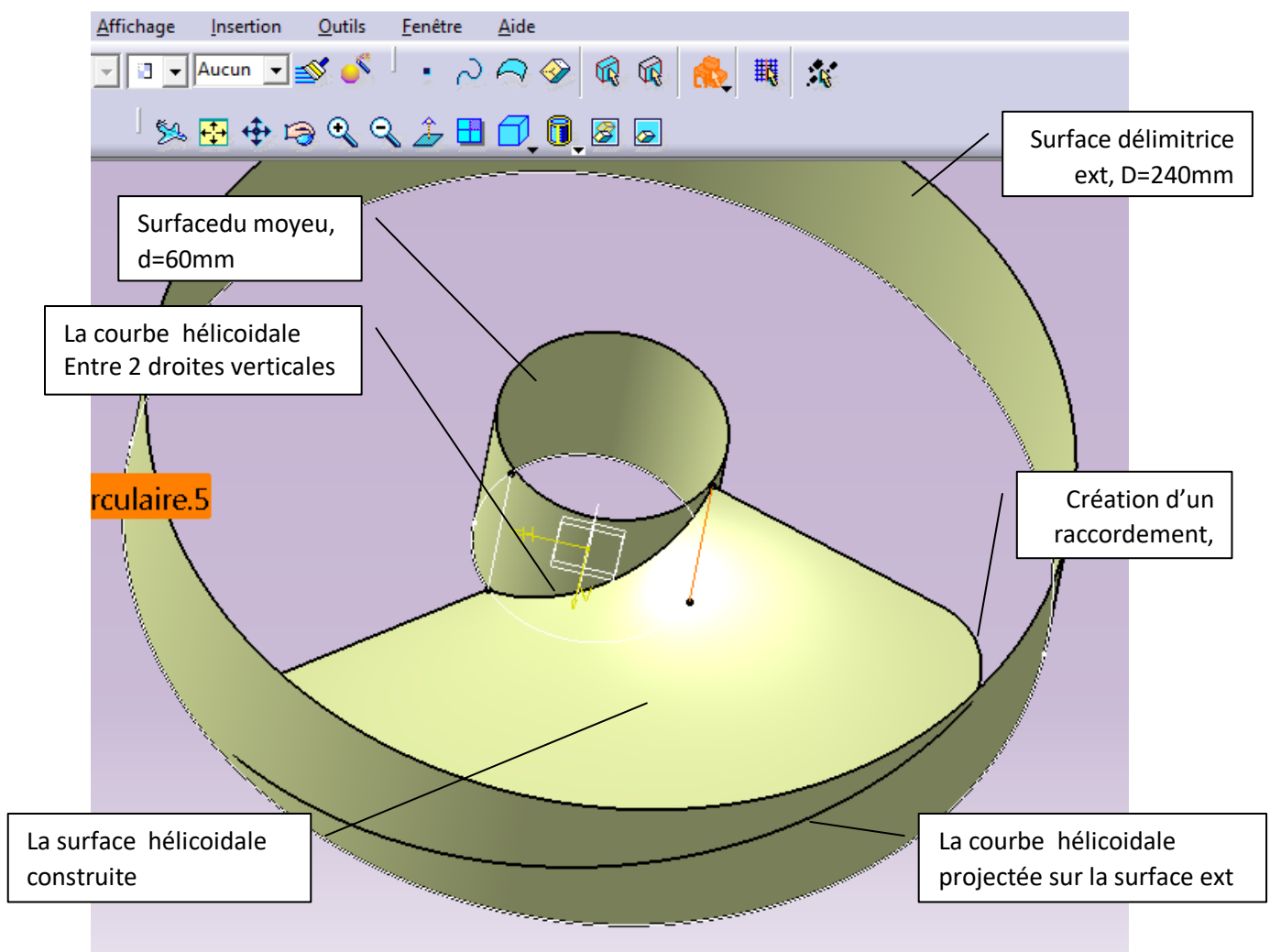


Figure.2.1. construction d'une pale de l'hélice

L'épaissement des surfaces, l'application de l'opérateur de répétition circulaire de la pale obtenue a donné l'hélice tripale suivante.

On procède par la suite à la création des 3 rainures nécessaires à l'entraînement et 3 trous destinés à la fixation.

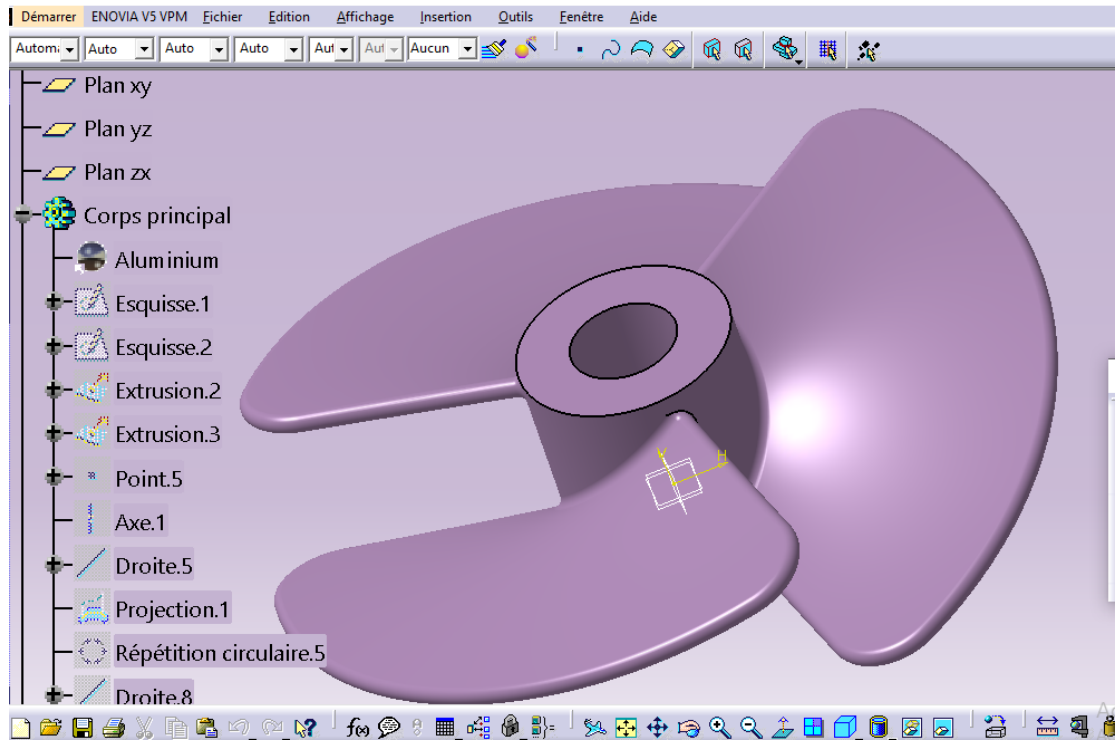


Figure.2.2 Vue de l'hélice conçue.

