

People's Democratic Republic of Algeria

Ministry of Higher Education and Scientific Research

Mohamed Boudiaf University of M'sila

Faculty of Technology



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

جامعة المسيلة

كلية التكنولوجيا

Département de Génie Mécanique

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de :

Licence

En Génie Mécanique

Option : Construction mécanique

Titre du mémoire :

Étude et Optimisation des Stratégies d'Usinage pour une Poche Irrégulière à l'aide de CAMWORKS

Préparé par :

- Oudina Lotfi

- Louatia Achraf

Encadré par :

Dr. Arslane Mustapha

Examiné par :

Pr. Makri Hocine

Année académique : 2024 / 2025

N° d'ordre : GM/...../2025

شكر وتقدير

بسم الله الرحمن الرحيم والحمد لله رب العالمين
أشهد أن لا إله إلا الله ولي الصالحين والصلاة والسلام على
المصطفى شفيع المؤمنين
يقول مولانا سبحانه وتعالى: {يَرْفَعُ اللَّهُ الَّذِينَ آمَنُوا مِنْكُمْ وَالَّذِينَ
أُوتُوا الْعِلْمَ دَرَجَاتٍ} [المجادلة: 11]
شكرا لمن علمنا حرفا
شكرا لمن كان لنا درسا
شكرا لمن شاركنا عسرا
شكرا . شكرا . شكرا

إهداء

إلى أول من علماني قواعد الحياة والإسلام والبيان واللغة والإيمان، إلى أول من علماني

الكلمات، أملي، نور حياتي، أبي وأمي

إلى من يربطني بهم أول بيت عشت فيه لم يدخله غيرنا ألا وهو بطن أُمي

إلى من كبرت معهم تحت سقف بيت واحد:

عاصم أولنا تجربة وأكبرنا عمرا وأرقى فكرا

مهدي أكثرنا دهاء وأعلى مقاما وخير جليس

لجين أصغرنا عمرا وأجمل هدية وهبنا الله

إلى كل أصدقائي ومن دفعوني لأكون هنا وشاركوني أجمل وأساء لحظات:

يعقوب أوزينة، عبد الرزاق أوزينة، محمد دحدوح، عاشور ضيف الله، هشام باي راقد

هيثم قاضي، خيرو دحدوح، يوسف دحدوح، رشيد أوزينة، مبروك سعداوي، ضياء حفيظي

عبد الصمد طاهر، أشرف لوطية، إسلام خرشي، معاذ بوقرة، أنيس بوخروبة

نعيم بوزيدي، أسامة بوزيدي، براهيم مسقم، تقي الدين جعفر، عبد الرحيم أوزينة

عبد الرحمن أوزينة.

إهداء

إلى والدي، الذي كان مثلاً في الجد والعمل، وغرس في نفسي قيمة الالتزام والمثابرة،
وإلى والدتي، التي لم تبخل يوماً بالعطاء والتوجيه، وكانت عوناً في كل مراحل الطريق،
إلى إختي جميعاً، من أكبرهم إلى أصغرهم، الذين كانوا سنداً متيناً ومحفزاً دائماً على التقدم،
أهدي هذا العمل ثمرةً لوقوفكم إلى جانبي ودعمكم المستمر

وإلى أصدقائي

لطفي أوزينة، عاشور ضيف الله، بوقرة معاد، وخرشي إسلام،
رفاق المرحلة، وشركاء الاجتهاد، أقدر لكم صدقكم ومواقفكم

كما أخص بالذكر أستاذي الشيخ هوام زكرياء، الذي لم يدخر جهداً في توجيهي، وكان مرجعاً
علمياً أستند إليه في كل خطوة

لكم جميعاً أقدم هذا الجهد المتواضع، وفاءً وتقديرًا لما قدمتموه

Table des Matières

| | |
|---|----|
| Introduction générale | 7 |
| Chapitre I : Introduction | 8 |
| I.1 Contexte et enjeux de l'usinage | 9 |
| I.1.1 Importance de l'usinage dans l'industrie mécanique | 9 |
| I.1.2 Défis liés à l'optimisation des stratégies d'usinage pour les poches irrégulières | 9 |
| I.1.3 Rôle des logiciels de FAO..... | 9 |
| I.2 Objectifs du projet | 9 |
| I.2.1 Comparer les différentes stratégies de vidage de poche circulaire | 10 |
| I.2.2 Générer des programmes G-code pour chaque stratégie..... | 10 |
| I.2.3 Analyser les résultats pour optimiser le processus d'usinage | 10 |
| I.3 Méthodologie | 11 |
| I.3.1 Conception de la pièce avec SolidWorks..... | 11 |
| I.3.2 Utilisation de CamWorks pour la simulation et la génération de G-code..... | 11 |
| I.3.3 Comparaison des stratégies d'usinage | 11 |
| Conclusion..... | 11 |
| Chapitre II : Conception de la Pièce avec SolidWorks | 12 |
| II.1 Introduction: | 13 |
| II.2 Analyse du Cahier des Charges | 13 |
| II.3 Choix du Logiciel de Conception..... | 13 |
| II.4 Étapes de modélisation | 13 |
| 1. Création de rectangle 2D | 13 |
| 2. Extrusion pour obtenir le parallélépipède 3D | 14 |
| 3. Création de la poche irrégulière | 14 |
| 4. Création de la poche circulaire de 20mm de diamètre..... | 15 |
| Chapitre III : Utilisation de CamWorks | 17 |
| III.1 Présentation de CamWorks | 18 |
| III.1.1. Fonctionnalités principales de CamWorks | 18 |
| a. Usinage basé sur les règles (RBM - Rule-Based Machining) | 18 |
| b. Technologie d'usinage avancée (VoluMill™) | 18 |
| c. Différentes stratégies d'usinage | 18 |
| d. Simulation et vérification | 18 |
| e. Génération de G-code | 18 |
| III.1.2. Intégration avec SolidWorks | 18 |
| a. Modélisation et FAO dans un seul environnement | 18 |
| b. Reconnaissance automatique des géométries | 18 |
| c. Interface conviviale | 18 |

| | |
|--|----|
| d. Gestion des assemblages complexes | 19 |
| III.2 Configuration de l'environnement d'usinage..... | 19 |
| Dimensions de la pièce brute | 19 |
| Saisie des dimensions de la pièce brute dans le programme CamWorks | 19 |
| Types d'outil utilisés | 20 |
| III.3 Stratégies de vidage de poche étudiées | 21 |
| Stratégie spirale..... | 21 |
| Stratégie Zigzag | 22 |
| Stratégie Parallèle | 22 |
| III.4 Simulation des stratégies d'Usinage avec CamWorks..... | 23 |
| III.5 Analyse de déviation (comparaison) | 23 |
| Conclusion..... | 24 |
| Chapitre IV : Génération des Programmes G-code | 25 |
| IV.1 Introduction..... | 26 |
| IV.2 Le G-code: Langage des Machines CNC..... | 26 |
| IV.3 Principaux Codes G Utilisés | 26 |
| IV.4 Codes M: Fonctions de la Machine | 26 |
| IV.5 Génération du G-code avec CamWorks | 27 |
| IV.6 Modification de la Stratégie d'Usinage | 27 |
| Programme Code G pour la stratégie "zig-zag" | 29 |
| Programme Code G pour la stratégie "spirale" | 30 |
| Programme Code G pour la stratégie "parallèle" | 31 |
| IV.7 Vérification des programmes CN | 31 |
| IV.7.1 Vérification Manuelle du G-code..... | 31 |
| IV.7.2 Simulation du G-code avec un Logiciel | 32 |
| Exemples de logiciels utiles :..... | 32 |
| Simulation par CNC Simulateur | 32 |
| Avantages : | 34 |
| Chapitre V : Résultats et Discussion | 35 |
| V. Analyse et Optimisation des Stratégies d'Usinage..... | 36 |
| V.1 Comparaison des Stratégies d'Usinage | 36 |
| V.2 Optimisation Proposée : Stratégie Hybride | 36 |
| Conclusion : | 37 |
| Conclusion Générale | 38 |
| Bibliographie | 39 |

Introduction générale

Dans le contexte actuel de l'industrie mécanique moderne, l'usinage occupe une place centrale dans la fabrication de pièces techniques, notamment grâce à l'automatisation des procédés par les machines à commande numérique (CNC). Pour garantir à la fois précision, rapidité et qualité, il devient indispensable d'optimiser les stratégies d'usinage, en particulier pour des géométries complexes telles que les poches irrégulières.

Ce travail s'inscrit dans cette logique d'optimisation. Il a pour objectif principal l'étude comparative de différentes stratégies d'usinage, à savoir : spirale, zigzag et parallèle, en s'appuyant sur les outils numériques SolidWorks pour la modélisation 3D et CamWorks pour la génération et la simulation des trajectoires d'outil. À travers une série de simulations, d'analyses de performances et de vérifications, ce projet vise à recommander la stratégie la plus adaptée, voire à proposer une solution hybride, permettant d'atteindre un bon compromis entre temps de cycle, qualité de surface et efficacité d'usinage.

Ce mémoire est structuré en plusieurs chapitres, allant de la conception de la pièce à la génération des programmes G-code, en passant par la simulation et l'analyse des résultats, dans une démarche rigoureuse et orientée vers l'amélioration du processus de fabrication.

Chapitre I : Introduction

I.1 Contexte et enjeux de l'usinage

I.1.1 Importance de l'usinage dans l'industrie mécanique

L'usinage est un procédé clé dans la fabrication des pièces mécaniques. Il permet de façonner des matériaux pour obtenir des pièces précises utilisées dans des secteurs comme l'automobile, l'aéronautique ou encore l'énergie. Avec l'usinage, on peut contrôler la forme, la taille et la qualité des surfaces des pièces. Aujourd'hui, les machines modernes sont de plus en plus rapides et performantes, ce qui améliore la productivité. Cependant, pour des pièces critiques, comme celles utilisées dans les avions ou les réacteurs nucléaires, il est essentiel de garantir non seulement la précision, mais aussi la qualité de la surface (par exemple, sa résistance ou sa structure interne) pour qu'elle fonctionne correctement pendant longtemps.

