



**UNIVERSITÉ SAAD DAHLAB DE BLIDA 1  
FACULTE DE TECHNOLOGIE  
DEPARTEMENT MÉCANIQUE**

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

**Thème :**

**Simulation et prédiction de la température de coupe lors d'une  
opération de fraisage**

Proposé par :

Promoteur : Professeur M. TEMMAR

Co-Promotrice : H. Lot

Réalisé par :

Madjed BOUZID

# Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction .....</b>	<b>9</b>
<b>2</b>	<b>Généralité sur l'usinage mécanique.....</b>	<b>11</b>
<b>2.1</b>	<b>Introduction : .....</b>	<b>11</b>
<b>2.2</b>	<b>Exigences liées à l'usinage :.....</b>	<b>12</b>
<b>2.3</b>	<b>Système POM :.....</b>	<b>13</b>
<b>2.4</b>	<b>Les procédés d'usinage.....</b>	<b>14</b>
2.4.1	Sciage.....	15
2.4.2	Perçage.....	16
2.4.3	Tournage.....	17
2.4.4	Brochage.....	18
<b>2.5</b>	<b>Conclusion .....</b>	<b>19</b>
<b>3</b>	<b>Généralités sur le fraisage .....</b>	<b>20</b>
<b>3.1</b>	<b>Introduction.....</b>	<b>20</b>
<b>3.2</b>	<b>Définition .....</b>	<b>20</b>
<b>3.3</b>	<b>Mouvements relatifs entre la pièce et l'outil.....</b>	<b>20</b>
3.3.1	Vitesse de coupe ( $V_c$ ) .....	21
3.3.2	Fréquence de rotation de la broche ( $n$ ).....	22
3.3.3	Vitesse d'avance ( $V_f$ ).....	22
3.3.4	Avance par tour ( $f$ ).....	23
3.3.5	Avance par dent ( $f_z$ ).....	23
3.3.6	Profondeur de la passe ( $a_p$ ).....	24
3.3.7	Largeur de la coupe ( $a_e$ ).....	24
<b>3.4</b>	<b>Classification de fraisage.....</b>	<b>25</b>
<b>3.5</b>	<b>Les fraises .....</b>	<b>27</b>
3.5.1	Type de fraise :.....	27
3.5.2	Propriétés des fraises.....	28
3.5.3	Les composants géométriques de la fraise .....	30
3.5.4	Caractéristiques des matériaux utilisés pour l'outil de fraisage .....	31
<b>3.6</b>	<b>Les machines de fraisage.....</b>	<b>32</b>
3.6.1	Fraiseuses horizontales.....	32
3.6.2	Fraiseuses verticales.....	32
3.6.3	Fraiseuse universelle .....	33

3.6.4	Fraiseuse à commandes numériques .....	34
<b>4</b>	<b><i>Modélisation numérique des effets thermiques au droit de l'interface pièce-outil lors du procédé de fraisage</i></b> .....	<b>35</b>
<b>4.1</b>	<b>Effets thermomécaniques lors du procédé de fraisage</b> .....	<b>35</b>
4.1.1	Forces mécaniques lors du fraisage : .....	35
4.1.2	Déformations et contraintes résiduelles : .....	36
4.1.3	Génération de chaleur : .....	36
4.1.4	Stratégies d'atténuation des effets thermomécaniques : .....	37
<b>4.2</b>	<b>Analyse par la méthode des éléments finis</b> .....	<b>37</b>
4.2.1	Maillage : .....	38
4.2.2	Domaines de modélisation .....	38
4.2.3	Modèle de comportement (Johnson-Cook): .....	39
<b>4.3</b>	<b>Modélisation et simulation numérique</b> .....	<b>40</b>
4.3.1	Conception et modélisation .....	40
4.3.2	Simulation numérique avec Ansys .....	48
<b>4.4</b>	<b>Analyse des résultats</b> .....	<b>63</b>
4.4.1	Méthode de résolution du système de prédiction par DESIGN EXPERT .....	65
4.4.2	Scénario 1 .....	66
4.4.3	Scénario 2 .....	68
<b>5</b>	<b><i>Conclusion générale</i></b> .....	<b>70</b>
<b>6</b>	<b><i>Références bibliographiques</i></b> .....	<b>71</b>

# Liste des Figures

Figure 2. 1 : processus de l'usinage .....	13
Figure 2. 2 : Scie à ruban .....	15
Figure 2. 3 : Différentes opérations du procédé de perçage .....	16
Figure 2. 4 : Nomenclature internationale ANSI pour les composants du foret de perçage .....	16
Figure 2. 5 : Différentes opérations de tournage .....	17
Figure 2. 6 : schéma de principe de la rectification plane .....	18
Figure 2. 7 : Exemples de brochages .....	19
Figure 3. 1 : Mouvements relatifs au procédé de fraisage .....	21
Figure 3. 2 : différence entre profondeur et largeur de passe.....	25
Figure 3. 3 : Techniques de fraisage en roulant .....	27
Figure 3. 4 : familles de fraises.....	28
Figure 3. 5 : Exemples de fraises avec différent nombre de tailles.....	29
Figure 3. 6 : Exemples de fraises avec différent type de forme .....	29
Figure 3. 7 : les différents angles de l'outil de fraisage .....	30
Figure 3. 8 : Exemple de machine de fraisage verticale et horizontale .....	33
Figure 3. 9 : Exemple de machine de fraisage universelle .....	34
Figure 3. 10 : Fraiseuse à commandes numériques .....	34
Figure 4. 1 : Étape 1 de modélisation de la fraise sur SolidWorks.....	41
Figure 4. 2 : Étape 2 de modélisation de la fraise sur SolidWorks.....	41
Figure 4. 3 : Étape 3 de modélisation de la fraise sur SolidWorks.....	42
Figure 4. 4 : Étape 4 de modélisation de la fraise sur SolidWorks.....	43
Figure 4. 5 : Étape 4 de modélisation de la fraise sur SolidWorks ( Vue 1) .....	43
Figure 4. 6 : Étape 5 de modélisation de la fraise sur SolidWorks ( Vue 2).....	44
Figure 4. 7 : Étape 6 de modélisation de la fraise sur SolidWorks ( Vue 1) .....	44
Figure 4. 8 : Étape 6 de modélisation de la fraise sur SolidWorks ( Vue 2) .....	45
Figure 4. 9 : Étape 7 de modélisation de la fraise sur SolidWorks ( Vue 2) .....	45
Figure 4. 10 : Forme géométrique finale de la fraise modélisée sur SolidWorks.....	46
Figure 4. 11 : Module Assemblage de SolidWorks .....	46
Figure 4. 12 : Mise en contact entre la pièce et l'outil de fraisage.....	47
Figure 4. 13 : Module d'exportation en format IGS.....	47
Figure 4. 14 : Système d'analyse : Dynamique explicite.....	48
Figure 4. 15 : Choix des matériaux adoptés pour l'outil de fraisage et la pièce à usiner .....	49
Figure 4. 16 : Attribution du matériau TITANE à l'outil de fraisage .....	49
Figure 4. 17 : Attribution du matériau Al-1100-O à la pièce (Scenario 1) .....	50
Figure 4. 18 : Attribution du matériau PLATINE à la pièce (Scenario 1) .....	50
Figure 4. 19 : Systèmes de coordonnées .....	51

<i>Figure 4. 20 : Systèmes de coordonnées .....</i>	<i>51</i>
<i>Figure 4. 21 : Maillage de la pièce et de l'outil.....</i>	<i>52</i>
<i>Figure 4. 22 : Paramétrage de la rotation de l'outil de fraisage .....</i>	<i>53</i>
<i>Figure 4. 23 : Valeurs des températures [scénario 1 cas d'étude 1].....</i>	<i>55</i>
<i>Figure 4. 24 : Courbes d'évolution des températures dans le temps [scénario 1 cas d'étude 1].....</i>	<i>55</i>
<i>Figure 4. 25 : Valeurs des températures [scénario 1 cas d'étude 2].....</i>	<i>56</i>
<i>Figure 4. 26 : Courbes d'évolution des températures dans le temps [scénario 1 cas d'étude 2].....</i>	<i>56</i>
<i>Figure 4. 27 : Valeurs des températures [scénario 1 cas d'étude 3].....</i>	<i>57</i>
<i>Figure 4. 28 : Courbes d'évolution des températures dans le temps [scénario 1 cas d'étude 3].....</i>	<i>57</i>
<i>Figure 4. 29 : Valeurs des températures [scénario 1 cas d'étude 4].....</i>	<i>58</i>
<i>Figure 4. 30 : Courbes d'évolution des températures dans le temps [scénario 1 cas d'étude 4].....</i>	<i>58</i>
<i>Figure 4. 31 : Valeurs des températures [scénario 2 cas d'étude 1].....</i>	<i>59</i>
<i>Figure 4. 32 : Courbes d'évolution des températures dans le temps [scénario 2 cas d'étude 1].....</i>	<i>59</i>
<i>Figure 4. 33 : Valeurs des températures [scénario 2 cas d'étude 2].....</i>	<i>60</i>
<i>Figure 4. 34 : Courbes d'évolution des températures dans le temps [scénario 2 cas d'étude 2].....</i>	<i>60</i>
<i>Figure 4. 35 : Valeurs des températures [scénario 2 cas d'étude 3].....</i>	<i>61</i>
<i>Figure 4. 36 : Courbes d'évolution des températures dans le temps [scénario 2 cas d'étude 3].....</i>	<i>61</i>
<i>Figure 4. 37 : Valeurs des températures [scénario 2 cas d'étude 4].....</i>	<i>62</i>
<i>Figure 4. 38 : Courbes d'évolution des températures dans le temps [scénario 2 cas d'étude 4].....</i>	<i>62</i>
<i>Figure 4. 39 : Exemple de prédiction de la température maximale pour une pièce en AL-1100-O (Design Expert)....</i>	<i>66</i>
<i>Figure 4. 40 : Abaque de prédiction de la température maximale au droit de l'interface de contact pour une pièce en AL-1100-O .....</i>	<i>67</i>
<i>Figure 4. 41 : Exemple de prédiction de la température maximale pour une pièce en Platine (Design Expert).....</i>	<i>68</i>
<i>Figure 4. 42 : Abaque de prédiction de la température maximale au droit de l'interface de contact pour une pièce en PLATINE .....</i>	<i>69</i>

## Liste des Tableaux

<i>Tableau 4. 1 : Paramètres de coupe retenus pour chaque scénario et pour chaque cas d'étude .....</i>	<i>53</i>
<i>Tableau 4. 2 : Synthèse des résultats de températures maximales obtenues au droit de l'interface de contact .....</i>	<i>63</i>

## **Remerciements**

Tout d'abord, je souhaiterais remercier mon promoteur Professeur Temmar pour son encadrement et ses conseils pertinents lors de la réalisation et la rédaction de ce projet de fin d'études.

Je souhaiterais également remercier Professeur Melzi pour son accompagnement et les informations précieuses qu'elle a mise à ma disposition tout au long de la réalisation du projet.

J'adresse ma reconnaissance particulièrement à ma famille et à tous les enseignants pour leur soutien et aide sans faille qu'ils m'ont apporté durant tout le cycle de ma formation

Enfin, je souhaiterais remercier tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

## **Dédicaces**

J'offre ce modeste travail à mes chers parents : Abd Karim et Nouria, en signe de reconnaissance pour leur patience et les sacrifices consentis pour me voir réussir.

A mes frères sœurs : Selma, Mohamed, Rafik et Madjda

A ma fiancée : Fadwa CHETTOUH

A mes tantes : Aicha, Hayet, Lamia

A mes cousins, Amina BENNAMA, Ryma BENNAMA, Mohamed BENNAMA et Adel OUZZANE.

A tous mes amis de l'université SAAD DAHLAB de Blida

**BOUZID MADJED**

## Résumé

Les pièces mécaniques (appareils, machines...) sont obtenues par plusieurs procédés : moulage, assemblage, formage (laminage, forgeage, estampage ...) ou usinage (coupe des métaux). L'usinage par enlèvement de matière permet d'élaborer des pièces mécaniques finies. L'outil de coupe enlève de la surépaisseur pour générer une nouvelle surface. Cette coupe est influencée principalement par les propriétés du matériau de la pièce à usiner, la géométrie de l'outil de coupe, les conditions de coupe, les conditions de lubrification et les paramètres dynamiques (raideur, amortissement) du système usinant.

Notre travail consistera à bien comprendre le phénomène de contact entre l'outil de coupe et la pièce à usiner en utilisant comme exemple, le procédé de fraisage. A cet effet, plusieurs opérations d'usinage expérimentales seront utilisées. Ainsi et pour atteindre cet objectif, nous allons utiliser des méthodes nous permettant d'observer le comportement de l'outil de coupe pendant l'usinage.

Les résultats seront interprétés par des approches numériques modélisant ce contact.

**Mots clés** : usinage, enlèvement de matière, fraisage, outil de coupe, approches numériques.

## Abstract

Mechanical parts (devices, machines, etc.) are obtained by several processes: molding, assembly, forming (rolling, forging, stamping, etc.) or machining (metal cutting). Material-removal machining produces finished mechanical parts. The cutting tool removes excess material to create a new surface. This cut is influenced mainly by the material properties of the workpiece, the geometry of the cutting tool, cutting conditions, lubrication conditions and the dynamic parameters (stiffness, damping) of the machining system.

Our work will focus on understanding the phenomenon of contact between the cutting tool and the workpiece, using the milling process as an example. To this end, several experimental machining operations will be used. To achieve this objective, we will use methods that enable us to observe the behavior of the cutting tool during machining.

The results will be interpreted by numerical approaches modeling this contact.

**Keywords**: machining, material-removal, milling, cutting tool, numerical approaches.

## ملخص:

يتم الحصول على الأجزاء الميكانيكية (الأجهزة، الآلات) من خلال عدة عمليات: الصب، التجميع، التشكيل (الدرفلة، الطرق، الختم، ...). أو التشغيل الآلي (قطع المعادن). التشغيل الآلي عن طريق إزالة المادة تسمح بصناعة الأجزاء الميكانيكية النهائية. تزيل أداة القطع السماكة الزائدة للحصول على سطح جديد. يتأثر هذا القطع بشكل أساسي بالخصائص المادية لقطعة العمل، وشكلها الهندسي، وظروف القطع والتشحيم، والإعدادات الديناميكية (الصلابة، التخميد) لنظام التشغيل الآلي.

من خلال هذا البحث هي فهم ظاهرة الاتصال بين أداة القطع وقطعة العمل باستخدام عملية التفريز كمثال. لذلك سيتم استخدام العديد من مهمتنا من عمليات التشغيل الآلي التجريبية. وبالتالي، ولتحقيق هذا الهدف، سوف نستخدم طرقاً تسمح لنا بمراقبة سلوك أداة القطع أثناء العملية.

سيتم تفسير النتائج من خلال المناهج العددية التي تنمذج هذا الاتصال.

**الكلمات الدالة:** التشغيل الآلي، إزالة المادة، التفريز، أداة القطع، المناهج العددية.



# **1 Introduction**

Depuis des siècles, l'homme a utilisé différentes méthodes pour façonner les matériaux et transformer des matières brutes en produits finis. Le domaine de la fabrication mécanique présente plusieurs techniques et procédés qui permettent de créer des pièces selon des spécifications précises. Ces procédés incluent l'usinage, la fonderie, le formage, la soudure et bien d'autres.

Parmi ces techniques, l'usinage se distingue en tant que méthode de retrait de matière, par des outils coupants afin d'obtenir une géométrie spécifique. Cette approche offre une grande flexibilité et permet la réalisation de pièces aux formes complexes. Ces dernières sont souvent utilisées dans l'industrie automobile, aérospatiale, médicale et autres. L'usinage, en tant que processus fondamental de fabrication, a été un acteur essentiel pour le développement technologique et industriel de l'humanité.

Les techniques d'usinage se sont développées au fil du temps pour répondre aux besoins de l'industrie. Ces techniques incluent le tournage, le fraisage, le perçage, le meulage et bien d'autres. Chacune de ces méthodes présente ses propres avantages et est adaptée à des applications spécifiques. Dans le cadre du présent projet de fin d'études, nous nous intéresserons sur la technique du fraisage qui occupe une place importante dans l'industrie de la fabrication mécanique.

Le fraisage est un processus d'usinage rotatif qui utilise des fraises pour enlever des copeaux de matière et obtenir des formes complexes.

Le fraisage, comme toutes les techniques d'usinage, repose sur des principes scientifiques et des théories appliquées pour garantir la qualité des pièces produites. La science des matériaux joue un rôle important dans la sélection des matériaux des pièces à usiner, en prenant en compte leurs propriétés mécaniques, thermiques et chimiques. De plus, la mécanique des solides est utilisée pour comprendre le comportement des matériaux lors de l'usinage, en tenant compte de la déformation, des contraintes et des vibrations. La précision et la qualité des pièces obtenues par fraisage sont influencées par de nombreux paramètres, tels que la vitesse de coupe, l'avance, la profondeur de passe et le choix de l'outil. Une analyse détaillée des conditions de coupe et une sélection adéquate des paramètres de fraisage sont nécessaires pour garantir des résultats conformes aux exigences de conception.

Afin d'améliorer le procédé de fraisage, plusieurs études scientifiques se sont intéressées aux phénomènes thermomécaniques générés au droit de l'interface de l'outil de coupe et de la pièce à usiner. Dans ce cadre, notre travail vise à analyser ces derniers en adoptant une approche

numérique en 3D basée sur la méthode des éléments finis. En effet, les études expérimentales in situ sont à la fois onéreuses et nécessitent des moyens matériels et humains conséquents.

Le travail mené dans le cadre de ce mémoire technique a été divisé en trois parties distinctes :

La première partie représente une étude approfondie des généralités sur l'usinage mécanique. Ceci inclus, l'exploration des différents procédés d'usinage, tels que le tournage, le perçage et le fraisage.

La deuxième partie du mémoire s'est concentrée spécifiquement sur les généralités du fraisage, qui est le cas d'étude principal de ce mémoire. Elle aborde en détail les principes du fraisage, les types de fraises utilisées et les paramètres de coupe associés.

Enfin, la troisième partie du mémoire a été consacrée à la simulation numérique des effets thermiques qui se produisent à l'interface outil-pièce lors du procédé de fraisage. Cette partie a nécessité l'utilisation de logiciels spécialisés comme SOLIDWORKS, ANSYS et DESIGN EXPERT pour modéliser et analyser les phénomènes thermiques.

## **2 Généralité sur l'usinage mécanique**

### **2.1 Introduction :**

L'usinage est le processus de fabrication qui consiste à enlever des copeaux de matière pour donner forme à une pièce spécifique. Il s'agit d'une étape fondamentale dans la production industrielle, qui permet de créer des pièces aux géométries complexes. L'usinage fournit les composants essentiels nécessaires à de nombreux secteurs tels que l'automobile, l'aérospatiale, l'énergie, l'électronique et bien d'autres.

Bien que l'usinage soit souvent associé au travail des métaux, il ne se limite pas exclusivement à ce domaine. En réalité, l'usinage peut être appliqué à une variété de matériaux, y compris les céramiques, les plastiques, les composites et même le bois. Les avancées technologiques ont permis de développer des techniques particulières pour usiner ces matériaux non métalliques. Par exemple, l'usinage des céramiques exige des outils spéciaux en diamant ou en nitrure de silicium en raison de la dureté de ce matériau. De même, l'usinage du bois implique l'utilisation de fraises spécifiques pour gérer les caractéristiques uniques de ce matériau.

Lors de l'usinage d'une pièce, plusieurs mouvements sont associés à l'enlèvement de matière pour obtenir la forme et les dimensions souhaitées. Tout d'abord, il y a le mouvement principal de la pièce elle-même, généralement effectué par rotation dans le cas du tournage ou par translation dans le cas du fraisage. Ce mouvement permet à l'outil de se déplacer le long de la pièce et de retirer les copeaux de matière.

Ensuite, il y a le mouvement de l'outil de coupe lui-même. L'outil est généralement fixé à une broche ou à une tête de fraisage et se déplace selon un trajet spécifique. Pour le tournage, l'outil suit une trajectoire linéaire, tandis que pour le fraisage, il peut suivre des mouvements linéaires, circulaires ou complexes à plusieurs axes.

Outre ces mouvements principaux, il y a également des mouvements d'avance et de passe. L'avance correspond à la vitesse à laquelle l'outil se déplace le long de la pièce ou le long de la surface à usiner. Elle détermine la quantité de matière retirée à chaque passage de l'outil. La passe, quant à elle, fait référence à la profondeur de coupe effectuée par l'outil à chaque passage.

De nos jours, ces mouvements associés à l'enlèvement de matière peuvent être automatisés grâce à l'utilisation de machines à commande numérique (CNC).

## 2.2 Exigences liées à l'usinage :

L'usinage est un processus qui nécessite le respect de diverses exigences pour garantir des résultats de qualité. Voici une liste des exigences les plus courantes à respecter pendant l'usinage d'une pièce mécanique :

1. Précision dimensionnelle : L'usinage doit permettre d'obtenir des dimensions précises conformes aux spécifications de conception.
2. Finition de surface : La qualité de la surface usinée est également cruciale. La finition de surface peut être lisse, texturée ou avec des caractéristiques spécifiques.
3. Durée de vie de l'outil : L'usinage impose des contraintes importantes sur les outils de coupe. Les outils doivent être résistants pour supporter les efforts d'usinage. Une durée de vie prolongée de l'outil réduit les coûts de production et améliore l'efficacité de l'usinage.
4. Productivité : L'usinage doit être réalisé de manière efficace et productive pour répondre aux demandes de l'industrie. Cela implique d'optimiser les vitesses de coupe, les avances et les paramètres d'usinage pour minimiser les temps d'usinage.
5. Sécurité : L'usinage peut comporter des risques pour la sécurité des opérateurs et des machines. Par conséquent, il est important de respecter les normes de sécurité appropriées.

Grâce à la recherche scientifique et au développement technologique, des avancées significatives ont été réalisées dans le domaine de l'usinage mécanique. Ces progrès ont permis d'améliorer la qualité, la productivité et la durabilité des processus d'usinage.

Il est important de signaler que l'usinage peut générer des déchets, des copeaux et des fluides de coupe. Ces derniers peuvent avoir un impact négatif sur l'environnement. Dans ce sens, il est important de considérer le recyclage des déchets et l'utilisation de techniques respectueuses de l'environnement. Parmi ces techniques, on peut citer la lubrification minimaliste.

## 2.3 Système POM :

Le processus d'usinage implique la collaboration de plusieurs éléments essentiels : Pièce, Outil, Machine. Ces derniers forment le système POM. Satisfaisants. Ces composants doivent interagir de manière harmonieuse afin de réaliser des opérations d'usinage efficaces et de qualité.

La figure ci-dessous présente un modèle structurel décrivant le processus d'usinage :

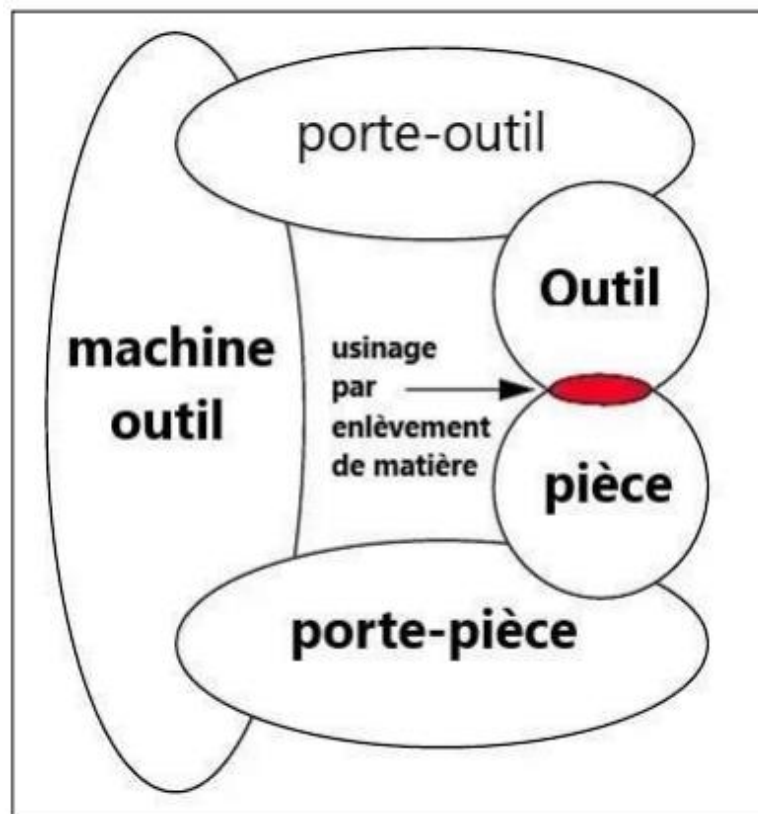


Figure 2. 1 : processus de l'usinage

il existe plusieurs liaisons entre les différents éléments intervenant dans le système POM:

- Interface entre la pièce et le porte-pièce
- Interface entre la pièce et l'outil
- Interface entre l'outil et le porte-outil
- Interface entre le porte-pièce et la machine-outil
- Interface entre le porte-outil et la machine-outil

Pour améliorer le processus d'usinage, il est crucial de comprendre les phénomènes qui se développent au droit des interfaces de contact entre les différents éléments. Une compréhension approfondie de ces phénomènes permet d'optimiser les performances, la durée de vie des outils, la qualité des surfaces usinées et d'éviter les problèmes tels que les vibrations, l'usure excessive ou les défauts de forme.