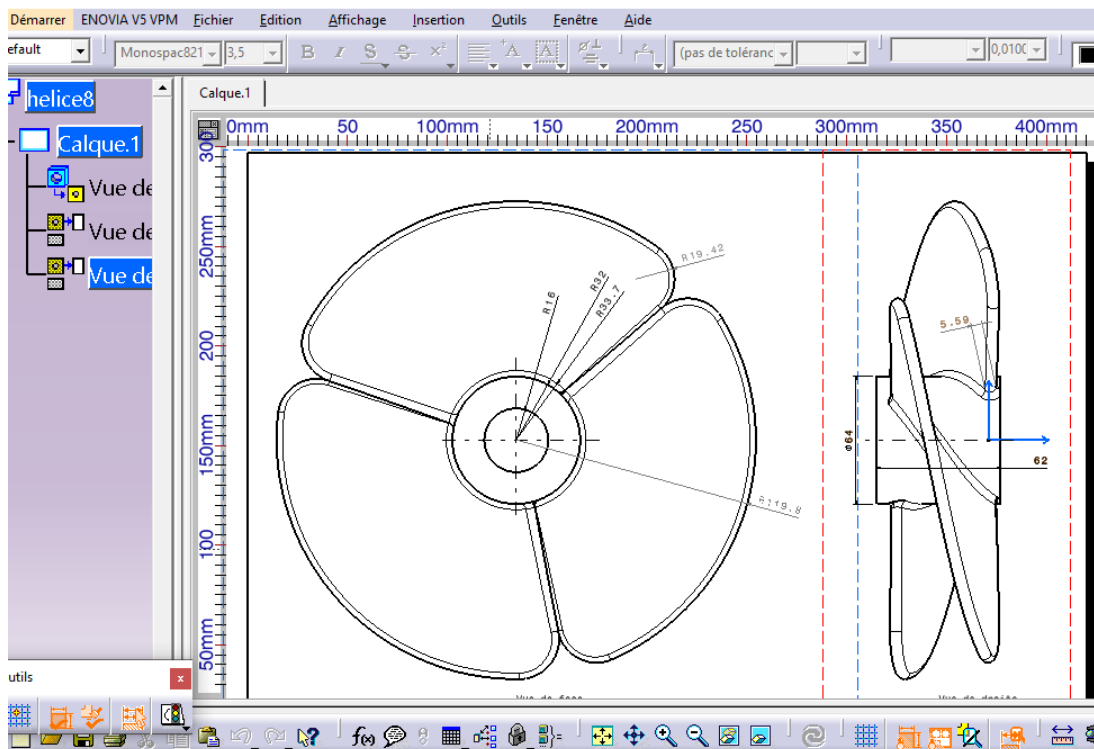


Figure.2.3. mise en plan de l'hélice

Cette géométrie représente un cas typique de pièce à paroi mince exposée aux risques de déformations dues aux forces de coupe et aux vibrations hautes fréquences.

2. Matériau de l'hélice

Le matériau choisi est un alliage d'aluminium. Ce dernier doit équilibrer propriétés mécaniques, usinabilité et coût. L'alliage d'aluminium est largement utilisé en aéronautique grâce à sa résistance élevée et son bon compromis global. Cependant, son module d'élasticité relativement modéré par rapport à des matériaux plus rigides (ex. titane) augmente sa sensibilité aux déformations sous charges de coupe, ce qui impose :

- une conception favorisant la rigidité (géométrie, nervures éventuelles, stratégie d'usinage),
- des conditions de coupe stables,
- un serrage et des supports adaptés.

Propriété	valeurs
Coefficient de Poisson	0.33
Limite élastique à la traction	280 MPa
Module d'élasticité	71 GPa
Coefficient d'expansion thermique	2,36e-005_Kdeg
Module de cisaillement	26.7 MPa
Masse volumique	2770kg_m3

Tableau 2.1 : Propriétés mécaniques et thermiques de l'alliage de l'aluminium

Les propriétés thermiques jouent également un rôle important : une bonne dissipation de chaleur peut limiter certains effets, mais la dilatation thermique et l'échauffement local peuvent tout de même affecter la précision dimensionnelle, surtout lors des opérations de finition.

Chapitre III: Simulation de la pièce choisie sous différents chargements

1. Introduction

Le fraisage des pièces à parois minces, telles que les hélices utilisées dans différents domaines, est une tâche complexe en raison de leur faible rigidité, qui entraîne des déformations et des vibrations. Cette étude se concentre sur une hélice. La simulation par éléments finis est utilisée pour analyser les déformations statiques, en s'appuyant sur le logiciel **ANSY WORKBENCH V17**. Cette approche permet de prédire les déformations, d'optimiser les paramètres d'usinage, et d'évaluer l'efficacité des stratégies de réduction des déformations, telles que l'ajout de nervures ou l'utilisation de supports temporaires.

Objectif: Simuler le comportement de la pièce sous différentes conditions de chargement pour identifier les déformations et proposer des solutions pour les minimiser.

2. Simulation par éléments finis

Une simulation **FEA** itérative est réalisée pour modéliser les déformations de l'hélice. La pièce est discrétisée en une maille tétraédrique d'environ **775531 nœuds** et de **512620 éléments**, avec **l'alliage d'aluminium** modélisé comme un matériau élastique et l'outil comme un corps rigide. La matrice de rigidité totale (**K**) est calculée en superposant les matrices de rigidité de chaque élément

3. Simulation

L'hélice conçue dans l'atelier de conception de CATIA a été exportée sous format step puis importée par le module design modeler de ANSYS

