

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Ibn Khaldoun de Tiaret

Faculté des Sciences Appliquées

Département de Génie Mécanique



PROJET DE FIN D'ÉTUDES

MASTER

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Construction Mécanique

Thème

**Simulation numérique d'une opération
d'usinage d'un matériau composite**

Préparé par :

BOURICHA Mohamed Khalil et CHETTAH Ikram

Soutenu publiquement le 27/06/2024, devant le Jury composé de :

M. MADANI Ahmed	Maître Assistant « A » (Univ. Ibn Khaldoun de Tiaret)	Président
M. ATHMANI Houari	Maître Assistant « A » (Univ. Ibn Khaldoun de Tiaret)	Examineur
M. BENAMAR Badr	Maître Assistant « A » (Univ. Ibn Khaldoun de Tiaret)	Examineur
M. HADDOUCHE Kamel	Professeur (Univ. Ibn Khaldoun de Tiaret)	Encadrant

Année universitaire : 2023 - 2024



Dédicace

DÉDICACE

Je dédie ce travail :

À ma chère mère.

Quoi que je fasse ou je dise, je ne saurai point te remercier comme il se doit. Ton affection me couvre, ta bienveillance me guide et ta présence à mes côtés a toujours été ma source de force pour affronter les différents obstacles.

À mon cher père.

Tu as toujours été à mes côtés pour me soutenir et m'encourager, que ce travail traduit ma gratitude et mon affection.

Mohamed.

À vous mes chers parents, je dédie ce modeste travail qui est le fruit de vos interminables conseils, assistance et soutien moral. En témoignage de ma reconnaissance et mon affectation, dans l'espoir que vous en serez fiers.

Je dédie ce travail aussi :

- À mes chères sœurs.
- À mon précieux frère.
- À ma chère cousine.

Ikram.



Remerciements

REMERCIEMENTS

Avant tout, nous remercions Allah tout puissant qui nous a donné la force et la volonté pour pouvoir finir ce modeste travail.

Nous remercions vivement nos familles pour leurs soutiens inestimables.

Nous tenons à remercier notre encadrant Monsieur HADDOUCHE Kamel, Professeur à l'Université Ibn Khaldoun de Tiaret et Directeur de laboratoire de recherche de Technologies Industrielles, pour avoir dirigé notre travail. Ses compétences et ses bonnes directives nous ont aidé à achever notre projet.

Nos remerciements vont aux membres du Jury pour avoir accepté d'examiner notre mémoire.

Enfin, un grand merci à toute personne qui a contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.



Table des matières
Table des matières



Table des matières

Nomenclature

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale1

Chapitre I : Généralité sur les matériaux composites

I.1 Introduction2

I.2 Définition2

I.3 Constituants principaux du matériau composite2

I.3.1 Matrice2

I.3.2 Renfort4

I.3.2.1 Fibres4

I.3.2.2 Particules6

I.4 Architecture de renforcement7

I.5 Structure des matériaux composites8

I.5.1 Monocouches9

I.5.2 Stratifiés9

I.5.3 Sandwichs10

I.6 Classification des matériaux composites13

I.6.1 Classification selon la forme des constituants13

I.6.2 Classification selon la nature des constituants13

I.6.3 Classification selon le taux d'utilisation13

I.7 Charges et additifs14

I.7.1 Charges14

I.7.1.1 Charges renforçantes14

I.7.1.2 Charges non renforçantes15

I.7.2 Additifs15

I.8 Mise en œuvre des matériaux composites15

I.9 Conclusion20

Chapitre II : Procédé de coupe et choix du couple outil-matière

II.1 Introduction21

II.2 Procédés et conditions de coupe21

II.2.1 Types de procédés de coupe21

II.2.1.1 Tournage21

II.2.1.2 Fraisage22

Table des matières

II.2.1.3 Perçage	22
II.2.2 Conditions de coupe.....	23
II.3. Définition de la coupe orthogonale et zones de cisaillement.....	24
II.4 Modélisation de la coupe orthogonale	26
II.4.1 Modélisation analytique.....	26
II.4.2 Modélisation numérique	27
II.5 Choix de couple matière/outil.....	28
II.5.1 Comportement rhéologique du composite cible	29
II.5.2 Critère d'endommagement de Johnson-Cook	30
II.6 Conclusion	30
Chapitre III : Résultats de simulation et interprétation	
III.1 Introduction	31
III.2 Simulation numérique de la coupe du matériau composite cible	31
III.2.1 Propriétés du couple outil-matière et conditions de coupe.....	31
III.2.2 Conception du modèle sur le logiciel Abaqus	31
III.2.2.1 Création des géométries de l'outil et de la pièce	32
III.2.2.2 Introduction des propriétés	33
III.2.2.3 Modules "Assembly" et "Step"	33
III.2.2.4 Définition des interactions.....	34
III.2.2.5 Module "Load"	34
III.2.2.6 Maillage de la pièce et de l'outil (Module "Mesh")	34
III.2.3 Hypothèses du modèle.....	35
III.2.4 Choix de la formulation.....	38
III.3 Résultats de simulation et discussion	38
III.3.1 Cas de simulation avec des particules de forme circulaire.....	38
III.3.2 Cas de simulation avec des particules elliptiques	43
Conclusion générale	48
Annexe	
Références bibliographiques	
Résumé	



Nomenclature

NOMENCLATURE



Nomenclature

Symbole	Désignation	Unité
A, B	Paramètres de Johnson-Cook	MPa
a_p	Profondeur de passe	mm
C, n, m	Paramètres de Johnson-Cook	
D	Diamètre de la pièce	mm
d_1, d_2, d_3, d_4, d_5	Paramètres d'endommagement de Johnson-Cook	
E	Module d'Young	GPa
F_c	Effort de coupe	N
F_f	Effort d'avance	N
F_r	Effort de refoulement	N
f	Avance	mm/tr
i	Angle d'inclinaison d'arête	(°)
N	Fréquence de rotation de la broche	tr/min
V_c	Vitesse de coupe	m/min
V_{cop}	Vitesse du copeau	m/min
V_f	Vitesse d'avance	mm/min
T_f	Température de fusion	°C ou K
T_r	Température ambiante	°C ou K
α	Angle de dépouille	(°)
β	Angle taillant	(°)
γ	Angle de coupe	(°)
ε	Déformation	
ε_f	Déformation de rupture	
ε_c^R	Déformation de compression	
ε_t^R	Déformation de torsion	
$\dot{\varepsilon}$	Vitesse de déformation	s^{-1}
$\dot{\varepsilon}_0$	Vitesse de déformation de référence du matériau usiné	s^{-1}
η	Rapport de la contrainte moyenne sur celle d'écoulement	
θ	Angle d'orientation des fibres	(°)
ρ	Masse volumique	Kg/m^3
σ	Contrainte d'écoulement	MPa
σ_c^R	Contrainte de compression	MPa
σ_t^R	Contrainte de torsion	MPa

Abréviations	
ALE	Arbitraire Lagrangienne-Eulérienne
CMC	Composite à Matrice Céramique
CMM	Composite à Matrice Métallique
CMO	Composite à Matrice Organique
GD	Grande Diffusion
HM	Haut Module
HP	Haute Performance
HR	Haute Résistance
PAN	PolyAcryloNitrile
PCD	PolyCrystalline Diamond
UD	Unidirectionnel
UV	Ultra-Violet



Liste des figures

Liste des figures



Chapitre I : Généralités sur les matériaux composites

Figure I.1 : Composition d'un matériau composite [2].	2
Figure I.2 : Types de matrices [4].	3
Figure I.3 : Types de renforts [4].	4
Figure I.4 : Types de fibres [8], [9].	6
Figure I.5 : Principales orientations des fibres [11].	8
Figure I.6 : Principaux motifs d'armures [12].	8
Figure I.7 : Couches d'un composite UD [14].	9
Figure I.8 : Structure d'un stratifié [14].	9
Figure I.9 : Structure d'un sandwich [18].	10
Figure I.10 : Matériau sandwich à âme pleine (âme en balsa).	11
Figure I.11 : Matériau sandwich à âme pleine (âme en mousse).	11
Figure I.12 : Matériau sandwich à âme creuse (nid d'abeilles).	11
Figure I.13 : Matériau sandwich à âme creuse (âme ondulée).	12
Figure I.14 : Âme en plastique alvéolaire (mousses).	12
Figure I.15 : Âme en nid d'abeille.	12
Figure I.16 : Âme en bois.	12
Figure I.17 : Calandre d'un autobus fabriquée par le procédé de moulage sous vide [22].	14
Figure I.18 : Moulage au contact [25].	16
Figure I.19 : Principe du moulage par projection simultanée [25].	17
Figure I.20 : Moulage sous vide [25].	17
Figure I.21 : Moulage par injection de résine [25].	18
Figure I.22 : Moulage par compression [25].	18
Figure I.23 : Moulage en continu de plaques [25].	18
Figure I.24 : Moulage en continu de panneaux ondulés [25].	19
Figure I.25 : Moulage par pultrusion [25].	19
Figure I.26 : Moulage par centrifugation [25].	19

Chapitre II : Procédé de coupe et choix du coupe outil-matière

Figure II.1 : Procédé de tournage [27].	21
Figure II.2 : Procédé de fraisage [27].	22
Figure II.3 : Procédé de perçage [26].	22
Figure II.4 : Design de l'outil de coupe [29].	24
Figure II.5 : Type d'usinage : (a) orthogonal ; (b) oblique.	24
Figure II.6 : Zones de cisaillement en coupe [28].	25
Figure II.7 : (A) Copeau discontinu ; (B) Copeau continu ; (C) Copeau avec arrête rapportée.	26
Figure II.8 : Constituants relatifs au couple outil-matière [9].	28

Chapitre III : Résultat de simulation et interprétation

Figure III.1 : Géométrie de l'outil.	32
Figure III.2 : Géométrie de la pièce.	32
Figure III.3 : Géométrie de la pièce en matériau composite.	33

Liste des figures

Figure III.4 : Introduction des propriétés de la pièce, des particules et de l'outil.	33
Figure III.5 : Définition des interactions.	34
Figure III.6 : Conditions aux limites et chargement.	34
Figure III.7 : Maillage de la pièce et de l'outil.	35
Figure III.8 : Approximation par le modèle orthogonal [37].	35
Figure III.9 : Température dans la zone de coupe (Pièce fixe).	36
Figure III.10 : Température dans la zone de coupe (Pièce mobile).	36
Figure III.11 : Contraintes de Von-Misès dans la zone de coupe (Pièce fixe).	37
Figure III.12 : Contraintes de Von-Misès dans la zone de coupe (Pièce mobile).	37
Figure III.13 : Température dans la zone de coupe (Formulation ALE).	38
Figure III.14 : Température pour $V_c = 200$ m/min ($\gamma = 5^\circ$ et $f = 0.1$ mm/tr).	39
Figure III.15 : Contraintes de Von-Misès pour $V_c = 200$ m/min ($\gamma = 5^\circ$ et $f = 0.1$ mm/tr).	39
Figure III.16 : Température pour $V_c = 300$ m/min ($\gamma = 5^\circ$ et $f = 0.1$ mm/tr).	40
Figure III.17 : Contraintes de Von-Misès pour $V_c = 300$ m/min ($\gamma = 5^\circ$ et $f = 0.1$ mm/tr).	40
Figure III.18 : Température pour $f = 0.15$ mm/tr ($\gamma = 5^\circ$ et $V_c = 300$ m/min).	41
Figure III.19 : Contraintes de Von-Misès pour $f = 0.15$ mm/tr ($\gamma = 5^\circ$ et $V_c = 300$ m/min).	41
Figure III.20 : Température pour $\gamma = -5^\circ$ ($V_c = 300$ m/min et $f = 0.1$ mm/tr).	42
Figure III.21 : Contraintes de Von-Misès pour $\gamma = -5^\circ$ ($V_c = 300$ m/min et $f = 0.1$ mm/tr).	42
Figure III.22 : Température pour $V_c = 300$ m/min ($\gamma = 5^\circ$ et $f = 0.1$ mm/tr).	43
Figure III.23 : Contraintes de Von-Misès pour $V_c = 300$ m/min ($\gamma = 5^\circ$ et $f = 0.1$ mm/tr).	44
Figure III.24 : Température pour $V_c = 400$ m/min ($\gamma = 5^\circ$ et $f = 0.1$ mm/tr).	44
Figure III.25 : Contraintes de Von-Misès pour $V_c = 400$ m/min ($\gamma = 5^\circ$ et $f = 0.1$ mm/tr).	45
Figure III.26 : Température pour $f = 0.05$ mm/tr ($\gamma = 5^\circ$ et $V_c = 300$ m/min).	45
Figure III.27 : Contraintes de Von-Misès pour $f = 0.05$ mm/tr ($\gamma = 5^\circ$ et $V_c = 300$ m/min).	46
Figure III.28 : Température pour $\gamma = 0^\circ$ ($V_c = 300$ m/min et $f = 0.1$ mm/tr).	46
Figure III.29 : Contraintes de Von-Misès pour $\gamma = 0^\circ$ ($V_c = 300$ m/min et $f = 0.1$ mm/tr).	47



Liste des tableaux
Liste des tableaux



Chapitre I : Généralités sur les matériaux composites

Tableau I.1 : Caractéristiques des résines thermodurcissables..... 3
Tableau I.2 : Caractéristiques des résines thermoplastiques. 4

Chapitre II : Procédé de coupe et choix du couple outil-matière

Tableau II.1 : Paramètres de comportement de Johnson-Cook..... 29
Tableau II.2 : Paramètres d'endommagement de Johnson-Cook. 30
Tableau II.3 : Propriétés de la pièce et de l'outil de coupe [36]. 31
Tableau II.4 : Paramètres de coupe et géométrie de l'outil [36]. 31

Chapitre III : Résultat de simulation et interprétation

Tableau III.1 : Variation de la température et des contraintes avec la vitesse de coupe (FC). 40
Tableau III.2 : Variation de la température et des contraintes avec l'avance (FC). 42
Tableau III.3 : Variation de la température et des contraintes avec l'angle de coupe (FC). ... 43
Tableau III.4 : Variation de la température et des contraintes avec la vitesse de coupe (FE). 45
Tableau III.5 : Variation de la température et des contraintes avec l'avance (FE). 46
Tableau III.6 : Variation de la température et des contraintes avec l'angle de coupe (FE). ... 47



Introduction générale

INTRODUCTION GÉNÉRALE



Les développements de la société humaine poussent sans cesse la science à trouver de meilleures réponses aux besoins croissants de cette même société. Des besoins qui cherchent toujours à repousser les performances. C'est dans cette optique que les matériaux composites ont été créés car les caractéristiques des matériaux classiques ne suffissent plus. Les matériaux composites remplacent de plus en plus les matériaux classiques. Ils sont utilisés dans différents secteurs d'activité [1]. Ils deviennent des matériaux de choix primordial dans de nombreux domaines tels que l'aérospatiale, l'aéronautique, l'automobile, etc. Cela est dû aux nombreux avantages que possèdent les matériaux composites notamment la légèreté, la résistance mécanique et chimique, l'aptitude à remplir plusieurs fonctions, etc.