## 2.4 Les procédés d'usinage

Les différents procédés d'usinage peuvent être distingués en fonction de plusieurs critères clés :

1. Type d'interaction matière-outil : Les procédés d'usinage peuvent être classés en fonction de la manière dont l'outil de coupe interagit avec le matériau à usiner. L'interaction peut être par enlèvement de matière ou par modification de l'état de la surface à usiner.
2. Nature de l'énergie utilisée : Les procédés d'usinage peuvent utiliser différentes formes d'énergie pour effectuer le travail. Par exemple, certains procédés utilisent l'énergie mécanique, comme le tournage ou le fraisage, tandis que d'autres utilisent l'énergie thermique, telle que la rectification.
3. Type de mouvement de l'outil ou de la pièce : Certains procédés impliquent un mouvement rotatif, comme le tournage ou le perçage, tandis que d'autres utilisent un mouvement linéaire, comme le fraisage.
4. Niveau d'automatisation : Les procédés d'usinage conventionnels nécessitent une intervention manuelle significative de la part de l'opérateur tandis que les machines à commande numérique (CNC) sont plus automatisées pour exécuter les opérations d'usinage de manière précise et répétable.
5. Matériaux et applications spécifiques : Certains procédés d'usinage sont mieux adaptés à certains matériaux ou applications spécifiques. Par exemple, l'usinage par fraisage est couramment utilisé pour l'usinage de métaux, tandis que l'usinage par électroérosion est utilisé pour des matériaux durs ou délicats.

Dans ce qui suit, nous présenterons les principaux procédés d'usinage hors fraisage. Ce dernier est traité en détail dans le chapitre suivant.

### 2.4.1 Sciage

Le sciage est l'un des procédés d'usinage par enlèvement de matière largement utilisé dans l'industrie pour couper des pièces en utilisant une scie. Ce procédé permet de diviser des matériaux solides en utilisant une action de coupe linéaire.

Le sciage peut être réalisé manuellement, mais il est plus couramment effectué à l'aide de machines spéciales, telles que les scies à ruban, les scies circulaires ou les scies alternatives.

Le principe de base du sciage consiste à guider la pièce à travers la lame dentée, qui pénètre dans le matériau et le sépare en deux parties distinctes. La lame de scie est généralement composée d'un matériau dur tel que l'acier ou le carbure de tungstène, et est dotée de dents disposées régulièrement sur le bord de la lame.

Le choix de la lame de scie, en termes de type de denture, de nombre de dents, de revêtements, etc., dépend du matériau à scier. Différentes configurations de lames sont utilisées pour des matériaux tels que le bois, le métal, le plastique, etc., afin d'assurer une coupe efficace et de réduire l'usure de la lame.

Le sciage est utilisé dans une variété d'applications industrielles, telles que la construction, l'ameublement, la métallurgie, l'industrie du bois, etc.

La figure ci-dessous présente une scie à ruban :



**Figure 2. 2 : Scie à ruban**

## 2.4.2 Perçage

Le perçage consiste à créer des trous cylindriques dans des matériaux en utilisant une perceuse ou une machine-outil spéciale équipée d'un foret rotatif.

Le perçage est un procédé d'usinage polyvalent qui comprend plusieurs opérations connexes telles que l'alésage, le chanfreinage, le taraudage, offrant ainsi une gamme étendue de possibilités pour créer des trous de différentes formes, dimensions et finitions. La figure ci-dessous présente les différentes opérations du procédé de perçage :

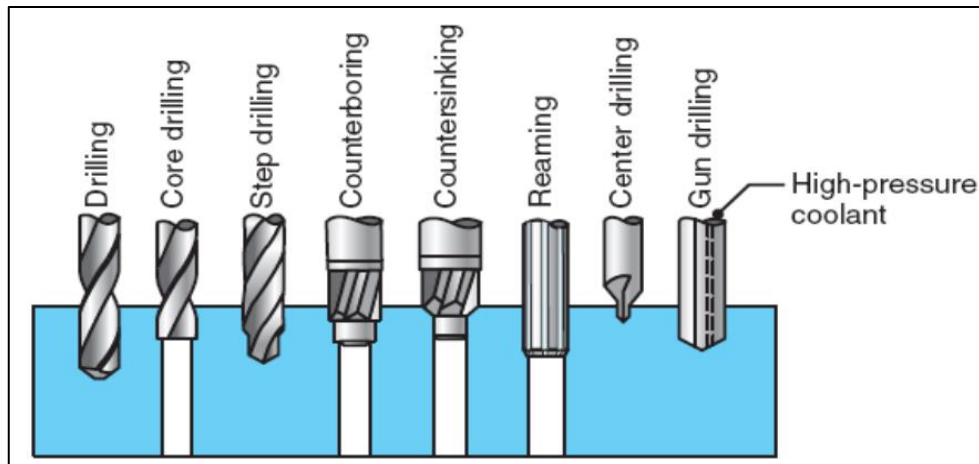


Figure 2. 3 : Différentes opérations du procédé de perçage

La figure ci-dessous présente la nomenclature internationale ANSI proposée pour chaque composant du forêt de perçage :

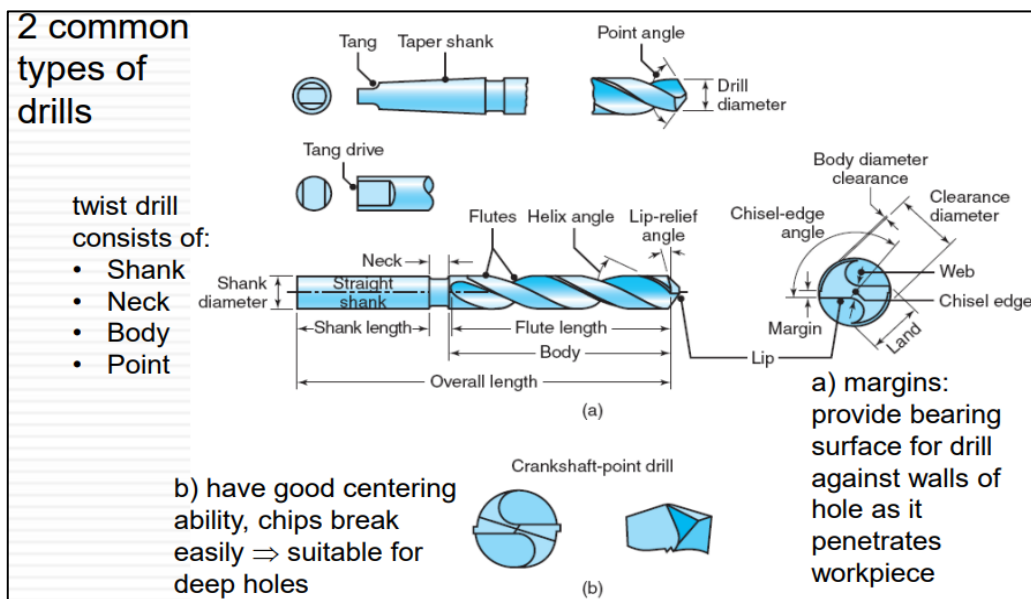


Figure 2. 4 : Nomenclature internationale ANSI pour les composants du forêt de perçage



### 2.4.3 Tournage

Le tournage est largement utilisé dans l'industrie pour fabriquer des pièces cylindriques ou de forme complexe. Ce procédé implique la rotation de la pièce à usiner autour de son axe tandis qu'un outil de coupe, tel qu'un burin, est déplacé le long de la pièce pour enlever des copeaux et façonner la surface.

Ce procédé offre une grande flexibilité en termes de formes et de dimensions des pièces qui peuvent être produites. Il permet de réaliser des opérations de tournage extérieur pour obtenir des surfaces cylindriques lisses, des filetages, des rainures, des chanfreins, ainsi que des opérations de tournage intérieur pour créer des alésages, des cavités ou des surfaces coniques.

La figure ci-dessous présente les différentes opérations de tournage ainsi que les outils associés :

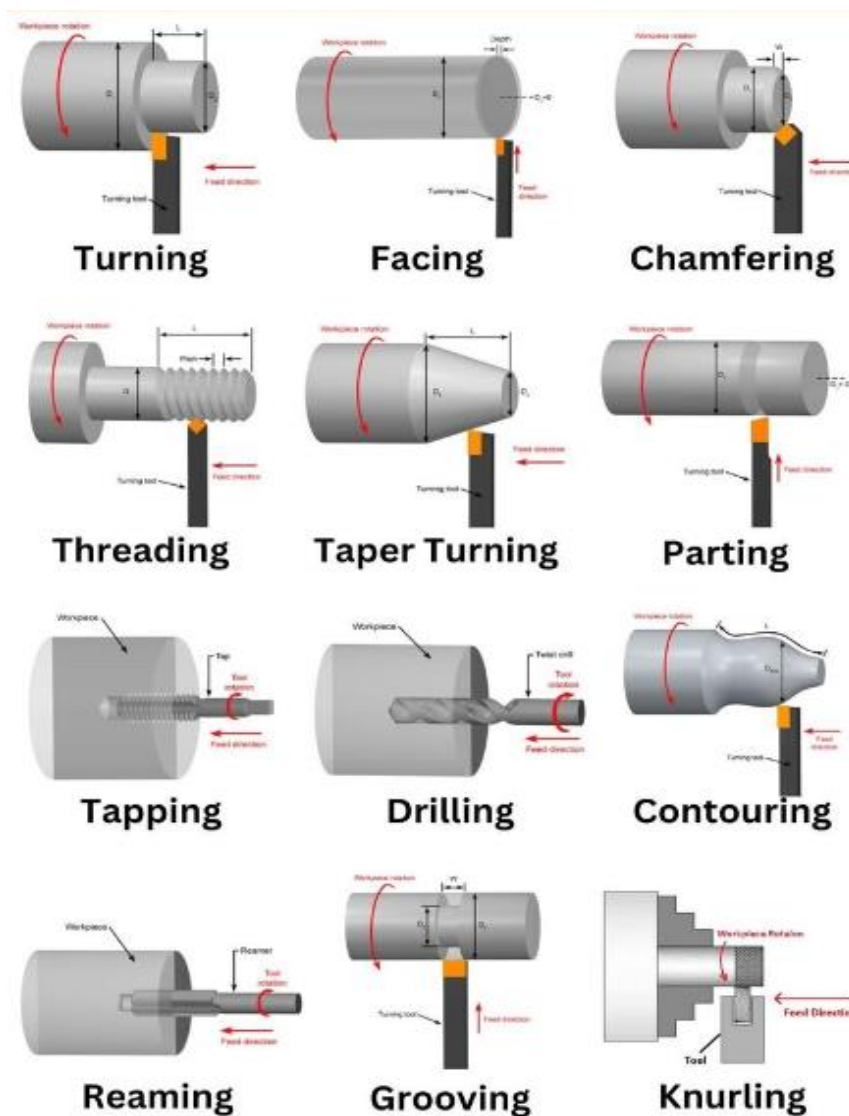


Figure 2. 5 : Différentes opérations de tournage

La rectification est un procédé d'usinage de précision qui vise à obtenir des surfaces lisses, planes, cylindriques ou de forme complexe.

La rectification est réalisée à l'aide d'une meule abrasive rotative, qui est composée de grains abrasifs durs agglomérés dans un liant. La meule est fixée à une broche rotative et applique une force de pression contre la surface de la pièce à rectifier. Lorsque la meule tourne, les grains abrasifs enlèvent de petites quantités de matière de la pièce, produisant ainsi la forme et la finition souhaitées.

La figure ci-dessous présente un schéma de principe relatif à la rectification plane :

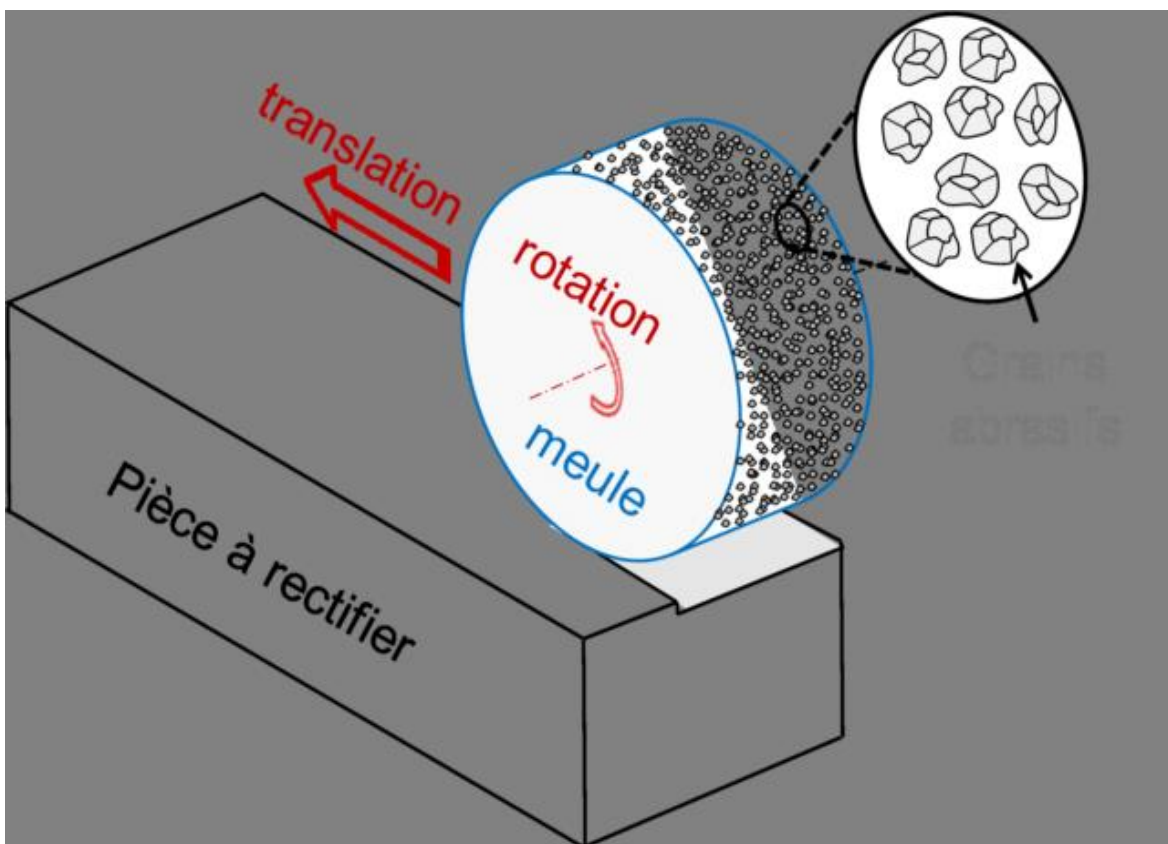


Figure 2. 6 : schéma de principe de la rectification plane

#### 2.4.4 Brochage

Le brochage permet de réaliser des surfaces internes ou externes de forme complexe, telles que des rainures, des cannelures ou des profils spécifiques.

Le brochage est réalisé à l'aide d'un outil de coupe spécialisé appelé broche. La broche est constituée d'une série de dents ou de lames coupantes disposées de manière progressive sur sa circonférence. L'outil de brochage est inséré dans la pièce à usiner et se déplace selon un mouvement linéaire.

La figure ci-dessous présente des exemples de brochages :

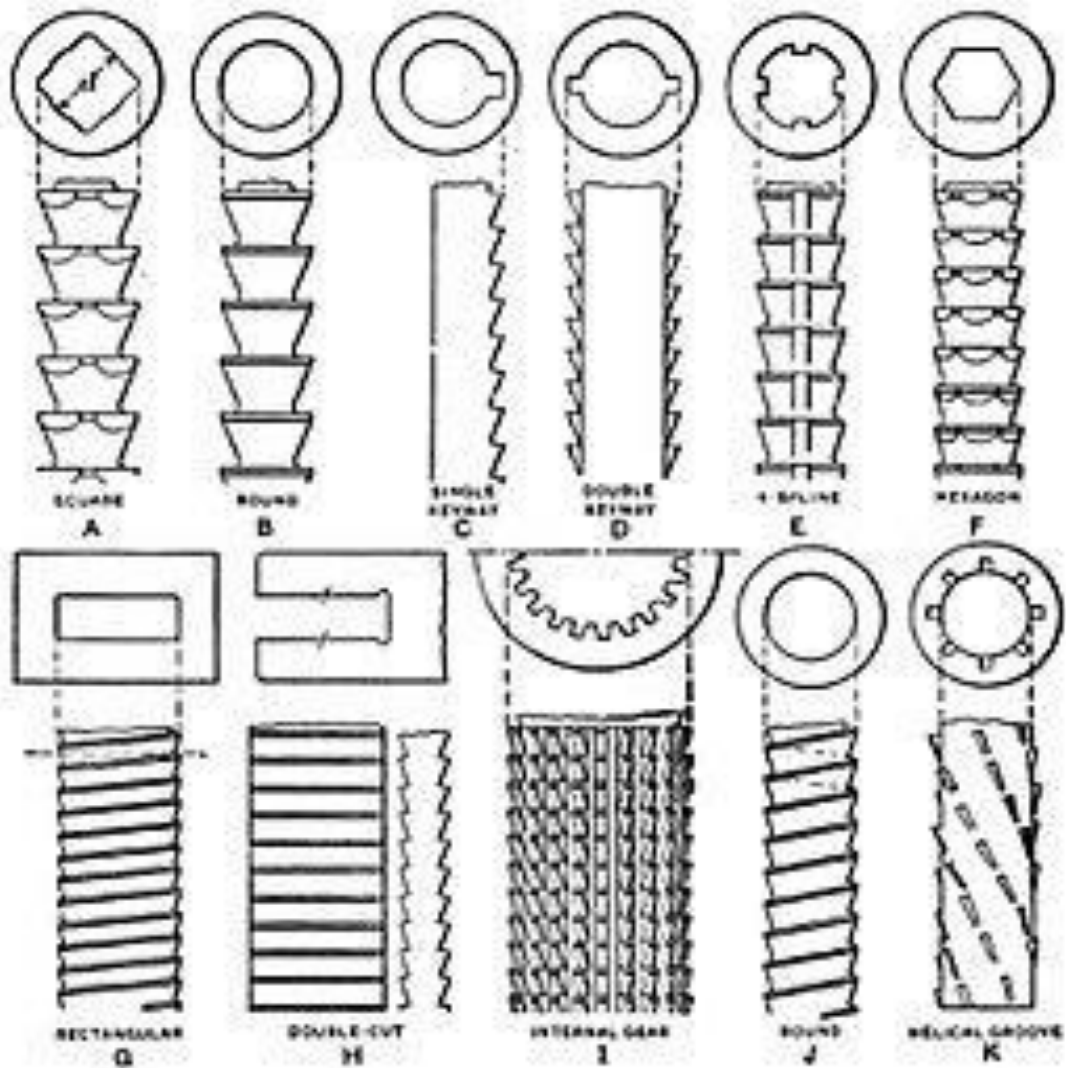


Figure 2. 7 : Exemples de brochages

## 2.5 Conclusion

Les procédés d'usinage sont des techniques essentielles pour la fabrication de pièces dans divers secteurs industriels. Ils offrent des possibilités infinies pour créer des pièces de haute qualité et de précision.

## 3 Généralités sur le fraisage

### 3.1 Introduction

Le fraisage permet d'obtenir des formes complexes et précises en enlevant de la matière à l'aide d'un outil de coupe appelé fraise. Ce chapitre se concentrera sur les principes de base du fraisage, les types de fraises, les paramètres d'usinage et les différentes opérations réalisables.

### 3.2 Définition

Le fraisage consiste à faire tourner une fraise à grande vitesse tout en la déplaçant le long de la pièce à usiner. L'outil de coupe, qui possède des arêtes tranchantes, enlève de la matière progressivement pour obtenir la forme désirée. Le mouvement de rotation de la fraise est généralement assuré par une broche, tandis que le déplacement de la pièce peut être réalisé par une table ou une tête de fraisage.

### 3.3 Mouvements relatifs entre la pièce et l'outil

Les différents mouvements relatifs entre la pièce à usiner et l'outil de fraisage à considérer lors du procédé de fraisage sont les suivants :

- **Mouvement de coupe  $M_c$**  : Il s'agit du mouvement principal qui conduit à l'enlèvement de matière. Ce dernier est généré par la rotation de l'outil.
- **Mouvement de pénétration  $M_p$**  : Il s'agit d'un mouvement rectiligne qui ajuste la pénétration de l'outil au sein de la matière. Dans la majorité des machines, ce mouvement est attribué à la pièce. Certaines machines particulières peuvent attribuer ce mouvement à l'outil.
- **Mouvement d'avance  $M_f$**  : Il s'agit d'un mouvement rectiligne qui pousse la pièce dans la direction de l'outil. Ceci dans le but de maintenir le contact entre ce dernier et la matière à enlever.

Le schéma ci-dessous présente les différents mouvements relatifs qui s'opèrent pendant le procédé de fraisage :

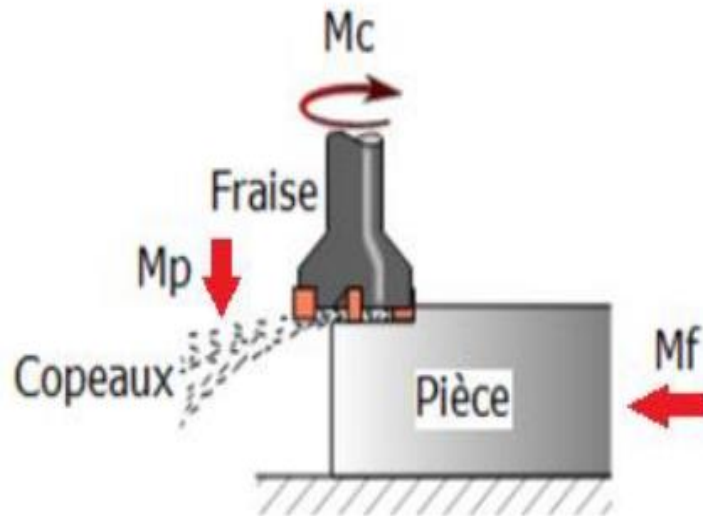


Figure 3. 1 : Mouvements relatifs au procédé de fraisage

Le procédé du fraisage dépend des paramètres suivants :

### 3.3.1 Vitesse de coupe (Vc)

Il s'agit d'une vitesse rectiligne qui exprime la distance réalisée par l'outil de coupe sur la pièce à usiner. Généralement, cette vitesse est exprimée en mètres par minutes (m/min)

La vitesse de coupe est un paramètre important du procédé de fraisage et dépend du diamètre de l'outil ainsi que de la fréquence de la rotation de la broche comme indiqué par la formule ci-dessous [1] :

$$V_c = \frac{\pi D n}{1000}$$

Où :

- **D** : diamètre de l'outil (m)
- **n** : la fréquence de la rotation de la broche (tr/min)

L'adaptation de la vitesse de coupe lors d'une opération de fraisage est déterminée en fonction des éléments suivants :

- Matériau de la pièce à usiner
- Matériau de l'outil de fraisage
- Mise en place d'une lubrification ou non
- Le type de la machine de fraisage

### **3.3.2 Fréquence de rotation de la broche (n)**

La fréquence de rotation de la broche représente le nombre de tours réalisés par la fraise en une minute (tr/min). Cette fréquence est obtenue par la formule ci-dessous [6] :

$$n = \frac{1000V_c}{\pi D}$$

Où :

- **D** : diamètre de l'outil (m)
- **V<sub>c</sub>** : Vitesse de coupe (m/min)

### **3.3.3 Vitesse d'avance (Vf)**

Il s'agit d'une vitesse instantanée à laquelle la pièce est déplacée par rapport à l'outil de pendant l'opération de fraisage. Cette dernière est généralement exprimée en millimètres par minute (mm/min) et indique la distance parcourue par la pièce par rapport à l'outil en une minute.

Cette vitesse d'avance permet de déterminer la quantité de matière enlevée dans le temps et ainsi calculer la productivité de l'opération de fraisage.

La vitesse d'avance dépend du nombre de dents de l'outil de fraisage ainsi qu'à la fréquence d'avance par dent. Elle est obtenue par la formule suivante [8] :

$$V_f = Z \times f_z \times n$$

Où :

- **Z** : Nombre de dents de l'outil de fraisage
- **f<sub>z</sub>** : Avance par dent
- **n** : fréquence de rotation de la broche

### **3.3.4 Avance par tour (f)**

Il s'agit d'un paramètre qui exprime la distance parcourue par la fraise le long de la circonférence de la pièce pendant un tour complet de l'outil de fraisage. Ce paramètre est généralement exprimé en millimètres par tour (mm/tour) et permet de déterminer la quantité de matière enlevée à chaque passage de la fraise. L'avance par tour dépend des facteurs suivants [18] :

- Diamètre de l'outil
- Fréquence de rotation de la broche
- Le nombre de dents de l'outil de fraisage
- La profondeur de la passe

### **3.3.5 Avance par dent (f<sub>z</sub>)**

Il s'agit d'un paramètre qui exprime la distance parcourue par la fraise le long l'axe de la pièce pour chaque dent de l'outil en contact avec la matière à enlever. Ce paramètre est généralement exprimé en millimètres par dent (mm/dent) et permet de déterminer la quantité de matière enlevée à chaque passage de dent.

L'avance par dent est obtenue par la formule ci-dessous [2][19]:

$$f_z = \frac{V_f}{Z * n}$$

Où :

- $V_f$  : vitesse d'avance
- $Z$  : nombre de dents
- $n$  : fréquence de rotation de la broche

### **3.3.6 Profondeur de la passe ( $a_p$ )**

La profondeur de la passe exprime la longueur de l'arête de coupe déjà pénétrée dans la matière. Ce paramètre est généralement exprimé en millimètres et influence directement l'enlèvement de la matière ainsi que la durée et la qualité de l'opération de fraisage. Il est important de rappeler que la profondeur de passe est mesurée perpendiculairement à la direction de l'avance. Le choix de ce paramètre d'usinage est crucial et dépend de plusieurs facteurs :

- Capacité de la fraiseuse
- Propriétés mécaniques de la pièce à usiner et l'outil de fraisage
- Les exigences de finition

Ce paramètre doit être choisi de manière à garantir un enlèvement de matière efficace sans développement de phénomène de vibrations excessives qui engendre une usure prématurée de l'outil et des défauts de surface.