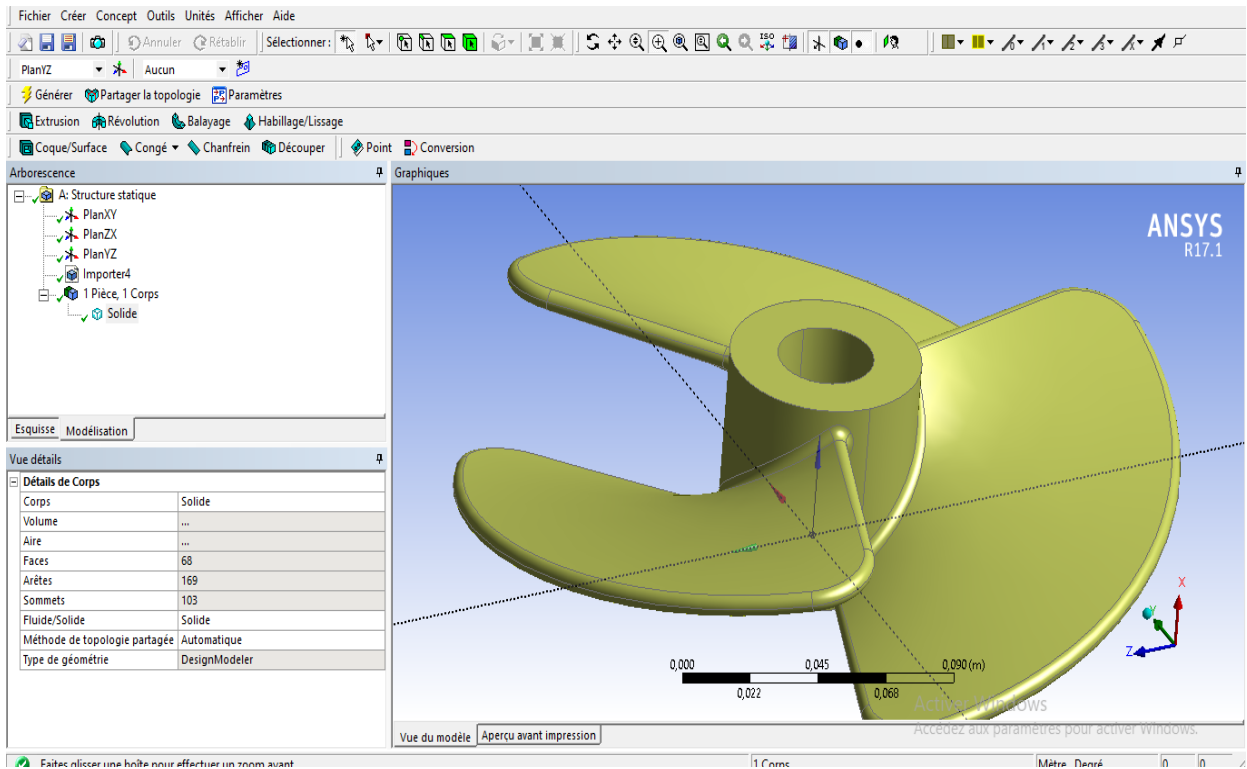


Figure 3.1. L'hélice importée dans Design modeler.

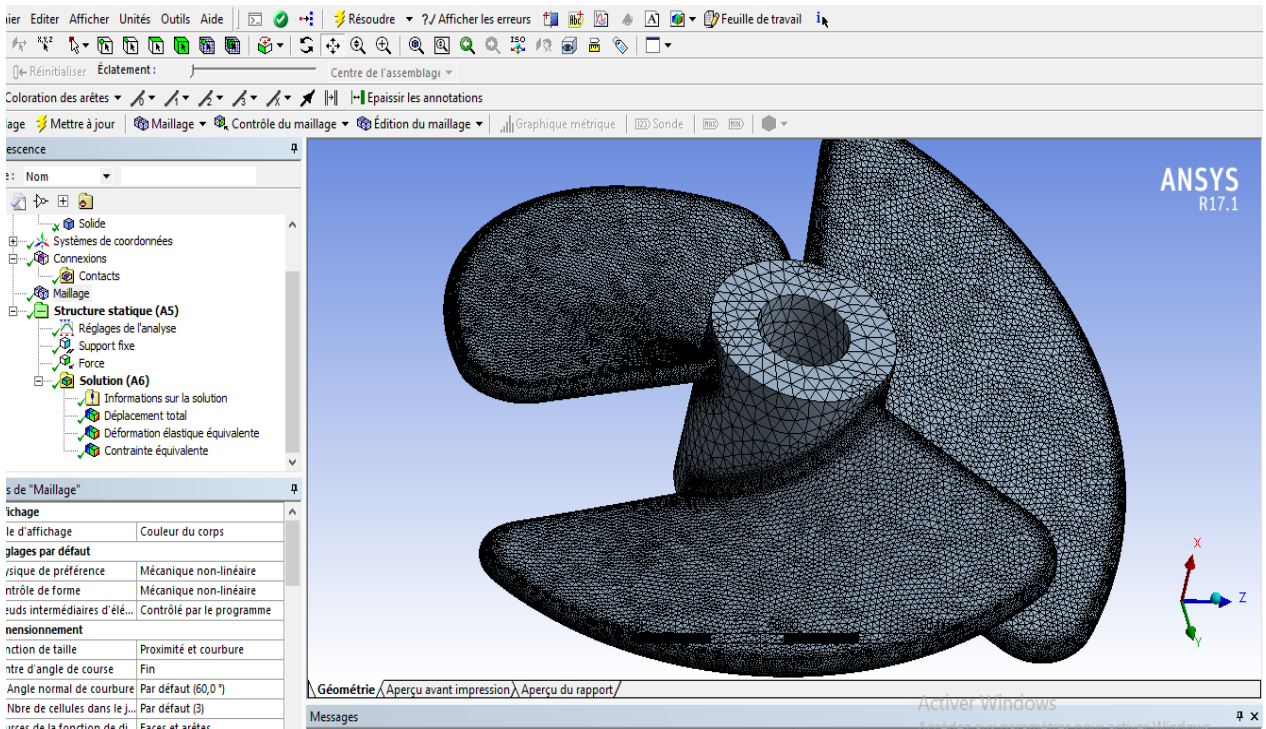


Figure 3.2. L'hélice maillée

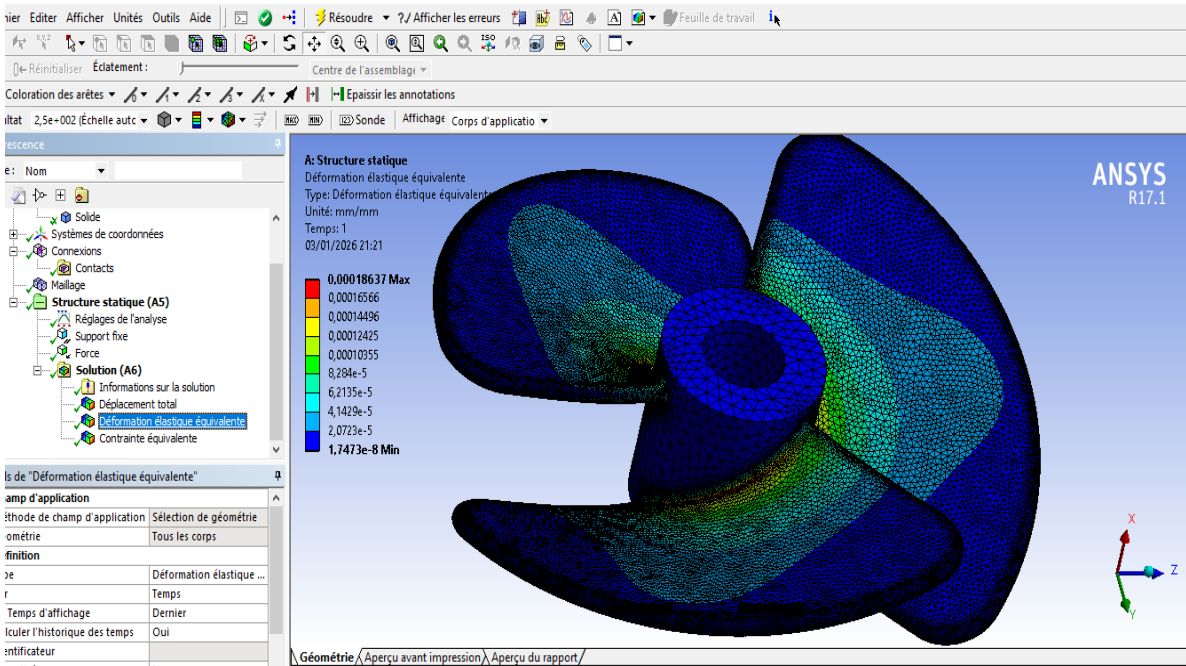


Figure 3.3 : Distribution des déformations.