La complexité croissante des géométries et matériaux des produits fabriqués rend le processus d'usinage et, en particulier, le procédé de coupe un défi majeur dans le domaine de la fabrication mécanique. Pour répondre à ce souci, il est essentiel de faire un choix judicieux des conditions de coupe. Ces dernières sont souvent déterminées par les opérateurs à partir de tables et abaques et en se référant à leur propre expérience. Ceci peut conduire à des résultats imprécis ; comme alternative pour contourner cette imprécision, c'est de recourir à la modélisation et à la simulation.

À cet effet et à travers la présente étude, nous souhaitons contribuer à l'amélioration des performances du procédé de coupe d'un matériau composite cible, et ce par la modélisation et la simulation de sa coupe orthogonale. Le composite est à base métallique en aluminium, renforcé par des particules en carbure de silicium.

Le mémoire est organisé principalement en trois chapitres.

✓ Dans le premier chapitre, nous allons présenter des généralités sur les matériaux composites ; à savoir : la définition, la constitution, l'architecture de renforcement, la structure, la classification, et le procédé de leur élaboration.

✓ Le second chapitre sera réservé à des généralités sur le procédé de coupe ; à savoir : les différents types de ce procédé, les conditions de coupe, la formation du copeau et la configuration de coupe orthogonale. Aussi, les lois régissant le comportement des matériaux usinés seront abordées.

✓ Le troisième chapitre sera relatif à la simulation numérique en coupe orthogonale pour analyser le comportement thermomécanique du matériau composite cible sous différentes conditions de coupe et formes des particules. En simulation, l'approche Lagrangienne a été adoptée tout en utilisant le logiciel Abaqus.



CHAPITRE I

CHAPITRE I

Généralités sur les matériaux composites



I.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons aborder des généralités sur les matériaux composites ; à savoir : leur définition, les principaux constituants qui les composent, leur architecture de renforcement et leur structure. Puis, nous allons évoquer leur classification pour mieux comprendre leur diversité ainsi que leurs modes d'élaboration. Cette modeste exploration fournira au lecteur les notions nécessaires à la compréhension des matériaux composites et de leur application dans divers domaines industriels.

I.2 Définition

Un matériau composite est un assemblage ou un mélange hétérogène d'au moins deux composants, non miscibles mais ayant une forte capacité d'interpénétration et d'adhésion, dont les propriétés mécaniques se complètent. Le nouveau matériau ainsi constitué possède des propriétés avantageuses que les composants seuls ne possèdent pas [2]. Un composite est constitué d'un renfort (ossature du matériau) et d'une matrice (enveloppe ou peau du matériau) généralement polymérique ou métallique.

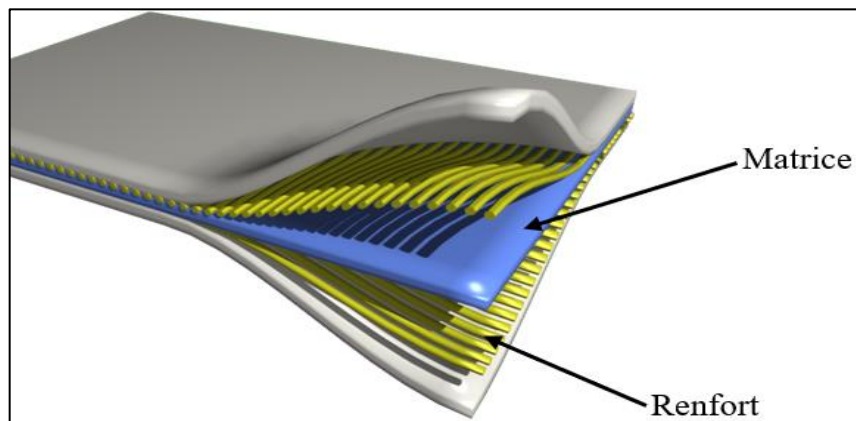


Figure I.1 : Composition d'un matériau composite [2].

De nos jours, les matériaux composites jouent un rôle très important dans le développement des technologies. Ces matériaux se caractérisent principalement par leur légèreté et leur résistance physique. L'évolution des matériaux composites est essentiellement dû aux besoins croissants de l'industrie, notamment, dans les domaines de l'énergie, l'aéronautique, le transport, etc.

I.3 Constituants principaux du matériau composite

I.3.1 Matrice

La matrice permet, d'une part, de garder la disposition géométrique des renforts, et,

d'autre part, de transmettre les sollicitations que subit la structure. De plus, elle assure une résistance à la propagation des fissures et contribue à l'amélioration des propriétés de cisaillement du composite. La déformabilité, la bonne compatibilité avec les fibres et une masse volumique faible sont les trois qualités que la matrice doit avoir [3].

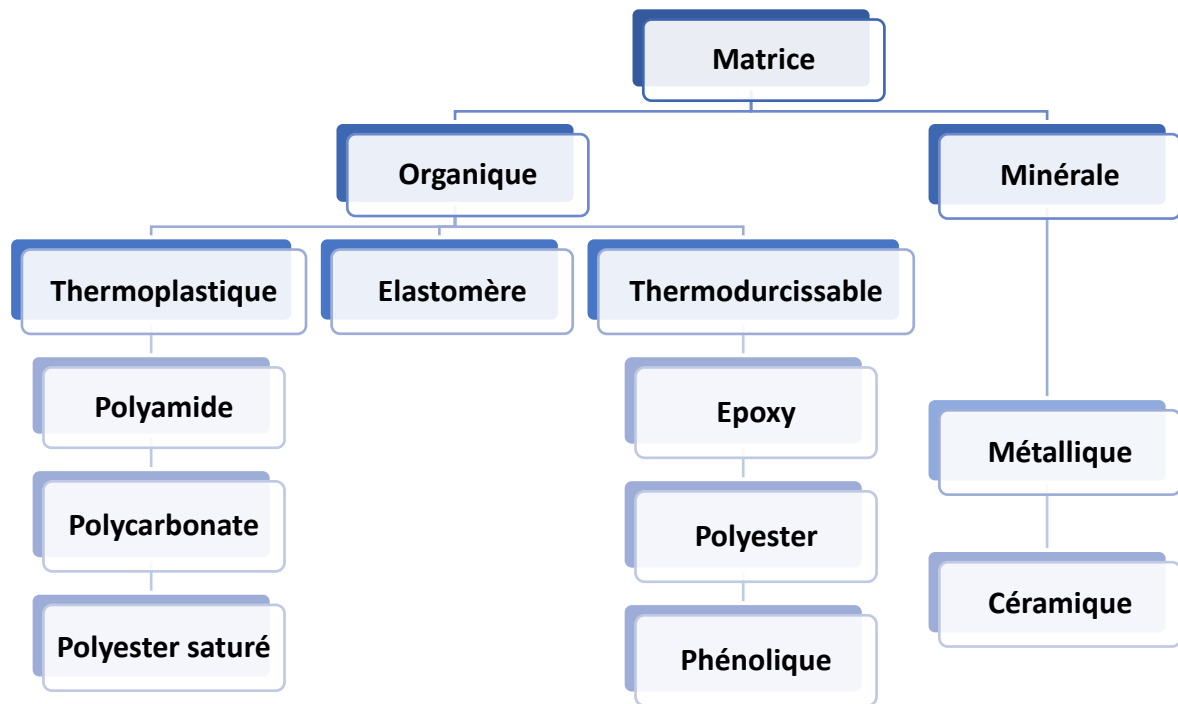


Figure I.2 : Types de matrices [4].

Pour les matrices thermodurcissables et thermoplastiques, la résine est l'élément de base qui se présente sous trois types ; à savoir [5] :

➤ **Les résines thermodurcissables** qui sont les polyesters, les phénoliques, et les époxydes.

	T_f (°C)	ρ (kg/m ³)	ε_t^R (%)	σ_t^R (MPa)	σ_c^R (MPa)	E (GPa)
Polyesters	60 à 100	1140	2 à 5	50 à 85	90 à 200	2.8 à 3.6
Phénoliques	120	1200	2.5	40	250	3 à 5
Epoxydes	290	1100 à 1500	2 à 5	60 à 80	250	3 à 5

Tableau I.1 : Caractéristiques des résines thermodurcissables.

➤ **Les résines thermoplastiques** qui sont des polymères pouvant être alternativement ramollis par chauffage et durcis par refroidissement dans un intervalle de température spécifique. Les résines thermoplastiques présentent l'aptitude à l'état ramolli de se mouler aisément par plasticité. Quelques variantes de résine thermoplastique très appliquées d'un matériau composite : PA, PET, PBT, PC, PPS, etc.

	T_f (°C)	ρ (kg/m ³)	ϵ_t^R (%)	σ_t^R (MPa)	σ_c^R (MPa)	E (GPa)
Polyamide	65 à 100	1140		60 à 85		1.2 à 2.5
Polypropylène	900	1200		20 à 35		1.1 à 1.4

Tableau I.2 : Caractéristiques des résines thermoplastiques.

I.3.2 Renfort

Les renforts assurent les propriétés mécaniques du matériau composite. Un grand nombre de renforts sont disponibles sur le marché en fonction des coûts de revient recherchés pour la structure à réaliser. La classification des types de renforts couramment rencontrés est indiquée sur la figure suivante.

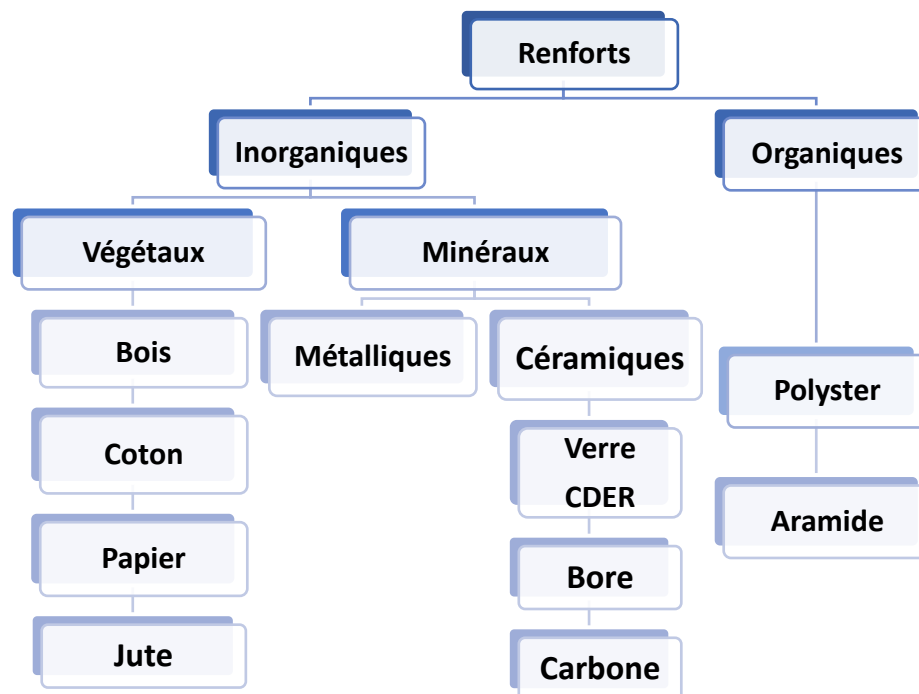


Figure I.3 : Types de renforts [4].

On distingue principalement deux formes du renfort ; à savoir les fibres et les particules.

I.3.2.1 Fibres

Les fibres se présentent sous les formes suivantes : linéique (fils, mèches), tissus surfaciques (tissus, mats), multidirectionnelle (tresse, tissus complexes, tissage tri-directionnel ou plus) [6]. On retrouve :

➤ **Les fibres de basalte**

La fibre de basalte, trois fois plus chère que la fibre de verre, est une fibre naturelle issue de la roche volcanique [7]. Cette roche formée à partir de magma refroidi confère des propriétés

exceptionnelles à la fibre de basalte. Elle est plus légère et plus résistante que la fibre de verre. Très utilisée dans l'automobile pour ses propriétés thermiques, elle est incombustible, possède de bonnes propriétés mécaniques et couvre une large plage de température qui lui confère un réel avantage en matière d'isolation thermique : -260 °C à +1200 °C. D'autre part, elle est imperméable et résiste aux radiations, aux acides ainsi qu'aux UV.

➤ **Les fibres de céramiques**

Les matériaux composites de type céramique sont souvent constitués de renforts et de matrices en céramique. Les fibres sont élaborées par dépôt chimique en phase vapeur sur un fil support. On retrouve ces fibres dans des applications où la température est très élevée entre 500 °C et 2 000 °C. Ces matériaux sont utilisés notamment dans les parties chaudes des moteurs [6].

Quelques exemples de fibres céramiques [8] :

- ❖ Fibre de bore de haut module et insensibles à l'oxydation à hautes températures, elles sont obtenues par dépôt en phase gazeuse sur un substrat en tungstène.
- ❖ Fibre de silice (ou de quartz) qui sont produites comme les fibres de verre, par fusion, et sont essentiellement utilisées pour leur haute tenue chimique et thermique dans les tuyères pour les moteurs de fusée.

➤ **Les fibres d'aramide**

Les fibres aramides ont des propriétés mécaniques élevées en traction comme les carbonés, mais leur résistance à la compression est faible. La faible tenue mécanique en compression est généralement attribuée à une mauvaise adhérence des fibres à la matrice dans le matériau composite. L'utilisation de composites à fibres hybrides permet également de remédier aux faiblesses des composites à fibres aramides [7].

On distingue deux types de fibres [8] :

- ❖ Fibres à bas module utilisées pour les gilets pare-balles.
- ❖ Fibres à haut module employées dans le renforcement pour les composites à hautes performances.

➤ **Les fibres de verre**

Les fibres de verre ont un excellent rapport performance/prix qui les placent au premier rang des renforts utilisés actuellement dans la construction de structures composites [7]. Elles sont obtenues à partir de sable (silice) et d'additifs (alumine, carbonate de chaux, oxyde de bore, etc.).

On distingue trois types de fibres [8] :

- ❖ E : pour les composites de grande diffusion et les applications courantes.