### **3.3.7 Largeur de la coupe ( $a_e$ )**

Ce paramètre désigne la largeur de la surface de la pièce qui est enlevée par l'outil de fraisage à chaque passage. Il est généralement exprimé en millimètres et joue un rôle déterminant dans la géométrie de la pièce à usiner.

Le choix de ce paramètre d'usinage est crucial et dépend de plusieurs facteurs :

- Géométrie de la coupe
- Tolérances dimensionnelles requises
- Propriétés mécaniques de la pièce à usiner et l'outil de fraisage



Ce paramètre doit être choisi de manière à garantir un enlèvement de matière efficace sans augmentation de la force de coupe qui engendre une réduction de la durée de vie de l'outil de fraisage.

Le schéma ci-dessous présente la différence de mesure entre la profondeur et la largeur de passe :

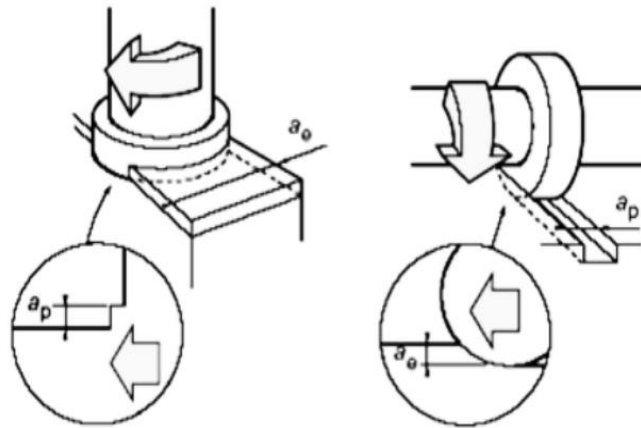


Figure 3. 2 : différence entre profondeur et largeur de passe

### 3.4 Classification de fraisage

Le choix du type de fraisage à adopter pour l'usinage d'une pièce donnée dépend des paramètres suivants :

- Qualité du résultat attendu
- Type et état de la machine à utiliser
- La qualité et le type de matériau de l'outil de fraisage
- Les dimensions de la surface à usiner
- La productivité souhaitée

Le fraisage peut être classifié en deux parties :

- Le fraisage de face ou en bout : la fraise est orientée perpendiculairement par rapport à la surface à usiner.
- Le fraisage de profil ou en roulant : la fraise est orientée parallèlement à la surface à usiner

Il existe deux types de fraisage en roulant :

#### A. Fraisage en opposition :

Le fraisage en opposition, également connu sous le nom de fraisage conventionnel, est une technique de fraisage largement utilisée dans l'industrie mécanique. Lors du fraisage en opposition, l'outil de coupe tourne dans le sens opposé à celui du déplacement de la pièce. Ceci crée une action de coupe contre le matériau à usiner.

Cette méthode de fraisage offre plusieurs avantages. Tout d'abord, elle permet d'obtenir une meilleure stabilité de l'outil et une meilleure évacuation des copeaux. Ceci contribue à la préservation de l'outil de fraisage. Cette technique génère généralement moins de vibrations que d'autres techniques de fraisage.

Cependant, le fraisage en opposition présente par ailleurs certaines limitations. En raison de la direction du mouvement de l'outil par rapport à la pièce, les forces de coupe peuvent être plus importantes. Ceci peut entraîner une usure plus rapide de l'outil. De plus, l'évacuation des copeaux peut être plus difficile, ce qui nécessite une attention particulière afin d'éviter tout risque de surchauffe ou d'obstruction de l'outil.

#### B. Fraisage en avalant :

Contrairement au fraisage en opposition, l'outil de coupe tourne dans le même sens que le déplacement de la pièce, ce qui crée une action de coupe dans le sens du mouvement.

Cette méthode de fraisage présente plusieurs avantages. Tout d'abord, elle permet de réduire les forces de coupe par rapport au fraisage en opposition, ce qui peut entraîner une durée de vie plus longue de l'outil. De plus, le fraisage en avalant peut offrir une meilleure évacuation des copeaux, ce qui contribue à une meilleure finition de surface et une meilleure gestion de la chaleur générée pendant l'usinage.

Cependant, le fraisage en avalant peut également présenter certains inconvénients. En raison du sens de rotation de l'outil par rapport au mouvement de la pièce, les forces de réaction peuvent exercer une pression vers le haut. Ceci peut affecter la stabilité de l'outil et nécessiter une fixation rigide de la pièce.

La figure ci-dessous présente un schéma décrivant les deux techniques de fraisage en roulant :

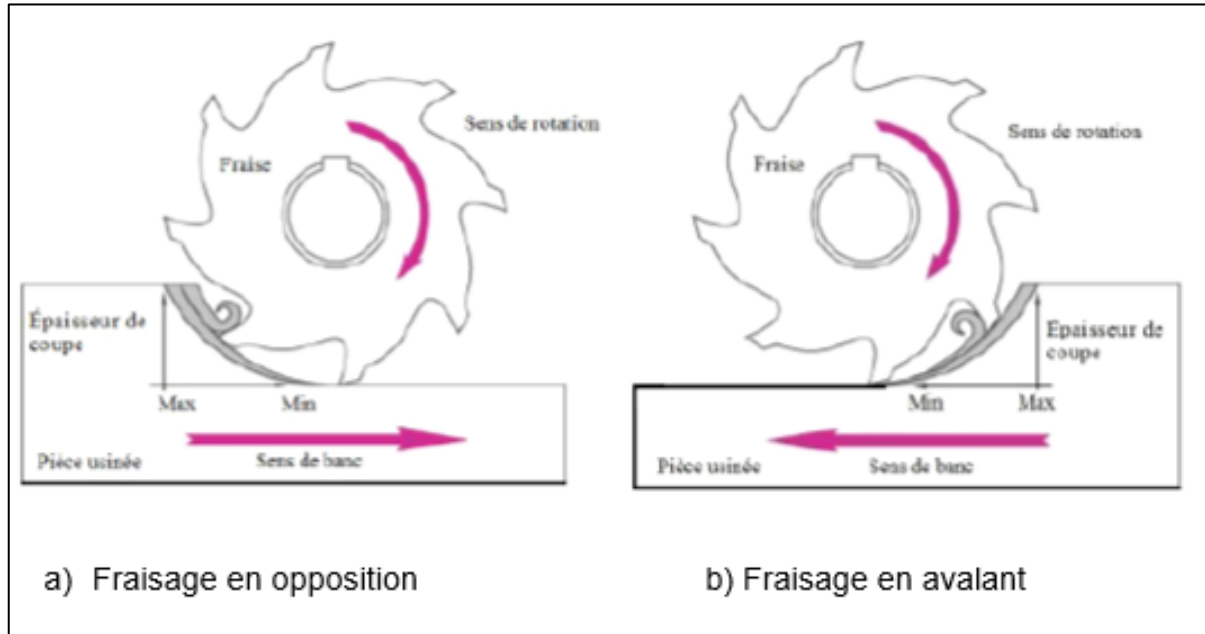


Figure 3. 3 : Techniques de fraisage en roulant

## 3.5 Les fraises

L'outil de fraisage est composé de multiples dents tranchantes disposées autour de sa circonférence. À l'aide d'une fraise, il est possible d'obtenir des surfaces planes, des surfaces courbes, des dentures et pleins d'autres formes.

### 3.5.1 Type de fraise :

D'une manière générale, il est possible de classer les fraises en 4 familles :

- Fraises à surfacer
- Fraises disques
- Fraises à rainurer
- Fraises de profil

La figure ci-dessous présente un exemple de chaque famille de fraise :



Figure 3. 4 : familles de fraises

### 3.5.2 Propriétés des fraises

#### 1. Sens de coupe :

Il est important de ne pas confondre le sens de coupe avec le sens de l'hélice de la fraise. Les fraises qui tournent dans le sens horaire en vue de dessus sont nommées: fraises en coupe à droite. Elles représentent la quasi-totalité des fraises disponibles dans le marché ( 95%). Le 5% restant représente les fraises qui tournent dans le sens inverse des aiguilles d'une montre.

#### 2. Type de denture :

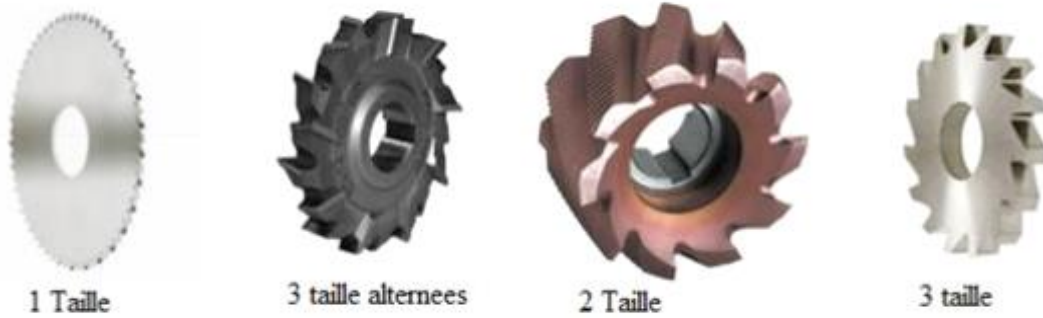
Selon l'inclinaison des arrêts de coupe, la fraise peut être catégorisée soit en :

- Fraise à dentures droites
- Fraise à dentures hélicoïdales à une hélice.
- Fraise à dentures alternées à double hélice.

### 3. La taille :

Le type de taille correspond au nombre d'arêtes tranchantes présentes par dent. On peut distinguer trois types : Fraises à une taille, Fraises à deux tailles et Fraises à trois tailles.

La figure ci-dessous présente quelques fraises avec différent nombre de tailles :



**Figure 3. 5 : Exemples de fraises avec différent nombre de tailles**

### 4. La forme :

Suivant la forme géométrique des génératrices autour de l'axe de l'outil de fraisage, on peut distinguer les types de fraises suivants :

- Fraises cylindriques
- Fraises coniques
- Fraises de formes

La figure ci-dessous présente quelques fraises avec différents types de forme :



**Figure 3. 6 : Exemples de fraises avec différent type de forme**

### 3.5.3 Les composants géométriques de la fraise

Les taillants d'une fraise sont caractérisés géométriquement les angles fondamentaux suivants :

#### **Angle d'hélice ou angle d'attaque $\alpha'$ :**

Il s'agit de l'angle situé l'axe principal de l'outil de fraisage et l'inclinaison de la denture. La dimension de cet angle dépend du type de matériaux à usiner. Il est très faible de l'ordre de  $5^\circ$  pour des métaux qui dégagent des copeaux courts comme la fonte. Pour les métaux légers, l'angle d'hélice présente une valeur plus importante de l'ordre de  $25^\circ$  comme c'est le cas pour l'aluminium et l'inox.

**Angle de taillant  $\beta$  :** C'est l'angle qui détermine la partie coupante de la dent de l'outil de fraisage. Un angle taillant aigu est susceptible d'être fragile et fortement exposé à la dégradation et l'endommagement.

**Pente d'affutage ou angle de coupe  $\gamma$  :** Cet angle détermine le comportement des copeaux au droit de la face de coupe. Une pente d'affutage forte engendre une diminution de l'effort de coupe. Le choix de cette pente dépend essentiellement du matériau à usiner. Cette dernière est plus importante pour les matériaux légers comme l'aluminium que pour les matériaux lourds comme la fonte.

**Angle de dépouille  $\alpha$  :** C'est l'angle formé entre la face de coupe de la fraise et une ligne parallèle à l'axe de rotation de la fraise. Il permet d'éviter les frottements excessifs entre la fraise et la pièce, réduisant ainsi les forces de coupe et l'échauffement.

La figure ci-dessous présente l'allure géométrique des taillants d'une fraise ainsi que les différents angles qu'ils la composent :

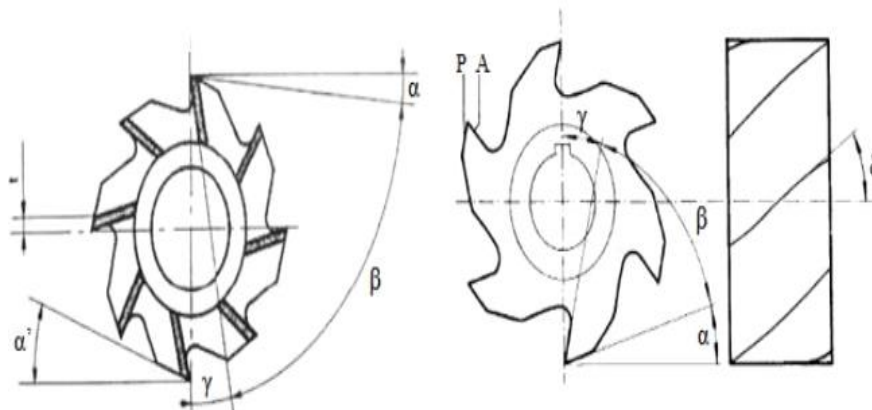


Figure 3. 7 : les différents angles de l'outil de fraisage

### **3.5.4 Caractéristiques des matériaux utilisés pour l'outil de fraisage**

Les fraises peuvent être fabriquées à partir de différents matériaux, chacun ayant ses propres caractéristiques et avantages. Voici quelques-uns des matériaux couramment utilisés pour la fabrication des fraises :

- **Acier rapide (HSS) :** C'est l'un des matériaux les plus couramment utilisés pour les fraises. Il est robuste, durable et peut être affûté facilement. Les fraises en acier rapide sont adaptées à un large éventail d'applications de fraisage.
- **Carbure de tungstène :** Le carbure de tungstène est un matériau très dur et résistant à l'usure, composé de tungstène et de cobalt. Les fraises en carbure de tungstène offrent une excellente résistance à l'usure et une durée de vie prolongée. Elles sont particulièrement adaptées à l'usinage de matériaux durs tels que les alliages d'acier, l'acier inoxydable et les matériaux réfractaires.
- **Revêtement en nitrure de titane (TiN) :** Il s'agit d'un revêtement appliqué sur les fraises pour améliorer leur résistance à l'usure, leur dureté et leur durée de vie. Le revêtement en TiN réduit également le frottement et facilite l'évacuation des copeaux, ce qui améliore les performances globales de la fraise.
- **Revêtement en nitrure de titane et aluminium (TiAlN) :** Ce revêtement est similaire au revêtement en TiN, mais il offre une résistance à l'usure et une dureté supérieures. Les fraises avec revêtement en TiAlN sont adaptées à l'usinage de matériaux difficiles à usiner tels que les superalliages, le titane et les matériaux composites.
- **Céramique :** Les fraises en céramique sont utilisées pour l'usinage à haute vitesse et l'usinage de matériaux durs et fragiles tels que les céramiques, les composites à matrice céramique et certains métaux réfractaires. Les fraises en céramique offrent une excellente résistance à la chaleur, une dureté élevée et une résistance à l'usure.

## **3.6 Les machines de fraisage**

En fonction de la position de l'arbre porte fraise ou de la broche et la possibilité de mouvement de la table, les fraiseuses peuvent être classés en trois principaux types :

- Fraiseuses mono-broche d'outillage (horizontale, verticale ou universelle)
- Fraiseuses mono-broche de production
- Fraiseuses multibroches

Voici quelques-unes des machines de fraisage les plus couramment utilisées :

### **3.6.1 Fraiseuses horizontales**

Dans une fraiseuse horizontale, l'axe de la broche est parallèle à la table de la machine. Cela permet d'effectuer des opérations de fraisage horizontales, notamment le fraisage de surfaces planes et de rainures. Les fraises cylindriques à une taille ou les fraises disques à deux ou trois tailles sont les plus utilisées sur ce type de machine. Les fraiseuses horizontales ont la particularité de permettre aux copeaux d'être évacués de la pièce à usiner. Ainsi, ces derniers ne seront pas usinés. Ceci améliore significativement la qualité de la pièce.

### **3.6.2 Fraiseuses verticales**

C'est le type de machine de fraisage le plus répandu. Elles sont réputées pour être les plus robustes. Dans une fraiseuse verticale, l'outil de coupe est fixé dans une broche qui se déplace verticalement sur la table de la machine. La table peut être déplacée dans différentes directions pour positionner la pièce à usiner sous l'outil. Les opérations de fraisages les plus utilisés avec les fraiseuses verticales sont : dressage avec des fraises en bout, usinage de contours et usinage de rainures droites.



La figure ci-dessous présente un exemple de machine verticale et une machine horizontale :

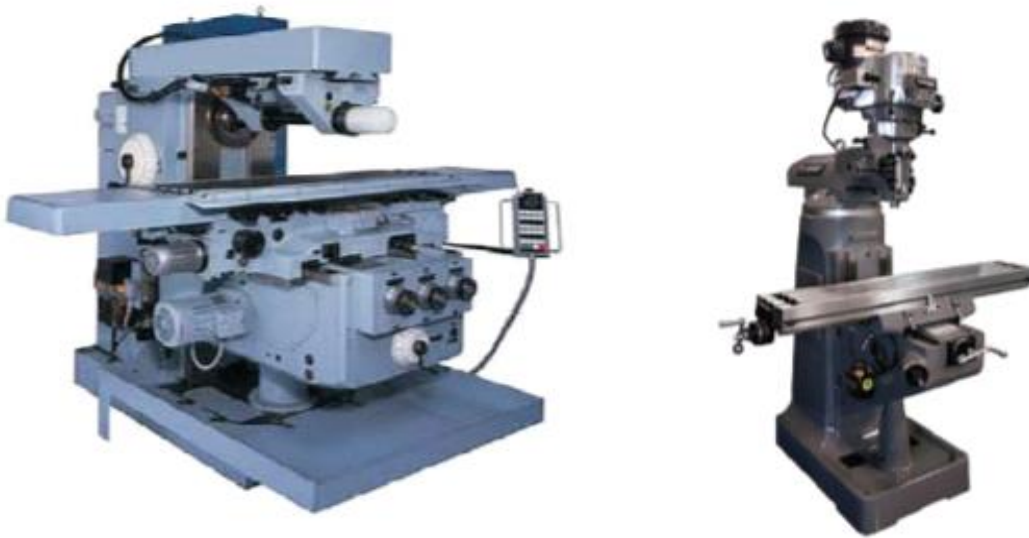


Figure 3. 8 : Exemple de machine de fraisage verticale et horizontale

### **3.6.3 Fraiseuse universelle**

La fraiseuse universelle est une version améliorée de la fraiseuse horizontale simple. En effet, la fraiseuse universelle possède deux accessoires supplémentaires :

- Diviseur universel : qui permet à la pièce de subir un mouvement rotatif.
- Support à contre-pointe : qui permet à la pièce d'être fixée entre pointes de la même manière que sur une machine de tournage.

La fraiseuse universelle permet également de mettre une tête à broche verticale à la place d'un arbre porte-outil horizontal.

En plus des opérations classiques qu'une fraiseuse horizontale peut réaliser, la fraiseuse universelle permet la mise en œuvre des usinages particuliers tels que les rainures hélicoïdales sur des éléments cylindriques.

La figure ci-dessous présente un exemple d'une fraiseuse universelle :



**Figure 3. 9 : Exemple de machine de fraisage universelle**

### **3.6.4 Fraiseuse à commandes numériques**

Sur certaines pièces complexes, le nombre d'opérations et de changement d'outils à mener lors du procédé d'usinage est important. Ceci rend le travail de l'opérateur difficile et peut impacter soit la qualité du travail ou la productivité. Pour pallier à cette problématique, il existe sur le marché des fraiseuses équipées de commandes numériques qui permettent l'automatisation de plusieurs tâches comme le chargement et le déchargement d'outils. Ces fraiseuses appelées également centres d'usinage ne nécessitent pas la présence permanente de l'opérateur devant la machine.

La figure ci-dessous présente un exemple d'une fraiseuse à commandes numériques :



**Figure 3. 10 : Fraiseuse à commandes numériques**

## **4 Modélisation numérique des effets thermiques au droit de l'interface pièce-outil lors du procédé de fraisage**

### **4.1 Effets thermomécaniques lors du procédé de fraisage**

Lors de l'opération de fraisage, les outils de coupe en rotation génèrent des forces mécaniques importantes sur la pièce à usiner, ce qui peut entraîner des déformations et des contraintes résiduelles. De plus, en raison de l'interaction entre l'outil et la pièce, une quantité importante de chaleur est générée, ce qui peut influencer les propriétés thermiques et mécaniques de la pièce. Dans ce chapitre, nous examinerons en détail les effets thermomécaniques du fraisage, en utilisant des équations et des principes scientifiques.

#### **4.1.1 Forces mécaniques lors du fraisage :**

Lors du fraisage, les forces mécaniques exercées sur la pièce sont principalement dues à l'interaction entre les dents de l'outil de coupe et le matériau. Ces forces peuvent être décrites à l'aide de l'équation de coupe de Merchant :

$$F_c = K_c * A_e * f * a_p$$

Où :

- $F_c$  est la force de coupe,
- $K_c$  est une constante dépendant des propriétés du matériau et de la géométrie de l'outil,
- $A_e$  est l'aire de contact entre l'outil et la pièce,
- $f$  est la force spécifique de coupe,
- $a_p$  est la profondeur de passe.

#### **4.1.2 Déformations et contraintes résiduelles :**

Les forces mécaniques appliquées lors du fraisage peuvent entraîner des déformations élastiques ou plastiques de la pièce. Les déformations élastiques peuvent être calculées à l'aide de la loi de Hooke :

$$\varepsilon = \sigma / E$$

où :

- $\varepsilon$  est la déformation élastique,
- $\sigma$  est la contrainte appliquée,
- $E$  est le module d'élasticité du matériau.

Les contraintes résiduelles résultant du processus de fraisage peuvent être estimées à l'aide de l'équation de contrainte résiduelle de Bauschinger :

$$\sigma_r = \sigma_c * (1 - \exp(-\pi * R / t))$$

Où :

- $\sigma_r$  est la contrainte résiduelle,
- $\sigma_c$  est la contrainte de coupe,
- $R$  est le rayon de courbure du matériau,
- $t$  est l'épaisseur de la pièce.

#### **4.1.3 Génération de chaleur :**

L'interaction entre l'outil de coupe et la pièce à usiner génère de la chaleur en raison du frottement et de la déformation plastique du matériau. Cette chaleur peut être estimée à l'aide de l'équation de génération de chaleur de Jaeger :

$$Q = \alpha * F_c * V * (1 - \varphi)$$

où :

- $Q$  est la chaleur générée,
- $\alpha$  est la constante de conductivité thermique du matériau,

- $F_c$  est la force de coupe,
- $V$  est la vitesse de coupe,
- $\varphi$  est l'efficacité thermique.

#### **4.1.4 Stratégies d'atténuation des effets thermomécaniques :**

Pour minimiser les effets thermomécaniques indésirables du fraisage, plusieurs stratégies peuvent être mises en œuvre. Tout d'abord, le choix des paramètres de coupe appropriés est essentiel. En réduisant la profondeur de passe, la vitesse de coupe et la vitesse d'avance, les forces de coupe et la génération de chaleur peuvent être réduites, ce qui limite les déformations et les contraintes résiduelles.

L'utilisation de lubrifiants ou de fluides de refroidissement peut également aider à dissiper la chaleur générée pendant le fraisage, réduisant ainsi la température de la pièce. Cela permet de minimiser les variations dimensionnelles dues à la dilatation thermique et de prolonger la durée de vie de l'outil de coupe.

De plus, une conception optimisée de l'outil de coupe peut contribuer à réduire les effets thermomécaniques. Les outils dotés de géométries spécifiques, tels que des arêtes de coupe adaptées et des revêtements résistants à l'usure, permettent de réduire les forces de coupe et d'améliorer l'évacuation de la chaleur. En utilisant des techniques d'usinage adaptées, telles que le fraisage à grande avance ou le fraisage à grande vitesse, les contraintes résiduelles et les déformations de la pièce peuvent être minimisées.

## **4.2 Analyse par la méthode des éléments finis**

La méthode des éléments finis est une technique numérique utilisée pour résoudre des problèmes complexes en mécanique et dans d'autres domaines de l'ingénierie. Elle permet d'approximer la solution d'un système en le subdivisant en éléments plus simples.

Chaque élément est caractérisé par un ensemble de propriétés, telles que la géométrie, les matériaux et les conditions aux limites. Les équations mathématiques qui décrivent le comportement du système sont résolues pour chaque élément individuellement, en utilisant des techniques d'approximation. Ces équations sont ensuite assemblées pour former un système global, qui est résolu pour obtenir la solution complète du problème.

### **4.2.1 Maillage :**

Le maillage est une étape cruciale de la méthode des éléments finis. Il consiste à diviser la géométrie du problème en petits éléments, tels que des triangles ou des quadrilatères en 2D, ou des tétraèdres ou des hexaèdres en 3D. Ces éléments forment une discrétisation du domaine, permettant ainsi d'approximer la solution du système. La taille et la forme des éléments peuvent varier en fonction des contraintes et des propriétés du système, ainsi que des zones d'intérêt spécifiques.