4. Résultats de la simulation

Les résultats de la simulation montrent que la déformation maximale est de **0.000186** sous des forces de 500N.

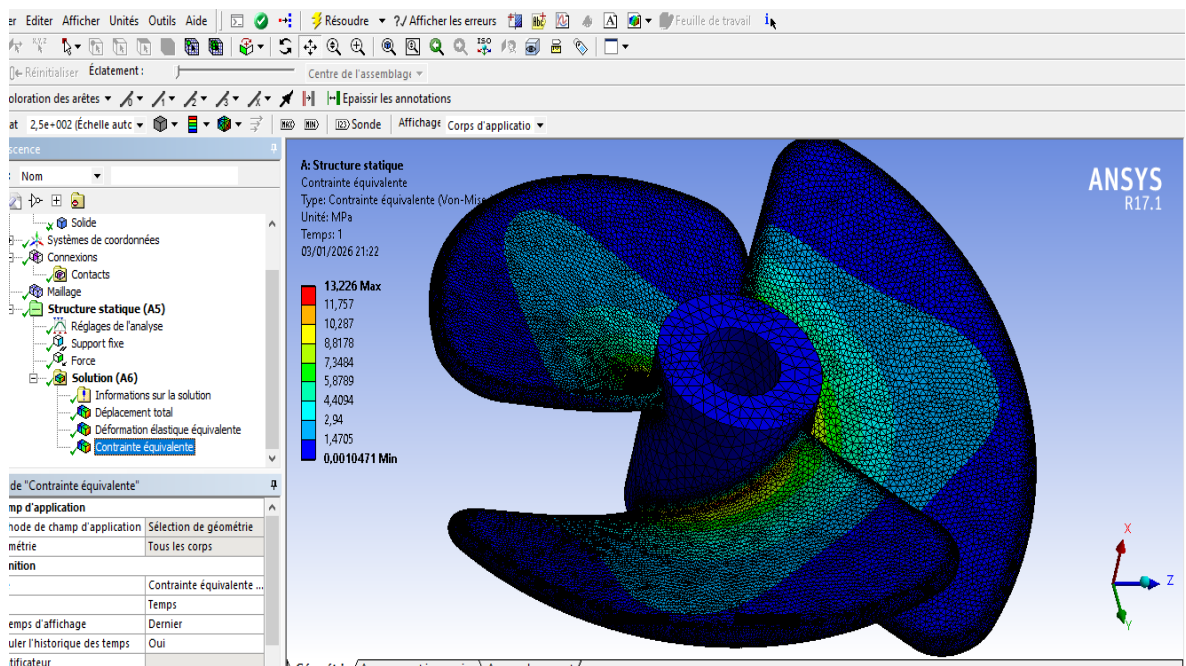


Figure 3.4 : Distribution des contraintes.

La valeur de la contrainte maximale est de 13.226 MPa. Cette valeur est très petite comparée à la limite d'élasticité 280 MPa.

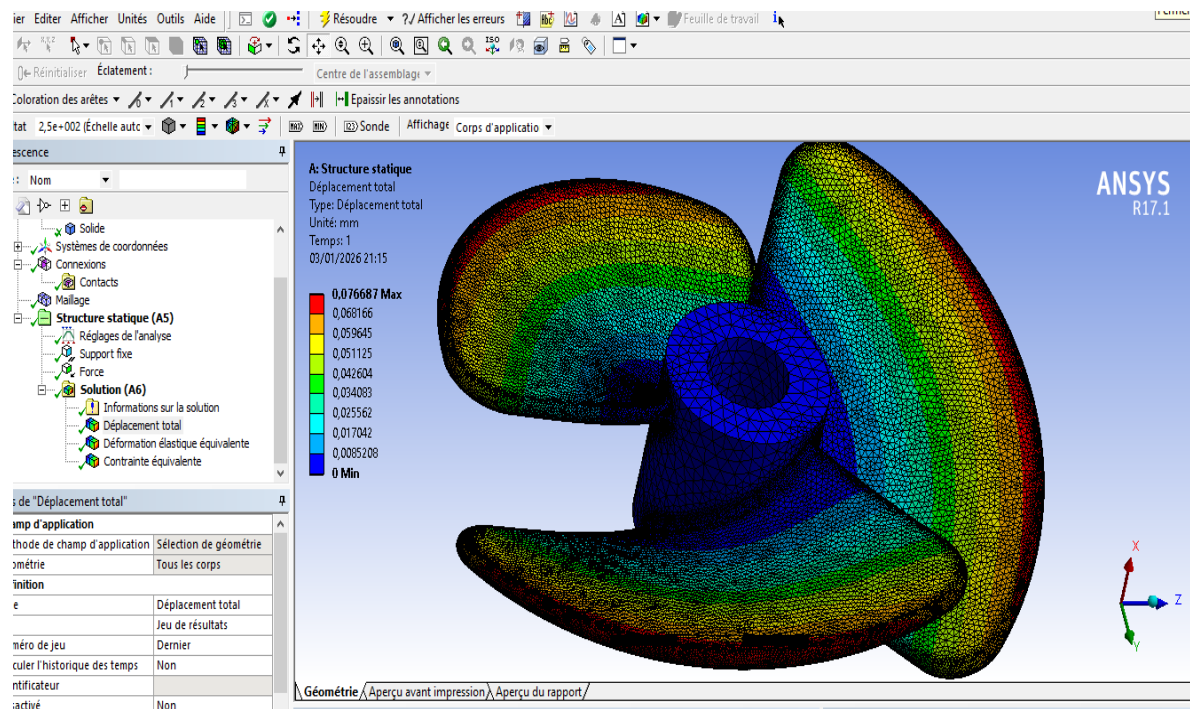


Figure 3.5 : Distribution des déplacements.

La valeur du déplacement maximal est de 0.0766mm. Cette valeur représente la flèche max. d'une pale, elle est loin de provoquer des problèmes lors de la rotation.