I.1.2 Défis liés à l'optimisation des stratégies d'usinage pour les poches irrégulières

L'usinage de poches irrégulières, comme les cavités ou les trous, présente plusieurs défis :

1. **Évacuation des copeaux** : Les copeaux (petits morceaux de matière enlevés) peuvent s'accumuler dans une poche fermée, ce qui abîme la surface ou casse l'outil si on ne les enlève pas correctement.
2. **Temps d'usinage** : Usiner une poche irrégulière peut prendre du temps, surtout si la poche est profonde ou petite, si la stratégie choisie n'est pas efficace.
3. **Vibrations** : À grande vitesse, les outils peuvent vibrer, ce qui réduit la précision et la qualité de la surface.
4. **Précision** : Obtenir des dimensions très précises demande des machines bien réglées et une gestion des effets de chaleur.

I.1.3 Rôle des logiciels de FAO

Les logiciels de Fabrication Assistée par Ordinateur (FAO), comme CamWorks, sont des outils essentiels pour simplifier et améliorer l'usinage. Ils permettent de :

- Créer automatiquement des trajectoires pour l'outil à partir d'un modèle 3D conçu dans un logiciel de CAO (comme SolidWorks).
- Choisir les meilleures stratégies d'usinage pour différentes formes (poches, trous, rainures, etc.).
- Proposer des réglages adaptés, comme la vitesse de l'outil ou le type d'outil, selon le matériau.
- Simuler l'usinage sur ordinateur pour repérer les erreurs (comme des collisions) avant de lancer la production, ce qui évite des problèmes coûteux.

I.2 Objectifs du projet

L'objectif principal de ce projet est d'étudier et d'améliorer les méthodes utilisées pour usiner des poches irrégulières. Voici les trois points clés du projet :

I.2.1 Comparer les différentes stratégies de vidage de poche circulaire

Nous allons examiner trois stratégies principales pour usiner des poches circulaires :

1. **Zigzag** : L'outil se déplace en lignes droites alternant dans deux directions. Cette méthode peut laisser des petites irrégularités sur les bords, qu'il faudra corriger avec une étape supplémentaire.
2. **Contours parallèles** : L'outil suit les contours de la poche en décalant progressivement son trajet. On commence généralement dans un coin pour obtenir une surface plus lisse à chaque passage.
3. **Contour spirale** : L'outil suit une trajectoire en spirale continue, en partant d'un point précis pour éviter des mouvements inutiles. Cette méthode est souvent plus fluide.

En comparant ces stratégies, nous voulons identifier laquelle est la plus efficace en termes de temps, de qualité de surface et d'usure de l'outil.

I.2.2 Générer des programmes G-code pour chaque stratégie

Le G-code est un langage utilisé pour donner des instructions aux machines CNC (Commande Numérique par Calculateur). Pour chaque stratégie (zigzag, contours parallèles, spirale), nous allons créer un programme G-code à l'aide d'un logiciel de FAO, comme CamWorks. Ces programmes indiqueront à la machine (fig. 01) comment déplacer l'outil, à quelle vitesse, et dans quel ordre pour usiner la poche circulaire.

I.2.3 Analyser les résultats pour optimiser le processus d'usinage

Une fois les programmes G-code créés, nous simulerons l'usinage sur ordinateur pour évaluer :

- Le **temps total** nécessaire pour usiner la poche, y compris les moments où l'outil s'approche ou se retire.
- La **longueur des trajets** de l'outil, pour voir quelle stratégie est la plus rapide.
- Les **zones à risques**, comme les endroits où des collisions ou des erreurs pourraient se produire.

En analysant ces résultats, nous pourrions recommander la meilleure stratégie pour usiner des poches irrégulières, en réduisant les coûts, les erreurs et le temps de production.



Figure 01 : machine CNC

I.3 Méthodologie

Pour mener à bien ce projet, nous allons suivre une approche claire et structurée en trois étapes principales : concevoir la pièce, simuler l'usinage, et comparer les stratégies. Voici les détails :

I.3.1 Conception de la pièce avec SolidWorks

La première étape consiste à créer un modèle 3D de la pièce à usiner à l'aide de SolidWorks, un logiciel de CAO (Conception Assistée par Ordinateur). Ce logiciel permet de dessiner la pièce avec précision, en définissant ses dimensions, ses formes (comme une poche circulaire) et ses caractéristiques techniques. Avec SolidWorks, on peut facilement modifier le modèle si besoin et s'assurer qu'il respecte les exigences du projet avant de passer à l'usinage.

I.3.2 Utilisation de CamWorks pour la simulation et la génération de G-code

Ensuite, nous utiliserons CamWorks, un logiciel de FAO (Fabrication Assistée par Ordinateur), pour préparer l'usinage. CamWorks prend le modèle 3D de SolidWorks et génère automatiquement les trajectoires que l'outil doit suivre pour usiner la pièce. Il permet aussi de :

- Simuler l'usinage sur ordinateur pour vérifier qu'il n'y a pas d'erreurs, comme des collisions entre l'outil et la pièce.
- Créer des programmes G-code, qui sont des instructions pour la machine CNC. Ces instructions indiquent à la machine où déplacer l'outil, à quelle vitesse, et comment usiner la poche irrégulière.

I.3.3 Comparaison des stratégies d'usinage

Enfin, nous comparerons trois stratégies d'usinage pour vider la poche irrégulière : zigzag, contours parallèles et contour spirale. Pour chaque stratégie, nous analyserons :

- Le **temps d'usinage** : Combien de temps chaque méthode prend pour terminer la poche.
- La **qualité de la surface** : Si la surface est lisse et sans défauts.
- L'**efficacité** : Quelle stratégie utilise le moins de mouvements inutiles et réduit l'usure de l'outil.

Ces analyses, basées sur les simulations de CamWorks, nous aideront à déterminer la meilleure stratégie pour usiner des poches irrégulières de manière rapide, précise et économique.

Conclusion

Ce chapitre a mis en lumière l'importance de l'usinage dans l'industrie mécanique, en soulignant son rôle clé pour produire des pièces précises et fiables, notamment dans des secteurs comme l'aéronautique ou le nucléaire. Les défis liés à l'optimisation des stratégies d'usinage, comme l'évacuation des copeaux ou la gestion des vibrations, ont été identifiés comme des points cruciaux. Les logiciels de FAO, tels que CamWorks, jouent un rôle essentiel en simplifiant la création de trajectoires d'usinage et en réduisant les erreurs grâce à des simulations. Ce projet vise à comparer trois stratégies d'usinage (zigzag, contours parallèles, spirale) pour optimiser la fabrication de poches irrégulières. Les chapitres suivants détailleront la modélisation, les simulations et l'analyse des résultats pour proposer des solutions pratiques et efficaces.

Chapitre II : Conception de la Pièce avec SolidWorks

II.1 Introduction:

Ce chapitre explique comment créer un modèle 3D d'une pièce à usiner avec le logiciel SolidWorks, en respectant les besoins de la pièce et les limites de l'usinage. L'objectif est de modéliser précisément une poche irrégulière, qui est l'élément principal de l'étude, pour l'utiliser dans le logiciel CamWorks.

Dans la fabrication assistée par ordinateur (FAO), la conception assistée par ordinateur (CAO) est la première étape clé. Un bon modèle 3D aide le logiciel de FAO à bien comprendre la pièce, réduit les erreurs, diminue le temps de fabrication et améliore les conditions de coupe. Une conception précise est donc essentielle pour réussir les étapes suivantes, comme la simulation et la fabrication.

II.2 Analyse du Cahier des Charges

la pièce à usiner, fabriquée à partir d'un bloc d'aluminium léger et facile à travailler. La pièce sert de support dans un châssis léger et inclut une poche irrégulière pour réduire son poids tout en restant solide.

Le cahier des charges fixe des règles :

- Dimensions maximales de la pièce : 150 mm × 100 mm × 25 mm.
- Rayons minimaux pour faciliter l'usinage.
- Respect des normes ISO pour la qualité de surface et les tolérances (précision de 0,05 mm dans certaines zones).

Ces contraintes guident la création du modèle 3D dès le début pour assurer que la pièce soit bien fabriquée et réponde à ses fonctions mécaniques.

II.3 Choix du Logiciel de Conception

Dans ce projet, nous avons choisi d'utiliser le logiciel SolidWorks pour créer le modèle 3D de la pièce. SolidWorks est un logiciel de conception assistée par ordinateur (CAO) très utilisé dans l'industrie. Il est facile à apprendre et permet de faire des dessins techniques précis et des modèles solides en 3D.

Un autre avantage important de SolidWorks est qu'il est compatible avec le logiciel CamWorks. Cela veut dire que les fichiers créés dans SolidWorks peuvent être utilisés directement dans CamWorks pour préparer l'usinage. Cette compatibilité facilite le travail et évite de refaire la modélisation. Elle permet aussi de gagner du temps et de réduire les erreurs lors de la préparation de l'usinage.

II.4 Étapes de modélisation

1. Création de rectangle 2D

Sélectionnez un plan de référence (Front Plan)

Cliquez sur l'icône "Esquisse" dans la barre d'outils.

Cliquez sur "Rectangle".