La qualité du maillage est importante, car elle peut avoir un impact significatif sur la précision et l'efficacité des résultats obtenus. Un maillage de haute qualité doit respecter certains critères, tels que la régularité des éléments, l'absence de distorsion excessive, et une répartition adaptée dans les zones d'intérêt où les variations sont importantes. Une fois le maillage créé, chaque élément est associé à des nœuds, qui sont les points où les calculs sont effectués.

### **4.2.2 Domaines de modélisation**

Lors de la modélisation d'une pièce mécanique, différents domaines peuvent être considérés en fonction du comportement souhaité et des conditions d'application. Les principaux domaines de modélisation sont la statique, la quasi-statique et la dynamique. Voici une brève description de chacun de ces domaines :

- **Statique :** La modélisation statique se concentre sur l'équilibre des forces appliquées à la pièce mécanique dans des conditions stationnaires. Elle permet d'analyser les contraintes internes, les déformations et les déplacements résultants des charges statiques appliquées sur la pièce. Ce domaine est couramment utilisé pour évaluer la résistance structurelle et la stabilité des composants.
- **Quasi-statique :** La modélisation quasi-statique est utilisée lorsque les charges appliquées évoluent lentement par rapport à la réponse de la pièce mécanique. Ce domaine est souvent utilisé pour des applications où la vitesse de chargement est relativement faible par rapport aux propriétés dynamiques de la pièce, mais où des déformations significatives peuvent se produire.
- **Dynamique :** La modélisation dynamique considère le comportement d'une pièce mécanique soumise à des charges variables dans le temps. Elle prend en compte les effets des forces, des masses, des déplacements, des vitesses et des accélérations, ainsi que les interactions entre les différents composants.

### **4.2.3 Modèle de comportement (Johnson-Cook):**

Les modèles de comportement jouent un rôle essentiel dans la modélisation et l'analyse du comportement mécanique des matériaux. Ils permettent de décrire mathématiquement la manière dont les matériaux réagissent aux charges appliquées, aux déformations et aux conditions environnementales.

Dans le cadre de notre mémoire, nous nous proposons de définir le modèle de comportement Johnson-Cook. Ce modèle est largement reconnu et appliqué pour décrire le comportement mécanique des matériaux soumis à des conditions de charges élevées et à des températures élevées.

Le modèle de Johnson-Cook est formulé sous la forme d'une équation qui relie les contraintes, les déformations et les paramètres matériels. L'équation prend généralement la forme suivante :

$$\sigma = (A + B \varepsilon^n) \left[ 1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right] \left[ 1 - \left( \frac{T - T_0}{T_f - T_0} \right)^m \right]$$

Dans cette équation,  $\sigma$  représente la contrainte effective,  $\varepsilon$  représente la déformation plastique vraie,  $\dot{\varepsilon}$  est la vitesse de déformation plastique vraie,  $T$  est la température,  $T_0$  est la température de référence,  $T_m$  est la température de fusion du matériau, et  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $n$  et  $m$  sont les paramètres du modèle.

## **4.3 Modélisation et simulation numérique**

La simulation est la partie la plus essentielle dans notre étude, on peut la diviser en deux parties essentielles :

- I - Conception et modélisation sur SolidWorks.
- II - Étude et simulation thermodynamique sur Ansys.

### **4.3.1 Conception et modélisation**

La modélisation de la pièce mécanique ainsi que l'outil de coupe ont été réalisés à l'aide du logiciel SolidWorks. Ce dernier présente une interface ergonomique qui facilite le dessin de pièces mécaniques complexes. Ce choix a été également motivé par le fait que dans le cadre de notre cursus universitaire, on a eu l'occasion de se former et de pratiquer SolidWorks dans le cadre des travaux pratiques au sein du département mécanique de l'université de Blida 1.

#### **4.3.1.1 Réalisation de la pièce à usiner**

La pièce à usiner a été le premier composant à modéliser sur SolidWorks. Voici la liste des étapes de modélisation :

- Sélectionner le plan supérieur
- Dessiner un rectangle présentant une longueur de 60 mm et une largeur de 20 mm
- Extruder le rectangle préalablement dessiné sur une hauteur de 20 mm
- Enregistrer la géométrie finale sous le format :. SLDPRT

#### **4.3.1.2 Réalisation de l'outil de coupe (la fraise)**

L'outil de coupe choisi dans le cadre de la présente étude est une fraise dotée de 2 tailles et 4 dents. La modélisation de cette dernière a été réalisée selon les étapes suivantes :



- Sélectionner le plan supérieur et sur esquisse nous avons dessiné le cercle 1 avec un diamètre 20 mm comme indiqué sur la figure ci-dessous.

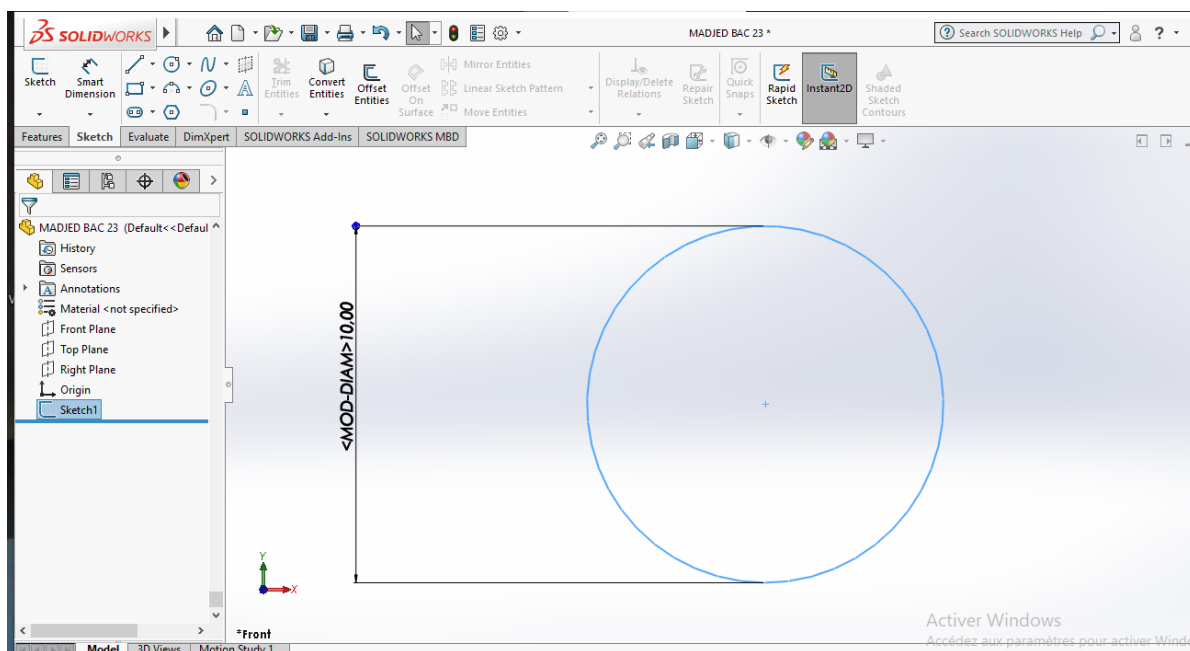


Figure 4. 1 : Étape 1 de modélisation de la fraise sur SolidWorks

- Extruder le Cercle\_1 de 60 mm vers le haut comme indiqué sur la figure ci-dessous :

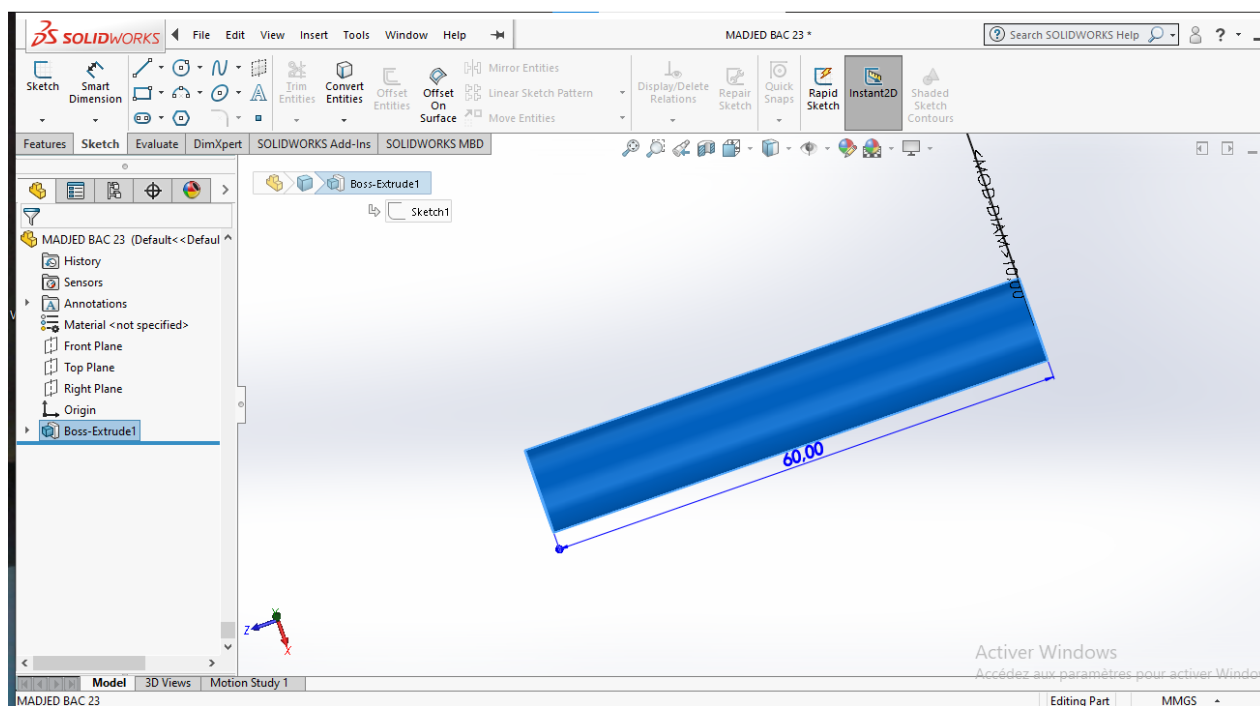


Figure 4. 2 : Étape 2 de modélisation de la fraise sur SolidWorks

- Ensuite nous avons dessiné le cercle 2 au bas de la pièce (sur le même plan) exactement au centre du cercle 1, avec un diamètre de 12mm. Par la suite, deux axes qui divisent nos cercles en 4 parties pour réaliser la symétrie. Dans une de ces 4 parties, nous avons dessiné la ligne 1 qui relie les deux cercles, et depuis le point qui coïncide avec le cercle intérieur (cercle 2), nous avons dessiné l'arc 1 de rayon de 4.75 mm allons vers le cercle extérieur (cercle 2) pour former la base du volume qui va être enlevé. Deux autres lignes (2 et 3) sont formées à l'extérieure de la pièce qui relie le premier point de la ligne 1 et le point final de l'arc 1 comme indiqué sur la figure ci-dessous :

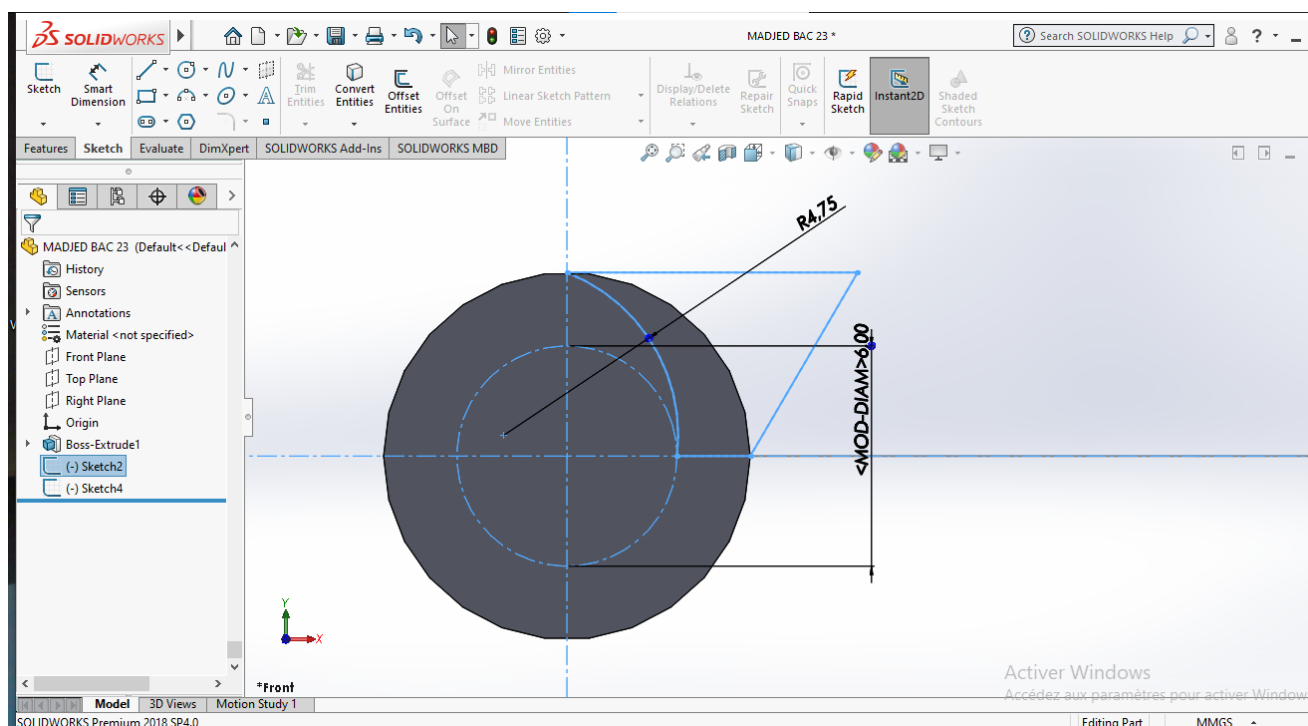


Figure 4. 3 : Étape 3 de modélisation de la fraise sur SolidWorks

- Dans la vue de face, nous avons dessiné la ligne 4 depuis le premier point de la ligne 1, qui s'étend vers le haut avec une hauteur de 20mm. Par la suite, nous avons dessiné l'arc 2 depuis le haut de la ligne 4 allons vers l'extérieure de la pièce avec un rayon de 25mm.

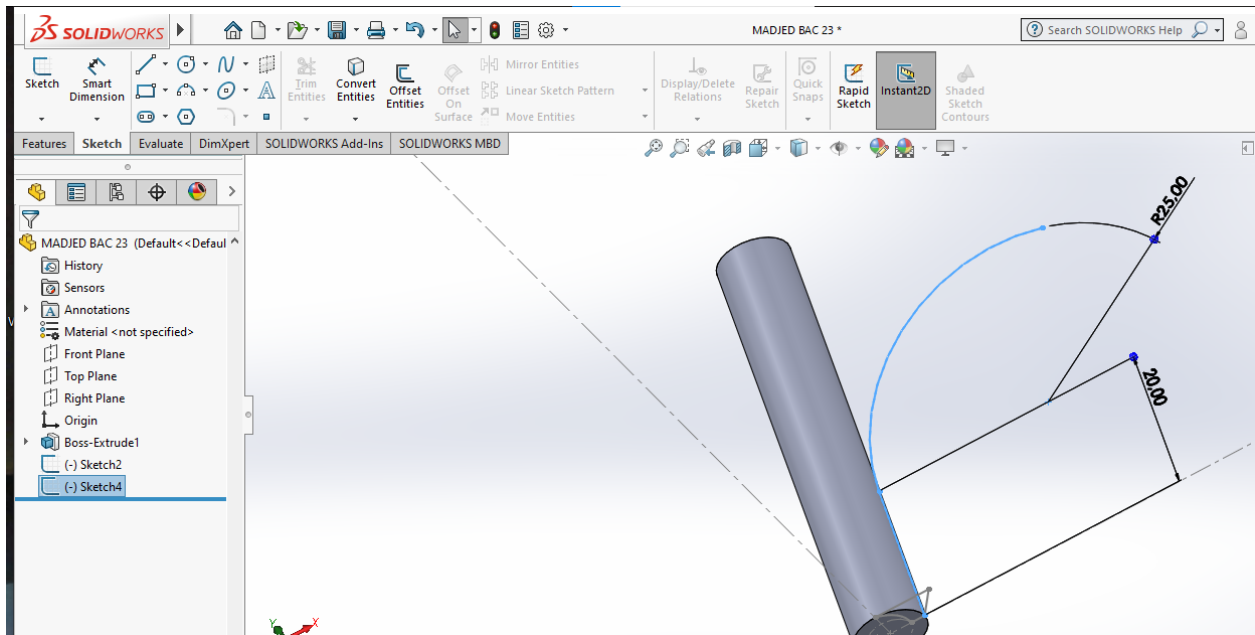


Figure 4. 4 : Étape 4 de modélisation de la fraise sur SolidWorks

- Nous avons fait une coupe balayée qui enlève la matière pour former une dent de la fraise.

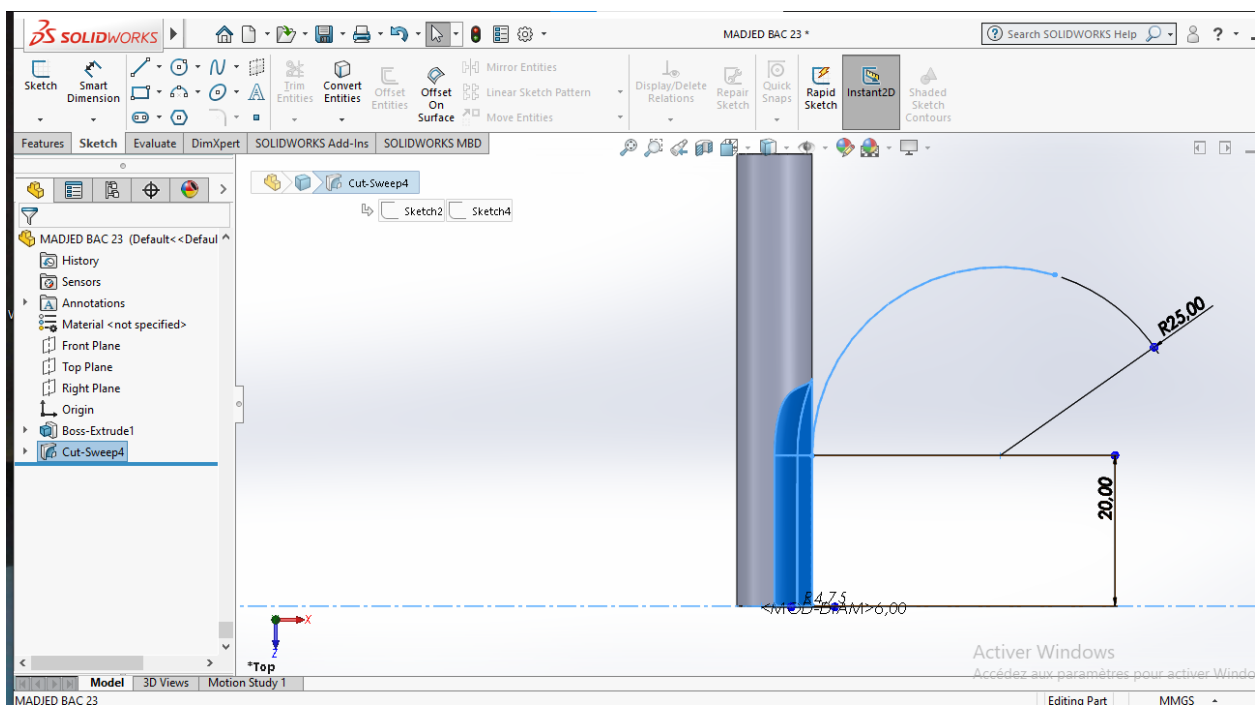


Figure 4. 5 : Étape 4 de modélisation de la fraise sur SolidWorks ( Vue 1)

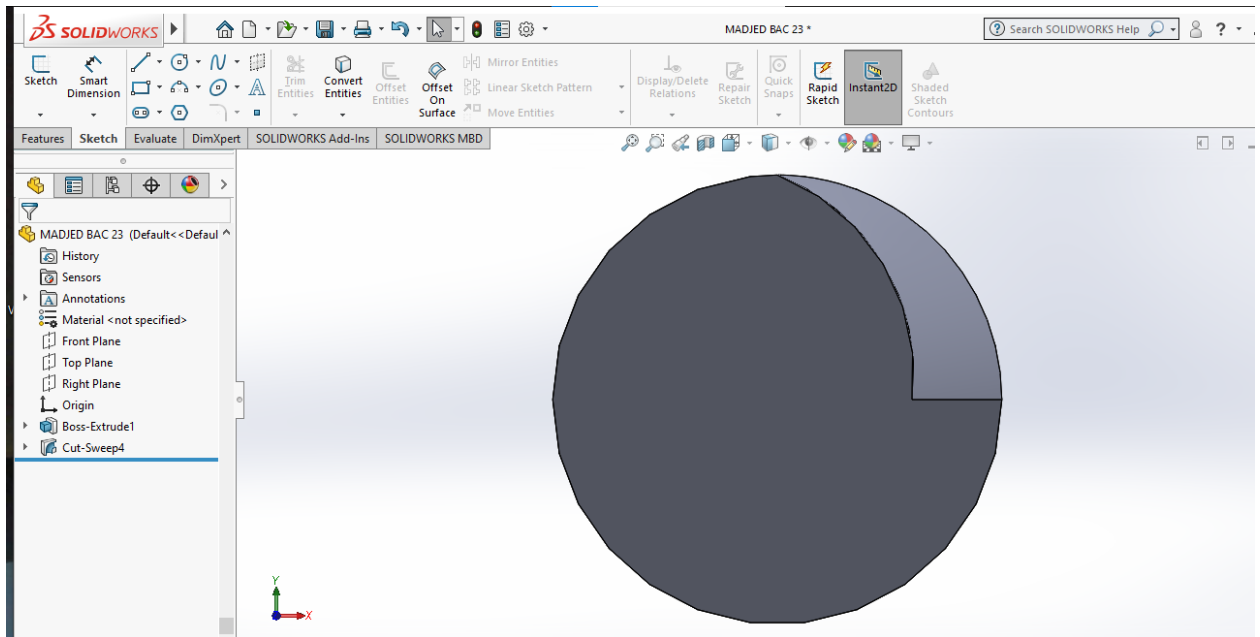


Figure 4.6 : Étape 5 de modélisation de la fraise sur SolidWorks ( Vue 2)

- Cette coupe balayée est refaite dans les 3 autres parties à l'aide des axes de symétrie, en utilisant l'outil motif linéaire. Cela nous donne 4 dents de notre fraise.