Chapitre IV: Etude du processus de fraisage à commande numérique de la pièce choisie

1. Introduction

L'usinage des pièces à paroi mince constitue un cas particulier en fraisage CNC, car la rigidité réduite de la pièce amplifie l'influence des efforts de coupe, des vibrations et des contraintes de serrage sur la précision dimensionnelle et l'état de surface. Une trajectoire d'outil correcte sur le plan géométrique peut néanmoins produire une pièce non conforme si l'on ne maîtrise pas l'ordre des opérations, la stratégie d'usinage, le montage et les paramètres technologiques.

Dans ce contexte, l'utilisation d'un environnement CAO/FAO tel que CATIA permet de structurer le processus: choix de l'atelier d'usinage, création de l'opération, définition du brut et du montage, création du programme CN, génération des trajectoires, vérification, simulation d'enlèvement de matière, puis génération du programme NC exécutable par la machine. Cette démarche répond directement aux exigences de validation avant fabrication

1.1.Objectif du chapitre : décrire étape par étape la préparation et la validation du fraisage CNC sous CATIA pour une pièce à faible rigidité, en mettant l'accent sur la simulation, la réduction des risques (collisions, trajectoires incohérentes, séquences fragilisantes) et la génération du code NC.

1.2.Choix de l'atelier de fabrication sous CATIA

La première exigence posée est de réaliser les étapes de simulation en utilisant CATIA. Le choix de l'atelier dépend de la nature des opérations à réaliser:

- Si les opérations sont principalement prismatiques (surfaçage, contournage, poches, perçages), l'atelier « usinage multiaxes » est le mieux adapté.
- Si la surface est complexe (formes libres), un atelier orienté surfaces peut être requis (selon modules disponibles)

Une fois l'atelier ouvert, CATIA propose une organisation de type processus-Product-ressources (PPR) permettant de structurer: la pièce, le brut,

les montages, les outils, puis les opérations et les sorties NC. Cette structure est importante pour la traçabilité: toute modification (outil, paramètre, repère, etc.) reste associée au programme de fabrication.

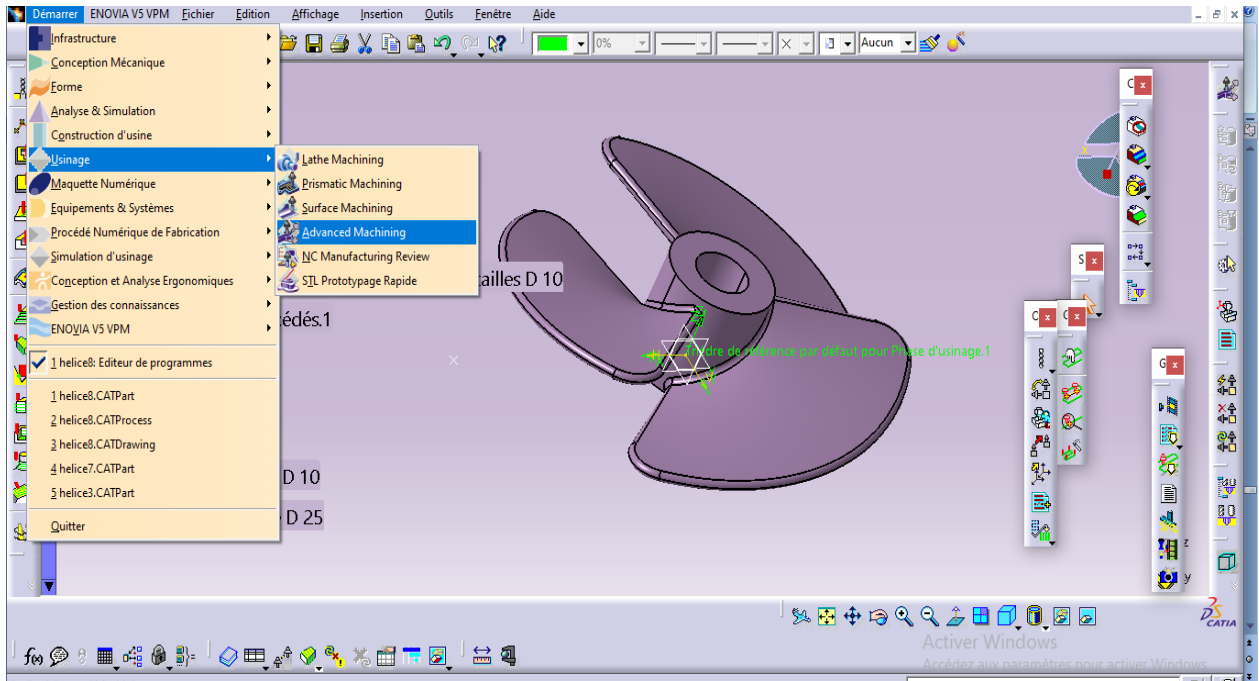


Figure 4.1: Sélection de l'atelier usinage multiaxes

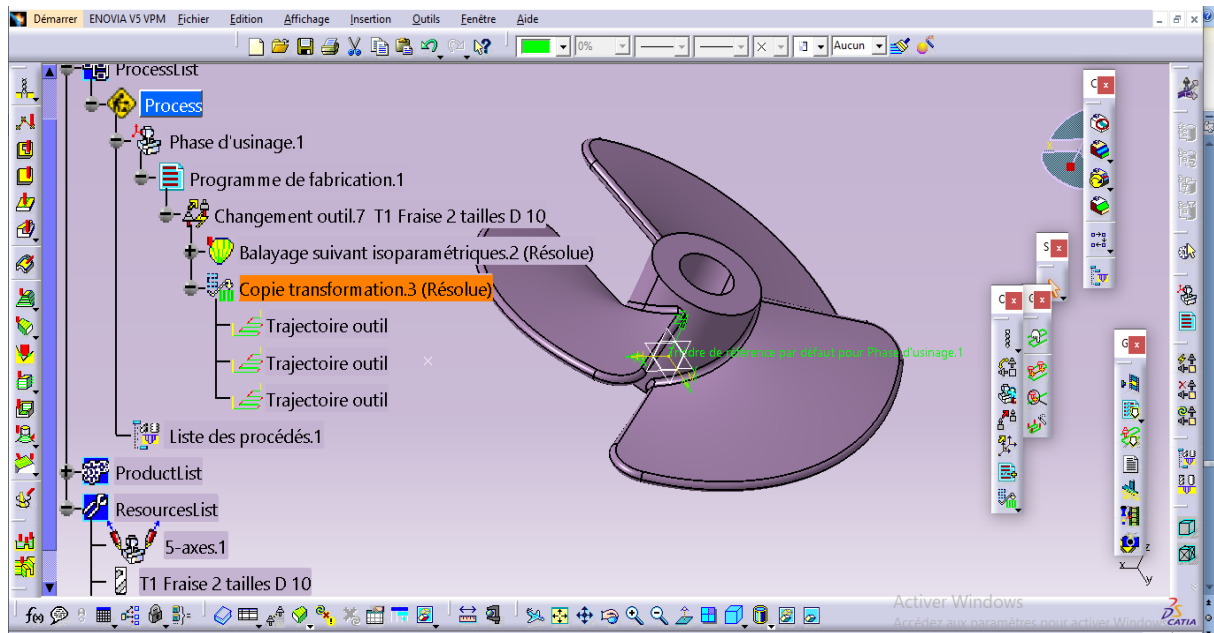


Figure 4.2 : L'Arbre PPR montrant le triplet : Process-Produit-Resources.