Nous choisissons le type de rectangle "Rectangle centré, figure 02

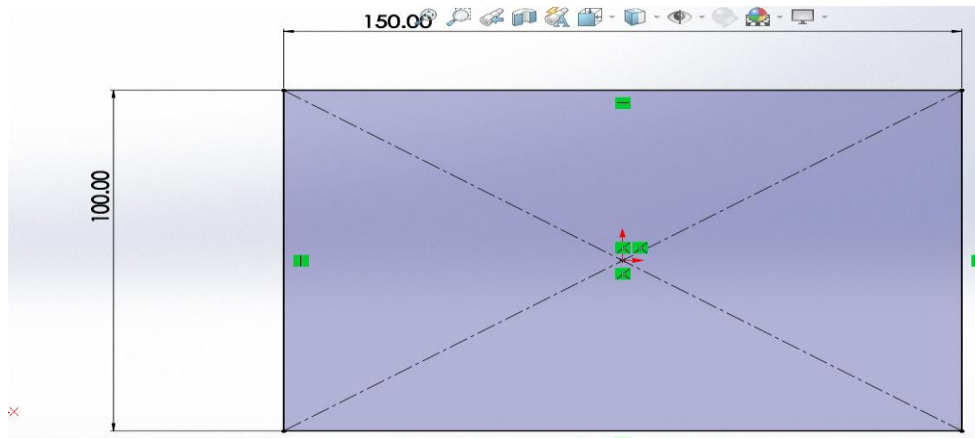


Figure 2:rectangle 2D

2. Extrusion pour obtenir le parallélépipède 3D

Sélectionnez l'esquisse du rectangle 2D

Boss-Extruder \rightarrow Distance: 20mm (figure 3)

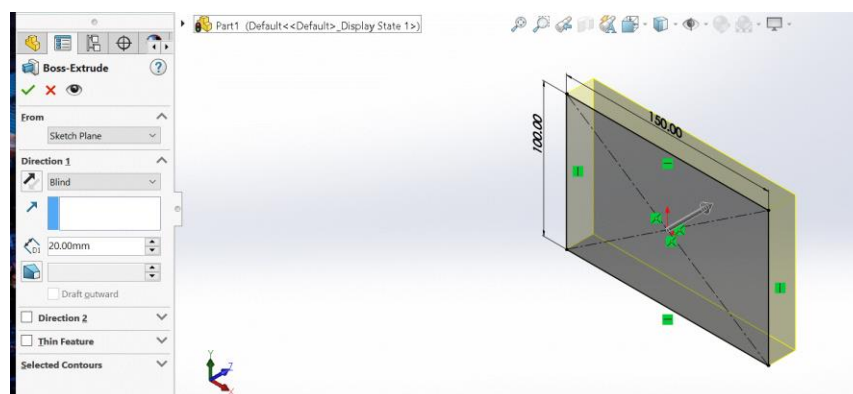


Figure 3 : Création du parallélépipède du brut 3D

3. Création de la poche irrégulière

Dans l'étape suivante, nous définissons la surface de dessin (front plan dans ce cas) et dessinons la forme à fraiser dessus, en spécifiant les dimensions et contraintes géométriques de base. Fig 4

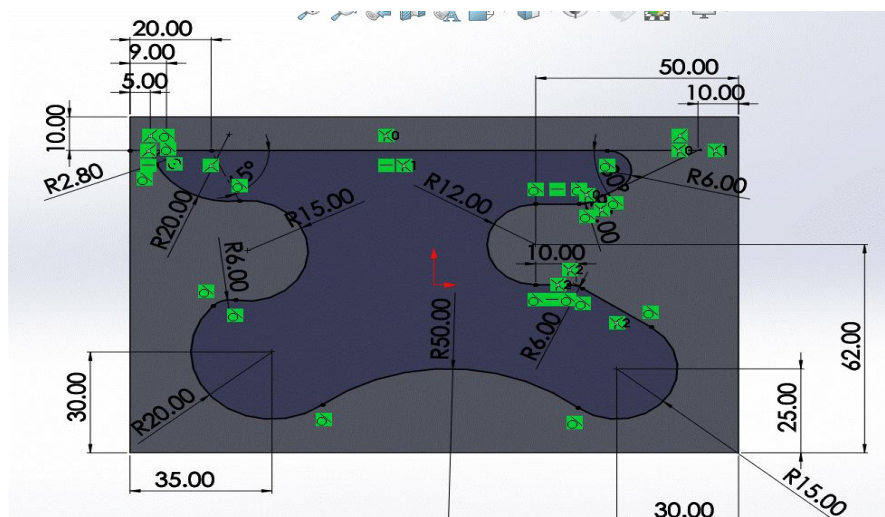


Figure 4: esquisse 2D de la poche irrégulière

Cut-Extrude1 → Distance: 10mm (fig 5)

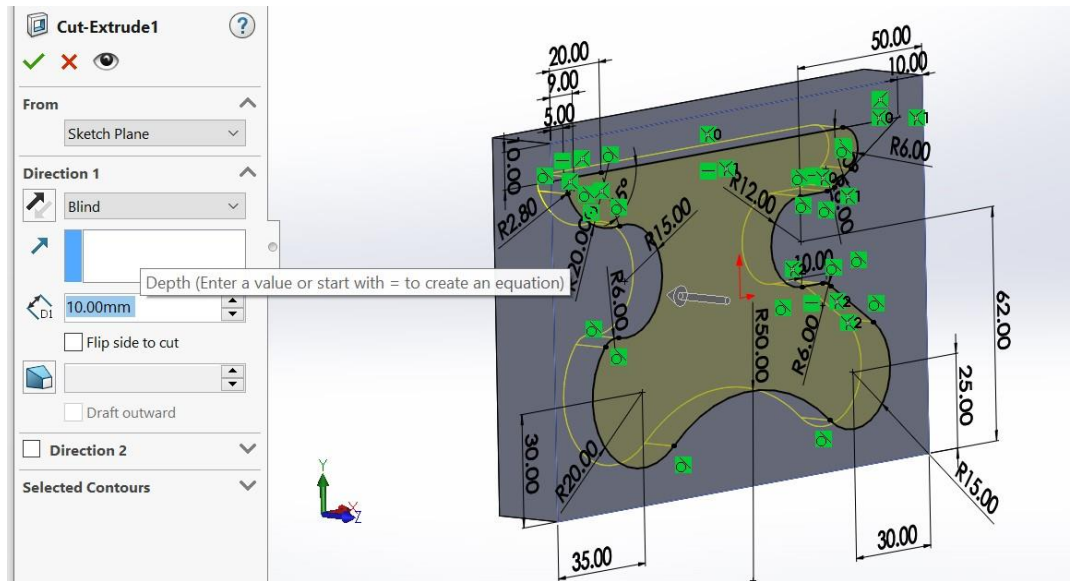


Figure 5 : Cut-Extrude1 de la poche

4. Création de la poche circulaire de 20mm de diamètre

Cut-Extrude2 → Distance: 5mm

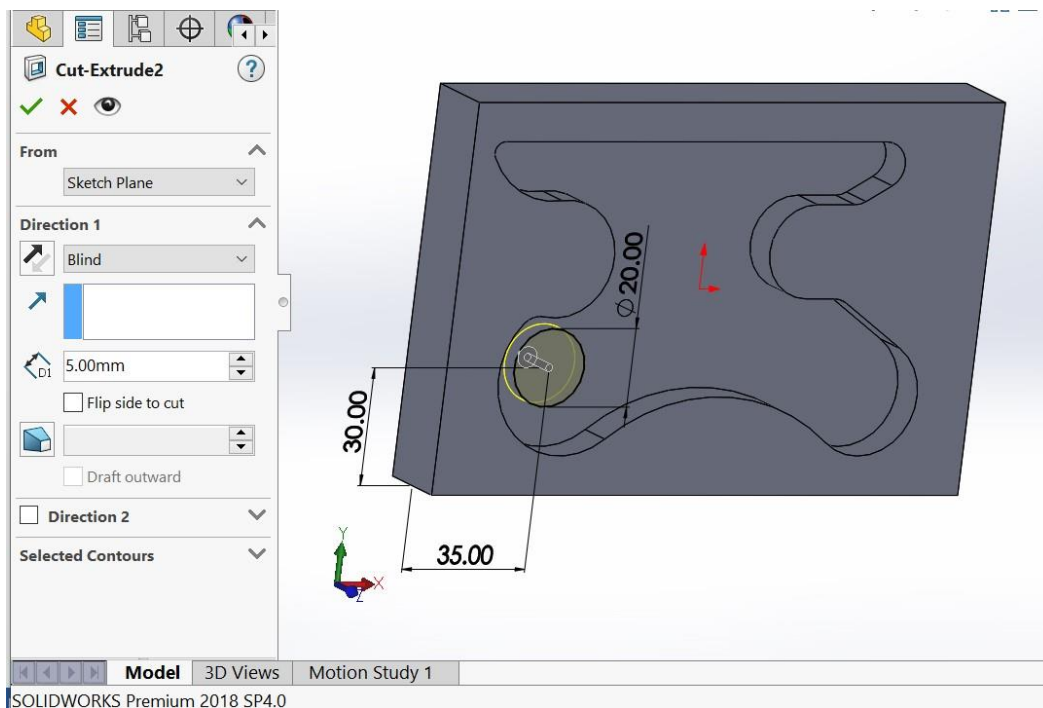


Figure 6 : Cut-Extrude2 de la poche circulaire

5. Création du bossage de 12 mm de diamètre

Boss-Extruder2 → Distance: 5mm (fig 7)