- ❖ R : pour les composites hautes performances.
- ❖ D : pour la fabrication de circuits imprimés (propriétés diélectriques).

➤ **Les fibres de carbone**

Les fibres de carbone ont de très fortes propriétés mécaniques et sont élaborées à partir d'un polymère de base, appelé précurseur. Actuellement, les fibres utilisées comme précurseurs sont des fibres acryliques élaborées à partir du PolyAcryloNitrile (PAN). La qualité des fibres de carbone finale dépend fortement de celle du précurseur. Dans le principe d'élaboration, le PAN subit un traitement thermique sans fusion des fibres aboutissant à une graphitisation. Le brai, qui est un résidu de raffinerie issu du pétrole ou de la houille, est également utilisé pour produire des fibres de carbone [7].

On distingue deux types de fibres [8] :

- ❖ Fibres haute résistance (HR)
- ❖ Fibres haut module (HM)

➤ **Les fibres de polyéthylène de haut module**

Elles présentent une très bonne résistance à la traction mais une mauvaise mouillabilité. Pour des structures peu sollicitées, on peut encore utiliser des fibres synthétiques courantes de polyamide ou polyester [8].

La figure qui suit reporte les différents types de fibres.

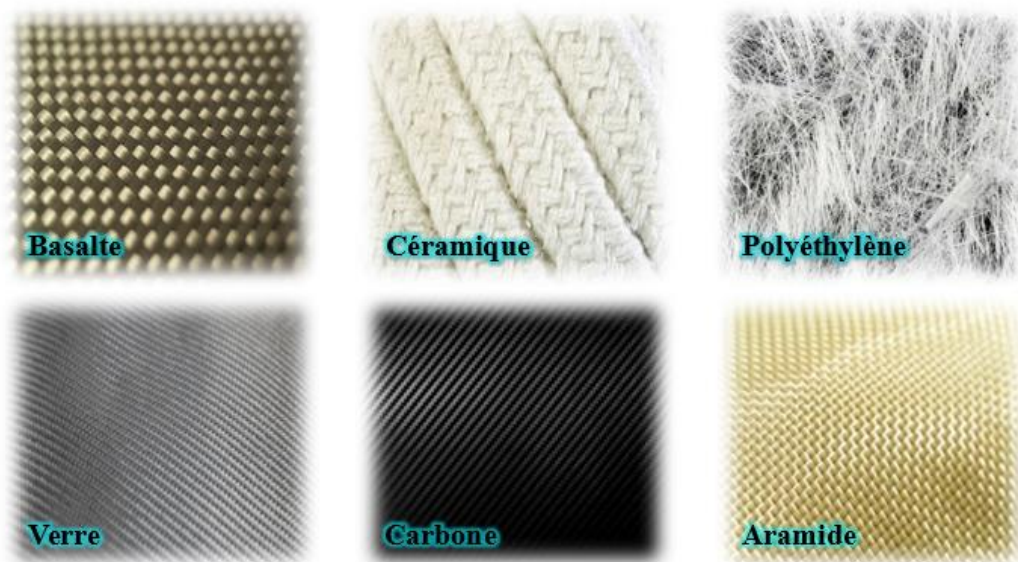


Figure I.4 : Types de fibres [8], [9].

I.3.2.2 Particules

Les composites renforcés par des particules sont classés en deux groupes [10] :

- Par des grosses particules (béton, polymères chargés, ...) : la géométrie des particules peut varier mais leurs dimensions demeurent similaires dans toutes les directions. Pour les composites renforcés par des grosses particules, l'interaction entre la matrice et le renfort se font à une échelle macroscopique. On peut supposer que la matrice et le renfort sont deux matériaux en contact parfait permettant ainsi l'utilisation de la loi des mélanges pour calculer les propriétés du composite résultant.

- Par dispersion : dans ces composites, de fines particules d'une matière inerte et de proportions très faibles sont dispersés généralement dans des matrices métalliques. Pour les composites renforcés par dispersion, les interactions matrice/renfort se font à l'échelle microscopique. Des interactions à l'échelle moléculaire peuvent exister entre la matrice et le renfort rendant imprécis l'utilisation de la loi des mélanges pour estimer les propriétés du composite.

I.4 Architecture de renforcement

Afin d'améliorer les caractéristiques mécaniques des structures en composites, il est nécessaire de jouer sur la texture des renforts (leur architecture) pour créer une charpente résistante adaptée aux contraintes mécaniques. En fonction des propriétés recherchées, on rencontre plusieurs architectures de renforcements [11].

➤ **Unidirectionnelle**

Les fibres sont orientées dans une même direction ; elles sont parallèles et peuvent se présenter sous deux formes : sans liaison particulière (roving), et reliées par un fil (nappes).

➤ **Multidirectionnelle aléatoire**

Il est possible de fabriquer des composites avec des fibres disposées dans trois directions. Par construction tous les composites sont fortement anisotropes puisque la rigidité et la résistance des fibres sont de l'ordre de 50 à 100 fois supérieures à celles des résines. Elles peuvent se présenter sous les formes :

- ❖ Fibres coupées et broyées, sans arrangement particulier.

- ❖ Feutre de fibres agglomérées par un liant : le mat peut être à fibres courtes (longueur inférieure à 50 mm) sans orientation particulière ou à fibres continues.

➤ **Orientée**

Le tissu comporte des fils de chaîne ou de trame (fibres bidirectionnelles) ; suivant le mode de croisement de la trame et de la chaîne, le tissu sera une toile, un sergé ou un satin. On réalise également pour des applications particulières (aérospatiale, défense) des armatures de

renforcements bidimensionnelles ou tridimensionnelles. On réalise aussi des plaques ou coques dont la raideur et la résistance varient avec la direction de la sollicitation.

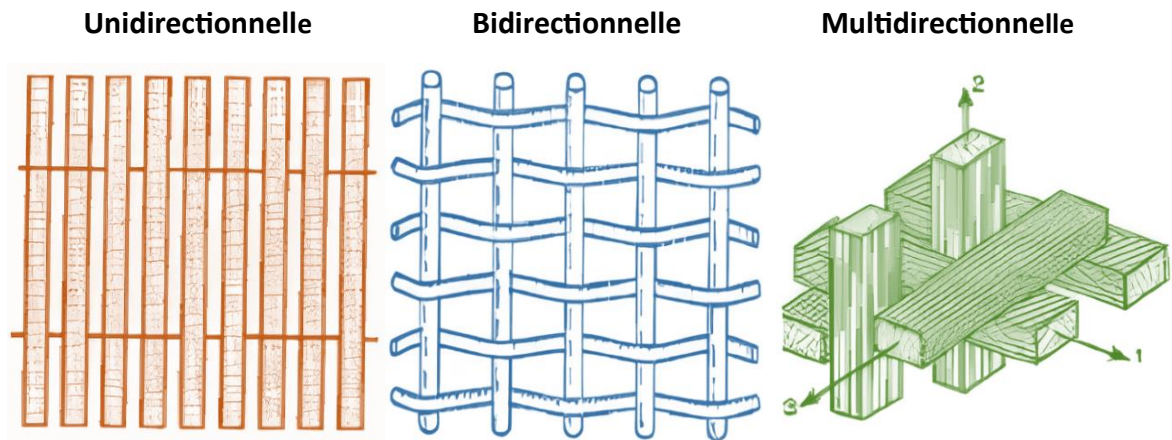


Figure I.5 : Principales orientations des fibres [11].

➤ **Taffetas [13]**

Dans lequel les fibres de chaîne et trame s'entrecroisent alternativement pour obtenir un tissu peu déformable ayant une planéité excellente.

➤ **Sergé [13]**

Est intermédiaire de taffetas et de satin ; un fil de chaîne passe sous plusieurs fils de trame successifs puis en dessus d'un fil de trame en suivant un schéma régulier. Ce type d'armure produit un motif diagonal ; ces tissus sont à la fois denses et souples.

➤ **Satin [13]**

Le fil de chaîne flotte au-dessus de plusieurs fils de trame ; cette forme est la plus déformable et elle est utilisée pour réaliser des formes complexes.

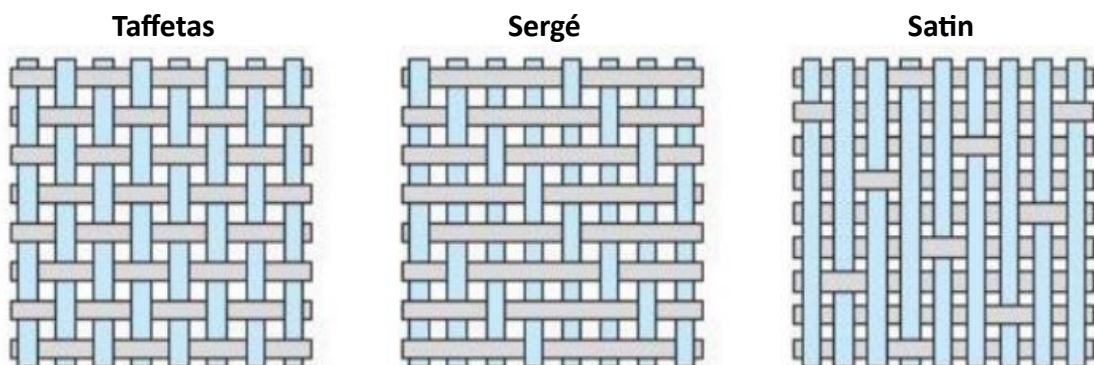


Figure I.6 : Principaux motifs d'armures [12].

I.5 Structure des matériaux composites

Il existe trois types de structure des matériaux composites : les monocouches, les stratifiés

et les sandwichs.

I.5.1 Monocouches

Les monocouches sont formées de deux constituants ou plus ; l'usage de l'expression « couche mixte » en ce sens est déconseillé [13]. Les monocouches représentent l'élément de base de la structure composite. Les différents types de monocouches sont caractérisés par la forme du renfort : à fibres longues (unidirectionnelles UD, réparties aléatoirement), à fibres tissées ou à fibres courtes [14].

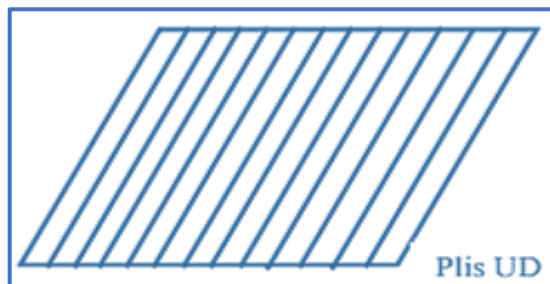


Figure I.7 : Couches d'un composite UD [14].

I.5.2 Stratifiés

La stratification est une autre structure couramment rencontrée dans les pièces composites. Dans un stratifié, les fibres sont agencées en couches fines (quelques dixièmes de millimètre) nommés plis qui sont empilées les unes sur les autres. Après la mise en forme, ces couches seront liées entre elles par l'intermédiaire de la matrice. Au sein d'un pli, les renforts peuvent avoir n'importe quel type de disposition [15].

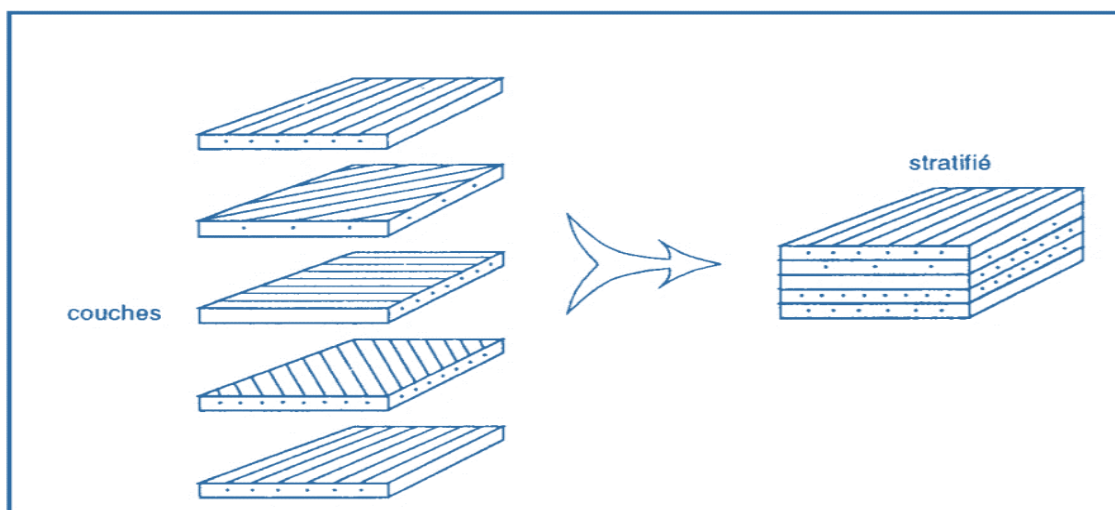


Figure I.8 : Structure d'un stratifié [14].

On pourra avoir des stratifiés de types [14] :

- ❖ Équilibré : stratifié comportant autant de couches orientées suivant la direction $+\theta$ que des couches orientées suivant $-\theta$.
- ❖ Symétrique : stratifié comportant des couches disposées symétriquement par rapport à un plan moyen.
- ❖ Orthogonal : comportant autant de couches à 0° que de couches à 90° .

I.5.3 Sandwichs

Une structure sandwich est une forme spéciale des composites laminés composés par différents matériaux collés les uns contre les autres dont le but est de compenser les propriétés de chaque composant permettant ainsi d'améliorer le comportement de toute la structure [16]. Ainsi, un panneau sandwich est une structure fabriquée à partir de 3 couches : une âme de faible densité insérée entre deux peaux fines et rigides. Cette composition de sandwich permet d'avoir une excellente performance mécanique avec un minimum de masse [17]. La meilleure rigidité d'un panneau sandwich est atteinte grâce à l'interaction de ses composants sous l'application d'une charge de flexion sur le panneau. En effet, l'âme prend le chargement en cisaillement en créant une distance entre les peaux qui prennent à leur tour les chargements dans le plan, l'une en traction et l'autre en compression. Un exemple de structure sandwich à base de nid d'abeilles est présenté sur la figure qui suit.