2. Mise en place du contexte: Part Operation, repère d'usinage et données d'entrée

2.1. Création de l'Operation-pièce

L'Operation-pièce représente le conteneur principal du processus d'usinage. Il rassemble les informations indispensables au calcul des trajectoires et à la simulation:

- La pièce (Part) : géométrie de la pièce finie.
- Le brut (Stock) : géométrie de la pièce brute.

Le repère d'usinage : référence utilisée pour programmer (origine pièce / zéro machine).

Les éléments liés au montage : bridage, mors, plaque de maintien (selon niveau de modélisation retenu).

Cette étape permet de passer d'une CAO "pure" à une FAO organisée, où la fabrication est décrite de manière systématique.

2.2. Définition du repère d'usinage

Le repère d'usinage est défini en cohérence avec le montage réel: orientation de l'axe Z suivant la direction de la broche, origine sur une face ou un coin de référence, et axes X/Y alignés avec la stratégie atelier. Une définition incorrecte du repère se traduit souvent par des erreurs de post-traitement et des incohérences lors de l'export NC.

3. Définition du brute et stratégie de maintien de rigidité

3.1. Définition du brute

Le brute doit représenter le plus fidèlement possible la matière disponible en atelier (plaque ou bloc avec surépaisseur). La surépaisseur joue un rôle

fonctionnel : elle permet d'assurer l'ébauche, de maintenir une rigidité suffisante au début, et de réserver de la matière pour la finition.

3. 2.Approche “rigidité d’abord”

Pour une pièce mince, il est recommandé de:

Réaliser un surfacage initial léger si nécessaire pour créer une référence propre.

Reporter la finition des bords minces après l'ébauche et la stabilisation de la géométrie globale.

Utiliser des passes faibles en finition pour limiter la flexion et préserver l'état de surface.

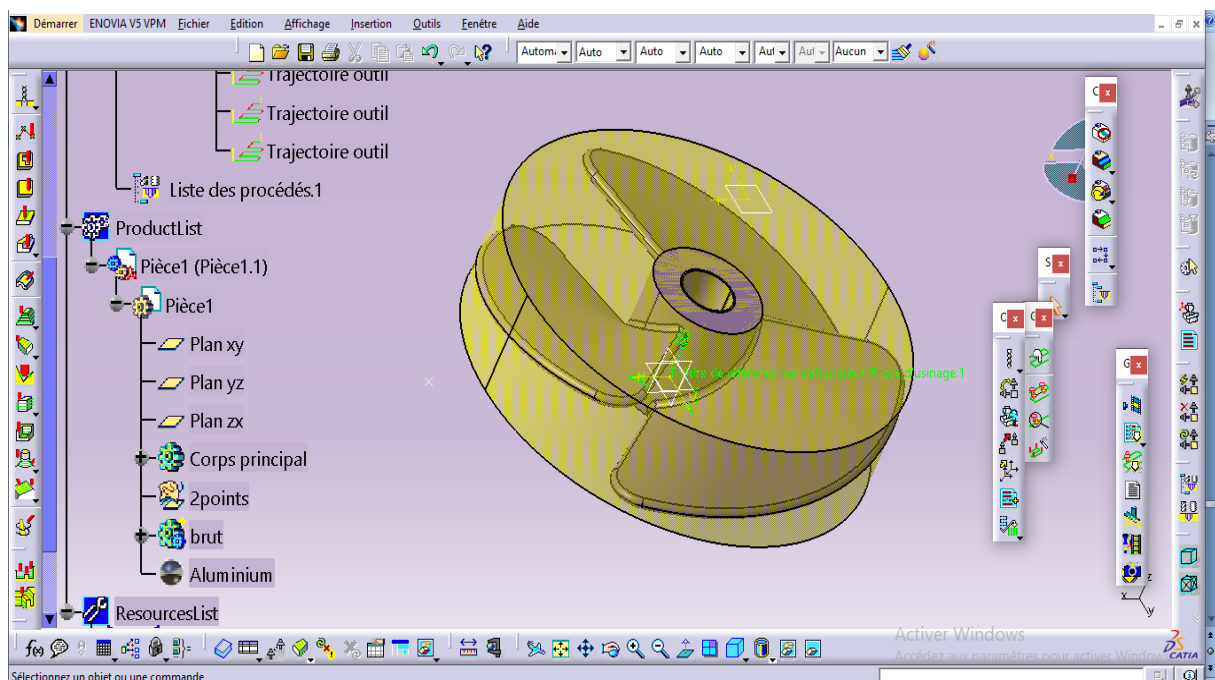


Figure 4.3: Définition/visualisation du brut (pièce jaune) autour de la pièce finie

4. Choix du système de serrage (Montage) et modélisation dans CATIA

4.1. Rôle du serrage pour les parois minces

Le serrage est déterminant dans la stabilité du procédé. Pour une plaque mince, un montage efficace doit:

Distribuer l'appui le plus uniformément possible.

Limiter les zones “en porte-à-faux.”

Éviter les contraintes locales trop élevées (qui déforment la pièce dès le bridage).

4.2. Représentation du montage dans CATIA

Selon le temps et les moyens, le montage peut être représenté de manière:

Simplifiée (volumes d'encombrement et surfaces d'appui).

Détaillée (mors, brides, vis, plateau, etc.).

L'intérêt principal, même avec un modèle simplifié, est la vérification des dégagements : éviter que l'outil ou le porte-outil ne touche le montage, et s'assurer que les hauteurs de sécurité sont suffisantes.