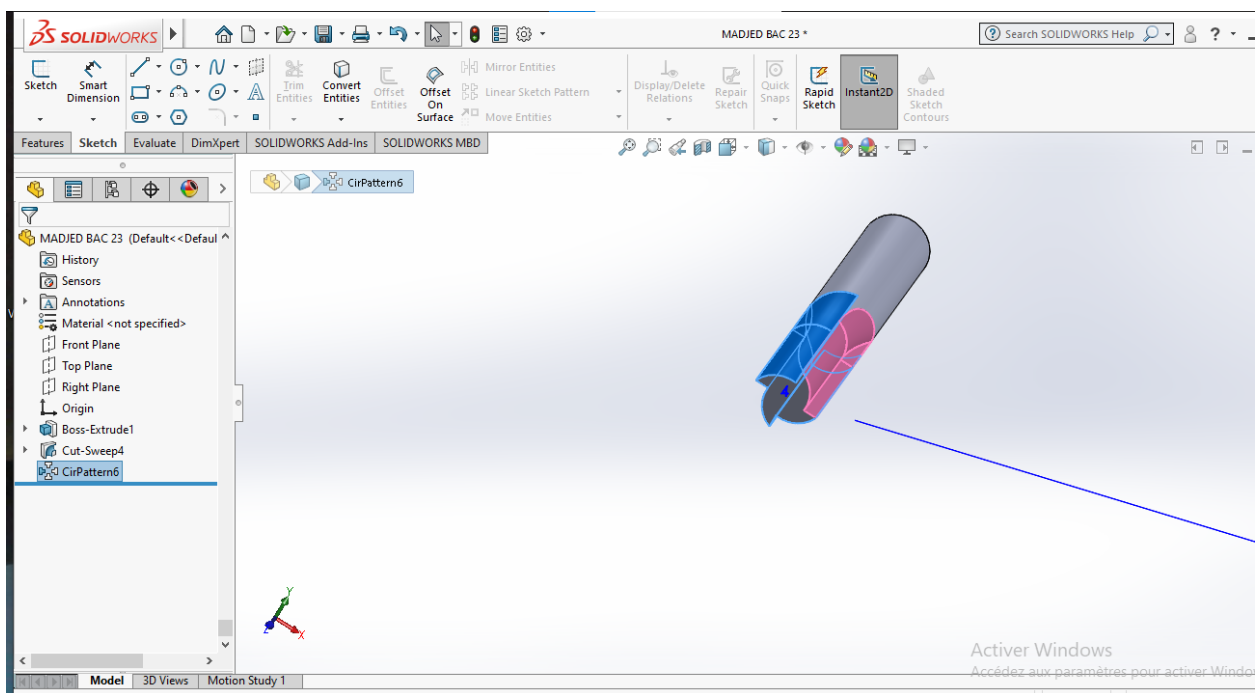


Figure 4.7 : Étape 6 de modélisation de la fraise sur SolidWorks ( Vue 1)

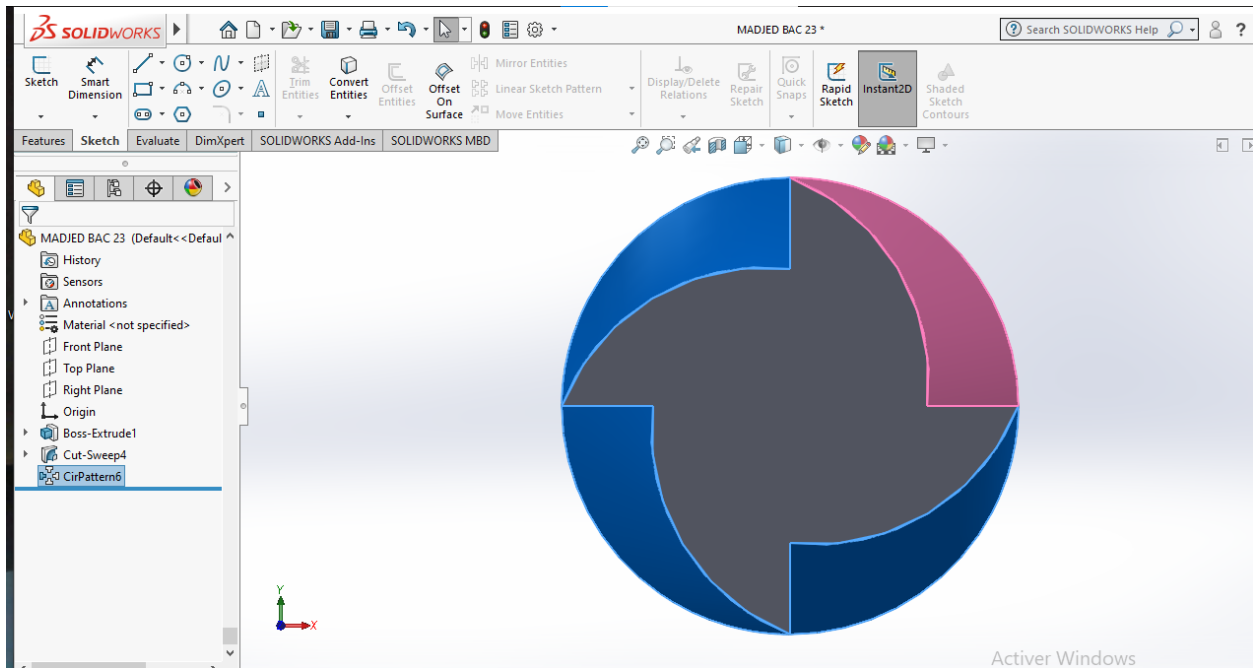


Figure 4. 8 : Étape 6 de modélisation de la fraise sur SolidWorks ( Vue 2)

- Pour arrondir les bords intérieurs des dents nous avons fait un filet de 1mm

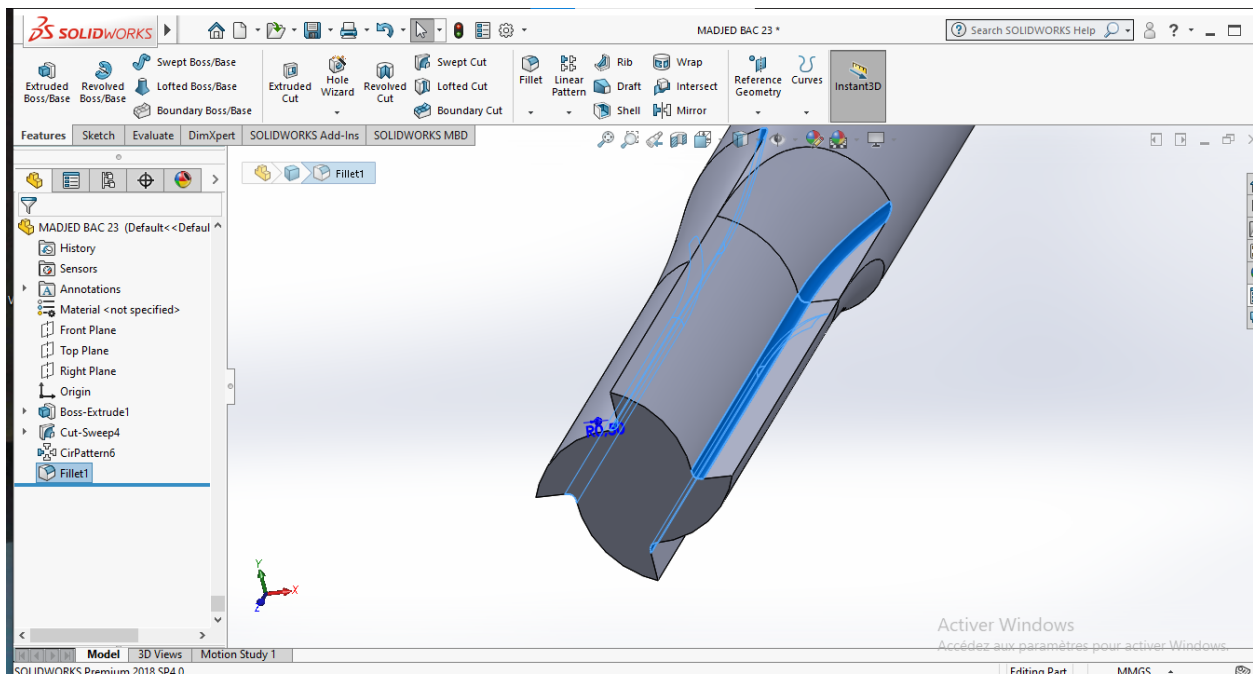
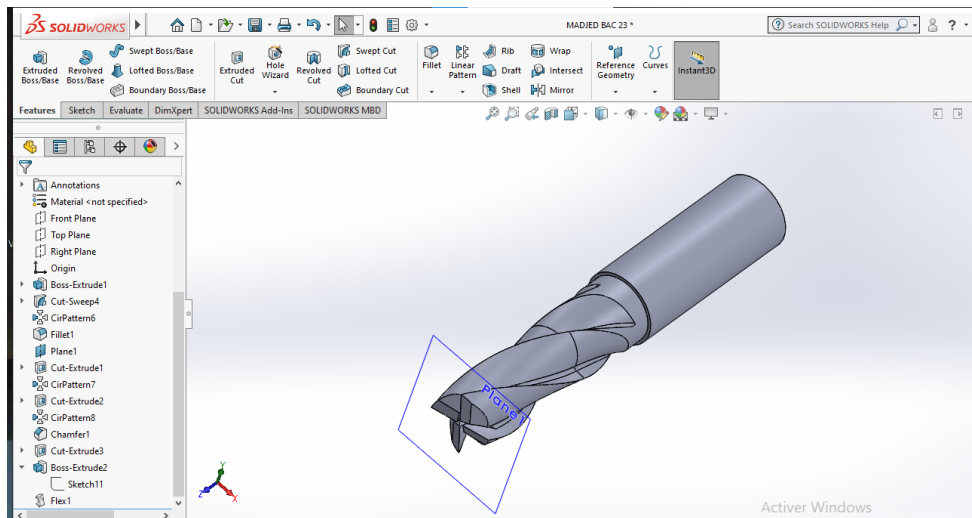


Figure 4. 9 : Étape 7 de modélisation de la fraise sur SolidWorks ( Vue 2)

Une fois que les dents sont formées, une succession de plusieurs étapes d'enlèvement de matière ont été réalisées afin d'affiner l'outil de coupe. Par la suite, une opération de flexion sur les dents

a été appliquée pour obtenir la forme finale de la fraise comme indiqué sur les deux figures ci-dessous :

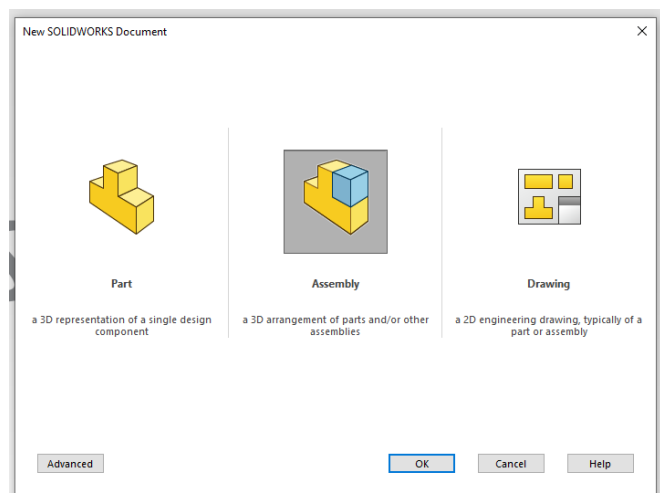


**Figure 4. 10 : Forme géométrique finale de la fraise modélisée sur SolidWorks.**

Comme pour la pièce à usiner, la géométrie de la fraise doit être enregistrée dans un fichier. SLDPRT

#### 4.3.1.3 Assemblage des composants

L'assemblage des deux composants (pièce et outil) a été réalisé avec le module Assemblage de SolidWorks.



**Figure 4. 11 : Module Assemblage de SolidWorks**

Cette étape consiste simplement à importer les deux composants dans un seul fichier SolidWorks. Par la suite, un déplacement des composants doit être opéré afin de réaliser le contact entre ces derniers.

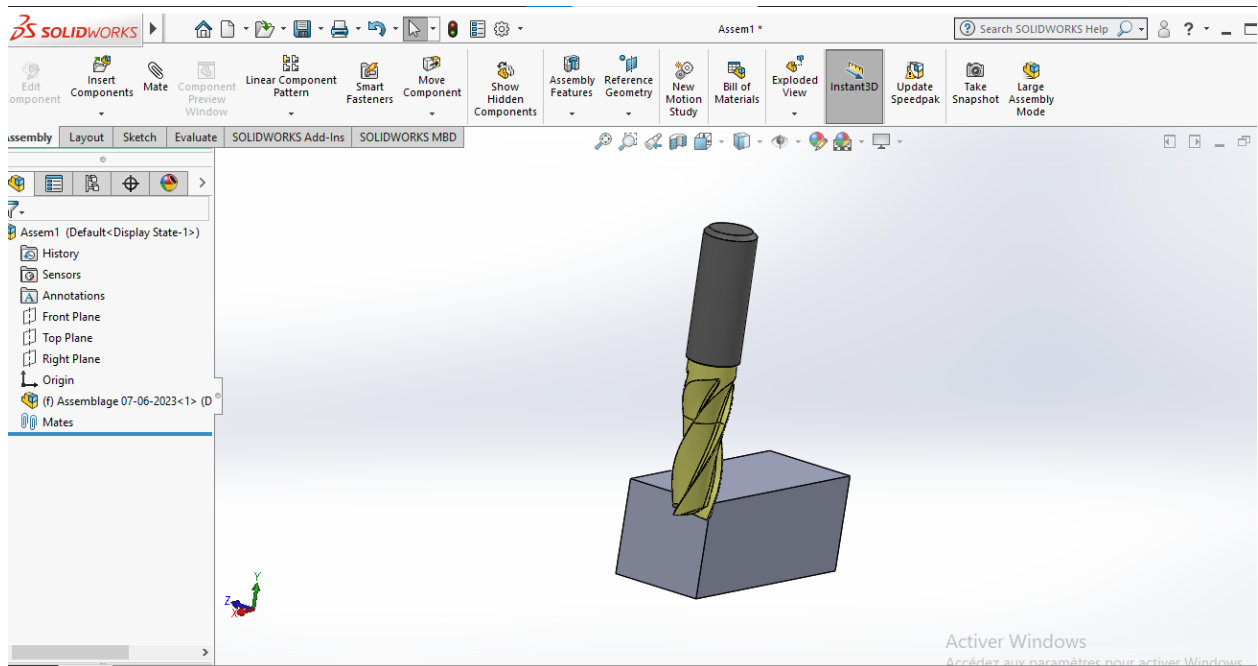


Figure 4. 12 : Mise en contact entre la pièce et l'outil de fraisage.

Enfin, nous avons exporté l'ensemble dans un fichier sous le format IGS (.igs). C'est ce dernier qui va être importé dans le logiciel Ansys pour la réalisation de la simulation numérique.

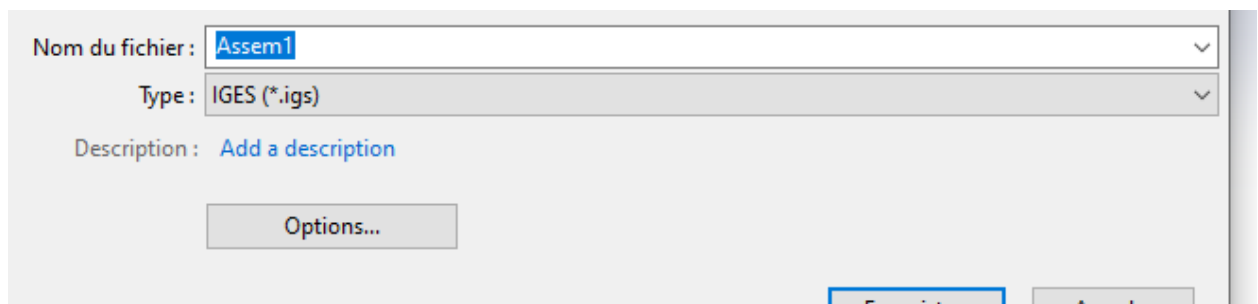


Figure 4. 13 : Module d'exportation en format IGS.

## 4.3.2 Simulation numérique avec Ansys

Dans ce qui suit, nous allons détailler les étapes de paramétrage du modèle numérique avant la présentation des résultats.

### 4.3.2.1 Importation de la géométrie

La première étape consiste à importer le fichier IGS qui contient la géométrie de la pièce et celle de l'outil préalablement dessinés et assemblés sur SolidWorks.

### 4.3.2.2 Choix du système d'analyse

Une fois que la géométrie est importée, nous avons choisi le système d'analyse Dynamique Explicite pour la simulation du modèle. Par la suite, la géométrie initialement importée a été attribuée comme indiqué sur la figure ci-dessous :

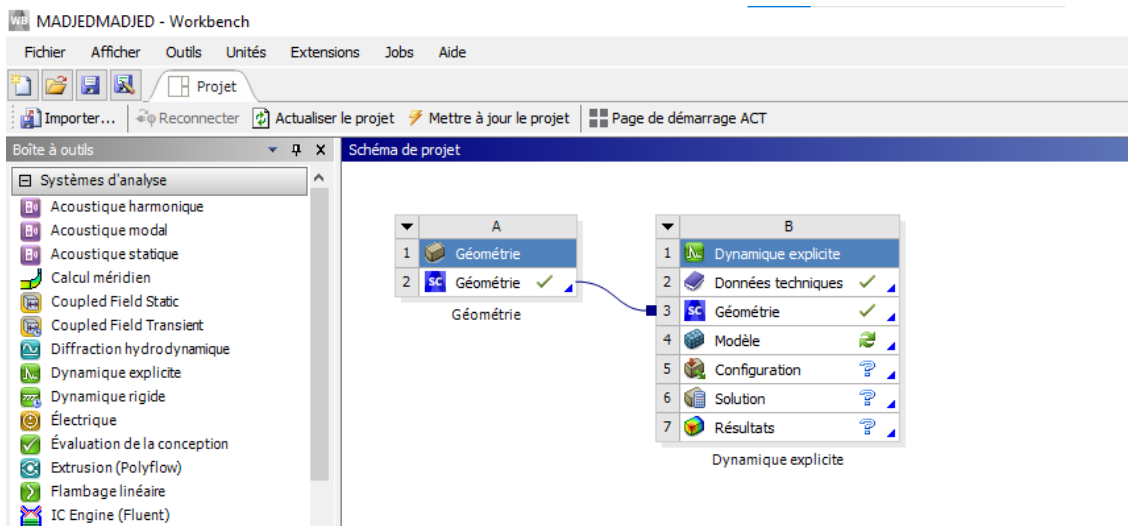


Figure 4. 14 : Système d'analyse : Dynamique explicite

### 4.3.2.3 Choix des matériaux

Au total, trois matériaux ont été adoptés dans le cadre de la présente modélisation. La fraise a été modélisée avec le matériau TITAN. Afin de mesurer l'influence du matériau de la pièce à usiner sur les effets thermiques engendrés par l'usinage, nous avons choisi de mener une étude paramétrique sur le matériau de la pièce. Par conséquent, deux scénarios ont été étudiés : le premier (S1) en adoptant le PLATINE comme matériau de la pièce et le second (S2) en adoptant l'ALLUMNIUM AL 1100-O comme matériau de la pièce.



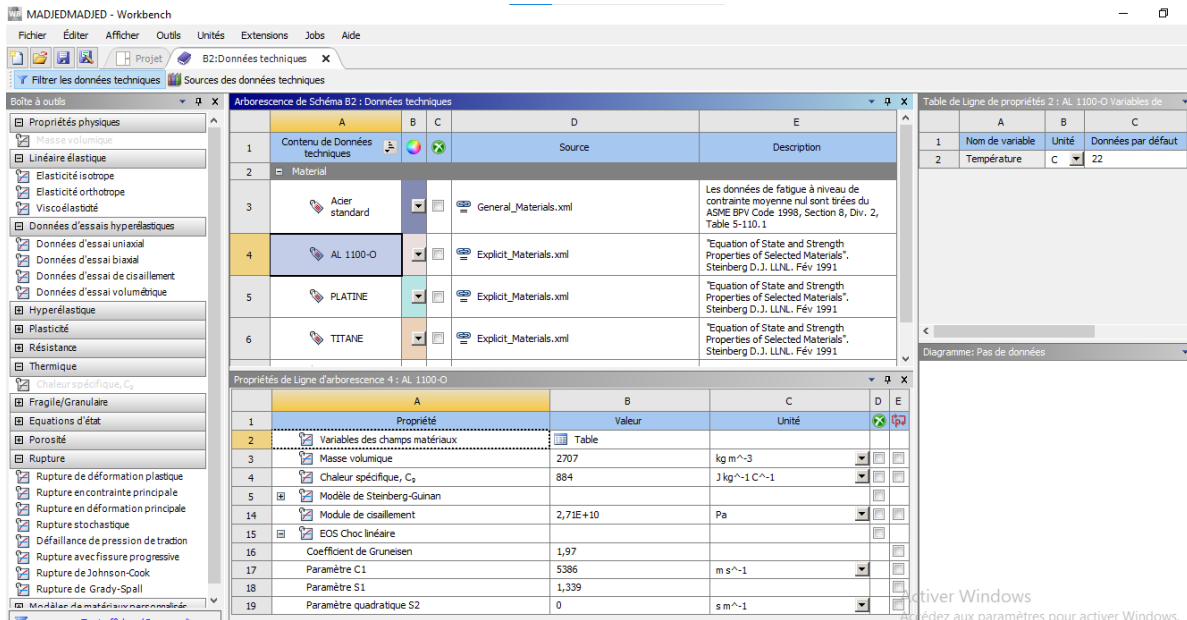


Figure 4. 15 : Choix des matériaux adoptés pour l’outil de fraisage et la pièce à usiner

#### 4.3.2.4 Paramétrage du modèle

##### 1] Affectation des matériaux :

Tout d’abord on attribue le matériau TITANE à l’outil de fraisage comme indiqué sur la figure ci-dessous :

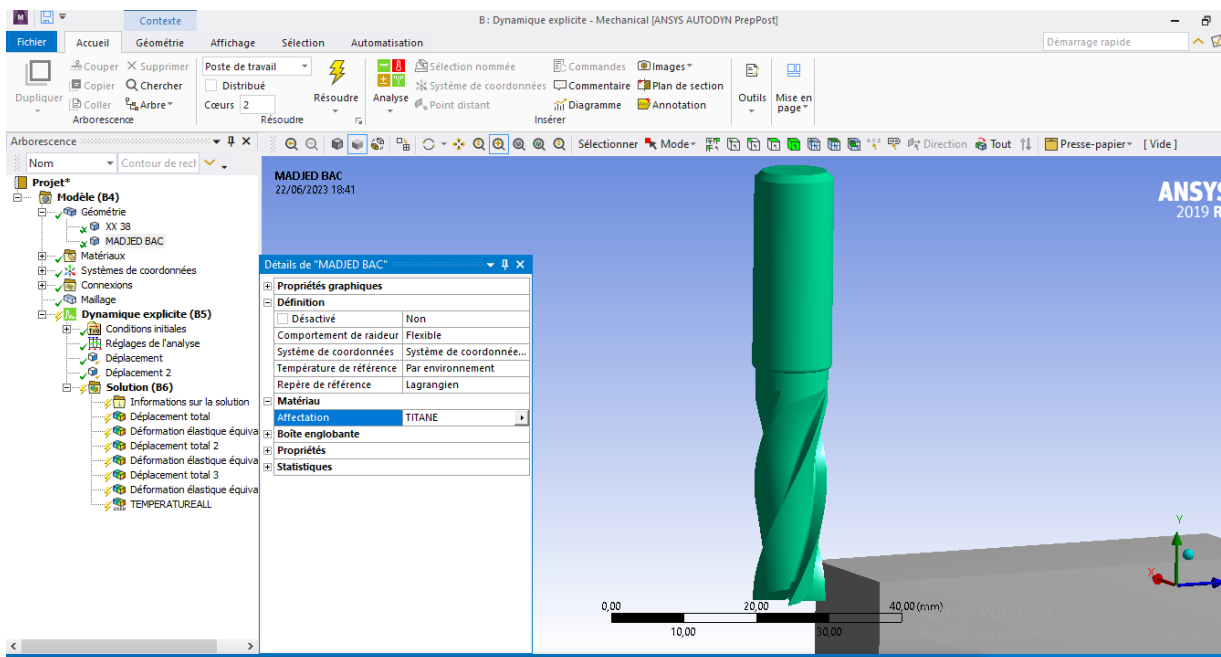


Figure 4. 16 : Attribution du matériau TITANE à l’outil de fraisage

En fonction du scénario étudié (S1 ou S2) on attribue le matériau PLATINE ou AL-1100-O à la pièce à usiner :

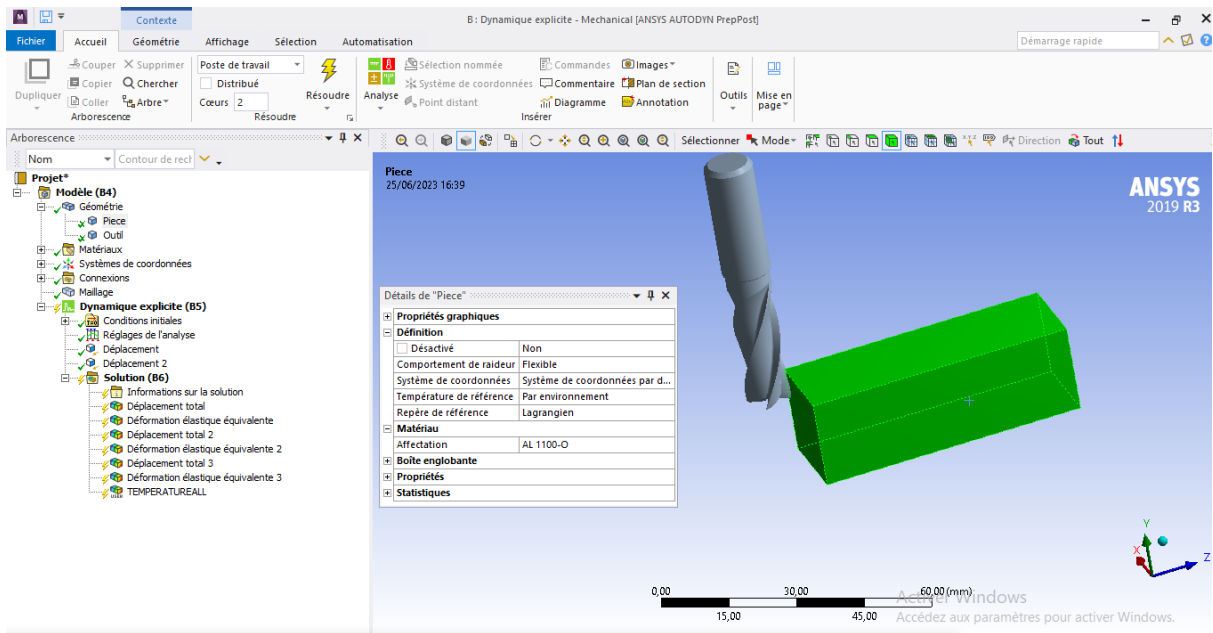


Figure 4. 17 : Attribution du matériau AL-1100-O à la pièce (Scenario 1)

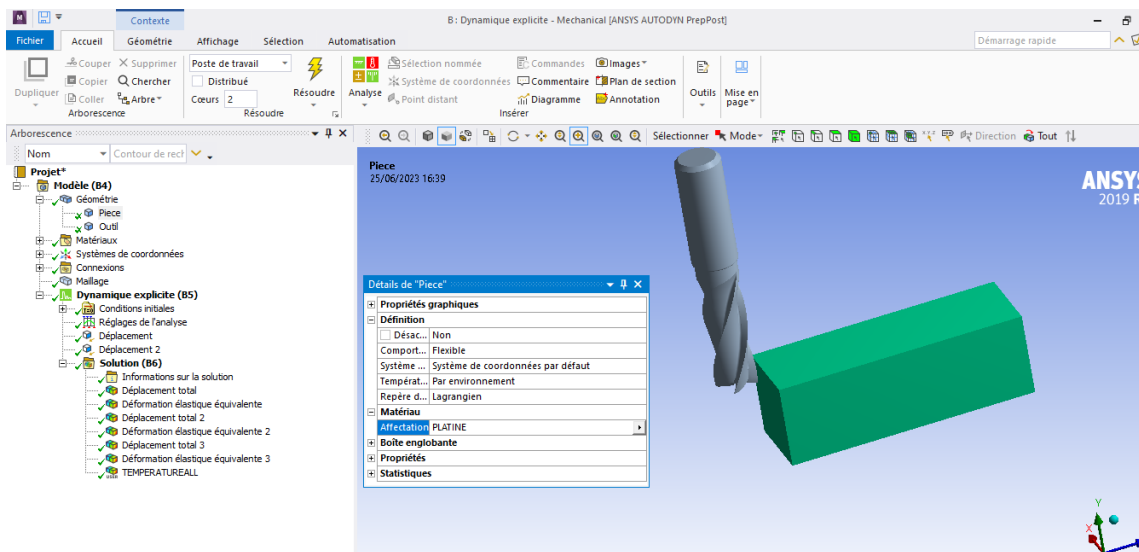


Figure 4. 18 : Attribution du matériau PLATINE à la pièce (Scenario 1)

## 2 | Systèmes de coordonnées

En plus du repère global, deux systèmes de coordonnées locaux ont été paramétrés comme indiqué sur la figure ci-dessous :

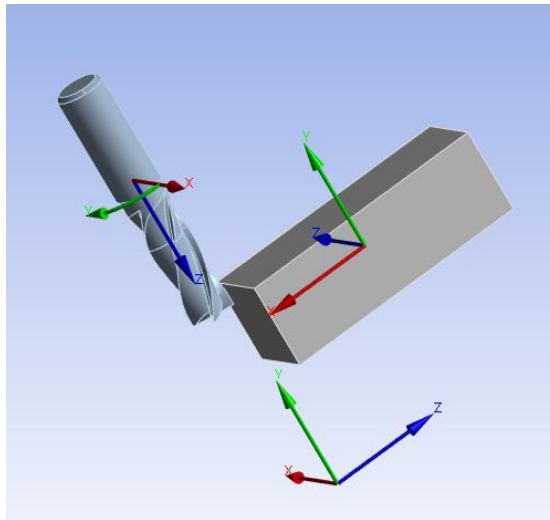


Figure 4. 19 : Systèmes de coordonnées

## 3 | Définition des connexions

Une connexion de type contact par frottement de Coulomb entre la pièce et l'outil a été mise en place. Les propriétés de contact adoptées sont les suivantes : coefficient de frottement 0.4, coefficient dynamique de 0.1 et la température initiale de la pièce et l'outil de 22 °.