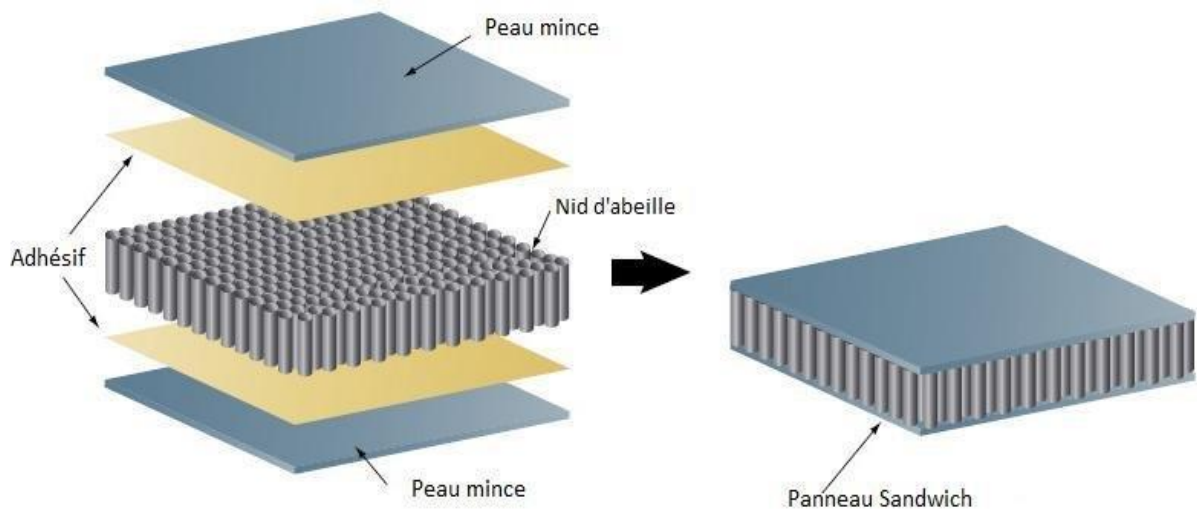


Figure I.9 : Structure d'un sandwich [18].

Les composites sandwichs les plus couramment utilisés sont les âmes, on distingue deux types :

➤ **Âme pleine [19]**

Parmi lesquelles on retrouve : le balsa ou bois cellulaire, diverses mousses cellulaires, et

des résines chargées de microsphères de verres appelés mousses syntactiques.

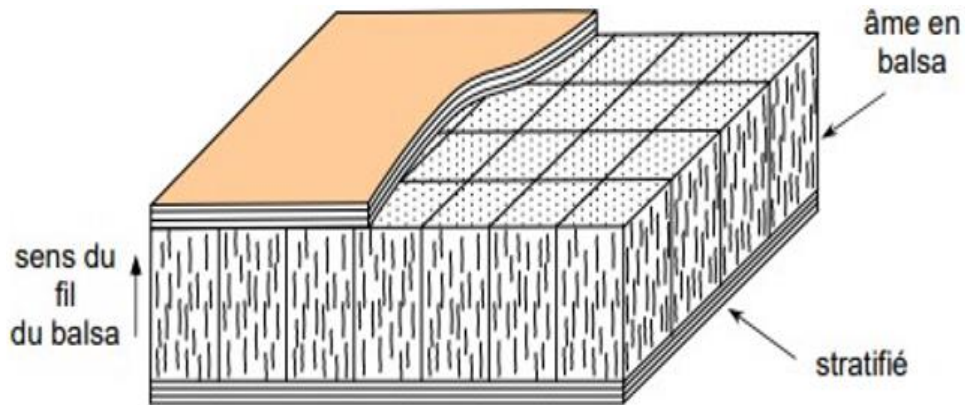


Figure I.10 : Matériau sandwich à âme pleine (âme en balsa).

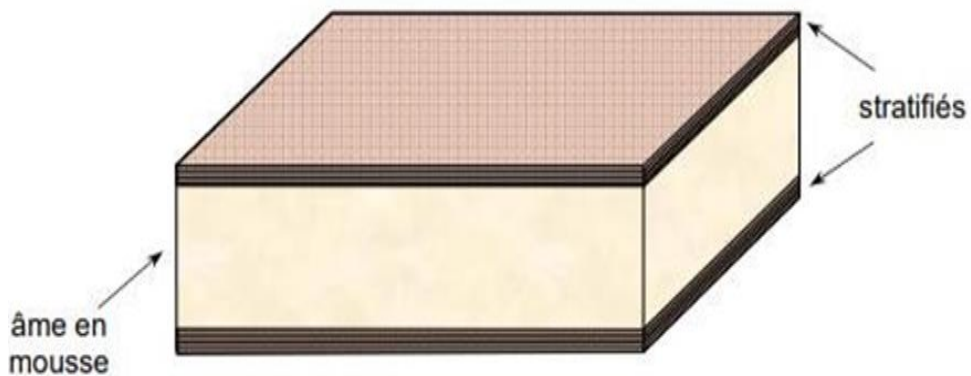


Figure I.11 : Matériau sandwich à âme pleine (âme en mousse).

➤ Âme creuse [19]

Essentiellement en nid d'abeilles et profilés :

- ❖ Des maillages métalliques légers.
- ❖ Du papier kraft (enduit ou non de résine phénolique).
- ❖ Du papier polyamide, type papier Nomex (fibres aramide).

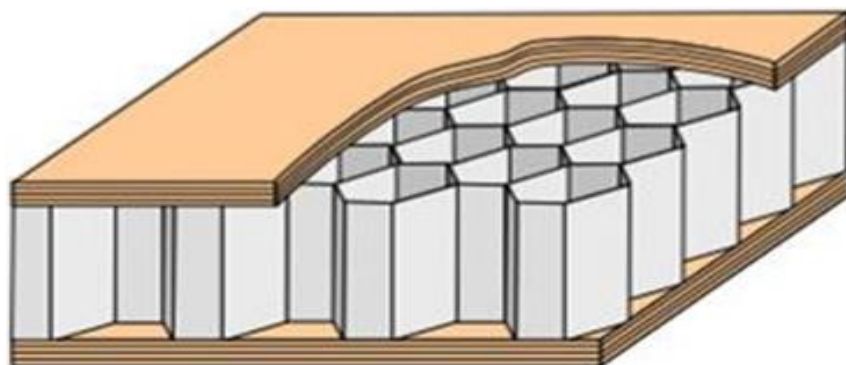


Figure I.12 : Matériau sandwich à âme creuse (nid d'abeilles).

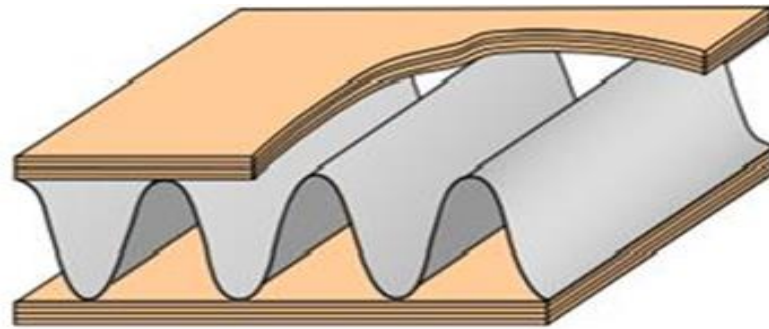


Figure I.13 : Matériau sandwich à âme creuse (âme ondulée).

Les âmes utilisées pour la fabrication de structures sandwich peuvent être de différentes natures ; les plus courantes sont reportées sur les figures qui suivent [7].



Figure I.14 : Âme en plastique alvéolaire (mousses).

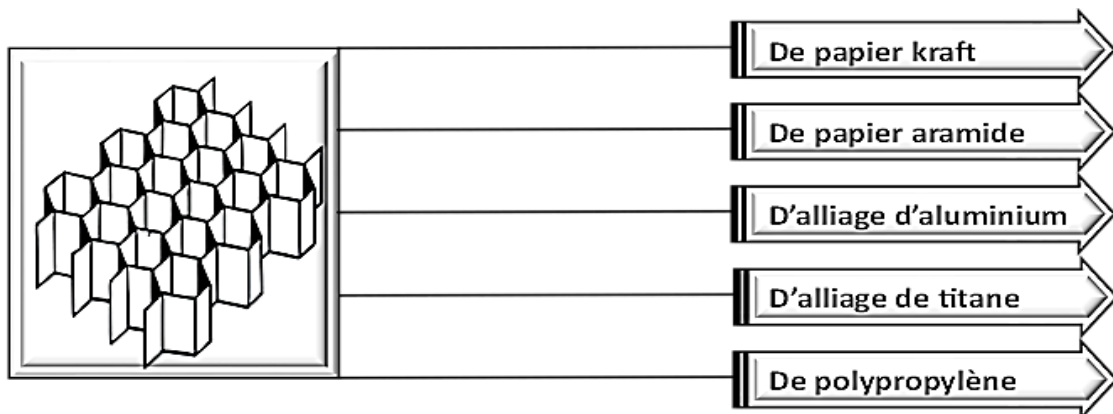


Figure I.15 : Âme en nid d'abeille.

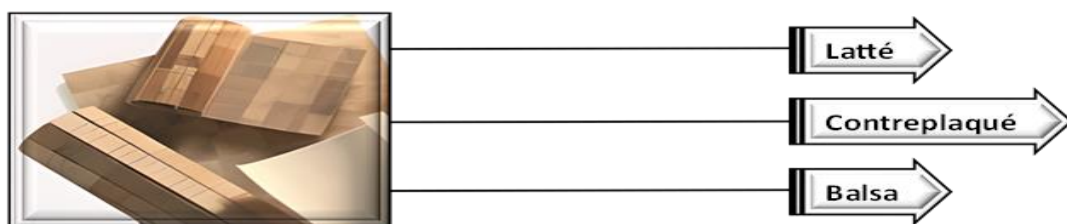


Figure I.16 : Âme en bois.

I.6 Classification des matériaux composites

I.6.1 Classification selon la forme des constituants

On peut classer les composites selon la forme du renfort en deux grandes classes [20] :

➤ **Composites à fibres**

Un matériau composite à fibres est un matériau renforcé par des fibres (longues, courtes ou coupées) dont l'orientation et l'arrangement permettent de modifier les propriétés mécaniques de ce composite.

➤ **Composites à particules**

Un matériau composite à renfort de particules est un composite chargé de particules ne possédant ni dimensions ni formes bien précises. L'utilisation de ce type de matériau est limitée ; les particules sont utilisées pour réduire le coût du matériau tout en améliorant ses propriétés mécaniques.

I.6.2 Classification selon la nature des constituants

Les matériaux composites sont classés selon la nature des constituants comme suit [21] :

➤ **Composites à matrice métallique (CMM)**

Les composites à matrice métallique ont été élaborés pour tenter de concilier les qualités des métaux avec la légèreté et les bonnes caractéristiques mécaniques propres aux structures composites. Ce sont des matériaux performants, mais pénalisés par un coût de revient encore élevé et réservés à des applications relativement exigeantes.

➤ **Composites à matrice organique (CMO)**

Il s'agit, de loin des composites les plus répandus ; ce sont en effet les seuls composites ayant, pour beaucoup d'entre eux, des coûts unitaires suffisamment réduits pour pouvoir être produits en grandes séries.

➤ **Composites à matrice céramique (CMC)**

Beaucoup moins répandus que leurs homologues à matrice organique en raison de leur coût élevé. Les CMC s'adressent aux applications à très haute température ; ils sont principalement utilisés dans l'industrie spatiale et l'aéronautique militaire ainsi que pour la conception d'organes de haute gamme comme les disques ou plaquettes de freins.

I.6.3 Classification selon le taux d'utilisation

➤ **Les composites à grande diffusion (GD)**

Les composites à grande diffusion (GD) possèdent des caractéristiques mécaniques

souvent inférieures à celle des matériaux de références tels que l'acier. Ils sont utilisés pour leur prix de revient global (matière + mise en œuvre) attractif et leur faible poids [22]. De plus, les procédés de fabrication utilisés permettent d'obtenir des pièces de formes complexes en une seule opération. Ce type de matériaux, généralement à base de fibres de verre, convient parfaitement aux grandes séries telles que celles rencontrées dans l'industrie des transports.

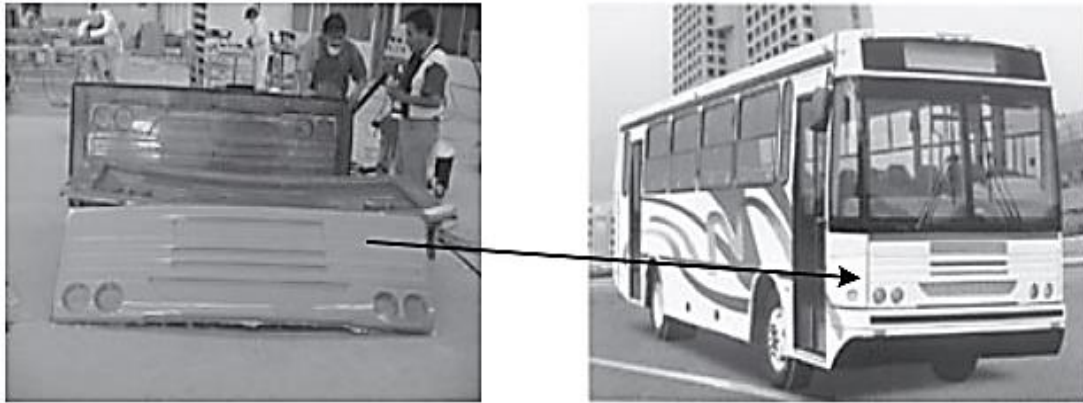


Figure I.17 : Calandre d'un autobus fabriquée par le procédé de moulage sous vide [22].

➤ Les composites à haute performance (HP)

Les composites à haute performance se caractérisent, d'une part, par leurs propriétés mécaniques plus élevées que celles des composites GD, et, d'autre part, par un coût global plus important en raison du prix des matériaux utilisés et des moyens de fabrication associés [22]. Les CMO HP sont le plus souvent utilisés en place des métaux et alliages métalliques. On retrouve les composites HP dans les applications de pointe telles que la compétition Formule 1, l'aéronautique, les bateaux de compétition, les loisirs, etc.

I.7 Charges et additifs

Pour améliorer les caractéristiques mécaniques et physiques, faciliter la mise en œuvre et réduire le coût, il faut ajouter d'autres produits tels que les charges et additifs [23].

I.7.1 Charges

I.7.1.1 Charges renforçantes

Elles sont incorporées aux résines pour améliorer leurs caractéristiques mécaniques ; selon leur forme géométrique, elles sont classées en :

❖ Charges sphériques : Sphères de faible diamètre, de 10 à 150 μm généralement, appelées aussi microbilles. La forme sphérique évite les concentrations de contraintes dans la matrice et diminue par conséquent sa sensibilité à la fissuration. Les microbilles de verre

creuses représentent 99% des charges sphériques utilisées.

❖ Charges non sphériques : Le mica sous forme d'écaillés est le matériau le plus utilisé. Des écaillés de dimensions allant de 100 à 500 μm et d'une épaisseur de 1 à 20 μm sont incorporées à des résines thermoplastiques ou thermodurcissables pour des applications électriques et électroniques.