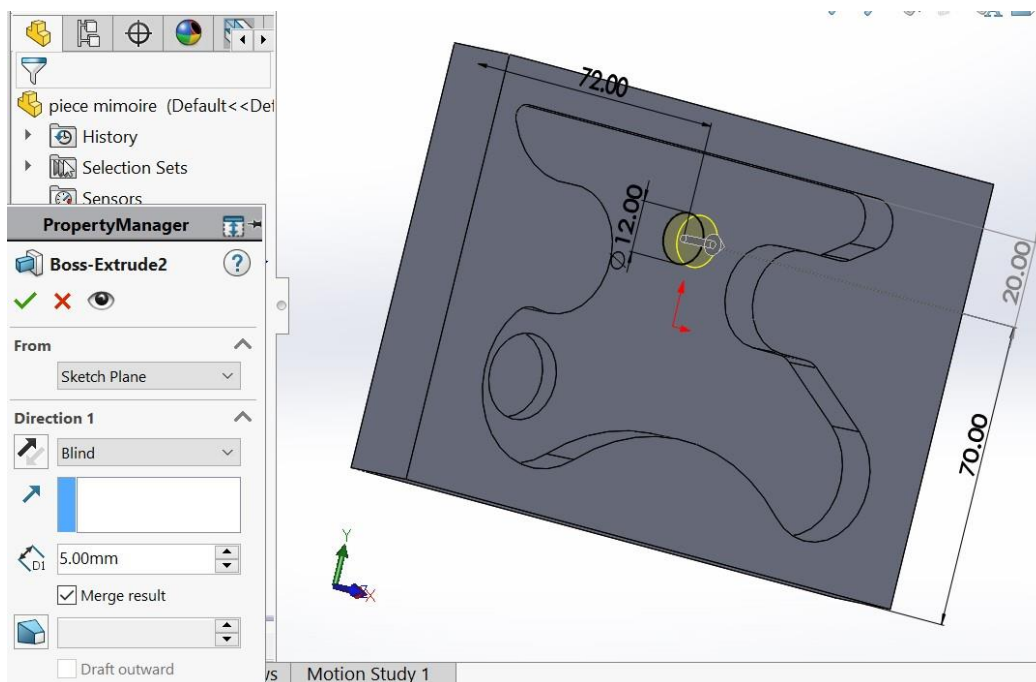


Figure 7 : Boss-Extruder2 du cercle Ø 12 mm

6. La pièce finale 3D

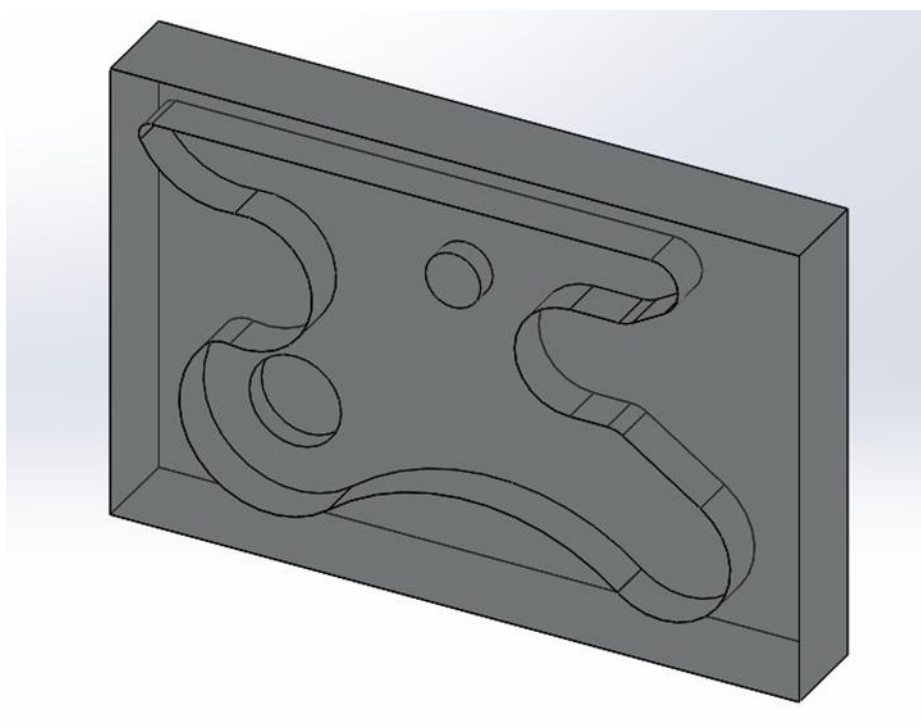


Figure 8: la pièce finale 3D

Chapitre III : Utilisation de CamWorks

III.1 Présentation de CamWorks

CamWorks est un logiciel de Fabrication Assistée par Ordinateur (FAO) utilisé pour programmer des machines CNC. Il permet de créer des parcours d'outil pour l'usinage 2.5D, 3D et le tournage. Voici ses principales caractéristiques, organisées en deux grandes parties : ses fonctionnalités principales et son intégration avec SolidWorks.

III.1.1. Fonctionnalités principales de CamWorks

a. Usinage basé sur les règles (RBM - Rule-Based Machining)

- Automatise la création des parcours d'outil grâce à des règles prédéfinies.
- Exemple : utilise des stratégies adaptées pour l'aluminium ou l'acier.
- Avantage : réduit le temps de programmation en réutilisant des paramètres standards.

b. Technologie d'usinage avancée (VoluMill™)

- Optimise les trajectoires pour réduire le temps d'usinage et l'usure des outils.
- Ajuste automatiquement les vitesses et les avances selon la matière et la forme de la pièce.

c. Différentes stratégies d'usinage

- **Dégrossissage** : Zigzag, Spirale, Adaptative Clearing (enlève rapidement la matière).
- **Finition** : Contournage, Projection, Parallèle (pour une surface lisse).
- **Usinage haute performance (HSM)** : parcours fluides et rapides pour plus d'efficacité.

d. Simulation et vérification

- Affiche une simulation 3D des parcours d'outil.
- Détecte les collisions entre l'outil, la pièce ou le montage.
- Évite les erreurs avant la fabrication.

e. Génération de G-code

- Crée automatiquement le code pour les machines CNC (compatible avec Fanuc, Siemens, Haas, etc.).
- Permet de personnaliser les post-traitements selon les besoins.

III.1.2. Intégration avec SolidWorks

CamWorks est conçu pour fonctionner directement dans SolidWorks, ce qui simplifie le processus de conception et d'usinage.

a. Modélisation et FAO dans un seul environnement

- Les opérations d'usinage sont liées au modèle 3D SolidWorks.
- Toute modification du modèle met automatiquement à jour les parcours d'outil.
- Avantage : pas besoin de recréer les données.

b. Reconnaissance automatique des géométries

- Utilise l'arbre de fonctions SolidWorks pour identifier poches, perçages, etc.
- Gain de temps : pas besoin de redéfinir manuellement les formes.

c. Interface conviviale

- L'interface ressemble à celle de SolidWorks, ce qui facilite l'apprentissage.
- Ergonomie adaptée pour les utilisateurs habitués à SolidWorks.

d. Gestion des assemblages complexes

- Permet de programmer l'usinage de pièces avec des montages multi-axes.
- Simule des configurations complexes pour garantir la précision.

III.2 Configuration de l'environnement d'usinage

Dimensions de la pièce brute

La pièce brute est un parallélépipède rectangle et a les dimensions suivantes :

Table 1: dimension de la pièce brute

| Longueur | Largeur | Hauteur |
|----------|---------|---------|
| 150 mm | 100 mm | 27mm |

Saisie des dimensions de la pièce brute dans le programme CamWorks

Afin de réinitialiser les dimensions correctes de la pièce dessinée dans CamWorks, nous cliquons sur l'instruction : **Stock manager**

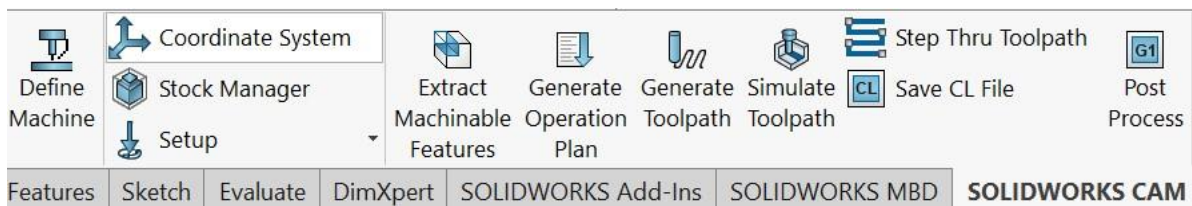


Figure 9: Panneau de configuration de CamWorks

Ajouter 2 mm à la surface extérieure sur l'axe Z+, en choisissant le type de matériau pour la pièce brute, c'est-à-dire, comme nous l'avons dans ce cas, l'aluminium : (fig 10)