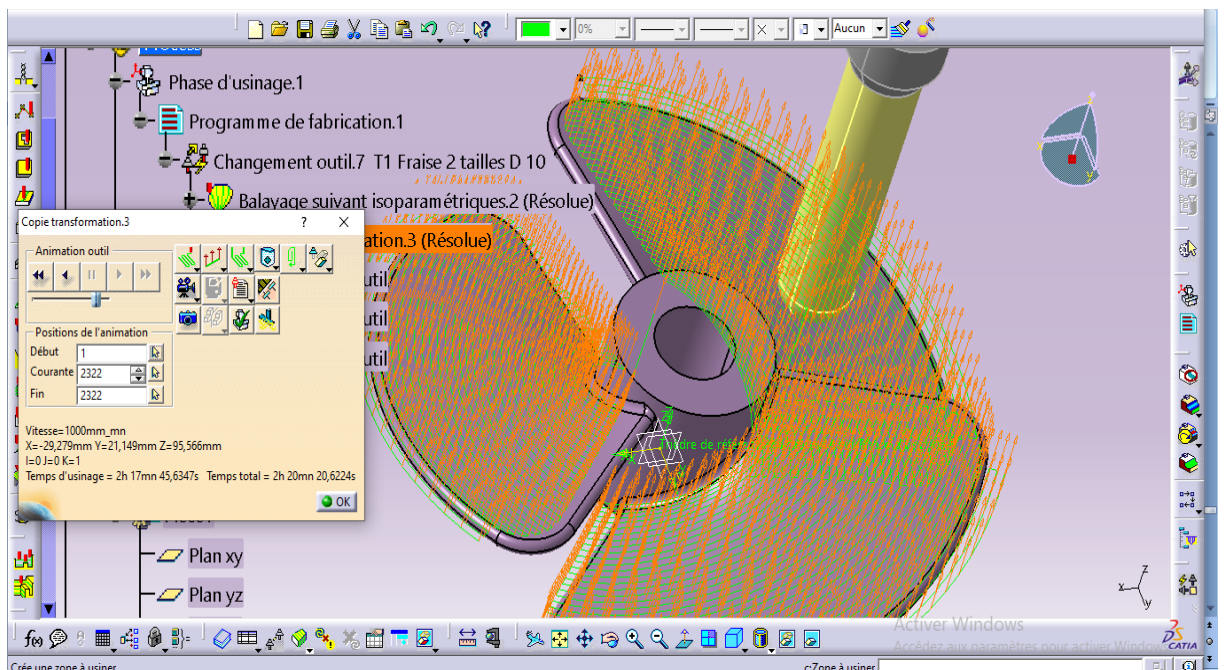


Figure 4.4 : Représentation des trajectoires de l'outil pour l'usinage des 3 faces des aubes

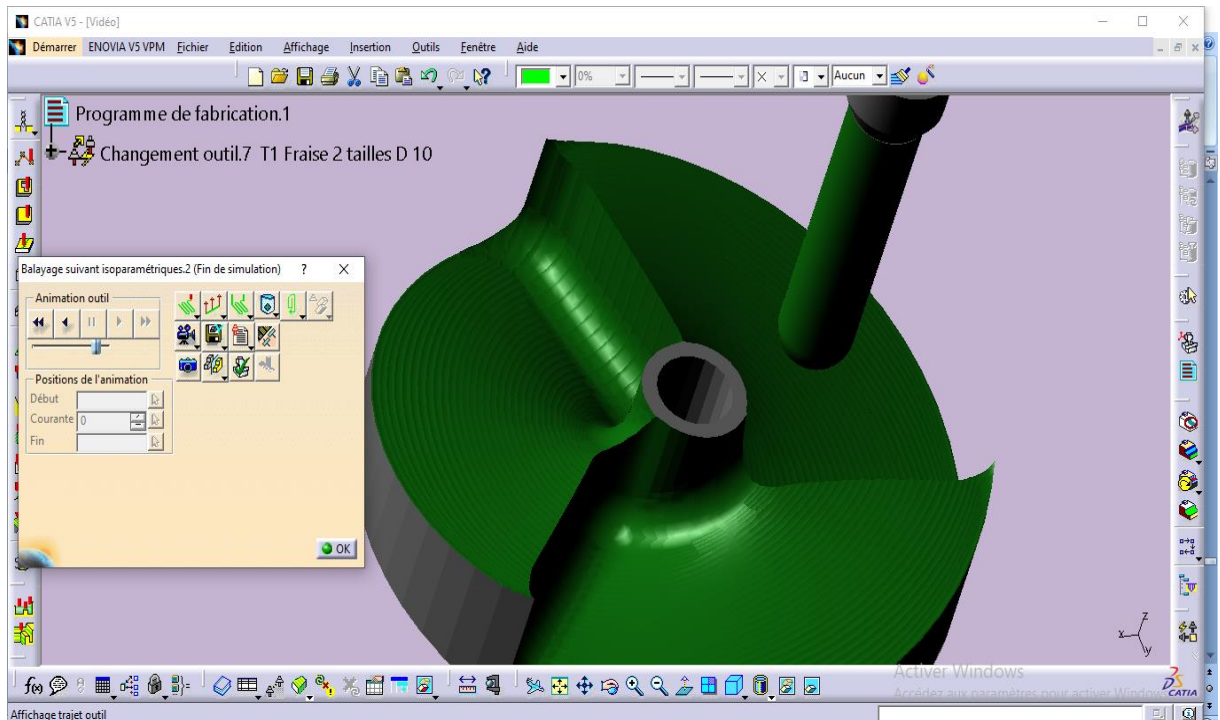


Figure 4.5 : Visualisation de la simulation de l'usinage des 3 faces des aubes

5. Création du Programme d'usinage et planification des opérations

Le Manufacturing Program contient les opérations d'usinage dans un ordre logique. Pour une pièce à paroi mince, une planification typique (adaptée selon géométrie) peut être:

Surfaçage (création d'une référence plane si nécessaire).

Ébauche des zones principales avec engagement maîtrisé.

Semi-finition pour stabiliser la géométrie et réduire l'effort en finition.

Finition des parois et contours sensibles (passes faibles).

Opérations complémentaires (chanfreins/perçages si présent).

L'idée n'est pas seulement d'obtenir la forme finale, mais d'y parvenir avec une séquence qui conserve de la rigidité et limite les sollicitations sur les zones fragiles.

6. Outils, conditions de coupe et génération des trajectoires (Tool Path)

6.1. Définition des outils

La sélection d'outil doit considérer:

Le diamètre (compromis rigidité/accès).

La longueur utile (minimiser la sortie pour réduire la flexion).

Le porte-outil (éviter collisions et augmenter rigidité).

6.2.. Définition des conditions technologiques

Les paramètres (vitesse, avance, profondeur de passe, stratégie d'entrée/sortie) sont réglés opération par opération. Pour les pièces minces, on privilégie en général:

Des engagements progressifs (rampes, entrées adaptées).

Des profondeurs plus faibles en finition.

Une trajectoire qui évite les changements brusques de direction lorsque cela est possible.

6. 3. Génération et analyse des trajectoires

Après calcul, chaque trajectoire doit être examinée : limites d'usinage, zones oubliées, liaisons, retraits, et cohérence globale. Toute modification doit être suivie d'un recalcul de trajectoire et d'une nouvelle vérification.

7. Vérification et simulation de l'enlèvement de matière

7.1.. Vérification cinématique

Elle permet de visualiser le mouvement de l'outil suivant la trajectoire:

Contrôle des transitions entre passes.