I.7.1.2 Charges non renforçantes

Les charges non renforçantes sont ajoutées pour diminuer le coût de la résine sans altérer ses performances ou bien pour améliorer certaines de ses propriétés.

❖ Charges de faible coût : Extraites de roches ou de minerais (carbonates, silicates, silices, etc.), leur incorporation augmente le module d'élasticité, la dureté et la stabilité dimensionnelle mais diminue la résistance à la traction et à la flexion.

❖ Charges ignifugeantes : Ont pour rôle de réduire ou d'empêcher la combustion de la résine.

❖ Charges conductrices et antistatiques : Ces charges sont utilisées pour rendre la matrice conductrice de chaleur et d'électricité dans certaines applications.

I.7.2 Additifs

➤ **Lubrifiants et agents de démoulage** : Ils sont utilisés pour faciliter le façonnage de la résine et réduire sa tendance à adhérer aux moules.

➤ **Pigments et colorants** : En fonction de la nature de la résine et de l'utilisation du matériau composite, ce dernier est coloré soit par des pigments (particules insolubles d'oxydes ou de sels métalliques) dispersés dans une pâte, soit par des colorants (composés organiques solubles dans l'eau ou dans un solvant).

➤ **Agents anti-retraits** : Le retrait de la résine après polymérisation peut aboutir à un mauvais état de surface, à un gauchissement ou à des microfissurations des pièces moulées. L'ajout de produits spécifiques anti-retrait, à base de thermoplastiques ou d'élastomères, permet de diminuer ou même d'annuler le phénomène.

➤ **Agents anti-ultraviolets** : Ils ont pour rôle de protéger la résine des rayons ultraviolets contenus dans le rayonnement solaire. En les absorbant, ils évitent une dégradation prématurée de la résine par rupture de liaisons atomiques ou par photo-oxydation.

I.8 Mise en œuvre des matériaux composites

Il existe plusieurs méthodes permettant d'élaborer des pièces en composite ; ces méthodes

dépendent de la nature de la combinaison recherchée matrice/renfort. Nous allons reporter quelques techniques de mise en œuvre des matériaux composite constitués de matrice organique renforcée par des fibres [24].

➤ **Moulage sans pression**

Ces méthodes permettent la réalisation de pièces en petites et moyennes séries, sans restriction de formes et dimensions. Bien que la proportion de fibres puisse varier, elle reste toutefois limitée. Les pièces comportent une seule face lisse, reproduisant l'aspect du moule. Enfin, la qualité de la pièce moulée dépend dans une large mesure du savoir-faire du mouleur. On retrouve le moulage au contact et le moulage par projection simultanée.

❖ **Moulage au contact** : Cette méthode de mise en œuvre est la première à avoir été employée dans le moulage des résines de polyesters insaturés renforcées. Elle est généralement pratiquée soit pour réaliser des pièces unitaires, soit pour des séries pouvant aller jusqu'à un millier de pièces par an.

La méthode de moulage au contact consiste à disposer successivement sur un moule :

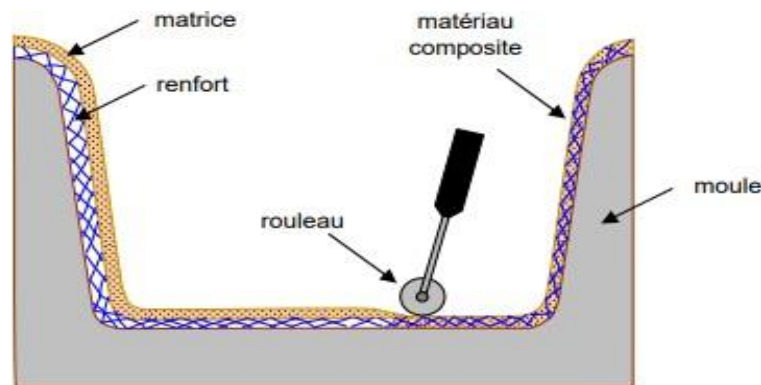


Figure I.18 : Moulage au contact [25].

- Un agent de démoulage et du gel.
- Une couche de résine thermodurcissable liquide de viscosité aux alentours de 0.35 Pa·s.
- Une couche de renfort (verre, aramide, carbone, etc.) sous forme de mat à fils coupés ou de tissu, et à réaliser l'imprégnation du renfort par une opération manuelle à l'aide d'un rouleau ou d'une brosse.

Cette opération est répétée autant de fois qu'il y a de couches de renfort afin d'obtenir l'épaisseur et la structure désirées.

❖ **Moulage par projection simultanée** : Le procédé consiste à projeter simultanément sur le moule les fibres de verre coupées généralement à 30 mm de longueur et la résine nécessaire à leur imprégnation. Après projection sur le moule, un travail manuel de roulage est

nécessaire pour bien plaquer ou compacter le mélange verre-résine sur le moule et éliminer au maximum les bulles générées par le système de projection.

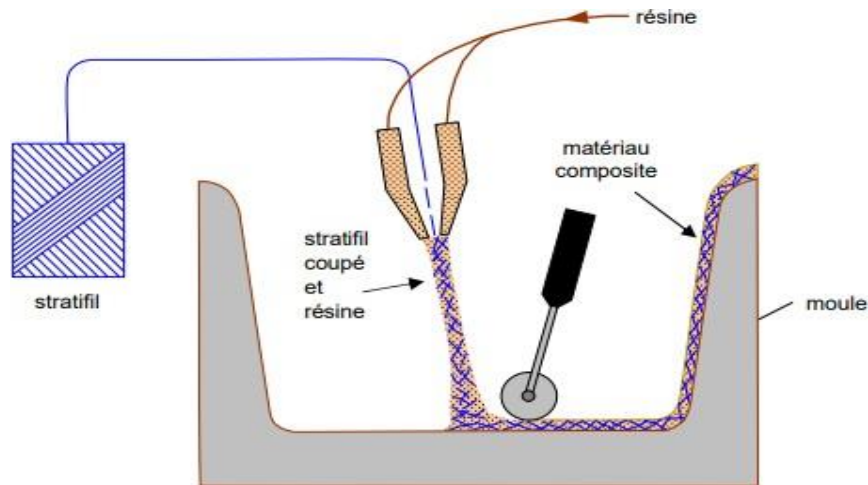


Figure I.19 : Principe du moulage par projection simultanée [25].

➤ Moulage sous vide

Le principe du moulage sous vide consiste à utiliser le vide pour permettre l'imprégnation progressive du renfort par la résine entre un moule (matrice) et un contre-moule (poinçon).

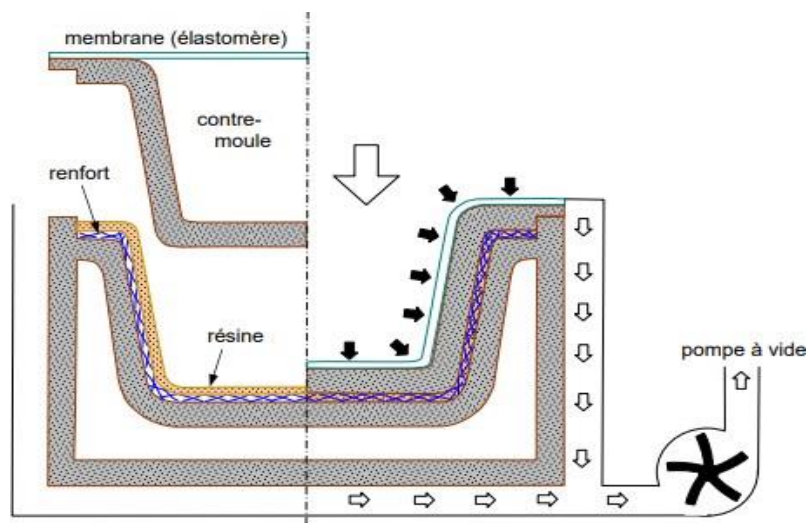


Figure I.20 : Moulage sous vide [25].

➤ Moulage par compression

Pour ce type de moulage, on retrouve le moulage par injection de résine et celui par compression.

❖ Moulage par injection de résine : Ce procédé consiste à remplir l'empreinte d'un moule rigide et fermé par injection d'une résine en un ou plusieurs points selon l'importance de la pièce. Les renforts sont préalablement disposés à l'intérieur du moule avant sa fermeture

et son verrouillage.

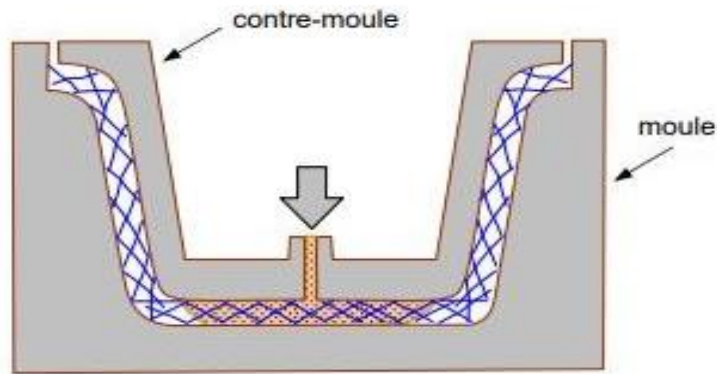


Figure I.21 : Moulage par injection de résine [25].

❖ Moulage par compression à froid ou à chaud :

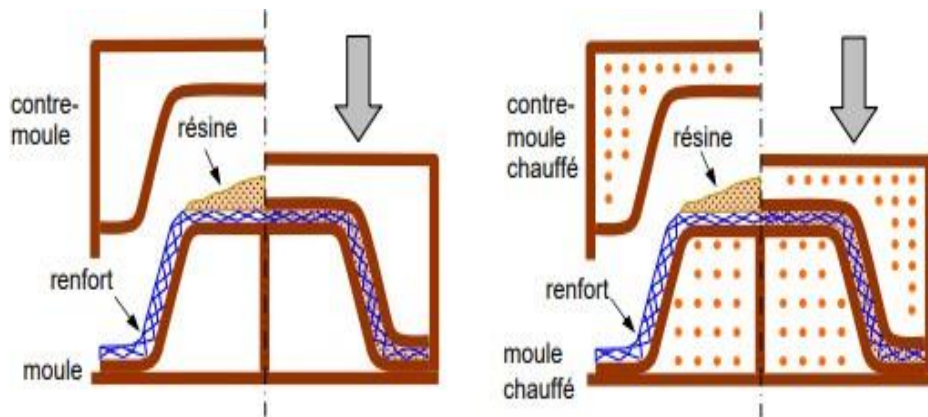


Figure I.22 : Moulage par compression [25].

➤ **Moulage en continu**

Le moulage en continu permet la fabrication de plaques planes, panneaux, sandwichs, de panneaux ondulés pour toitures, plaques nervurées, etc. Les figures qui suivent montrent le moulage en continu des plaques et des panneaux ondulés.

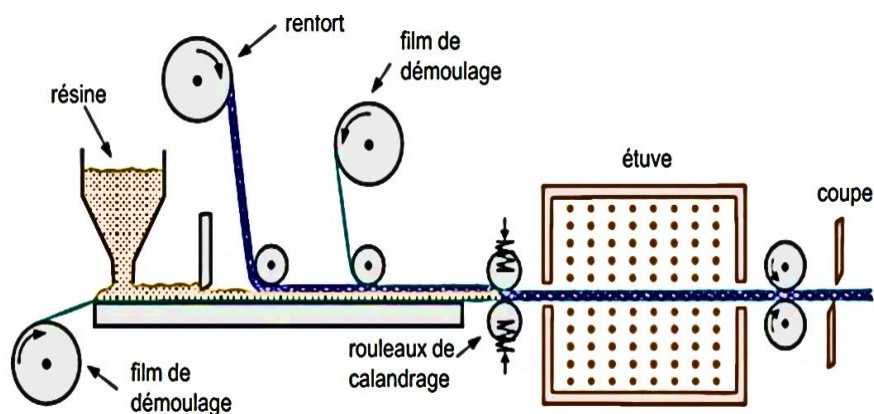


Figure I.23 : Moulage en continu de plaques [25].

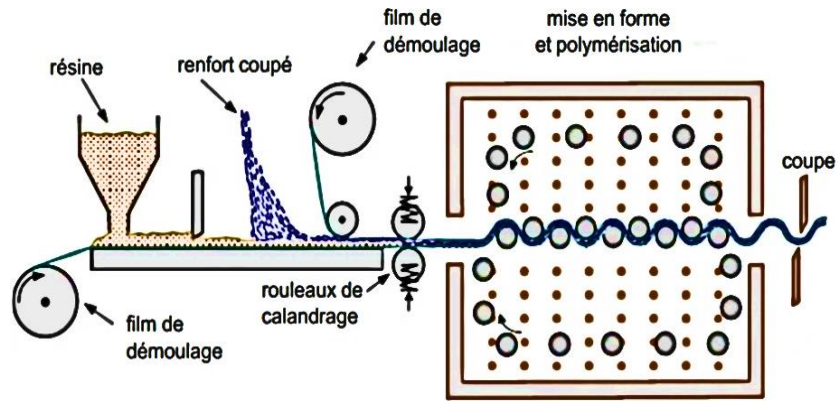


Figure I.24 : Moulage en continu de panneaux ondulés [25].

➤ **Moulage par pultrusion**

Le procédé de moulage par pultrusion sert pour la fabrication de profilés rectilignes ou courbés à section constante et hautement renforcés dans la direction principale.

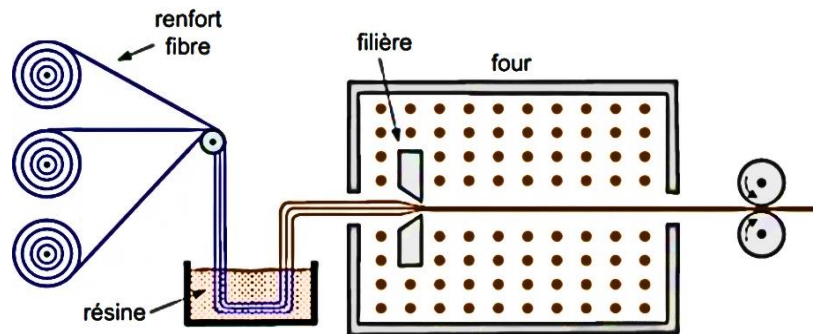


Figure I.25 : Moulage par pultrusion [25].

➤ **Moulage par centrifugation**

Le moulage par centrifugation est le procédé permettant l'obtention de corps creux en disposant le renfort et la résine à l'intérieur d'un moule mis en rotation à grande vitesse.