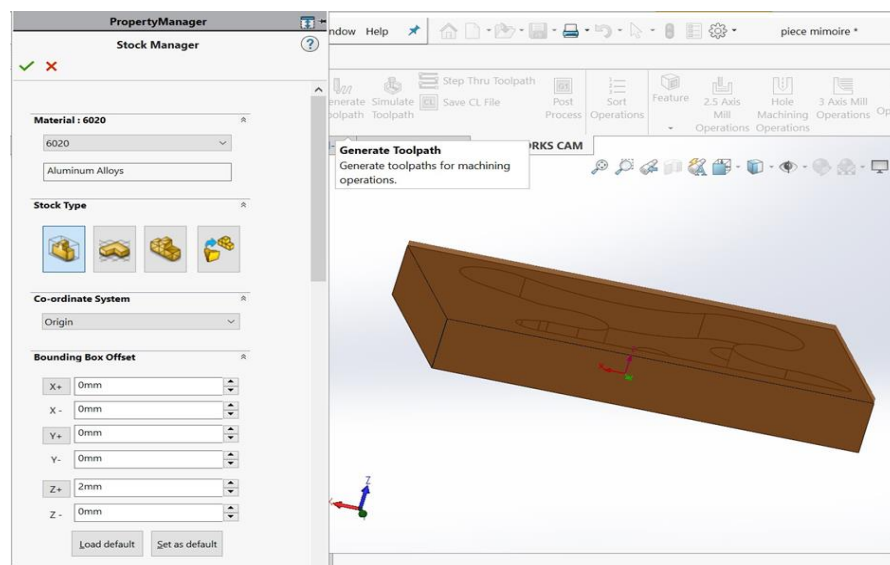


Figure 10 : saisie le type de matériaux dans CamWorks

Types d'outil utilisés

| | |
|--|---|
| <p>Tool usage : 1</p> <p>Diameter (D1) : 50mm</p> <p>Body diameter (D3) : 58.2mm</p> <p>Shank diameter (D2) : 38mm</p> <p>Flute length (L2) : 3.2mm</p> <p>Shoulder length (L4) : 35mm</p> <p>Overall length (L1) : 40mm</p> <p>Number of inserts : 5</p> <p>Tool material : Carbide</p> <p>Cutting parameters...</p> <p>TechDB ID : 2</p> <p>Combination ID : </p> <p>Comment : 50MM 5FL FACE MILL</p> <p>Hand of cut <input checked="" type="radio"/> Right <input type="radio"/> Left</p> | <p>Tool usage : 1</p> <p>Tool type : Flat End</p> <p>Sub-type : Rough & Finish</p> <p>Cut diameter (D1) : 12mm</p> <p>Shank dia (D2) : 16mm</p> <p>End radius (R) : 0mm</p> <p>Flute length (L2) : 19mm</p> <p>Shoulder length (L4) : 19mm</p> <p>Overall length (L1) : 51mm</p> <p>No. of flutes : 2</p> <p>Tool material : Carbide</p> <p>Cutting parameters...</p> <p>Output through : Tip</p> <p>TechDB ID : 18</p> <p>Combination ID : </p> <p>Comment : 16MM CRB 2FL 32 LOC</p> <p>Hand of cut <input checked="" type="radio"/> Right <input type="radio"/> Left</p> |
| <p>Tool usage : 2</p> <p>Tool type : Flat End</p> <p>Sub-type : Rough & Finish</p> <p>Cut diameter (D1) : 6mm</p> <p>Shank dia (D2) : 6mm</p> <p>End radius (R) : 0mm</p> <p>Flute length (L2) : 19mm</p> <p>Shoulder length (L4) : 19mm</p> <p>Overall length (L1) : 51mm</p> <p>No. of flutes : 2</p> <p>Tool material : Carbide</p> <p>Cutting parameters...</p> <p>Output through : Tip</p> <p>TechDB ID : 10</p> <p>Combination ID : </p> <p>Comment : 6MM CRB 2FL 19 LOC</p> <p>Hand of cut <input checked="" type="radio"/> Right <input type="radio"/> Left</p> | <p>Tool usage : 1</p> <p>Drill dia (D1) : 20mm</p> <p>Tip angle : 90deg</p> <p>Shank dia (D2) : 20mm</p> <p>Countersink angle (A) : 90deg</p> <p>Flute length (L2) : 20mm</p> <p>Overall length (L1) : 92mm</p> <p>No. of flutes : 2</p> <p>Tool material : Carbide</p> <p>Cutting parameters...</p> <p>Size designation : 20MM X 90DEG</p> <p>TechDB ID : 13</p> <p>Combination ID : </p> <p>Comment : 20MM X 90DEG CRB SPOT DRILL</p> <p>Hand of cut <input checked="" type="radio"/> Right <input type="radio"/> Left</p> |
| <p>Tool usage : 1</p> <p>Diameter (D1) : 20mm</p> <p>Shank dia (D2) : 20mm</p> <p>Tip angle (A) : 118deg</p> <p>Tip length : 6mm</p> <p>Flute length (L2) : 120mm</p> <p>Shoulder length (L4) : 120mm</p> <p>Overall length (L1) : 215mm</p> <p>No. of flutes : 2</p> <p>Tool material : Cobalt</p> <p>Cutting parameters...</p> <p>Fraction or No. : 20.0mm</p> <p>TechDB ID : 133</p> <p>Combination ID : </p> <p>Comment : 20.0mm JOBBER DRILL</p> <p>Hand of cut <input checked="" type="radio"/> Right <input type="radio"/> Left</p> | <p>Tool usage : 1</p> <p>Tool type : Flat End</p> <p>Sub-type : Rough & Finish</p> <p>Cut diameter (D1) : 10mm</p> <p>Shank dia (D2) : 10mm</p> <p>End radius (R) : 0mm</p> <p>Flute length (L2) : 22mm</p> <p>Shoulder length (L4) : 22mm</p> <p>Overall length (L1) : 73mm</p> <p>No. of flutes : 2</p> <p>Tool material : Carbide</p> <p>Cutting parameters...</p> <p>Output through : Tip</p> <p>TechDB ID : 14</p> <p>Combination ID : </p> <p>Comment : 10MM CRB 2FL 22 LOC</p> <p>Hand of cut <input checked="" type="radio"/> Right <input type="radio"/> Left</p> |

Figure 11 : types d'outils utilisée

III.3 Stratégies de vidage de poche étudiées

Stratégie spirale

La stratégie Spirale (ou Contour Concentrique) consiste à usiner la poche en suivant un motif de passes circulaires ou curvilignes, partant du contour extérieur et progressant vers l'intérieur (ou vice-versa) de manière continue.

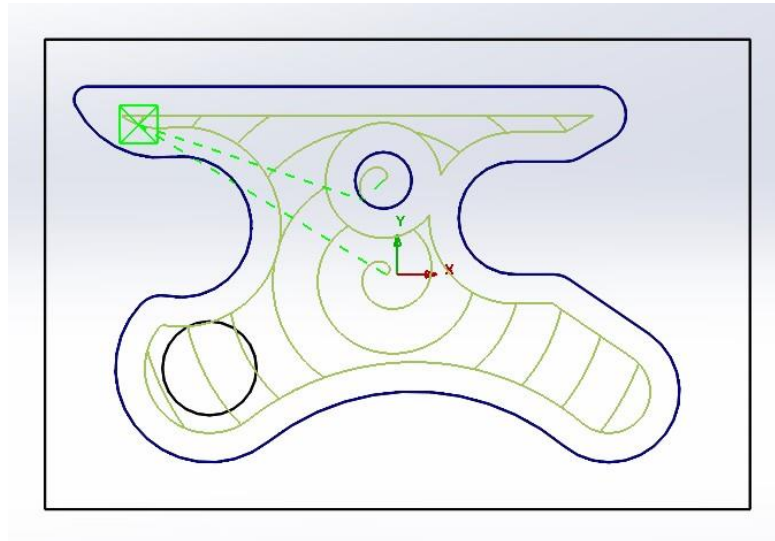


Figure 12 : Trajectoire spirale

Avantages

- Fluidité du mouvement.
- Réduction des chocs mécaniques (moins de changements de direction qu'en zigzag).
- Usure d'outil réduite (charges constantes).
- Adapté aux machines haute vitesse (HSM).

Inconvénients

- Complexité pour les géométries irrégulières.
- Nécessite des algorithmes avancés pour adapter la spirale aux formes complexes.
- Risque de sur usinage dans les angles serrés.
- Moins flexible que le zigzag pour les ajustements locaux.
- Peut laisser des marques de "vagues" si le pas de coupe est trop grand.

Stratégie Zigzag

La stratégie Zigzag consiste à usiner la poche en suivant un motif alterné de passes parallèles, avec des mouvements linéaires et des virages à 180° entre chaque rangée.

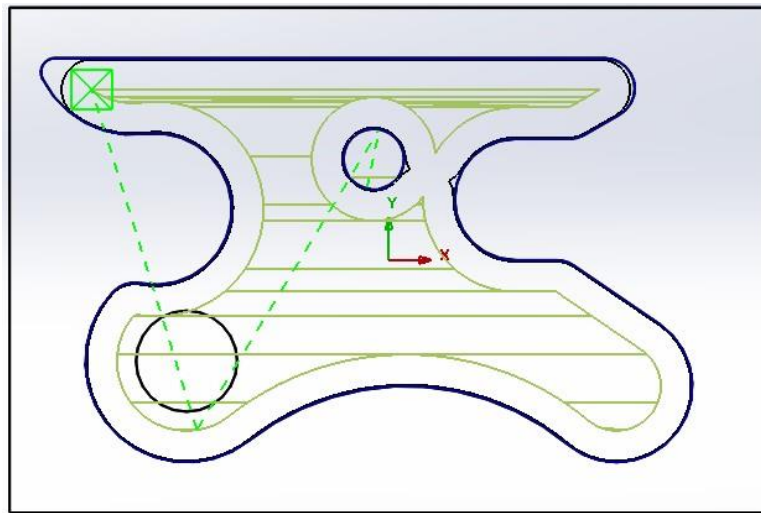


Figure 13: Trajectoire zig-zag

Avantages

- Uniformité de la coupe : Répartition homogène des efforts sur l'outil.
- Adaptabilité : Convient à la plupart des géométries de poches (simples ou complexes).

Inconvénients

- Usure accrue de l'outil : Les changements de direction brutaux génèrent des chocs mécaniques.
- Surchauffe possible : En cas de paramètres mal optimisés (avance trop lente, profondeur excessive).

Stratégie Parallèle

La stratégie Parallèle (ou Offset Parallèle) consiste à usiner la poche en suivant une série de passes parallèles rectilignes, généralement selon un axe prédéfini (X dans ce cas).

Unidirectionnel L'outil revient en rapide (G00) après chaque passe.

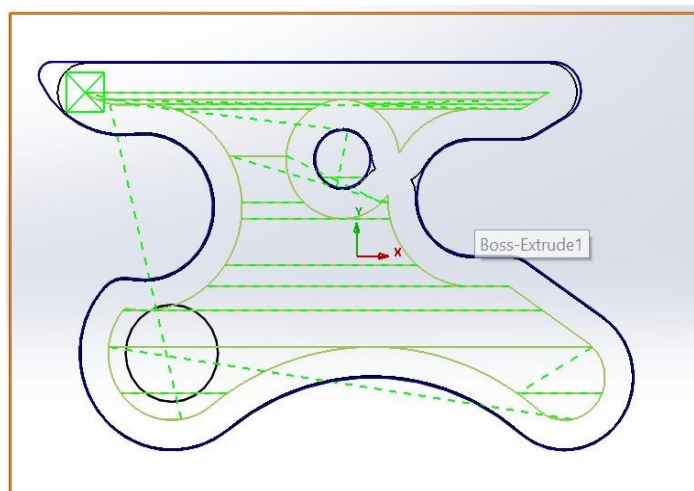


Figure 34: Stratégie Parallèle

Avantages

- Passe régulières et parallèles → finition homogène, idéale pour les pièces visibles.
- Permet d'adapter facilement le pas de coupe pour équilibrer temps d'usinage et qualité.
- Peut suivre les contours irréguliers en ajustant la direction des passes.

Inconvénients

- Temps d'usinage long.
- Inefficace pour le dégrossissage.
- Risque d'accumulation dans les coins (surtout en unidirectionnel).
- Toutes les passes sollicitent l'outil de la même manière → usure asymétrique possible.

III.4 Simulation des stratégies d'Usinage avec CamWorks

Cette étape permet de valider les trajectoires d'outil et d'anticiper les erreurs avec CamWorks avant l'usinage réel.