Vérification des hauteurs de sécurité.

Détection visuelle de collisions évidentes (outil/porte-outil/montage/pièce).

7.2.. Simulation d'enlèvement de matière

La simulation d'enlèvement de matière apporte une validation plus complète:

Visualisation de l'état du brut après chaque opération.

Détection de sur-usinage, sous-usinage, ou séquences inadaptées.

8. Génération du programme NC et préparation pour la machine CN

Après validation des trajectoires et de la simulation, l'étape suivante consiste à produire la sortie machine:

Sélection du post-processeur correspondant au centre d'usinage (atelier choisi).

Génération du fichier NC (programme exécutable).

Sauvegarde/archivage: projet CATIA + paramètres + liste outils + fichier NC.

Il est recommandé de conserver une cohérence stricte entre le repère d'usinage défini dans CATIA et le zéro réellement réglé sur la machine, afin d'éviter toute erreur lors du lancement.

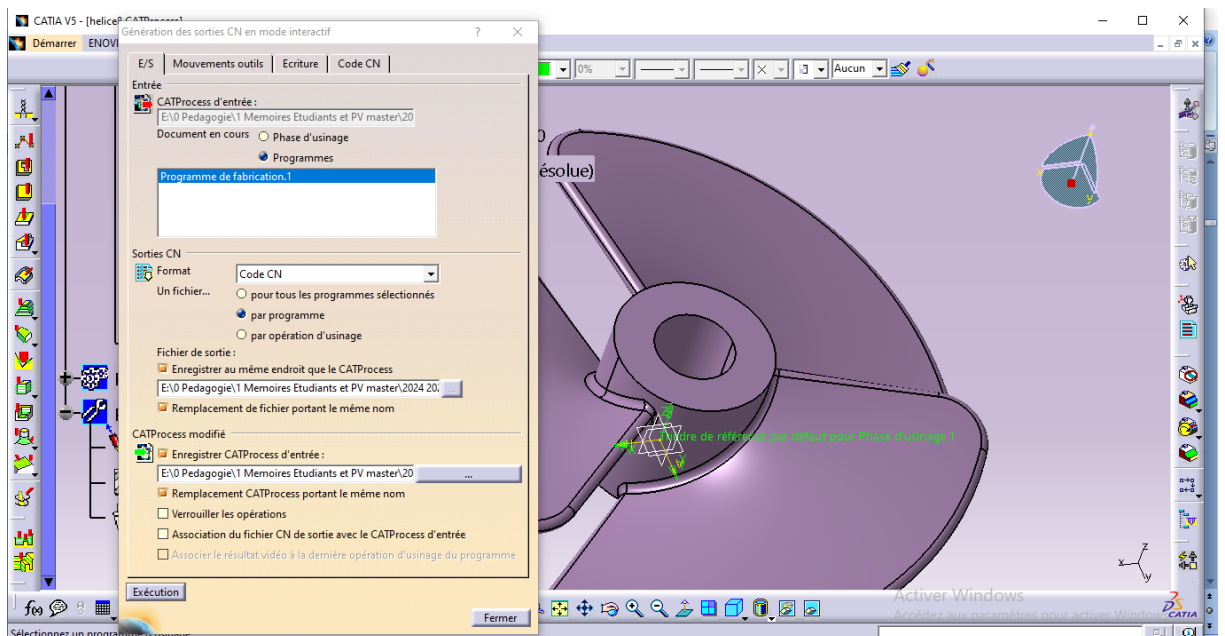


Figure 4.6 : Parametrage pour la sortie du code ISO

9. Résultats attendus et recommandations finales

En respectant la démarche complète sous CATIA (atelier → Part Operation → brut/montage → programme → trajectoires → simulation → NC), les bénéfices attendus sont:

Réduction du risque de collision et d'erreurs de trajectoire avant atelier.

Validation de l'ordre des opérations et de l'enlèvement de matière.

Amélioration de la traçabilité: chaque capture d'écran devient une preuve de validation de fabrication.

Conclusion

Conclusion

Ce mémoire a exploré de manière approfondie les défis associés au fraisage des pièces à parois minces, caractérisées par leur faible rigidité, en se concentrant sur les vibrations, les déformations et les processus d'usinage CNC. À travers une approche méthodique, cette étude a permis d'atteindre plusieurs objectifs clés. Tout d'abord, la revue bibliographique du premier chapitre a permis d'identifier les principales sources de vibrations (libres, forcées et régénératives) et de déformations (statiques et dynamiques), mettant en lumière des stratégies de mitigation telles que les amortisseurs actifs et les fluides à viscosité augmentée sous cisaillement, capables de réduire les vibrations jusqu'à 98%.

Le deuxième chapitre a abordé la conception d'une pièce à paroi mince, en l'occurrence une hélice.

Le troisième chapitre a présenté une analyse par éléments finis (FEA) de la pièce sous des forces de coupe, révélant une réduction des déformations maximales

Le quatrième chapitre a examiné le processus de fraisage CNC,

En synthèse, ce travail met en évidence l'importance d'une approche intégrée combinant conception optimisée, simulation numérique et contrôle précis des paramètres d'usinage pour surmonter les défis du fraisage des pièces à parois minces. Notamment dans l'aéronautique, où la précision dimensionnelle et la légèreté sont critiques.

Ce mémoire contribue à l'avancement des techniques de fabrication intelligente, en alignement avec les besoins croissants de l'industrie pour des composants légers, précis et durables. Ces résultats et perspectives futures

soulignent le potentiel de l'innovation technologique pour relever les défis complexes de l'usinage des pièces à parois minces.

References bibliographiques

References bibliographiques

- Altintas, Y., & Budak, E. (2001). Analytical Prediction of Stability Lobes in Milling. *CIRP Annals*, 50(1), 357–362. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)62142-1
- Smith, S., & Tlustý, J. (1998). An Overview of Modeling and Simulation of the Milling Process. *Journal of Engineering for Industry*, 120(2), 169–176. DOI: 10.1115/1.2830134
- Ratchev, S., Liu, S., Huang, W., & Becker, A.A. (2004). Milling of Thin-Walled Components: A Finite Element Approach. *Journal of Materials Processing Technology*, 153–154, 134–141. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2004.04.306
- Tohline, J.E., & Budak, E. (2008). *Machining Dynamics: Frequency Response to Improved Productivity*. Springer. ISBN: 978-0-387-09644-5
- Arrazola, P.J., & Özel, T. (2013). Investigations on the Effects of Cutting Parameters on Surface Integrity in Machining of Thin-Walled Parts. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 65, 75–82. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2012.10.002
- Seguy, S., Insperger, T., Arnaud, L., & Desein, G. (2010). Suppression of Chatter Vibrations in Milling Using Active Magnetic Bearings. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 3(2), 154–160. DOI: 10.1016/j.cirpj.2010.03.002