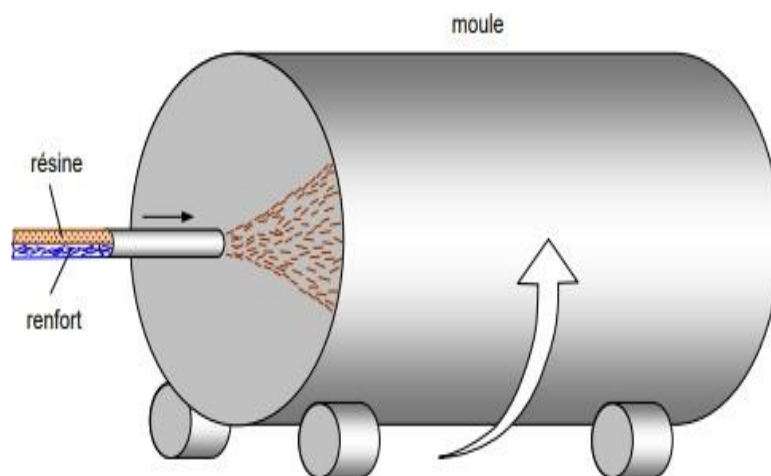


Figure I.26 : Moulage par centrifugation [25].

Pour ce procédé, on utilise l'effet de la force centrifuge pour l'application et le maintien des constituants sur la paroi intérieure du moule, et surtout pour l'imprégnation du renfort par la résine.

➤ **Moulage par enroulement filamentaire**

Le renfort (fil continu, ruban, etc.) imprégné de résine catalysée est enroulé avec une légère tension sur un mandrin cylindrique en rotation. Ce type de moulage est bien adapté aux surfaces cylindriques et sphériques.

I.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé des généralités sur les matériaux composites ; à savoir : leur définition, les principaux constituants qui les composent, leur architecture de renforcement et leur structure. Puis, nous avons évoqué leur classification pour mieux comprendre leur diversité ainsi que leurs modes d'élaboration.



CHAPITRE II

CHVBLLE II

**Procédé de coupe et choix du couple
outil-matière**



II.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter des généralités sur le procédé de coupe ; à savoir : les différents types de ce procédé, les conditions de coupe, les zones de formation du copeau et la configuration de coupe orthogonale. Aussi, la modélisation analytique et numérique de cette dernière seront brièvement entamées. Enfin, nous allons clôturer ce chapitre par le choix du matériau composite et les lois de comportement et d'endommagement qui le régissent.

II.2 Procédés et conditions de coupe

L'usinage est l'un des processus de fabrication mécanique par enlèvement de matière pour donner à une pièce brute la forme, les dimensions et les tolérances désirées. Cette technologie permet de produire des pièces de haute précision pour les utiliser dans de nombreux domaines tels que l'aéronautique, l'automobile, la médecine, etc. Parmi, les procédés d'usinage, on retrouve le procédé de coupe qui consiste à produire une pièce avec un outil coupant.

II.2.1 Types de procédés de coupe

Il y a plusieurs types de procédés de coupe ; cette diversité est principalement relative à la géométrie de la pièce à fabriquer [26]. À cet effet, on rencontre le tournage, le fraisage et le perçage, classés comme étant des procédés à forte vitesse de coupe et grand débit de copeaux.

II.2.1.1 Tournage

Le tournage est une technique d'usinage dans laquelle la broche (porte-pièce) de la machine-outil (tour) effectue des rotations à une certaine vitesse, et que le chariot (porte-outil) est animé de mouvements de translation pour permettre l'obtenir des pièces cylindriques ou coniques.

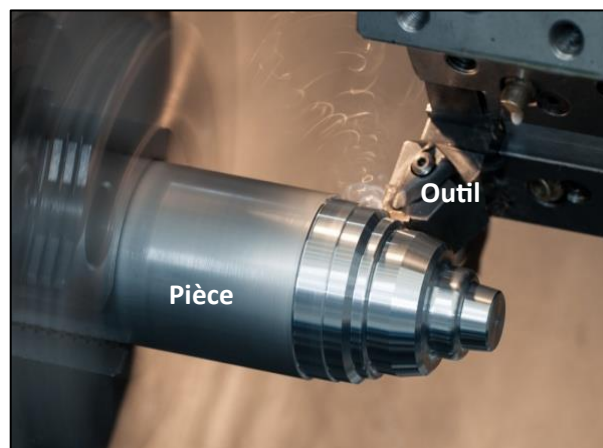


Figure II.1 : Procédé de tournage [27].

Ce procédé d'usinage permet de créer une multitude de produits finis, puisqu'il est possible de travailler aussi bien l'intérieur de la pièce que l'extérieur. Le tournage peut également être effectué manuellement sur un tour conventionnel ou automatiquement à l'aide d'une CNC.

II.2.1.2 Fraisage

Dans un processus de fraisage, la pièce est fixée sur la table de travail mobile qui s'ajuste par des translations pour la diriger vers l'outil de coupe qui est porté par la broche animée d'un mouvement de rotation. Principalement, les fraises sont les outils de coupe utilisés pour usiner les pièces et produire les formes voulues.

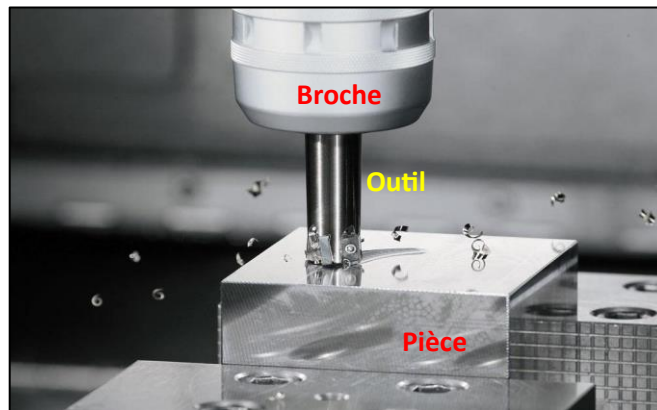


Figure II.2 : Procédé de fraisage [27].

II.2.1.3 Perçage

Avec le perçage, des trous sont réalisés à travers le matériau de la pièce usinée. Cette technique d'usinage est utilisée pour préparer les pièces à l'assemblage de différents composants. Chaque matériau est doté d'outils et de réglages recommandés pour créer des trous lisses et faciles à nettoyer.



Figure II.3 : Procédé de perçage [26].

Les forêts sont généralement les outils de coupe utilisés pour percer les pièces et créer des trous de différentes tailles.

II.2.2 Conditions de coupe

Nous allons maintenant aborder les définitions relatives aux paramètres de coupe et à la géométrie de l'outil de coupe [28].

➤ **Vitesse de coupe (V_c)**

Caractérise le mouvement principal relatif entre la pièce et l'outil ; elle a une influence directe sur la façon dont est formé le copeau, sur l'état de la surface usinée, sur l'usure de l'outil et sur la productivité. Elle est définie comme étant une vitesse instantanée du point considéré de l'arête par rapport à la pièce. Dans le cas du mouvement circulaire, la vitesse de coupe est une fonction de la fréquence de rotation et du diamètre de l'élément en rotation. Pour le tournage, elle est exprimée par :

$$V_c = \frac{\pi D N}{1000} \quad (\text{II.1})$$

➤ **Avance (f)**

L'avance est la valeur avec laquelle se déplace l'outil à chaque tour de la pièce (cas du tournage) ou de la pièce à chaque tour de l'outil (cas du fraisage). En tournage, elle est liée à la vitesse d'avance comme suit :

$$f = \frac{V_f}{N} \quad (\text{II.2})$$

➤ **Profondeur de passe (a_p)**

Est la distance entre la surface initiale de la pièce et la surface engendrée. Cependant afin d'arriver à la dimension finale de la pièce, on doit souvent effectuer plusieurs passes. La passe est définie comme étant la couche de matière de la pièce qui doit être enlevée suite à un passage unique de l'outil de coupe.

➤ **Géométrie de l'outil de coupe**

Il existe une grande diversité d'outils de coupe ; toutefois, les principaux éléments des différents outils sont semblables. Ainsi, afin de simplifier la compréhension de différents éléments définissant un outil quelconque, nous nous baserons a priori sur un outil de coupe monobloc en tournage. Ce dernier est constitué d'un corps et d'une queue, la partie de l'outil qui intervient directement dans l'opération de coupe est appelée partie active. Elle est limitée par trois faces : la face de coupe sur laquelle glisse le copeau et les deux faces de dépouille (principale et secondaire) sur lesquelles frottent les surfaces usinée et engendrée. L'arête

principale est l'intersection entre la face de coupe et la face de dépouille principale, et l'arête secondaire est l'intersection entre la face de coupe et la face de dépouille secondaire. La jonction des arêtes principale et secondaire forme le bec de l'outil, il peut être droit ou arrondi. Les schémas de la figure qui suit illustre le design d'un outil de tournage sans plaquette rapportée et ses angles principaux : de dépouille (α), taillant (β) et de coupe (γ).

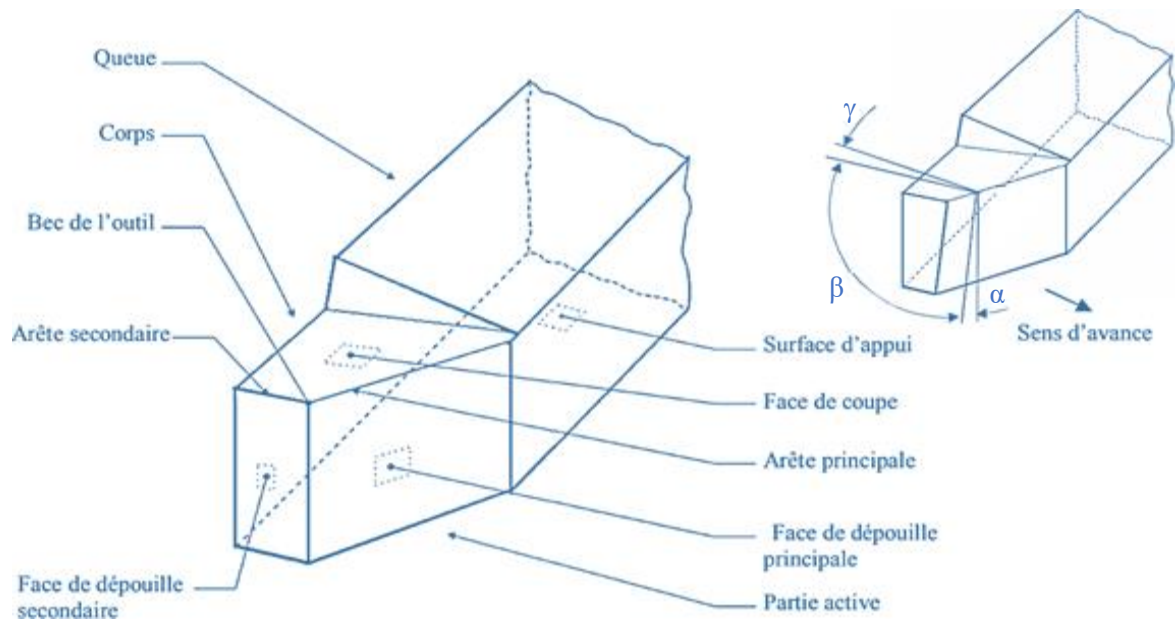


Figure II.4 : Design de l'outil de coupe [29].

II.3. Définition de la coupe orthogonale et zones de cisaillement

Il existe deux types d'analyse du mécanisme de l'usinage par enlèvement de matière : la coupe orthogonale et la coupe oblique.

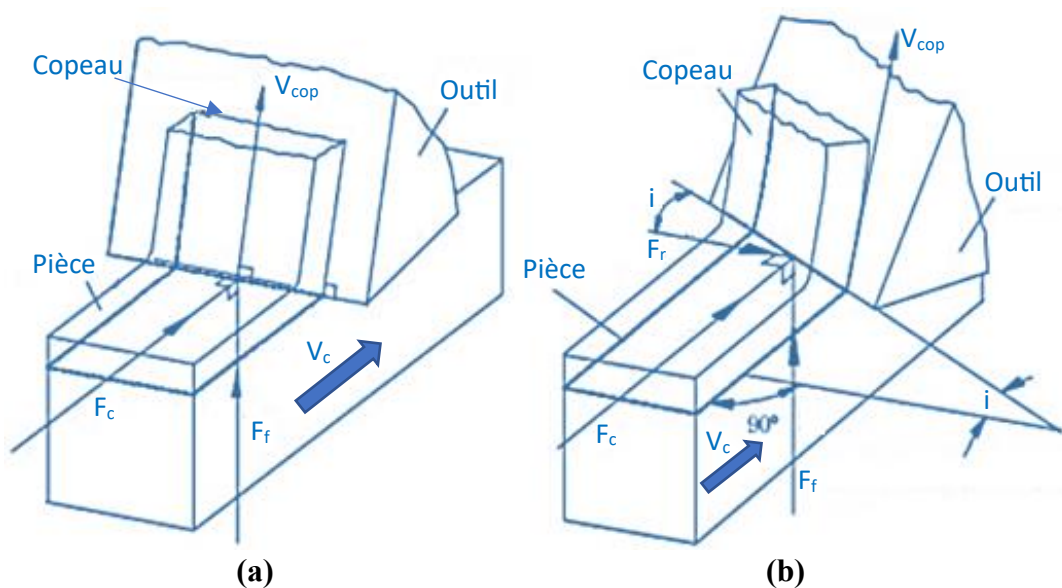


Figure II.5 : Type d'usinage : (a) orthogonal ; (b) oblique.

Dans la coupe orthogonale, la matière est enlevée de la pièce avec une arête de coupe qui est perpendiculaire à la direction du mouvement relative entre l'outil et la pièce à usiner ; l'enlèvement de matière est supposé être uniforme tout le long de l'arête de coupe, donc c'est un problème à déformations planes [29]. La coupe orthogonale a été largement étudiée à cause de sa simplicité et les bonnes approximations qu'elle procure.

Dans un processus de coupe, trois zones de déformation principales prennent naissance ; à savoir : la zone de cisaillement primaire, la zone de cisaillement secondaire, et la zone de cisaillement tertiaire.