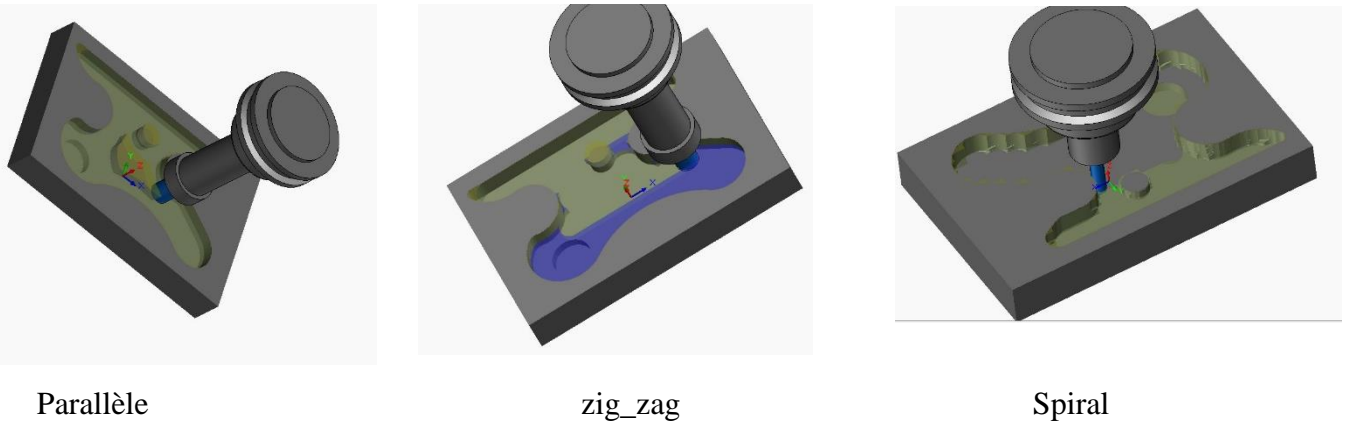


Figure 45: simulation des trois stratégies

III.5 Analyse de déviation (comparaison)

L'image affichée représente une analyse de déviation (comparaison) entre le modèle usiné et le modèle CAO de référence. Ce type de représentation est généralement utilisé pour le contrôle qualité après usinage ou pour valider une simulation d'usinage dans un logiciel de FAO tel que CamWorks ou un logiciel de métrologie 3D.

Voici quelques commentaires techniques et pédagogiques :

1. Légende des couleurs :

- La barre de couleur à gauche indique l'échelle des écarts en millimètres.
- Le vert (qui domine la pièce) signifie que la déviation entre la pièce usinée et la géométrie théorique est très faible (proche de 0 mm).
- Les teintes bleues (jusqu'à -0.40 mm) et rouges (jusqu'à +0.40 mm) indiquent des zones où il y a un excès ou un manque de matière plus important.

2. Interprétation :

- La quasi-totalité de la surface est verte, ce qui signifie que l'usinage est très proche du modèle CAO : la tolérance est respectée dans la majorité des zones.
- Une petite zone bleue est visible dans le coin supérieur gauche de la poche, ce qui indique un léger sur-usinage (enlèvement de trop de matière) pouvant atteindre environ -0.10 mm à -0.20 mm.
- Aucune zone rouge importante n'est visible, ce qui suggère qu'il n'y a pas de matière en excès.

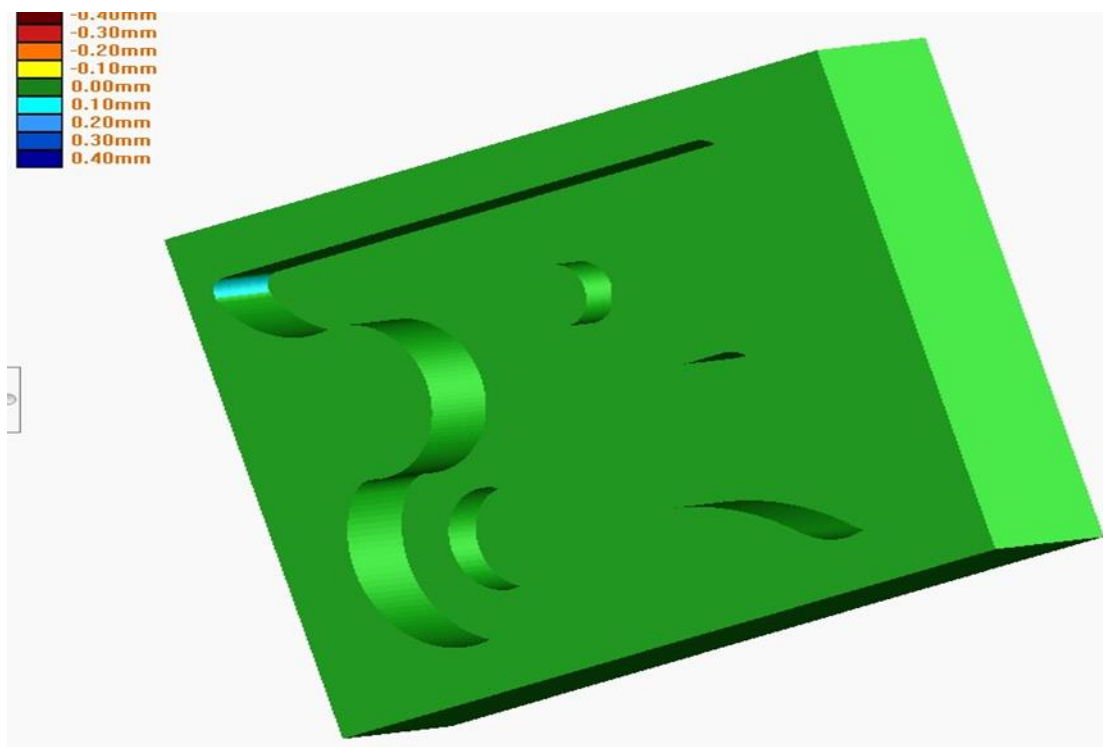


Figure 56 : l'état de surface après l'usinage

Conclusion

Ce chapitre démontre l'importance de la simulation virtuelle pour valider et affiner les stratégies d'usinage. Il ouvre la voie à une industrialisation éclairée des processus, où logiciels de FAO comme CamWorks jouent un rôle central dans la réduction des aléas et l'amélioration de la productivité.

Chapitre IV : Génération des Programmes G-code

IV.1 Introduction

Dans le processus de fabrication assistée par ordinateur, la génération du code G constitue l'étape finale de la préparation de l'usinage. Ce langage machine est essentiel pour piloter les machines-outils à commande numérique (CNC). Il permet de traduire les trajectoires d'usinage créées dans le logiciel CamWorks en instructions compréhensibles par la machine. Ce chapitre présente les principaux codes G et M utilisés, ainsi que les étapes nécessaires pour générer un fichier G-code adapté à la stratégie d'usinage choisie.

IV.2 Le G-code: Langage des Machines CNC

Le G-code est un langage standardisé utilisé pour contrôler les mouvements d'une machine CNC. Il permet de définir des actions précises comme les déplacements linéaires, circulaires, le choix du plan de travail, ou encore les modes de positionnement. À côté des codes G, les codes M (Machine codes) sont utilisés pour contrôler les fonctions auxiliaires comme l'activation de la broche, le refroidissement ou le changement d'outil.

IV.3 Principaux Codes G Utilisés

Voici les codes G les plus couramment utilisés dans la programmation CNC :

- G00 : Déplacement rapide sans usinage
- G01 : Interpolation linéaire (usinage en ligne droite)
- G02 : Interpolation circulaire sens horaire
- G03 : Interpolation circulaire sens antihoraire
- G17 : Sélection du plan XY
- G20 : Programmation en pouces
- G21 : Programmation en millimètres
- G28 : Retour automatique à la position d'origine
- G90 : Positionnement absolu (à partir de l'origine machine)
- G91 : Positionnement relatif (incrémental)
- G92 : Définir une nouvelle origine temporaire

La bonne compréhension et la maîtrise de ces codes permettent de développer des programmes CNC fiables et précis.

IV.4 Codes M: Fonctions de la Machine

Les codes M permettent de gérer des fonctions secondaires essentielles au bon déroulement de l'usinage. Voici les codes M les plus utilisés :

- M03 : Démarrage de la broche en rotation horaire
- M05 : Arrêt de la broche
- M06 : Changement d'outil automatique
- M08 : Activation du liquide de refroidissement
- M09 : Désactivation du liquide de refroidissement

- M30 : Fin de programme et réinitialisation

Ces instructions complètent le G-code pour automatiser toutes les actions mécaniques de la machine.

IV.5 Génération du G-code avec CamWorks

L'exportation du programme G-code se fait via la commande Post Process de CamWorks dans l'interface SolidWorks CAM.

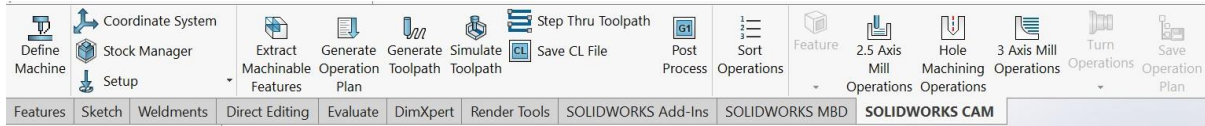


Figure 17 : Interface CamWorks

Étapes à suivre :

1. Après avoir défini les opérations et les stratégies d'usinage,
2. Cliquer sur Post Process dans la barre d'outils CamWorks,
3. Sélectionner le dossier d'enregistrement,
4. Choisir le format adapté à la machine. Dans ce projet, nous avons utilisé le format : SIEMENS_828D (*.MPF).
5. Après avoir cliqué sur l'instruction mentionnée, nous choisissons l'emplacement pour enregistrer le fichier et son type. Dans notre cas, nous choisissons SIEMENS_828D (*.MPF). (fig 18).



Figure 18: enregistrement de g code

IV.6 Modification de la Stratégie d'Usinage

Pour adapter ou modifier une stratégie :

- Aller dans Opération → Edit Definition
- Choisir la stratégie souhaitée (ex. : Contour Mill, Pocket Mill...)
- Ajuster les paramètres : profondeur de passe, recouvrement, vitesse d'avance, etc.

Chaque stratégie modifiée génère un nouveau fichier G-code personnalisé, adapté à la géométrie de la pièce et aux contraintes d'usinage.

La génération de G-code est une étape critique pour transformer un modèle numérique en pièce physique. Grâce à CamWorks et SolidWorks, cette opération est automatisée, tout en permettant une personnalisation fine selon la stratégie choisie. La compréhension des codes G et M reste cependant indispensable pour tout opérateur ou programmeur CNC souhaitant assurer un usinage précis, fiable et optimisé.