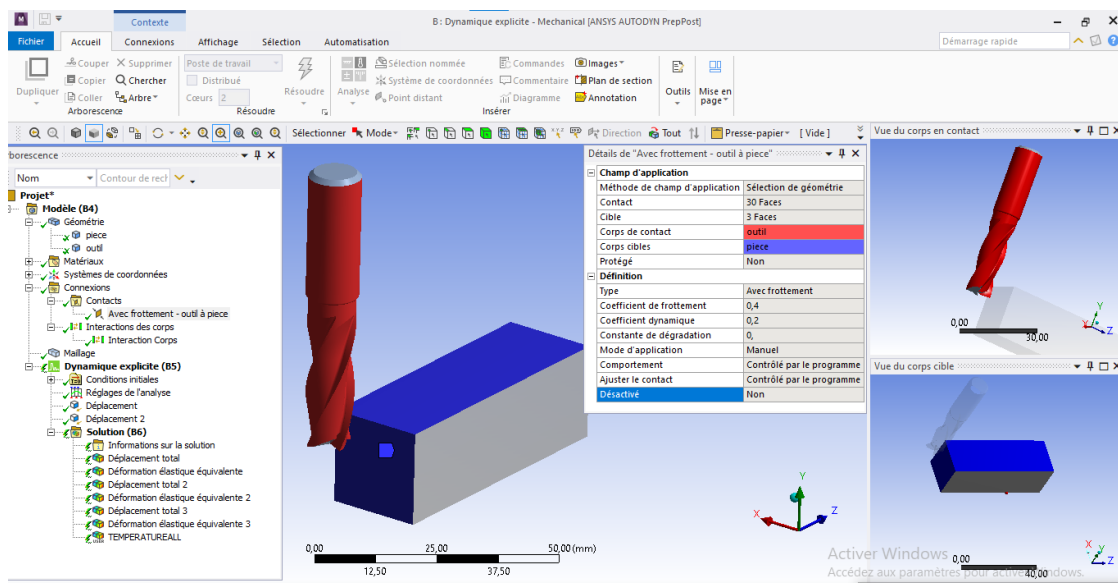
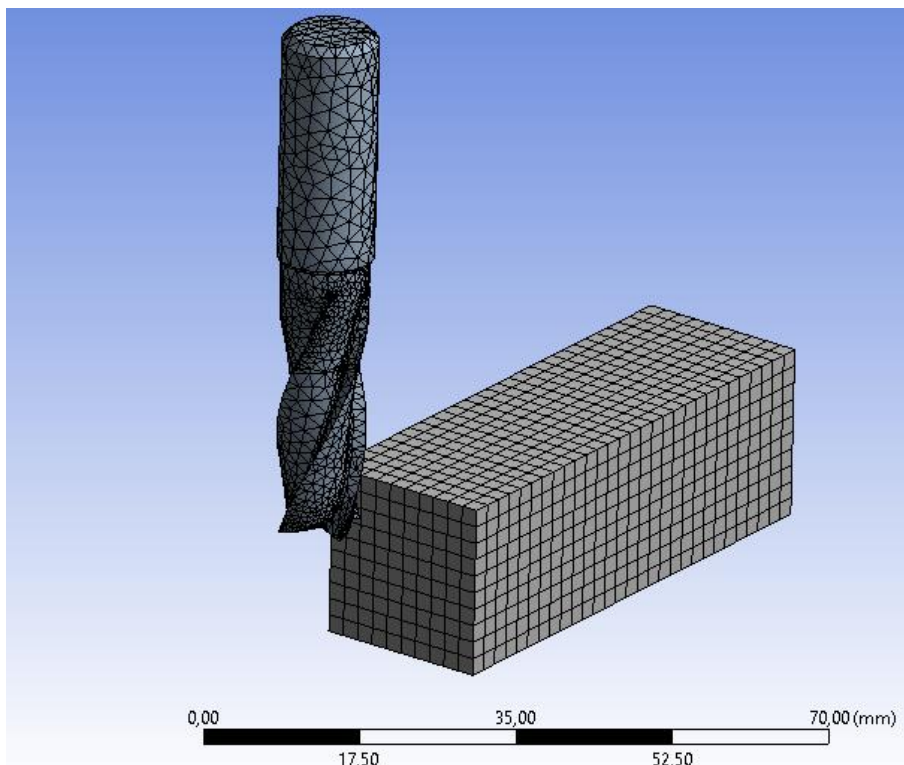


Figure 4. 20 : Systèmes de coordonnées

#### **4] Maillage**

Après la finalisation de la conception du modèle, on réalise le maillage de la pièce et de l'outil automatiquement avec le logiciel Ansys. La pièce a été maillée avec des éléments quadratiques tandis que l'outil a été maillé avec des éléments tétraédriques compte tenu de sa géométrie complexe. En effet, les éléments tétraédriques sont plus adaptés aux formes géométriques irrégulières.

La figure ci-dessous présente l'allure du maillage obtenu avec le logiciel Ansys :



**Figure 4. 21 : Maillage de la pièce et de l'outil**

Au total, le modèle est formé par : 15176 nœuds et 63770 éléments.

L'aire de surface moyenne du maillage est de  $1.19 \text{ e-}4 \text{ m}^2$

## 5] Paramétrage des éléments pendant la simulation

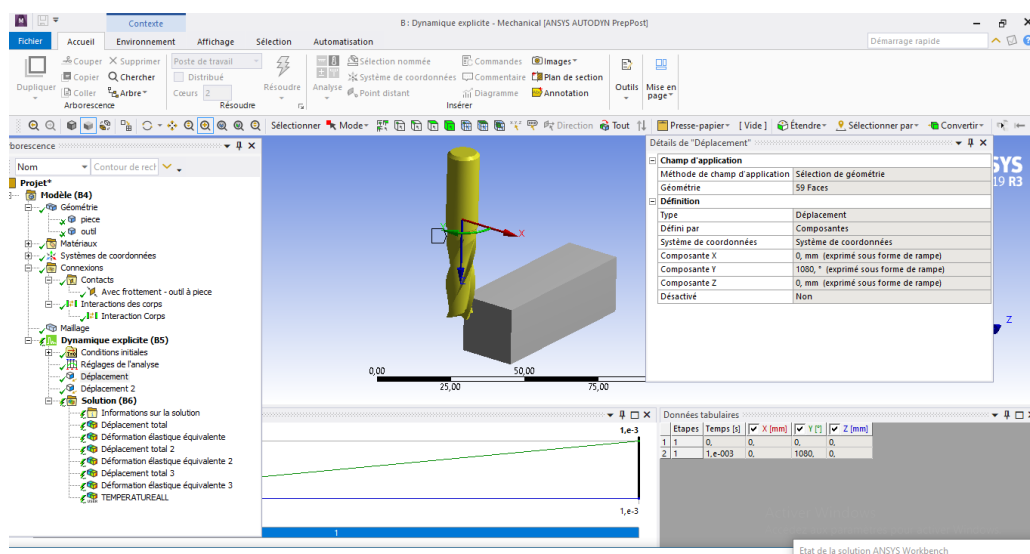
Pour chaque scénario (S1 et S2), 4 cas d'études ont été simulés en faisant varier la valeur de rotation de l'outil et la valeur de translation de la pièce.

Le tableau suivant présente les déplacements adoptés pour chaque cas d'étude.

Cas d'étude	Déplacement	Type de déplacement	Propriétés du déplacement
Cas_1	Déplacement 1	Rotation de l'outil	8000 tours / minutes
	Déplacement 2	Translation de la pièce	40 mm
Cas_2	Déplacement 1	Rotation de l'outil	8000 tours / minutes
	Déplacement 2	Translation de la pièce	20 mm
Cas_3	Déplacement 1	Rotation de l'outil	3000 tours / minutes
	Déplacement 2	Translation de la pièce	40 mm
Cas_4	Déplacement 1	Rotation de l'outil	3000 tours / minutes
	Déplacement 2	Translation de la pièce	20 mm

**Tableau 4. 1 : Paramètres de coupe retenus pour chaque scénario et pour chaque cas d'étude**

La figure ci-dessous présente un exemple de paramétrage de la rotation de l'outil :



**Figure 4. 22 : Paramétrage de la rotation de l'outil de fraisage**

#### 4.3.2.5 Résultats des calculs

Dans le cadre de la présente section, nous présenterons pour chaque scénario et pour chaque cas d'étude les résultats suivants :

- Carte des températures calculées au droit de la pièce mécanique, l'outil de coupe ainsi que l'interface pièce-outil
- Courbes d'évolution de la température en fonction du temps pour la température maximale, la température minimale et la température moyenne.

#### **Remarques :**

- La température maximale est mesurée au droit de l'interface pièce-outil
- La température minimale est mesurée au droit des zones éloignées de la zone de contact pièce-outil.
- La température moyenne représente la somme algébrique de toutes les températures mesurées au droit de tous les nœuds de la pièce, l'outil et l'interface pièce-outil divisé par le nombre de nœuds du modèle numérique.

## 1] Scenario 1 (Pièce modélisée avec le matériau AL-1100-O)

La figure ci-dessous présente les valeurs des températures pour le cas d'étude 1 :

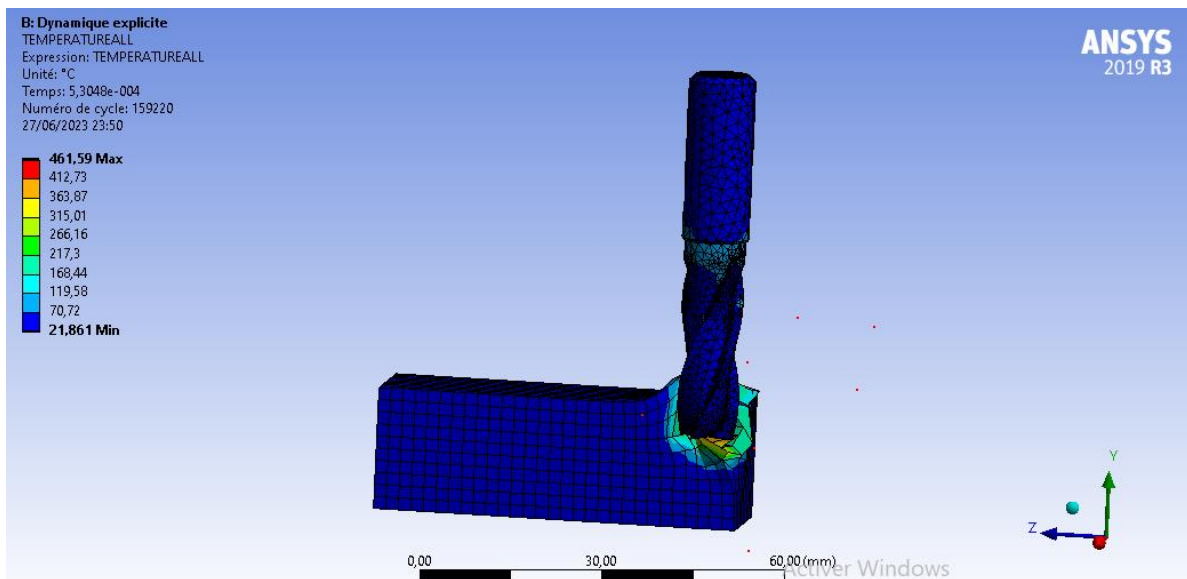


Figure 4. 23 : Valeurs des températures [scénario 1 cas d'étude 1]

D'après la figure présentée ci-dessus, la température maximale est de :  $461^{\circ}$  et la température minimale est de :  $22^{\circ}$ .

La figure ci-dessous présente l'évolution des températures maximales, minimales et moyennes dans le temps :

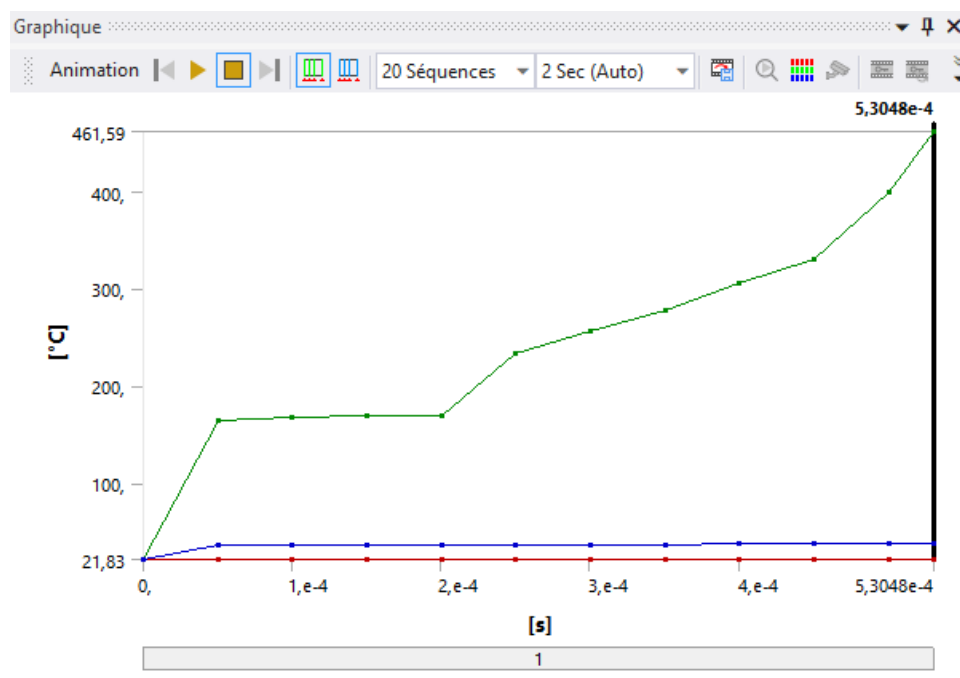


Figure 4. 24 : Courbes d'évolution des températures dans le temps [scénario 1 cas d'étude 1]

La figure ci-dessous présente les valeurs des températures pour le cas d'étude 2 :

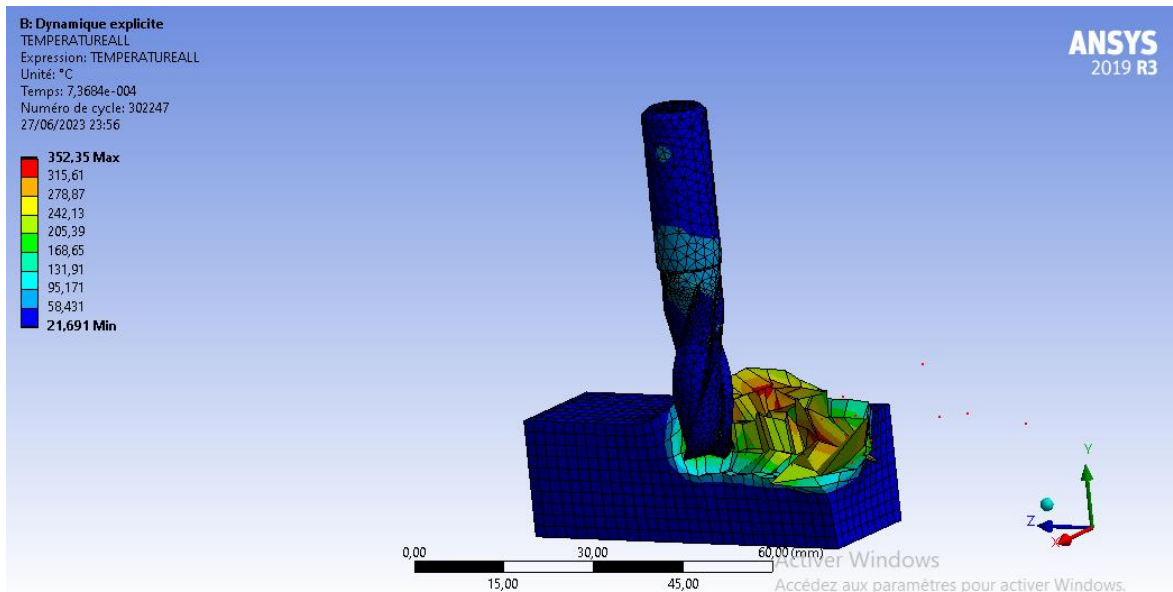


Figure 4. 25 : Valeurs des températures [scénario 1 cas d'étude 2]

D'après la figure présentée ci-dessus, la température maximale est de : 352 ° et la température minimale est de : 22 °.

La figure ci-dessous présente l'évolution des températures maximales, minimales et moyennes dans le temps :

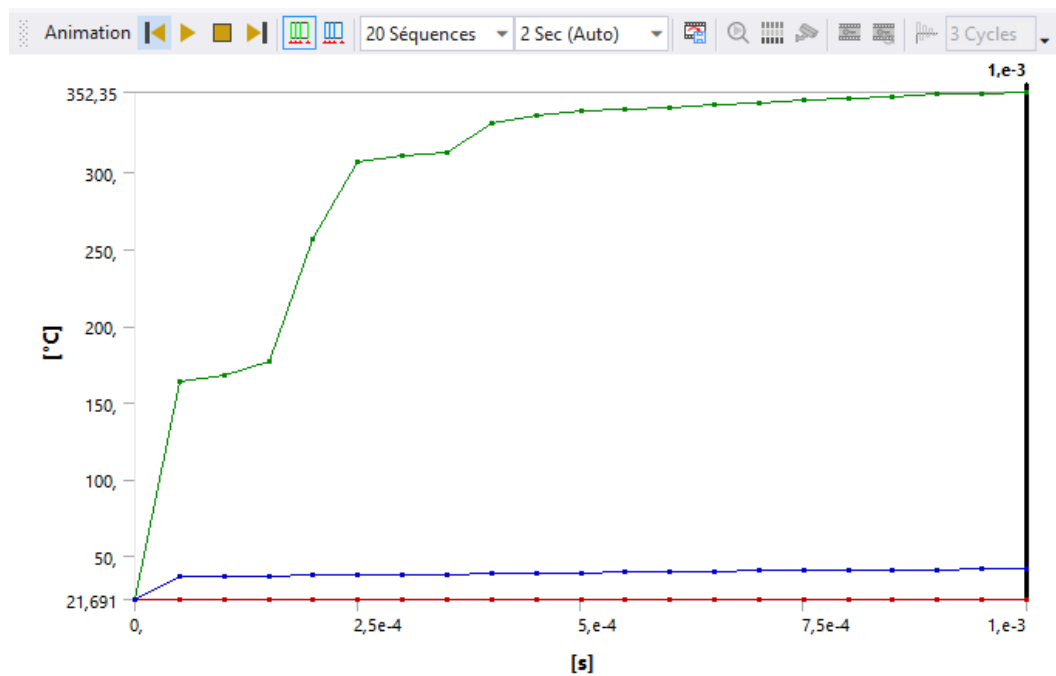


Figure 4. 26 : Courbes d'évolution des températures dans le temps [scénario 1 cas d'étude 2]



La figure ci-dessous présente les valeurs des des températures pour le cas d'étude 3 :

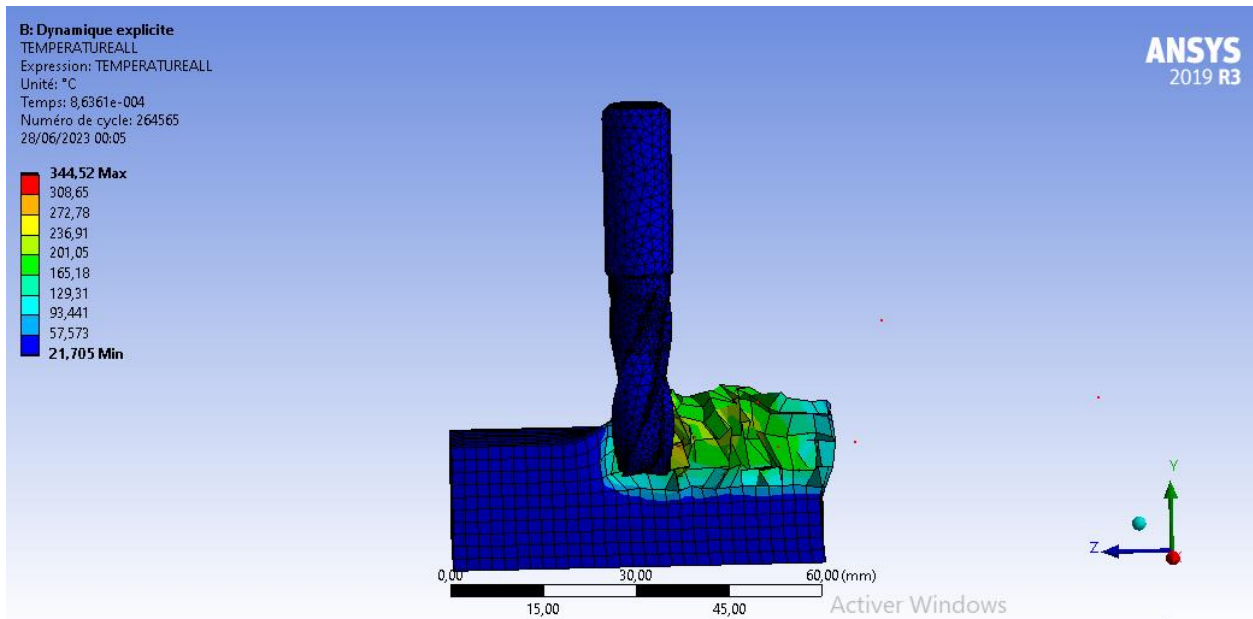


Figure 4. 27 : Valeurs des températures [scénario 1 cas d'étude 3]

D'après la figure présentée ci-dessus, la température maximale est de : 344 ° et la température minimale est de : 22 °.