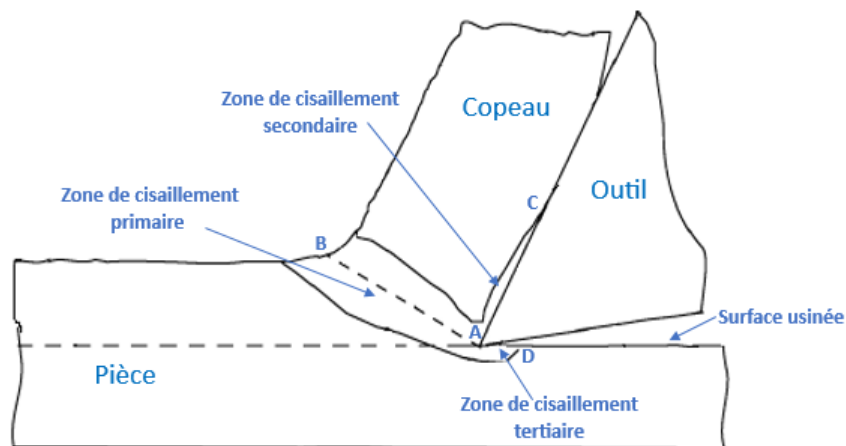


Figure II.6 : Zones de cisaillement en coupe [28].

✓ **La zone de cisaillement primaire (AB)**

La formation du copeau commence dans cette zone quand l'arête de l'outil pénètre dans la pièce à usiner. C'est une zone de déformation plastique intense.

✓ **La zone de cisaillement secondaire (AC)**

Le copeau et la surface d'attaque de l'outil sont en contact de A à C. Quand la contrainte de frottement dans la surface d'attaque atteint une valeur égale à la limite élastique de cisaillement du matériau de la pièce usinée, il se produit un écoulement de matière dans cette zone.

✓ **La zone de cisaillement tertiaire (AD)**

Quand la surface de dépouille de l'outil frotte la surface usinée, une déformation se produira dans cette zone.

La formation du copeau en coupe peut engendrer trois types de copeaux ; à savoir : le copeau discontinu, le copeau continu et le copeau avec arête rapportée. La figure qui suit montre ces types de copeaux.

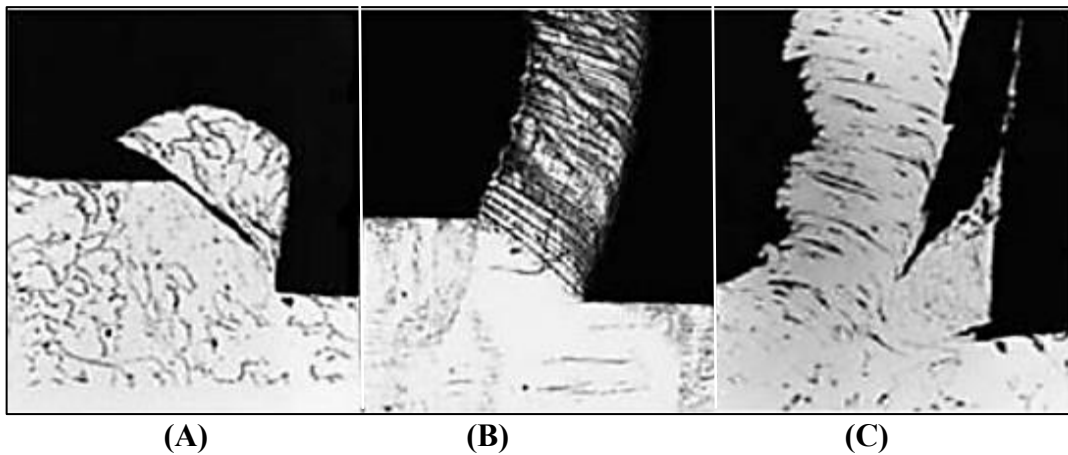


Figure II.7 : (A) Copeau discontinu ; (B) Copeau continu ; (C) Copeau avec arrête rapportée.

Nous allons maintenant entamer la modélisation de la coupe orthogonale.

II.4 Modélisation de la coupe orthogonale

II.4.1 Modélisation analytique

Les recherches portant sur la modélisation de la formation du copeau sont anciennes et sont apparues bien avant les ordinateurs et la simulation numérique grâce à la mise en place de modèles analytiques [30]. Dans ce contexte, Merchant a utilisé une approche purement énergétique. Il suppose que la formation du copeau se fait le long du plan de cisaillement AB inclinée par rapport à la direction de la vitesse de coupe d'un angle ϕ . Ce dernier est déterminé en minimisant la puissance de coupe. Lee et Shaffer ont développé un modèle purement mécanique utilisant des lignes de glissement. Albrecht propose un modèle basé sur des observations en considérant le fait que les outils présentent toujours une certaine acuité. Cette dernière provient de l'usure. Il a établi expérimentalement une relation liant le rayon d'acuité à l'angle de taillant de l'outil.

Boothroyd est le premier à présenter une modélisation thermomécanique. Afin de relever les champs de température en coupe orthogonale, il a élaboré des techniques expérimentales à partir de méthodes basées sur la photographie infrarouge. Il a commencé par émettre l'hypothèse selon laquelle toute la puissance calorifique dissipée dans la coupe provient d'une puissance mécanique générée pendant le cisaillement du matériau usiné. Il considère ensuite que cette chaleur provient de deux sources distinctes :

- ✓ Une source plane de chaleur uniforme dans le cisaillement primaire.
- ✓ Une source plane uniforme dans le cisaillement secondaire.

Oxley modélise la formation du copeau en utilisant un modèle thermomécanique.

L'auteur prend en compte la vitesse de déformation et la température générée par la coupe pour traduire le comportement rhéologique du matériau usiné. Aussi, en plus du cisaillement primaire, il prend en compte la présence d'une zone de cisaillement secondaire générée par le frottement outil-copeau.

II.4.2 Modélisation numérique

De nombreuses méthodes de résolution et de simulation numérique ont été développées pour être appliquées à la coupe orthogonale. Ces méthodes diffèrent par le type de discrétisation utilisée (différences finies, éléments finis, ...) et par le type de formulation retenue (Lagrangienne, Eulérienne, Arbitraire Lagrangienne-Eulérienne, ...) [30]. Les outils numériques permettent de détailler l'écoulement du copeau, les répartitions des contraintes et les températures de coupe. La nécessité de connaître une géométrie initiale du copeau et de donner des conditions de contact à l'interface outil/copeau constituent l'inconvénient majeur de ces méthodes.

La méthode des différences finies a été appliquée par Gilormini à la coupe orthogonale pour mieux appréhender les phénomènes de coupe. Tay et al. ont beaucoup apporté à la modélisation des distributions de température dans le copeau et dans l'outil grâce aux éléments finis. Ils ont d'ailleurs proposé une méthode pour élaborer la cartographie des températures dans la coupe à partir des données expérimentales qui sont l'effort de coupe, l'angle de coupe et l'angle de cisaillement.

La formulation Eulérienne focalise l'attention sur une région fixée de l'espace à travers lequel s'écoule la matière. Son application à la simulation de la coupe est couplée avec une gestion des surfaces libres permettant, à partir d'une définition plus ou moins grossière de la géométrie initiale du copeau, d'obtenir l'écoulement en phase stationnaire d'un copeau continu. Cette formulation est à la base des premières simulations réalisées en coupe orthogonale, mais ne permet pas de rendre compte de la formation d'un copeau discontinu.

Dans la formulation Lagrangienne, chaque nœud du maillage suit le mouvement du point matériel auquel il est affecté. Le maillage se déforme, il est alors possible de simuler le procédé de coupe depuis la phase de pénétration jusqu'à obtention d'un copeau. Néanmoins, partant d'une géométrie arbitraire (pas de prédéfinition de la géométrie du copeau), son utilisation nécessite de définir un critère de séparation afin de permettre la formation du copeau. Les modélisations utilisant ce formalisme ont fait apparaître des problèmes de distorsion de maillage.

La formulation Arbitraire Lagrangienne-Eulérienne est un compromis entre les approches

Eulérienne et Lagrangienne. Elle repose sur l'utilisation d'un maillage mobile partiellement indépendant des points matériels. Le maillage est globalement Lagrangien, au sens où il est nécessaire que sa frontière suive la surface du domaine occupé par la matière. Mais une liberté de choix quant au mouvement des nœuds internes est introduite. Cette dissociation entre maillage et matière permet de s'affranchir des problèmes de distorsions.

Dans ce qui suit, nous allons procéder au choix du couple outil-matière.

II.5 Choix de couple matière/outil

Pour notre investigation, le choix correspond a priori à un matériau composite à matrice métallique en aluminium renforcée par des particules en carbure de silicium. C'est un travail qui fait suite à des travaux déjà effectués au laboratoire de recherche des Technologies Industrielles [31].

Les matériaux les plus utilisés pour élaborer des CMM sont l'aluminium et ses alliages car leur ductilité et leur faible densité peuvent être combinées avec la rigidité et la capacité portante des renforts. Habituellement, les métaux comme l'aluminium, le magnésium, le cobalt, le titane, le cuivre et divers alliages de ces matériaux peuvent être adoptés comme matrice, et le renfort est généralement un matériau dur tel que le SiC, TiC, Al₂O₃, etc. Parmi les nombreux matériaux de renforcement, le SiC est généralement utilisé car il offre certains avantages tels que le faible coût, la bonne dureté et la haute résistance à la corrosion.

Pour notre étude, la matrice est à base d'aluminium (Al359), renforcée par des particules en carbure de silicium (SiC). La coupe du composite est effectuée à l'aide d'un outil de type PCD (PolyCristalline Diamond). La figure qui suit reporte les constituants relatifs au couple outil-matière ; à savoir : l'aluminium, le carbure de silicium, et le diamant polycristallin.



Figure II.8 : Constituants relatifs au couple outil-matière [9].

Nous allons maintenant aborder le comportement rhéologique et le critère d'endommagement adoptés pour le composite cible.

II.5.1 Comportement rhéologique du composite cible

En usinage différentes lois rhéologique ont été utilisées pour imiter le comportement du matériau usiné ; à savoir [32] : la loi de Johnson-Cook, d'Oxley et Hastings, de Zerilli-et Armstrong, de Maekawa et al., de Marusich et Ortiz, etc. En dépit de tous ces développements, la loi de Johnson-Cook est la plus utilisée. Cette dernière exprime la contrainte équivalente du matériau sous forme d'une fonction de la déformation plastique, de la vitesse de déformation et de la température. Elle est exprimée par [33] :

$$\sigma = [A + B \times \varepsilon^n] \times \left[1 + C \times \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] \times \left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_f - T_r} \right)^m \right] \quad (\text{II.3})$$

Elle est composée, dans l'ordre d'apparition, d'un terme d'écrouissage, d'un terme dynamique et d'un terme d'adoucissement thermique. Le premier terme, faisant référence à l'écrouissage, correspond à la contrainte d'écoulement à vitesse de déformation constante. (A) étant la limite d'élasticité, (B) le module d'écrouissage (paramètre linéaire de l'écrouissage) et (n) le coefficient d'écrouissage (paramètre non linéaire de l'écrouissage).

Le second terme caractérise le durcissement dynamique du matériau. Ce terme est fonction de la vitesse de déformation plastique et du coefficient (C) qui correspond au coefficient de dépendance à la vitesse d'écrouissage.

Le dernier terme de cette loi est relatif au phénomène d'adoucissement thermique ayant lieu à partir du moment où la température du matériau est plus élevée que la température de transition ; le coefficient (m) représentant l'exposant d'adoucissement thermique.

Concernant la rhéologie du matériau composite cible (Al/SiC), qui est à matrice métallique en aluminium avec un pourcentage limité en carbure de silicium, nous allons considérer la loi de comportement de Johnson-Cook uniquement pour la matrice qui subit la déformation plastique, et les propriétés élastiques du carbure de silicium seront intégrés séparément. Pour l'aluminium, on retrouve plusieurs jeux de paramètres ; à titre indicatif, le tableau qui suit reporte quelques combinaisons.

A(MPa)	B(MPa)	C	n	m	T _f (K)	T _r (K)	Référence
176.45	63.99	0.0036	0.7	0.31	923	293	[34]
546	678	0.024	0.71	1.56	893	293	[35]
255	361	0.01	0.18	5.5	866	293	[36]

Tableau II.1 : Paramètres de comportement de Johnson-Cook.

Pour notre investigation, nous avons retenu les paramètres du troisième jeu pris de la référence [36]. À noter que ce jeu a été déjà utilisé dans l'étude menée dans la référence [31] qui nous sert de base.

II.5.2 Critère d'endommagement de Johnson-Cook

Allant de pair avec la loi de comportement de Johnson-Cook, ce critère d'endommagement fait apparaître la contrainte équivalente, la vitesse de déformation et la température. Il est exprimé par :

$$\varepsilon_f = [d_1 + d_2 \exp(-d_3 \times \eta)] \times \left[1 + d_4 \times \ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)\right] \times \left[1 + d_5 \left(\frac{T - T_r}{T_f - T_r}\right)\right] \quad (\text{II.4})$$

De même, on peut retrouver plusieurs jeux de paramètres pour un même matériau. À cet effet, le tableau qui suit reporte certains d'entre eux pour le cas d'aluminium.

d1	d2	d3	d4	d5	Référence
0.13	0.13	-1.5	0.011	0	[34]
-0.068	0.451	-0.952	0.036	0.697	[35]
0.071	1.248	-1.142	0.147	0.1	[36]

Tableau II.2 : Paramètres d'endommagement de Johnson-Cook.

De même, nous avons retenu le dernier jeu reporté de la référence [36].

II.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté des généralités sur le procédé de coupe ; à savoir : les différents types de ce procédé (tournage, fraisage et perçage), les conditions de coupe principalement liées au processus de tournage, les zones de formation du copeau (primaire, secondaire et tertiaire) et la configuration de coupe orthogonale. Aussi, les modélisations analytique et numérique de cette dernière ont été brièvement abordées. De plus, nous avons reporté le choix du matériau composite Al/SiC ayant une matrice métallique en aluminium renforcée par des particules en carbure de silicium, ainsi que les lois de comportement et d'endommagement qui régissent la matrice.



CHAPITRE III

CHARLIE III

Résultats de simulation et interprétation



III.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons effectuer une simulation numérique sous le logiciel Abaqus de la coupe orthogonale du matériau composite cible Al/SiC. À travers cette simulation, nous allons analyser les effets de changement, d'une part, des conditions de coupe (vitesse de coupe, avance, et angle de coupe), et, d'autre part, de la forme des particules (circulaire et elliptique).