Pour modifier la stratégie dans CamWorks, vous devez suivre les instructions suivantes :

Opération → Edit Definition (fig 19)

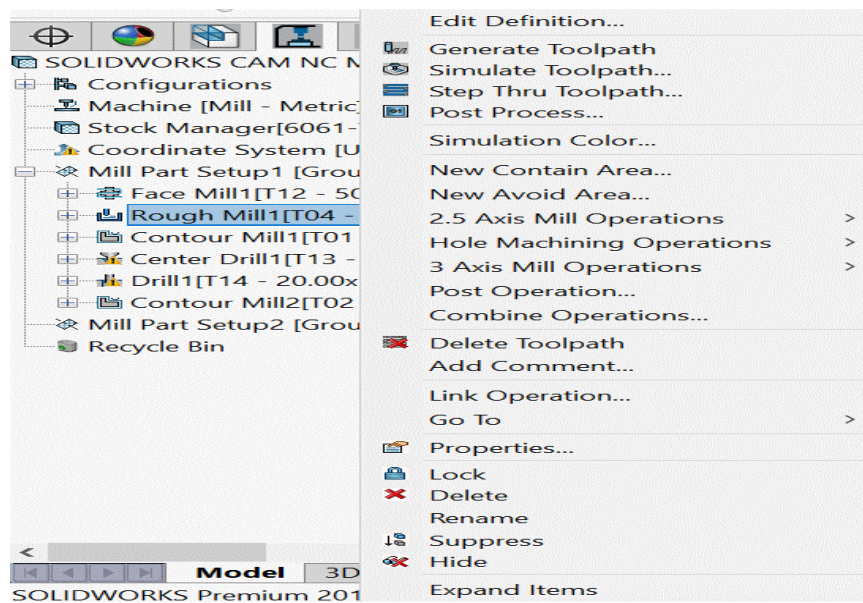


Figure 19 : opération → Edit Définition dans CamWorks

Sélectionnez la stratégie voulue et d'autres paramètres : (fig 20)

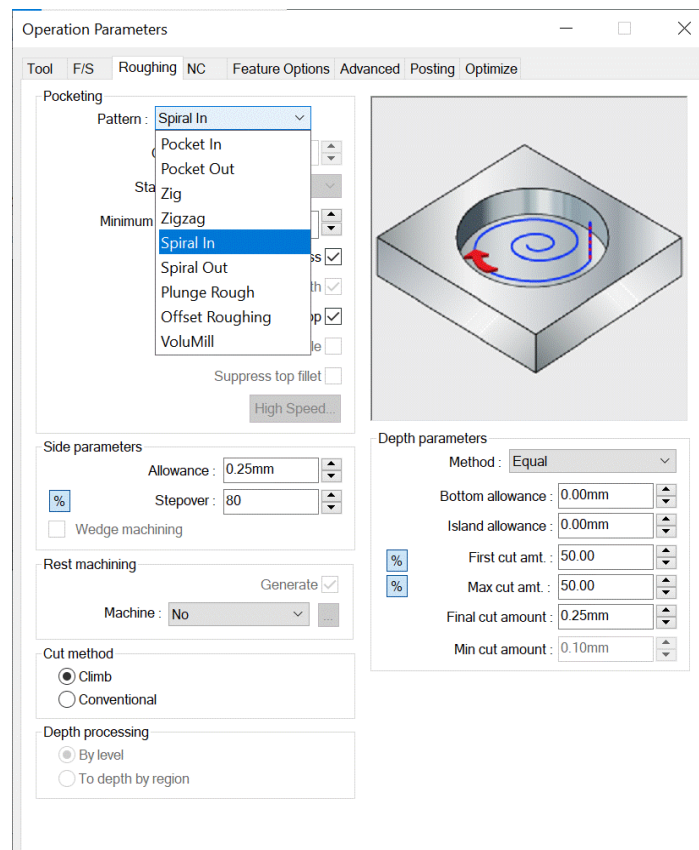


Figure 20: configuration de l'opération

Programme Code G pour la stratégie "zig-zag"

zigzag.MPF

;This Post Processor is distributed on an "AS IS" BASIS,

;WITHOUT WARRANTIES OR CONDITIONS OF ANY KIND, either express or implied.

N1 T04 D04

N2 L6

N3 MSG("16MM CRB 2FL 32 LOC")

N4 G60

N5 G64

N6 SOFT

N7 G00 G17 G90 G54

N8 S5991 M03

N9 G00 G90 X-58.73 Y33.75

N10 Z47. M08

N11 Z22.5

N12 G01 Z14. F136.955

N13 X41.675 F547.82

N14 X39.077 Y32.25

N15 X-56.134

N16 X-7.193 Y31.51

N17 G02 X1.539 Y31.378 CR=12.25

N18 G01 X37.566

N19 X37.317 Y31.234

N20 X1.884

N21 G02 X3.708 Y30.25 CR=12.25

N22 G01 X35.613

N23 X2.127 Y31.125

N24 G03 X-7.539 Y31.378 CR=12.25

N25 G01 X-53.421

N26 G03 X-52.618 Y31.234 CR=13.75

Programme Code G pour la stratégie "spirale"

spiral.MPF

;This Post Processor is distributed on an "AS IS" BASIS,

;WITHOUT WARRANTIES OR CONDITIONS OF ANY KIND, either express or implied.

N1 T04 D04

N2 L6

N3 MSG("16MM CRB 2FL 32 LOC")

N4 G60

N5 G64

N6 SOFT

N7 G00 G17 G90 G54

N8 S5991 M03

N9 G00 G90 X-55.147 Y31.86

N10 Z47. M08

N11 Z22.5

N12 G01 Z14. F136.955

N13 X-54.262 Y33.247 F547.82

N14 X-53.9 Y33.75

N15 X41.675

N16 X35.613 Y30.25

N17 X25.

N18 G03 X9.198 Y21.13 CR=18.25

N19 X-14.779 Y23.365 CR=12.25

N20 X6.76 Y12.597 CR=12.25

N21 X25. Y-6.25 CR=18.25

N22 G01 X33.069

N23 X49.936 Y-17.775

N24 G02 X51.33 Y-18.959 CR=8.75

N25 G01 X50.936 Y-20.017

N26 X49.62 Y-23.012

Programme Code G pour la stratégie "parallèle"

parallele.MPF

;This Post Processor is distributed on an "AS IS" BASIS,

;WITHOUT WARRANTIES OR CONDITIONS OF ANY KIND, either express or implied.

N1 T04 D04

N2 L6

N3 MSG("16MM CRB 2FL 32 LOC")

N4 G60

N5 G64

N6 SOFT

N7 G00 G17 G90 G54

N8 S5991 M03

N9 G00 G90 X-58.73 Y33.75

N10 Z47. M08

N11 Z22.5

N12 G01 Z14. F136.955

N13 X41.675 F547.82

N14 G00 Z22.5

N15 X-58.73 Y33.75

N16 G01 Z14. F136.955

IV.7 Vérification des programmes CN

Avant de lancer l'usinage sur une machine CNC, il est très important de vérifier le programme. Cette étape permet d'éviter les erreurs, les collisions et les accidents. On fait cette vérification en deux étapes : d'abord à la main, puis avec un logiciel de simulation.

IV.7.1 Vérification Manuelle du G-code

La vérification manuelle consiste à lire le programme G-code pour vérifier qu'il n'y a pas d'erreurs. On regarde par exemple :

- Si les lignes de code sont bien écrites (bonne syntaxe),
- Si les vitesses ou les profondeurs ne sont pas trop élevées,
- Si l'outil ne risque pas de toucher la pièce ou la machine de façon dangereuse.

Cette étape permet de repérer les erreurs simples avant de passer à la simulation.

IV.7.2 Simulation du G-code avec un Logiciel

Après la vérification manuelle, on peut utiliser un logiciel pour simuler le programme. Ce logiciel montre les mouvements de l'outil en 3D, sans utiliser la machine réelle. Cela permet de :

- Voir s'il y a des collisions entre l'outil et la pièce,
- Vérifier si l'outil suit bien le bon chemin,
- Contrôler le temps d'usinage et la qualité du travail.

Exemples de logiciels utiles :

- CNC Simulator Pro : montre la pièce en 3D avec détection de collisions.
- CAMotics : simple et gratuit, pour machines 3 axes.
- MachiningCloud : bien adapté aux parcours complexes.
- Vericut : logiciel professionnel utilisé dans l'industrie.

Simulation par CNC Simulateur

Import du G-code dans le logiciel.



Figure 21 : l'interface de l'application cnc simulateur

Observation des trajectoires d'outil, les plongées, et les retraits pour les trois stratégies d'usinage voir les figures 22, 23 et 24.