La figure ci-dessous présente l'évolution des températures maximales, minimales et moyennes dans le temps :

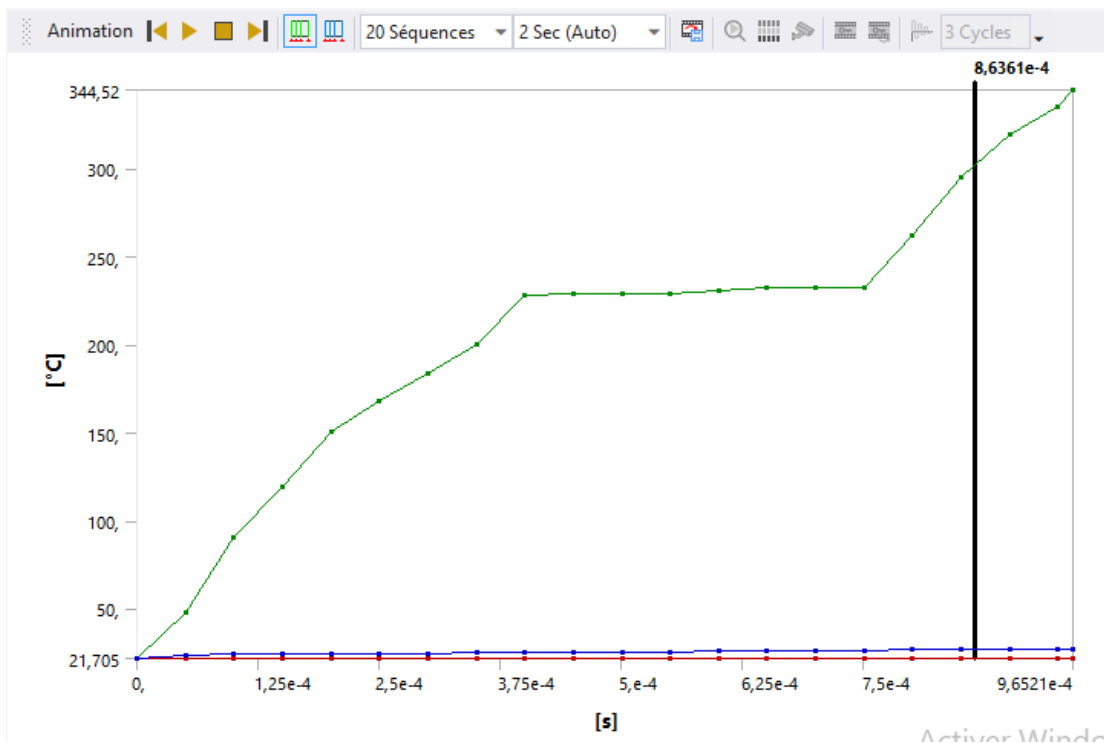


Figure 4. 28 : Courbes d'évolution des températures dans le temps [scénario 1 cas d'étude 3]

La figure ci-dessous présente les valeurs des températures pour le cas d'étude 4 :

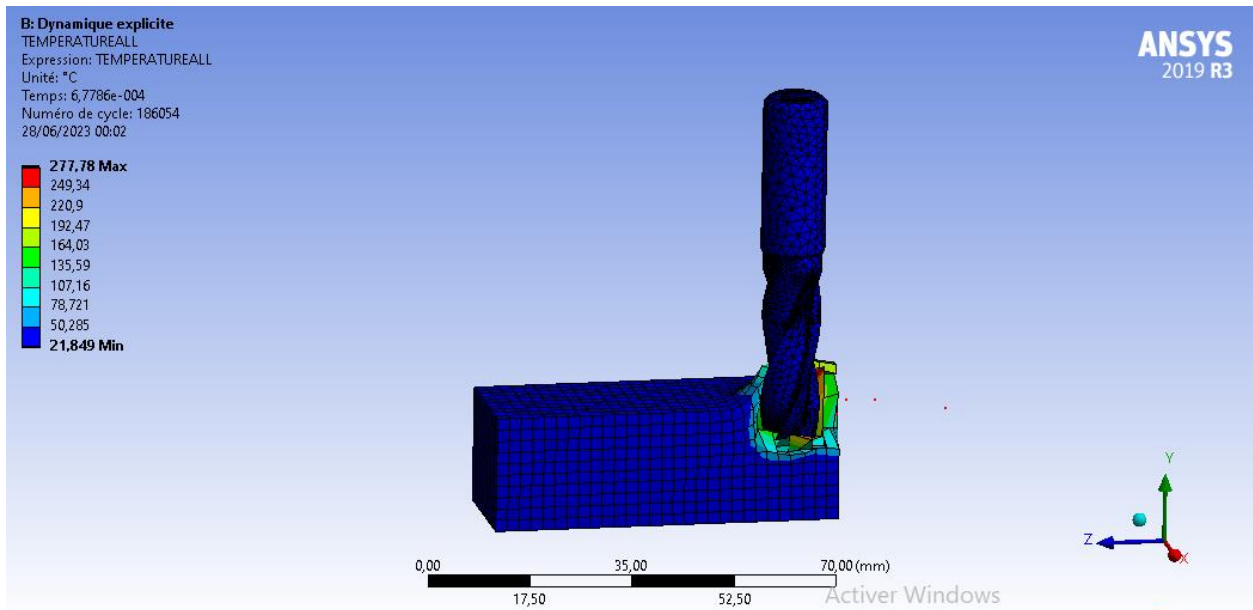


Figure 4. 29 : Valeurs des températures [scénario 1 cas d'étude 4]

D'après la figure présentée ci-dessus, la température maximale est de : 278 ° et la température minimale est de : 22 °.

La figure ci-dessous présente l'évolution des températures maximales, minimales et moyennes dans le temps :

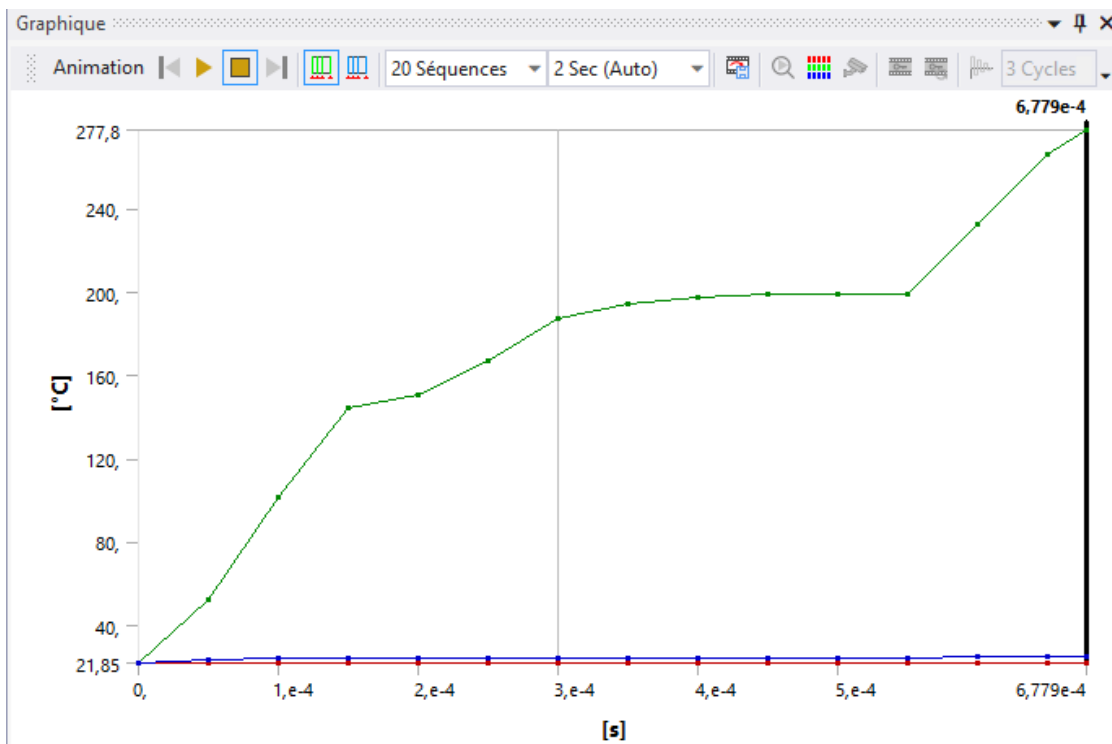


Figure 4. 30 : Courbes d'évolution des températures dans le temps [scénario 1 cas d'étude 4]

## 2] Scenario 2 (Pièce modélisée avec le matériau PLATINE)

La figure ci-dessous présente les valeurs des températures pour le cas d'étude 1 :

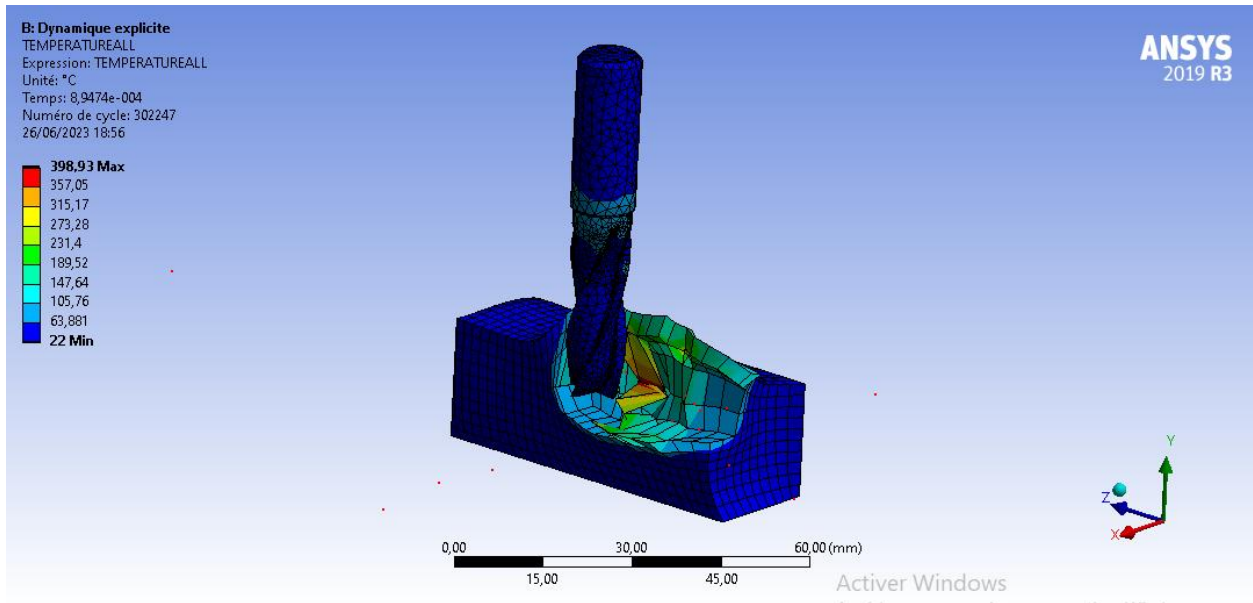


Figure 4. 31 : Valeurs des températures [scénario 2 cas d'étude 1]

D'après la figure présentée ci-dessus, la température maximale est de : 399 ° et la température minimale est de : 22 °.

La figure ci-dessous présente l'évolution des températures maximales, minimales et moyennes dans le temps :

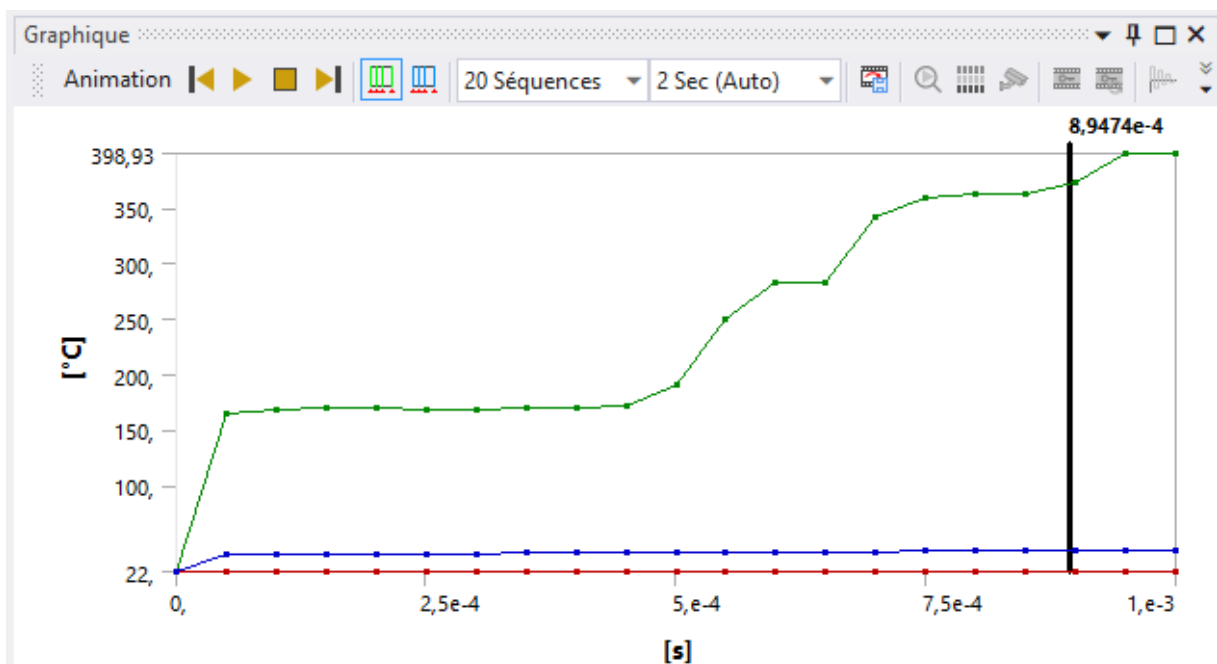


Figure 4. 32 : Courbes d'évolution des températures dans le temps [scénario 2 cas d'étude 1]

La figure ci-dessous présente les valeurs des températures pour le cas d'étude 2 :

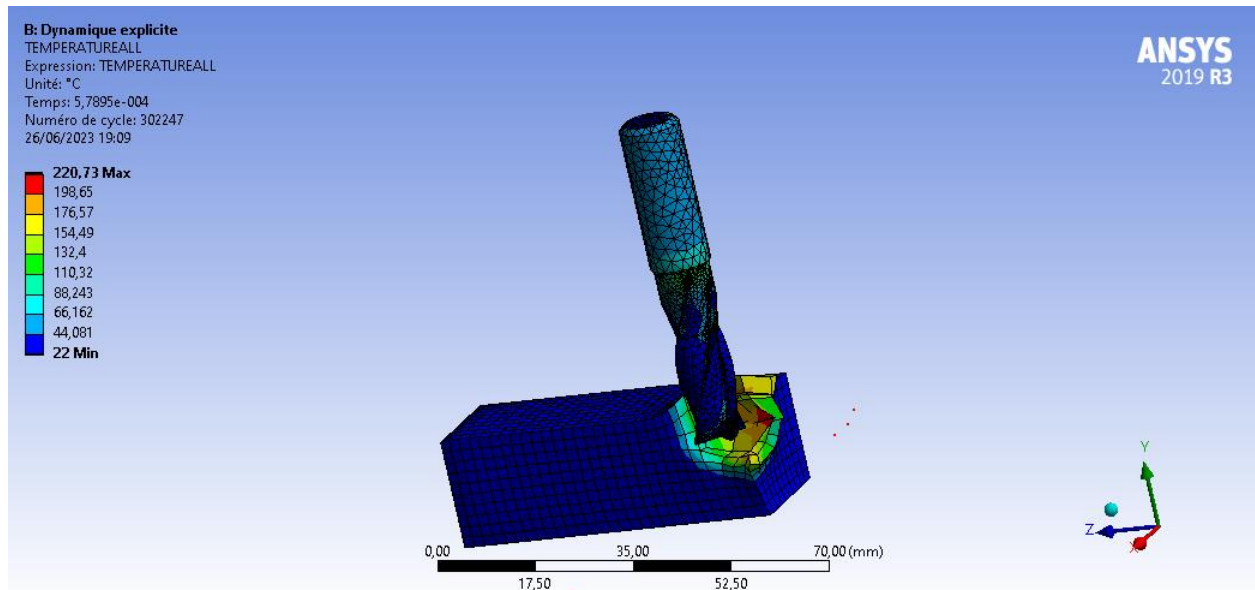


Figure 4. 33 : Valeurs des températures [scénario 2 cas d'étude 2]

D'après la figure présentée ci-dessus, la température maximale est de : 221 ° et la température minimale est de : 22 °.

La figure ci-dessous présente l'évolution des températures maximales, minimales et moyennes dans le temps :

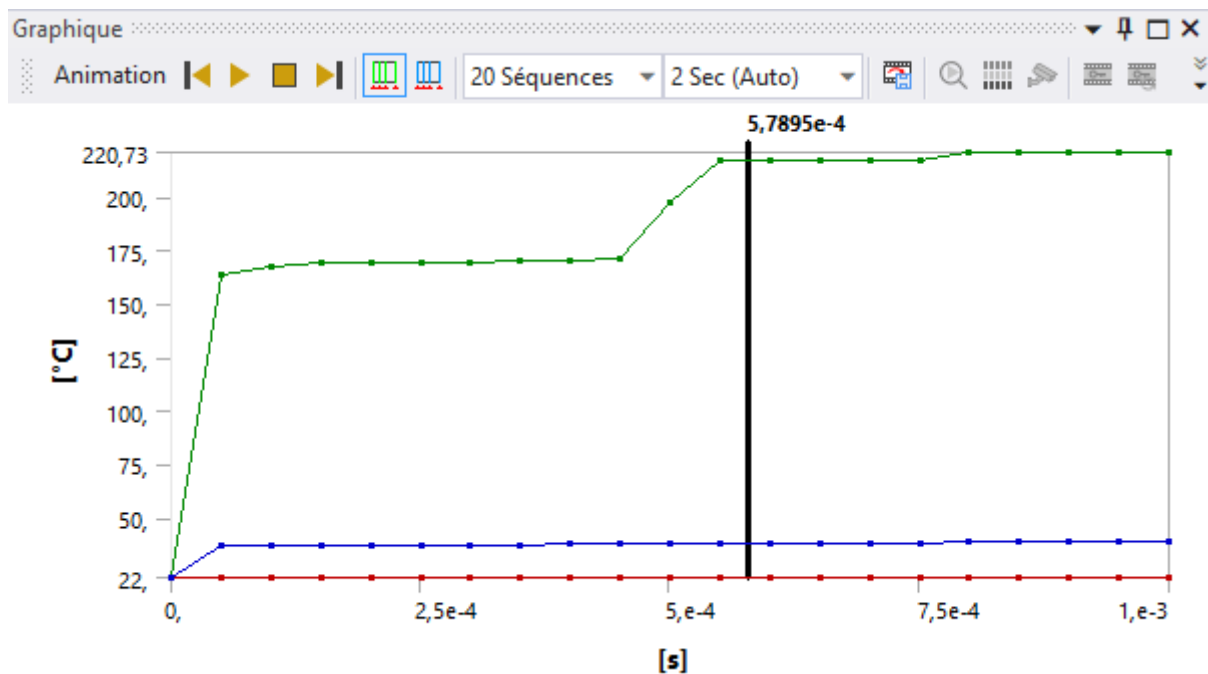


Figure 4. 34 : Courbes d'évolution des températures dans le temps [scénario 2 cas d'étude 2]

La figure ci-dessous présente les valeurs des températures pour le cas d'étude 3 :

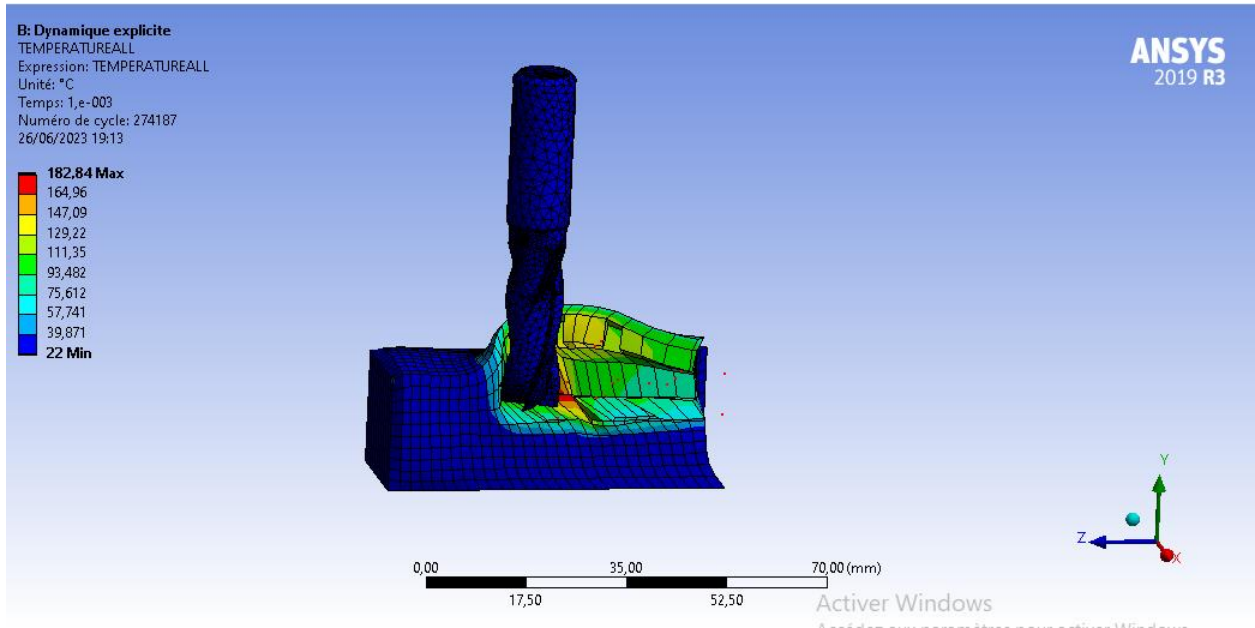


Figure 4. 35 : Valeurs des températures [scénario 2 cas d'étude 3]

D'après la figure présentée ci-dessus, la température maximale est de : 183 ° et la température minimale est de : 22 °.

La figure ci-dessous présente l'évolution des températures maximales, minimales et moyennes dans le temps :

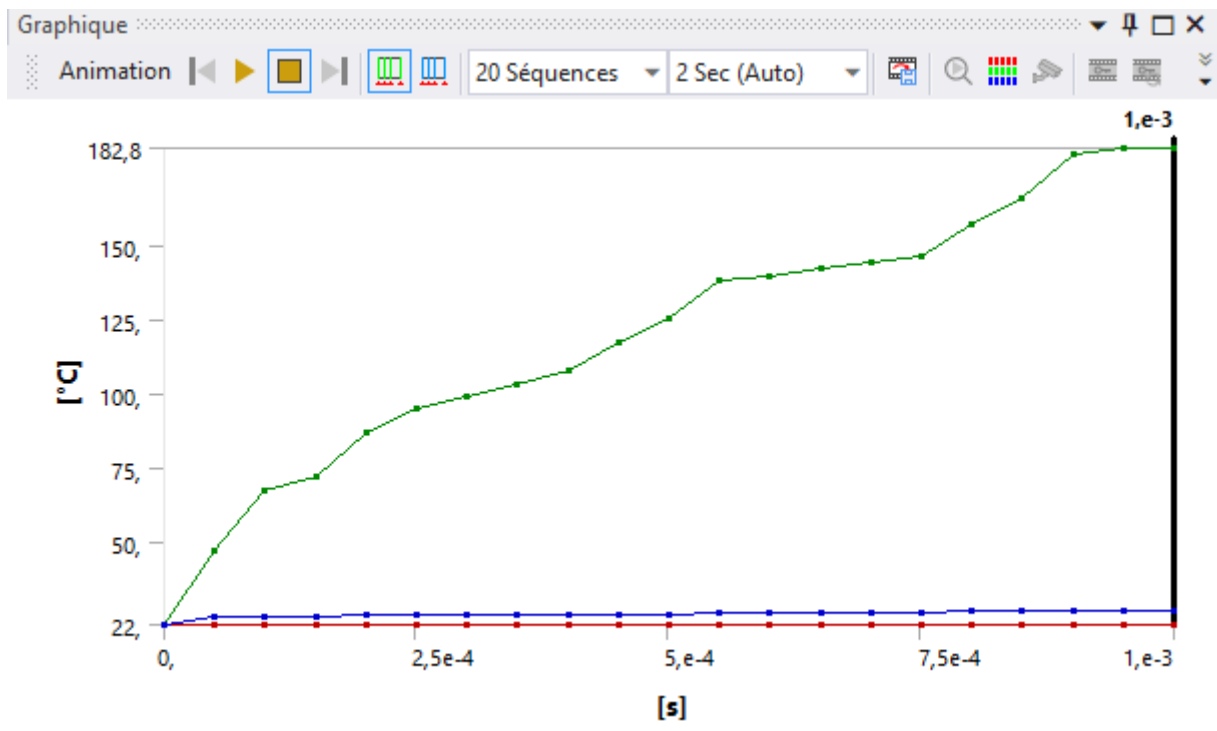


Figure 4. 36 : Courbes d'évolution des températures dans le temps [scénario 2 cas d'étude 3]

La figure ci-dessous présente les valeurs des températures pour le cas d'étude 4 :

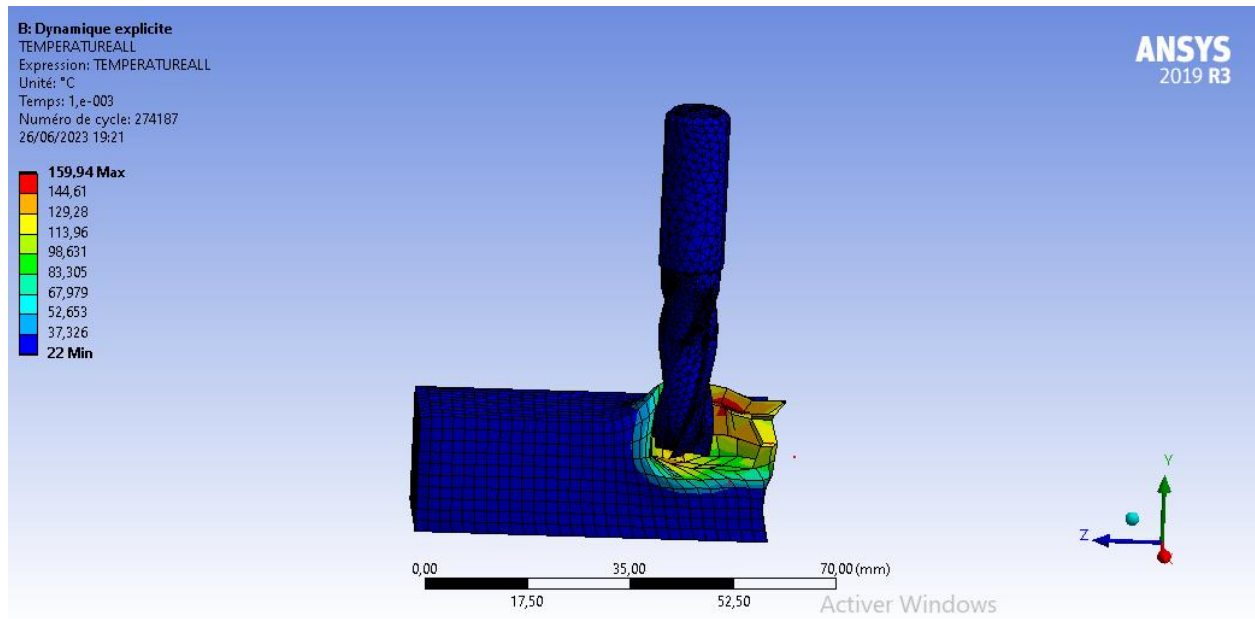


Figure 4. 37 : Valeurs des températures [scénario 2 cas d'étude 4]

D'après la figure présentée ci-dessus, la température maximale est de : 160 ° et la température minimale est de : 22 °.