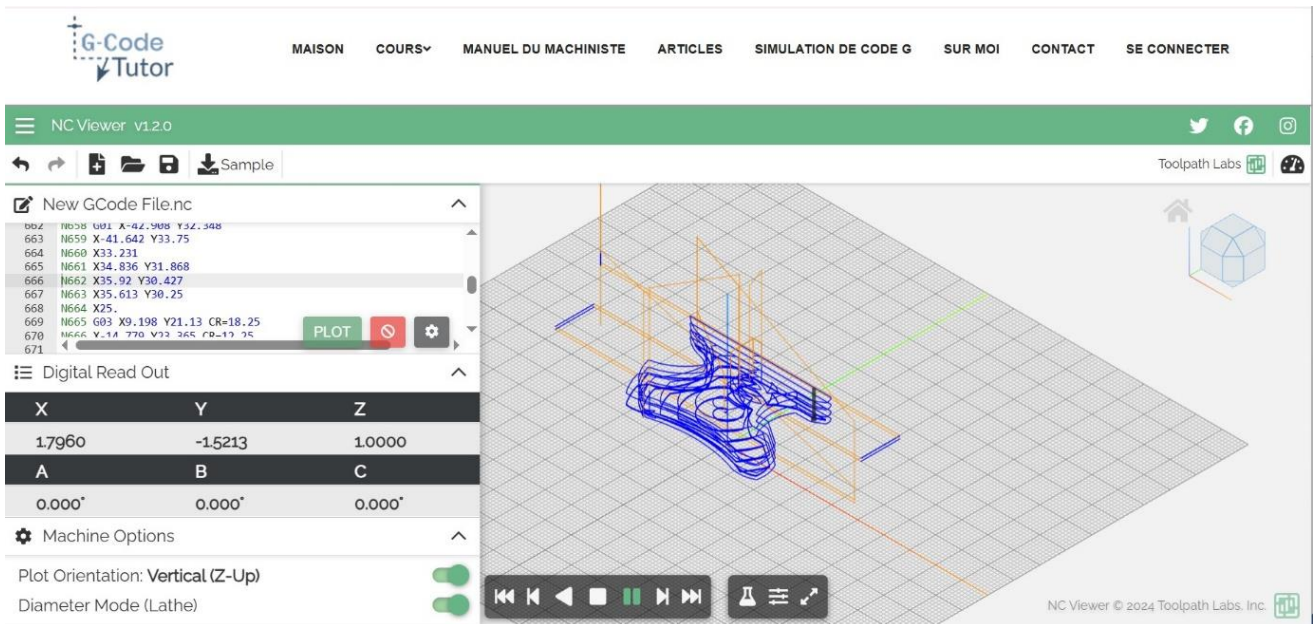


Figure 22: Simulation spiral online

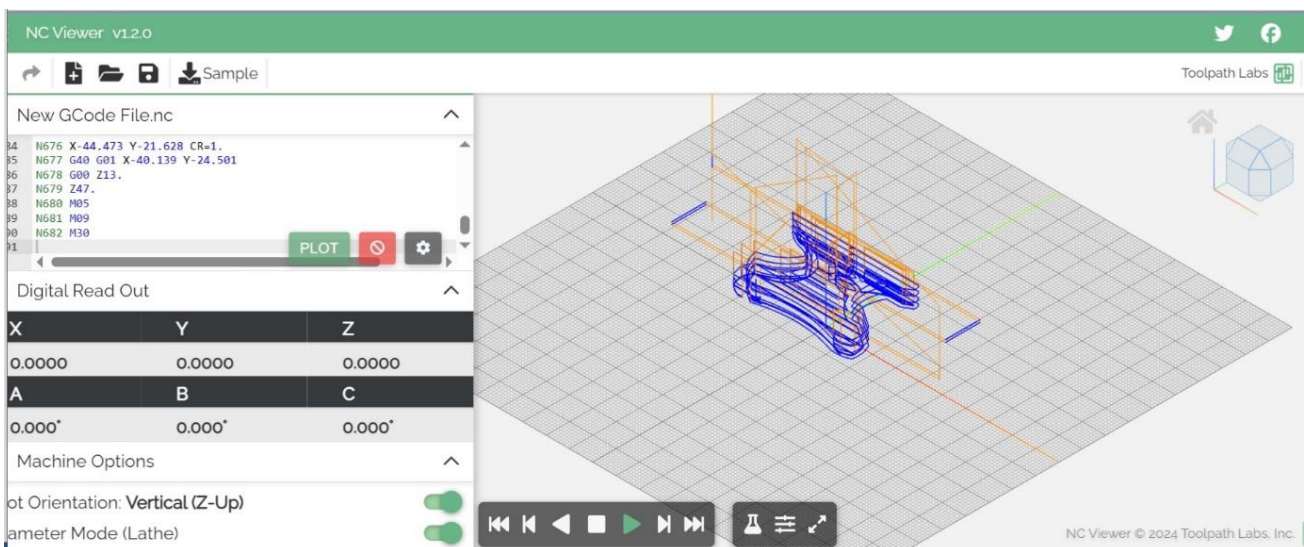


Figure 23 : Simulation parallèle online

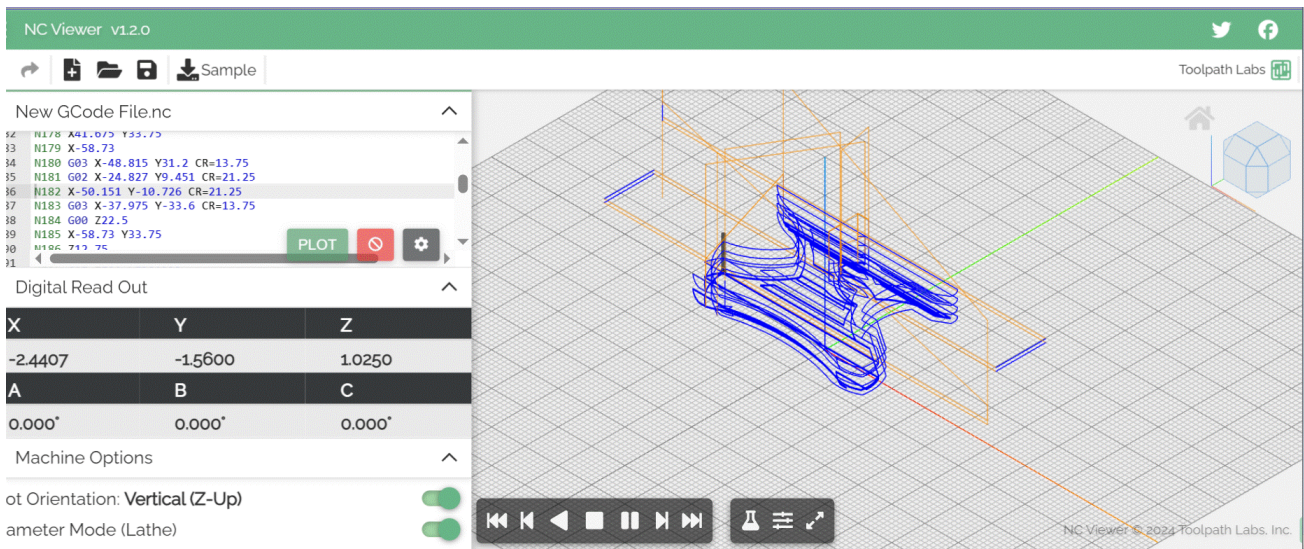


Figure 24 : Simulation zig_zag online

Avantages :

Détection des erreurs comme :

- Les dépassements des limites machine.
- Les surépaisseurs ou zones non usinées.

Chapitre V : Résultats et Discussion

V. Analyse et Optimisation des Stratégies d'Usinage

V.1 Comparaison des Stratégies d'Usinage

Dans cette partie, nous comparons trois stratégies d'usinage utilisées pour usiner une poche irrégulière : spirale, zigzag et parallèle. Le tableau ci-dessous montre les résultats obtenus pour chaque stratégie selon plusieurs critères :

Tableau 2 : Comparaison des stratégies d'usinage

| Critère | Spirale | Zigzag | Parallèle |
|-------------------------------------|---------|--------|-----------|
| Vitesse d'avance XY (mm/min) | 547.82 | 547.82 | 547.82 |
| Temps de cycle (minutes) | 17.53 | 12.5 | 14.19 |
| Nombre de lignes de programme | 1154 | 480 | 690 |
| Longueur du parcours outil (mètres) | 12.58 | 9.81 | 13.24 |

Analyse :

- La stratégie zigzag est la plus rapide (12.5 min), avec le parcours outil le plus court.
- La stratégie spirale offre une finition plus homogène, mais elle est plus longue.
- La stratégie parallèle est intermédiaire, mais produit un programme plus long que le zigzag.

V.2 Optimisation Proposée : Stratégie Hybride

Pour améliorer le temps d'usinage tout en gardant une bonne qualité de surface, une stratégie hybride est proposée. Elle combine les avantages des deux meilleures stratégies.

Principe de la stratégie hybride :

L'usinage se fait en deux phases :

1. Phase d'Ébauche (enlever rapidement la matière)
 - Stratégie utilisée : Zigzag
 - Avantages :
 - Temps d'usinage réduit
 - Moins d'effort sur l'outil (durée de vie prolongée)
2. Phase de Finition (obtenir une bonne surface)
 - Stratégie utilisée : Spirale
 - Avantages :
 - Finition plus régulière
 - Moins de marques sur la pièce

Tableau 3 : Paramètres recommandés dans CamWorks

| Phase | Stratégie | Paramètres clés |
|----------|-----------|---|
| Ébauche | Zigzag | - Grande profondeur de passe (70-80%) |
| | | - Avance rapide |
| | | - Tolérance large (précision faible) |
| Finition | Spirale | - Petite profondeur de passe (10-20% du Ø outil) |
| | | - Avance réduite |
| | | - Chevauchement élevé ($\text{stepover} \leq 30\%$) |

Conclusion :

Cette stratégie hybride permet de gagner du temps lors de l'ébauche et d'obtenir une meilleure qualité de surface à la fin. Elle représente un bon compromis entre rapidité et précision pour l'usinage de poches irrégulières.

Conclusion Générale

L'étude menée dans ce projet a permis de mieux comprendre l'impact des différentes stratégies d'usinage sur la performance globale d'une opération CNC, notamment pour le cas d'une poche irrégulière. Grâce à l'utilisation combinée de SolidWorks pour la conception et CamWorks pour la programmation et la simulation, nous avons pu générer, analyser et comparer plusieurs scénarios d'usinage.

Les résultats ont montré que chaque stratégie présente des avantages et des limites. La stratégie zigzag s'est révélée la plus rapide, tandis que la spirale a offert la meilleure qualité de finition. En combinant ces deux approches, nous avons proposé une stratégie hybride qui optimise à la fois le temps d'usinage et la qualité de surface.

Ce travail confirme l'importance de la simulation en amont et de la bonne maîtrise des outils FAO pour améliorer les performances de production. Il ouvre également la voie à d'autres travaux d'optimisation, comme l'intégration de l'usinage à grande vitesse ou l'automatisation de la sélection des stratégies via l'intelligence artificielle.

Bibliographie

1. Altintas, Y. (2012). Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations, and CNC Design. Cambridge University Press.
2. Groover, M. P. (2015). Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems. Wiley.
3. Sandvik Coromant. (2020). Metal Cutting Technical Guide. Disponible en ligne : <https://www.sandvik.coromant.com/>
4. Kalpakjian, S., & Schmid, S. R. (2014). Manufacturing Engineering and Technology. Pearson.
5. Alexandre Mondelin, Modélisation de l'intégrité des surfaces usinées Application au cas du tournage finition de l'acier inoxydable 15-5PH. Thèse de l'université de Lyon.
6. G. Poulachon, A. Moisan, I.S. Jawahir, On modeling the influence of thermo-mechanical behavior in chip formation during hard turning of 100Cr6 bearing steel, CIRP Annals - Manuf. Tech. 50 (2001) 1 31-36.
7. <https://www.3erp.com/blog/g-code/#table-co-1>
8. RIANE Rami. Contribution à la Synthèse d'Observateur Adaptatif à Entrées Inconnues d'un Système de Forage Rotary : Simulations sous Lab view. Université M'hamed bougaraboumerdes (2014/2015).
9. Liste des langages de programmation CNC : G-code et M-code [Guide facile] Dernière modification : 21 juin 2024