La figure ci-dessous présente l'évolution des températures maximales, minimales et moyennes dans le temps :

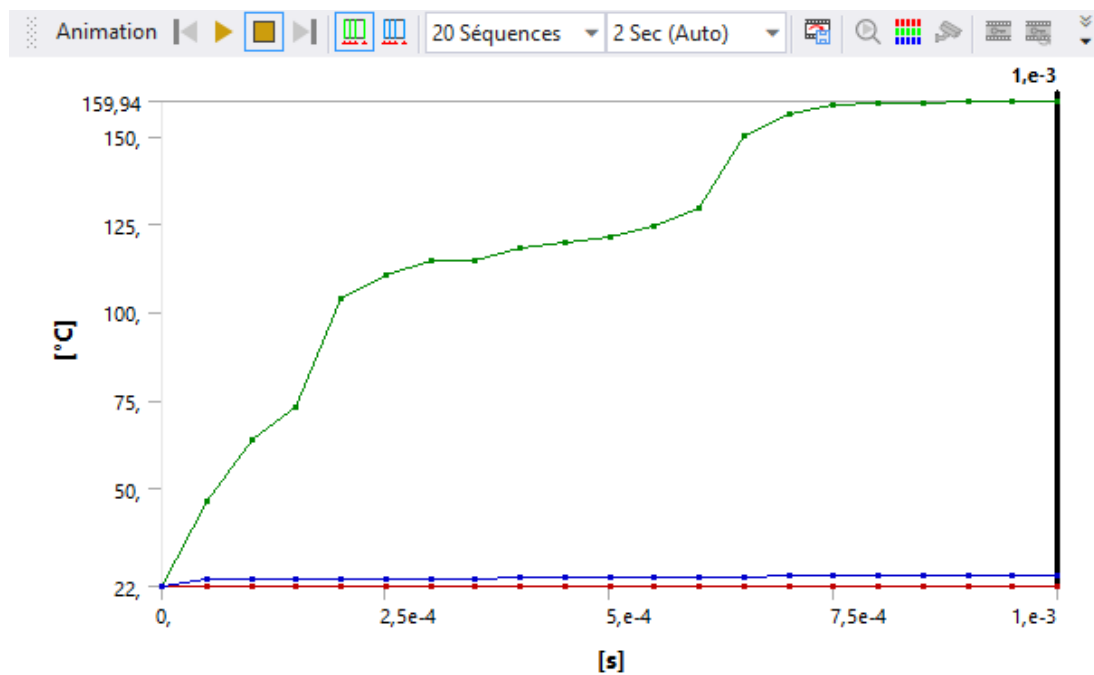


Figure 4. 38 : Courbes d'évolution des températures dans le temps [scénario 2 cas d'étude 4]

## 4.4 Analyse des résultats

Le tableau ci-dessous présente une synthèse des résultats des températures maximales obtenues au droit de l'interface de contact pièce-outil pour chaque scénario et pour chaque cas d'étude :

Scénario	Cas d'étude	Température max [°]
S1 : Matériau de la pièce en AL-1100-O	Cas 1 : <ul style="list-style-type: none"> <li>• Rotation de l'outil : 8000 tours/min</li> <li>• Translation de la pièce : 40 mm</li> </ul>	461
	Cas 2 : <ul style="list-style-type: none"> <li>• Rotation de l'outil : 8000 tours/min</li> <li>• Translation de la pièce : 20 mm</li> </ul>	352
	Cas 3 : <ul style="list-style-type: none"> <li>• Rotation de l'outil : 3000 tours/min</li> <li>• Translation de la pièce : 40 mm</li> </ul>	344
	Cas 4 : <ul style="list-style-type: none"> <li>• Rotation de l'outil : 3000 tours/min</li> <li>• Translation de la pièce : 20 mm</li> </ul>	278
S2 : Matériau de la pièce en Platine	Cas 1 : <ul style="list-style-type: none"> <li>• Rotation de l'outil : 8000 tours/min</li> <li>• Translation de la pièce : 40 mm</li> </ul>	399
	Cas 2 : <ul style="list-style-type: none"> <li>• Rotation de l'outil : 8000 tours/min</li> <li>• Translation de la pièce : 20 mm</li> </ul>	221
	Cas 3 : <ul style="list-style-type: none"> <li>• Rotation de l'outil : 3000 tours/min</li> <li>• Translation de la pièce : 40 mm</li> </ul>	183
	Cas 4 : <ul style="list-style-type: none"> <li>• Rotation de l'outil : 3000 tours/min</li> <li>• Translation de la pièce : 20 mm</li> </ul>	160

**Tableau 4. 2 : Synthèse des résultats de températures maximales obtenues au droit de l'interface de contact**

Afin d'analyser les résultats des différentes simulations menées dans le cadre de la présente étude, nous avons réalisé un plan d'expérience à l'aide du logiciel Design Expert 7. Ce dernier est un outil de statistique qui permet de généraliser le comportement d'un phénomène à partir d'un jeu de variables en se basant sur des exemples annotés.

Les exemples annotés représentent une base de données d'apprentissage issue d'un nombre d'expériences dont les hypothèses d'entrées (variables) et le résultat (variable de prédiction) sont connus.

On distingue deux types de problèmes de prédictions :

- Problème de prédiction d'une seule variable
- Problème de prédiction de plusieurs variables

La résolution d'un problème de prédiction à une seule variable peut être réalisée avec la méthode statistique : **Régression**, tandis que la résolution d'un problème de prédiction à plusieurs variables peut être réalisée avec la méthode statistique : **Classification**.

Dans notre cas de figure, on doit résoudre un problème de prédiction à une seule variable qui est la température maximale au droit de l'interface de contact Pièce-Outil par le biais de la méthode statistique : régression.

Les variables d'entrées du modèle sont :

- La rotation de l'outil
- La translation de la pièce.

La base de données d'apprentissage du modèle est constituée de 4 expériences. Ces dernières représentent les 4 cas d'études de chaque scénario réalisé dans la présente étude.

Les 4 cas d'études sont choisis de manière à combiner les rotations de l'outil maximale et minimale avec les translations de la pièce maximale et minimale. Ceci dans le but de couvrir un large champ de prédiction.

Étant donné que le plan d'expérience concerne une seule variable de prédiction et le nombre de variables d'entrées est limité à deux, le modèle de comportement peut être représenté en un abaque de 2 dimensions.

Au total, deux plans d'expériences ont été réalisés. Un pour chaque scénario étudié dans la présente étude.



#### **4.4.1 Méthode de résolution du système de prédiction par DESIGN EXPERT**

Étant donné que la problématique étudiée dans le cadre de la présente étude est une prédiction d'une seule variable avec deux données d'entrée, la résolution du système peut se faire avec une **Régression linéaire multiple** à l'aide du logiciel Design Expert 7.

La régression linéaire multiple consiste à trouver la fonction qui exprime la variable de prédiction en fonctions des données entrées. La forme générale de cette fonction est la suivante :

$$Y = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + \dots + a_nX_n + \varepsilon$$

Avec :

- Y : valeur à prédire
- $X_i$  : données d'entrée (variables indépendantes)
- $a_i$  : paramètres de la fonction à estimer
- $\varepsilon$  : erreur résiduelle

Dans notre cas de figure, la valeur de prédiction est la température maximale au droit de l'interface de contact Pièce-Outil et les données d'entrées sont : la rotation de l'outil et la translation de la pièce. Par conséquent, on peut récrire la fonction de prédiction sous la forme suivante :

$$T_{max} = a_0 + a_1N + a_2P + a_{12}N.P$$

Avec :

- $T_{max}$  : Température maximale au droit de l'interface Pièce-Outil.
- N : Nombre de tours
- P : Translation de la pièce
- $a_0$  : la valeur moyenne de l'effet des deux variables d'entrées
- $a_1$  : l'effet de la rotation de l'outil
- $a_2$  : l'effet de la translation de la pièce
- $a_{12}$  : l'interaction entre les paramètres  $a_1$  et  $a_2$

L'estimation des paramètres  $a_i$  est réalisée avec le logiciel DESIGN EXPERT 7 avec la méthode numérique des moindres carrés en se basant sur la base de données d'apprentissage.

Ainsi pour chaque scénario, le plan d'expérience nous permet d'obtenir une fonction qui prédit la température maximale en fonction du couple : rotation de l'outil et translation de la pièce à condition que ce couple soit compris dans l'intervalle de prédiction telle que l'on a décrit dans le Tableau 4.1.

#### 4.4.2 Scénario 1

D'après les résultats présentés dans le tableau 2, on peut constater que la température maximale au droit de l'interface de contact pièce-outil augmente à la fois avec l'augmentation de la rotation de l'outil et/ou l'augmentation de la translation de la pièce.

A l'aide du logiciel DESIGN EXPERT, nous avons obtenu la fonction qui exprime la température maximale en fonction du couple : rotation de l'outil et translation de la pièce :

$$T_{max} = 193.4 + 6.2 \times 10^{-3} \cdot N + 2.01 \cdot a + 4.3 \times 10^{-4} \cdot a \cdot N$$

Avec :

- N : Nombre de tours
- a : Translation de la pièce

Ainsi on peut prédire la température maximale pour n'importe quel couple (rotation de l'outil, translation de la pièce) à condition que les valeurs du couple soient comprises entre les valeurs minimales et maximales des rotations et translations telles que définies dans le tableau 4.1.

À titre d'exemple, pour le couple (Nombre de tours = 5500 tours/min, Translation de la pièce = 30 mm), la valeur estimée pour la température maximale est de : 358.75 ° (voir figure ci-dessous).

Factor	Name	Level	Low Level	High Level	Std. Dev.	Coding
A	N	5500.00	3000.00	8000.00	0.000	Actual
B	a	30.00	20.00	40.00	0.000	Actual

Response	Prediction	SE Mean	95% CI low	95% CI high	SE Pred	95% PI low	95% PI high
T	358.75						

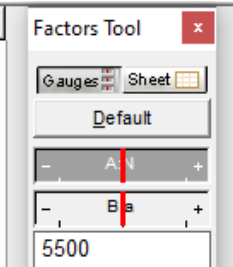
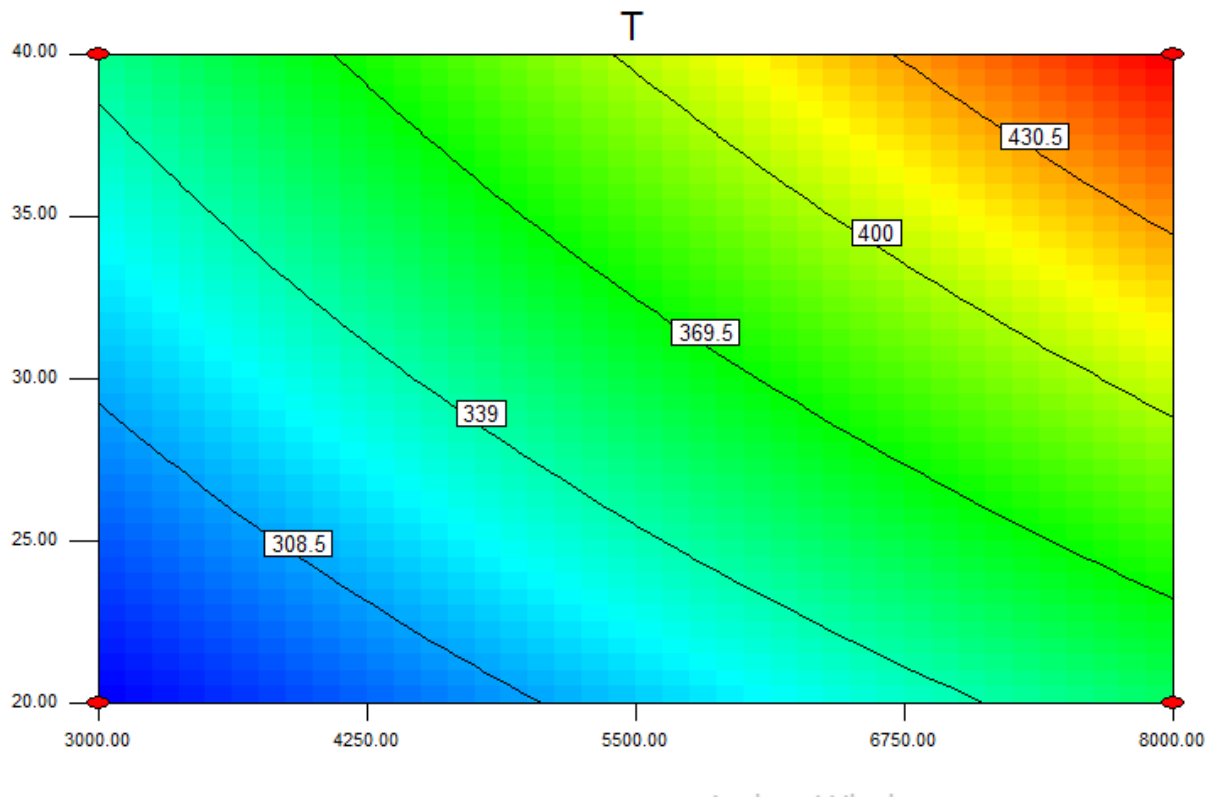


Figure 4. 39 : Exemple de prédiction de la température maximale pour une pièce en AL-1100-O (Design Expert)

A l'aide du logiciel DESIGN EXPERT, nous avons pu produire un abaque de prédiction de la température maximale au droit de l'interface pièce-outil pendant le procédé de fraisage en fonction du jeu de paramètres : Rotation de l'outil et Translation de la pièce et pour une pièce en AL-1100-O.

La figure ci-dessous, présente l'abaque réalisé avec le logiciel DESIGN EXPERT :



**Figure 4. 40 : Abaque de prédiction de la température maximale au droit de l'interface de contact pour une pièce en AL-1100-O**

Remarque :

- L'axe des X représente la valeur de la rotation de l'outil en tours/minutes
- L'axe des Y représente la valeur de la translation de la pièce en mm

### 4.4.3 Scénario 2

D'après les résultats présentés dans le tableau 2, on peut constater que la température maximale au droit de l'interface de contact pièce-outil augmente à la fois avec l'augmentation de la rotation de l'outil et/ou l'augmentation de la translation de la pièce.

A l'aide du logiciel DESIGN EXPERT, nous avons obtenu la fonction qui exprime la température maximale en fonction du couple : rotation de l'outil et translation de la pièce :

$$T_{max} = 193.4 - 0.0188.N - 3.5.a + 1.55 \times 10^{-3}.a.N$$

Avec :

- N : Nombre de tours
- a : Translation de la pièce

Ainsi on peut prédire la température maximale pour n'importe quel couple (rotation de l'outil, translation de la pièce) à condition que les valeurs du couple soient comprises entre les valeurs minimales et maximales des rotations et translations telles que définies dans le tableau 4.1.

À titre d'exemple, pour le couple (Nombre de tours = 5500 tours/min, Translation de la pièce = 30 mm), la valeur estimée pour la température maximale est de : 240.75 ° (voir figure ci-dessous).

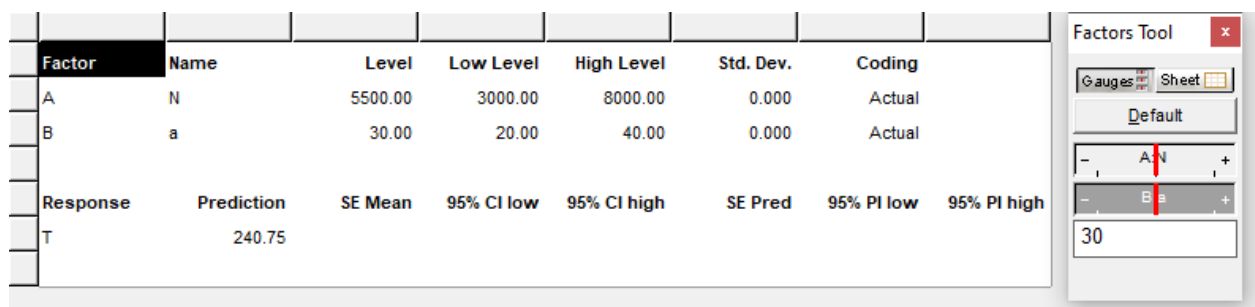
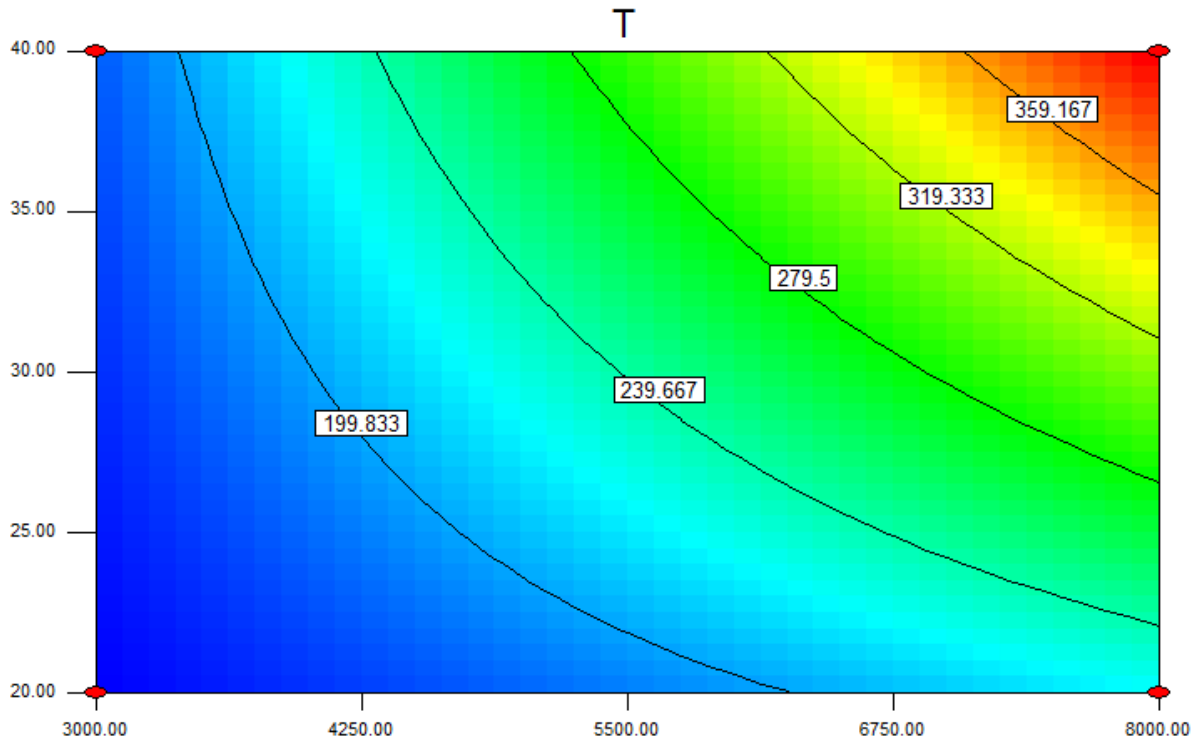


Figure 4. 41 : Exemple de prédiction de la température maximale pour une pièce en Platine (Design Expert)

A l'aide du logiciel DESIGN EXPERT, nous avons pu produire un abaque de prédiction de la température maximale au droit de l'interface pièce-outil pendant le procédé de fraisage en fonction du jeu de paramètres : Rotation de l'outil et Translation de la pièce et pour une pièce en PLATINE.

La figure ci-dessous, présente l'abaque réalisé avec le logiciel DESIGN EXPERT :



**Figure 4. 42 : Abaque de prédiction de la température maximale au droit de l'interface de contact pour une pièce en PLATINE**

Remarque :

- L'axe des X représente la valeur de la rotation de l'outil en tours/minutes
- L'axe des Y représente la valeur de la translation de la pièce en mm

## **5 Conclusion générale**

Dans le cadre de ce projet de fin d'études, il a été fixé comme objectif d'étudier les phénomènes thermomécaniques qui se développent au droit de l'interface de contact Pièce-Outil lors d'une opération de fraisage. Afin de réaliser cet objectif, une simulation numérique en 3D a été réalisée à l'aide du logiciel SolidWorks pour la partie conception de la géométrie du modèle et du logiciel Ansys pour la partie analyse thermomécanique.

Pour une meilleure compréhension de ces phénomènes, une étude paramétrique a été effectuée en faisant varier à la fois, le matériau de la pièce à usiner, la rotation de l'outil de coupe et l'avance de la pièce. Dans ce sens, 8 simulations numériques réparties en 2 scénarios ont été menées. Le scénario 1 présente 4 cas d'études pour une pièce à usiner avec matériau AL-1100-O (Aluminium) tandis que le scénario 2 présente 4 cas d'études pour une pièce à usiner avec matériau en Platine.

Les résultats de ces études paramétriques indiquent que la température maximale au droit de l'interface Pièce-Outil augmente avec l'augmentation de la rotation de l'outil et/ou l'avance de la pièce. Il a été noté également constaté que les températures maximales pour une pièce en Aluminium sont plus importantes que les températures maximales pour une pièce en Platine. Ceci est dû aux caractéristiques mécaniques des matériaux.

Les expériences menées dans le cadre de ce projet de fin d'études s'inscrivent dans le cadre de la recherche scientifique qui vise à améliorer les procédés d'usinage d'une manière générale. En effet, une meilleure compréhension des phénomènes qui se développent pendant ces opérations permettent à terme d'améliorer la productivité et la qualité des pièces à usiner. Ces recherches scientifiques permettent également d'optimiser l'utilisation des lubrifiants chimiques et ainsi limiter l'impact sur l'environnement.

## **6 Références bibliographiques**

- [1] Nyengera Tanaka , Mwambingu Alfred. Modélisation et simulation en 3D d'une opération de fraisage par les éléments finis.2020. Master en génie mécanique. Université de Blida 1.
- [2] M .Temmar, cours sur les Généralités sur l'usinage des metaux,pp14-22
- [3] Le répertoire de la machine-outil (<https://www.machine-outil.com/>)
- [4] HIMED Lynda. Modélisation et simulation de la coupe orthogonale en utilisant un code de calcul par la méthode des éléments finis. Thèse pour obtention de Magistère, UNIVERSITÉ DE BATNA, FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR DEPARTEMENT DE MECANIQUE ,2009.
- [5] Bouaita Munir . Étude, modélisation et simulation de l'usinage orthogonal par la méthode des éléments finis. Mémoire de Master UNIVERSITÉ BADJ MOKHTAR ANNABA, 2017.
- [6] Aurelien Maurel-Pantel. Étude expérimentale et modélisation par éléments finis du procédé de fraisage: Applications à l'identification paramétrique des lois de comportement. Mécanique [physics.medph]. Université de Franche-Comté, 2009. Français. NNT : 2009BESA2017. tel-00561446
- [7] Finite Element Analysis with ANSYS Workbench. ALPHA SCIENCE INTERNATIONAL LTD. 7200 The Quorum, Oxford Business Park NorthGarsington Road, Oxford OX4 2JZ,U.K.[www.alphasci.com](http://www.alphasci.com) .ISBN 978-1-78332-369-2
- [8] ALIA Riadh, GUEMAZ Slimane, Optimisation des Paramètres de Coupe pour Minimiser la Consommation d'Énergie Pendant le Fraisage,2015,pp.7-12
- [9] KokouviMawuli KPENYIGBA, Étude du comportement dynamique et modélisation thermo viscoplastique de nuances d'acier soumises à un impact balistique,2013,p20-23
- [10] Mayssa GUEDICHE, Modélisation et Simulation de l'usure des outils de coupe au cours du processus d'enlèvement de matière : Approche Expérimentale Et Numérique (MOSUOC), pp.16-17
- [11] SpecificationSheet: Alloy 316/316L. SANDMEYER STEEL COMPANY. [www.SandmeyerSteel.com](http://www.SandmeyerSteel.com)

- [12] D. Bennegagi Mohammed el Laribi, polycopie de coupe de métaux en fabrication mécanique et productique, 2018
- [13] F. Lorey. Endommagement des outils de coupe. Les techniques d'ingénieur, traité mécanique et chaleur B7042 2, 1993
- [14] T.D. Marusich, M. Ortiz, Modeling and simulation of high-speed machining, International Journal for Numerical Methods in Engineering 38 (1995) 3675-3694.
- [15] KIM K. W. , SIN H.-C. – Development of a thermo-viscoplastic cutting model using finite element method – International Journal of Machine Tools and Manufacture. 1995, vol. 36, n° 3, pp. 379–397
- [16] KIM K. W. , LEE W. Y. , SIN H.-C. – A finite-element analysis of machining with the tool edge considered – Journal of Materials Processing Technology. 1999, vol. 86, pp. 45–55
- [17] BENABID, Farida. Étude des transferts thermiques au cours d'une opération d'usinage, influence sur l'usinage à grande vitesse. 2015. Thèse de doctorat. Université de Batna 2.
- [18] Gara Souhir, Cours interactif : Le fraisage, Institut supérieur des études technologiques de Nabeul, 2015, pp2-10.
- [19] Chakirsama, Laidikarima, Modélisation et simulation des mécanismes aux interfaces pièces-outil coupeaux de l'acier xxc48,2016,pp7-12