III.2 Simulation numérique de la coupe du matériau composite cible

III.2.1 Propriétés du couple outil-matière et conditions de coupe

Le matériau usiné ainsi que l'outil de coupe seront considérés comme deux corps déformables ; leurs propriétés sont reportées dans le tableau qui suit [36] :

	Matrice (Aluminium Al359)	Renfort (SiC)	Outil de coupe (PCD)
Masse volumique (kg/m ³)	2700	4370	3500
Module d'Young (GPa)	72	408	800
Conductivité thermique (W/m·°C)	180	30	173
Chaleur spécifique (J/kg·°C)	963	706	508
Température de fusion (°C)	593		
Température de référence (°C)	20		

Tableau II.3 : Propriétés de la pièce et de l'outil de coupe [36].

Le tableau qui suit reporte les conditions de coupe.

Paramètres de coupe	
V _c	300 m/min
f	0.1 mm/tr
a _p	1 mm
Géométrie de l'outil de coupe	
γ	5°
α	5°

Tableau II.4 : Paramètres de coupe et géométrie de l'outil [36].

III.2.2 Conception du modèle sur le logiciel Abaqus

La simulation numérique de l'opération d'usinage du matériau composite cible est menée sous l'environnement du logiciel Abaqus CAE. À cet effet, la description des modules du

logiciel utilisé est reportée en annexe.

III.2.2.1 Création des géométries de l'outil et de la pièce

Dans le module "Part", on crée les géométries de l'outil et de la pièce. Pour l'outil, l'angle de coupe (γ) est pris a priori égal à 5° et l'angle de dépouille $\alpha = 5^\circ$.

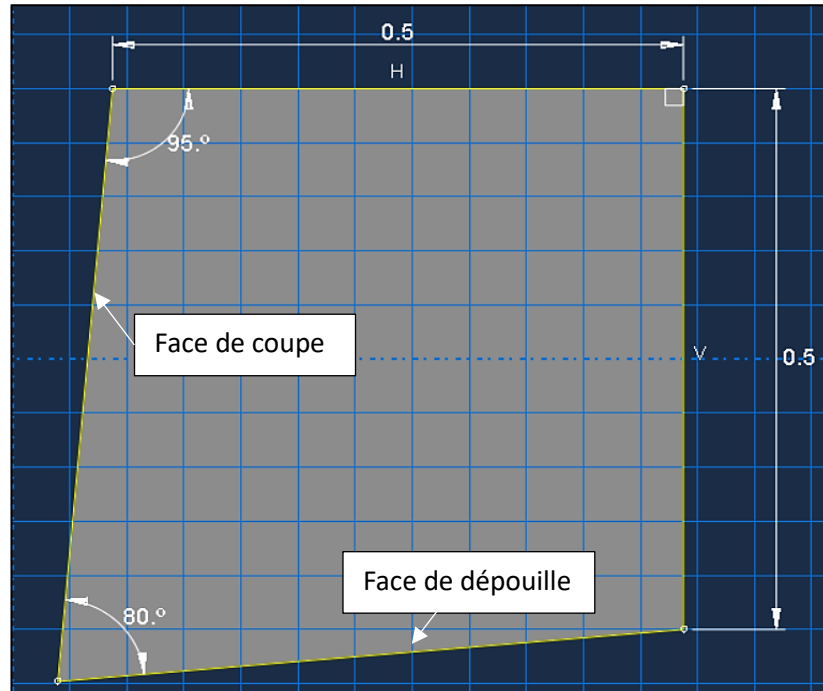


Figure III.1 : Géométrie de l'outil.

La pièce est prise de forme rectangulaire ayant les dimensions de 1 mm de longueur et 0.25 mm de hauteur.

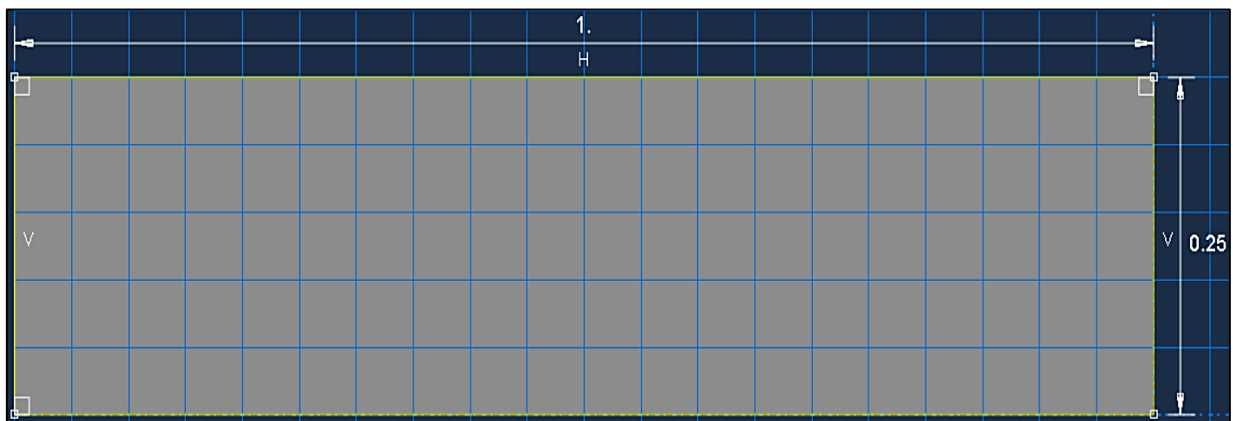


Figure III.2 : Géométrie de la pièce.

La figure qui suit montre l'insertion des particules de forme circulaire et ceux de forme elliptique. À noter qu'en pratique, la forme des particules est aléatoire, mais dans la littérature se sont les deux formes adoptées.

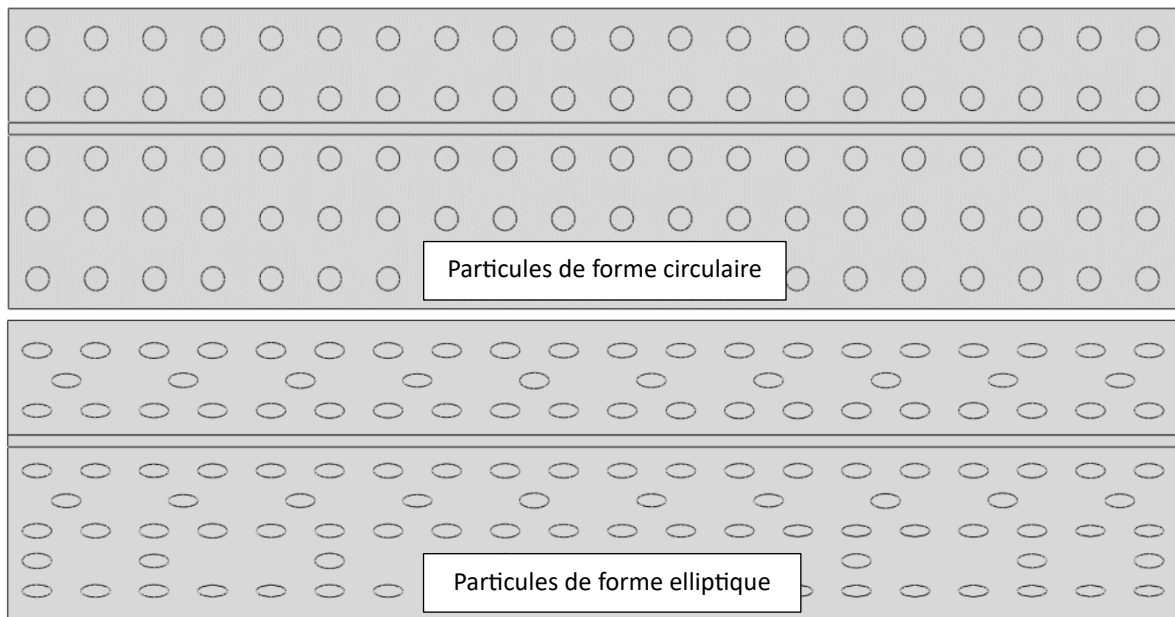


Figure III.3 : Géométrie de la pièce en matériau composite.

III.2.2.2 Introduction des propriétés

Dans le module "Property", nous introduisons les propriétés de la pièce, de l'outil et des particules, ainsi que les paramètres de comportement et d'endommagement de Johnson-Cook.

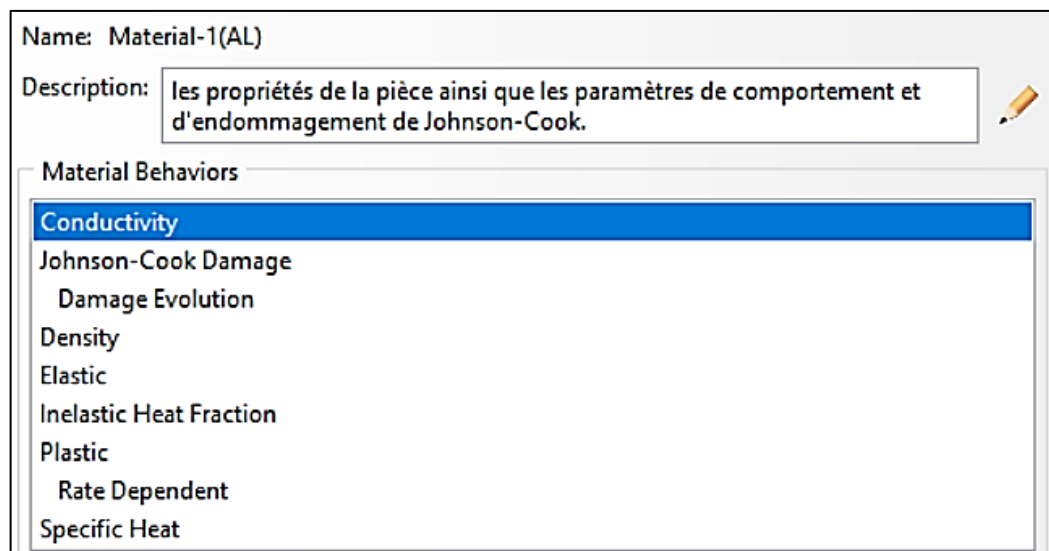


Figure III.4 : Introduction des propriétés de la pièce, des particules et de l'outil.

III.2.2.3 Modules "Assembly" et "Step"

Dans le module "Assembly", nous procédons à la mise en place des éléments de l'interaction outil-matière. Dans le module "Step", nous choisissons le temps de simulation proportionnel à la distance de 0.83 mm. Cette dernière est choisie pour faire aboutir la simulation presque à la fin de la pièce.

III.2.2.4 Définition des interactions

Le module "Interaction" consiste à établir les conditions de contact entre les surfaces de l'outil et de la pièce. À cet effet, nous considérons un frottement de Coulomb avec un coefficient égal à 0.15 [32].

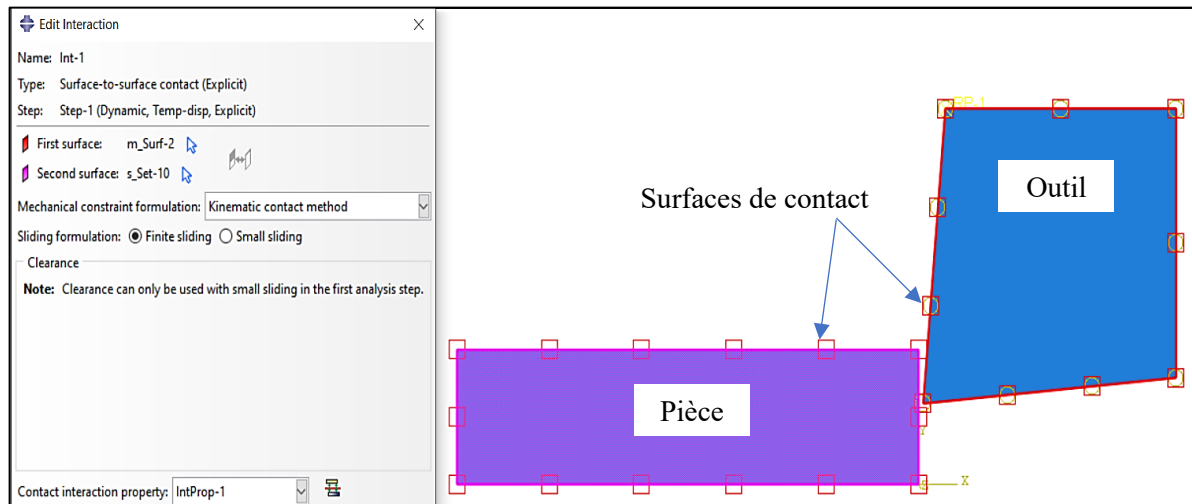


Figure III.5 : Définition des interactions.

III.2.2.5 Module "Load"

Dans ce module, nous allons définir les conditions aux limites et le chargement qui sont liés à la pièce et l'outil comme l'encastrement et la vitesse.

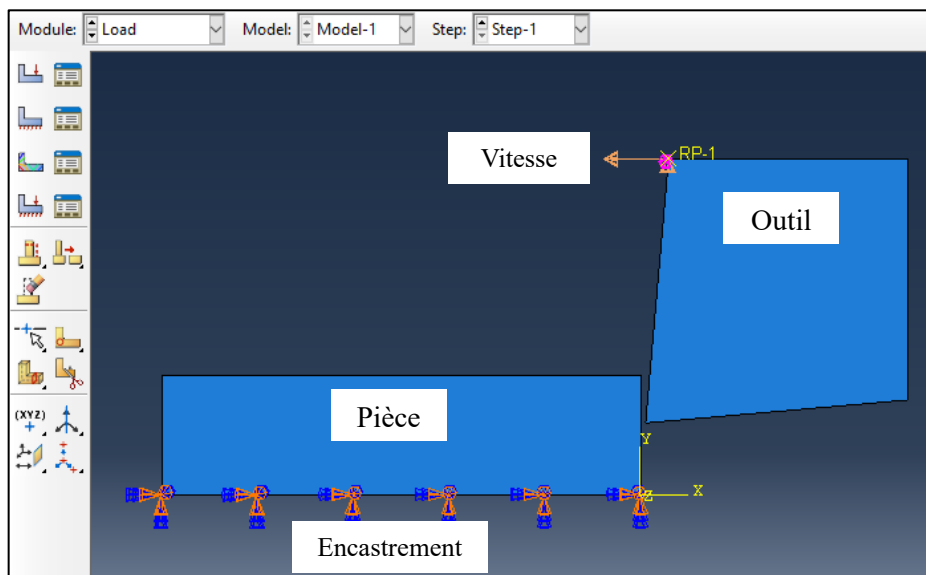


Figure III.6 : Conditions aux limites et chargement.

III.2.2.6 Maillage de la pièce et de l'outil (Module "Mesh")

Abaqus offre divers types d'éléments finis (triangulaires, quadrilatéraux, etc.) ; dans notre cas, nous avons choisi des éléments quadrilatéraux en raison de leur simplicité.

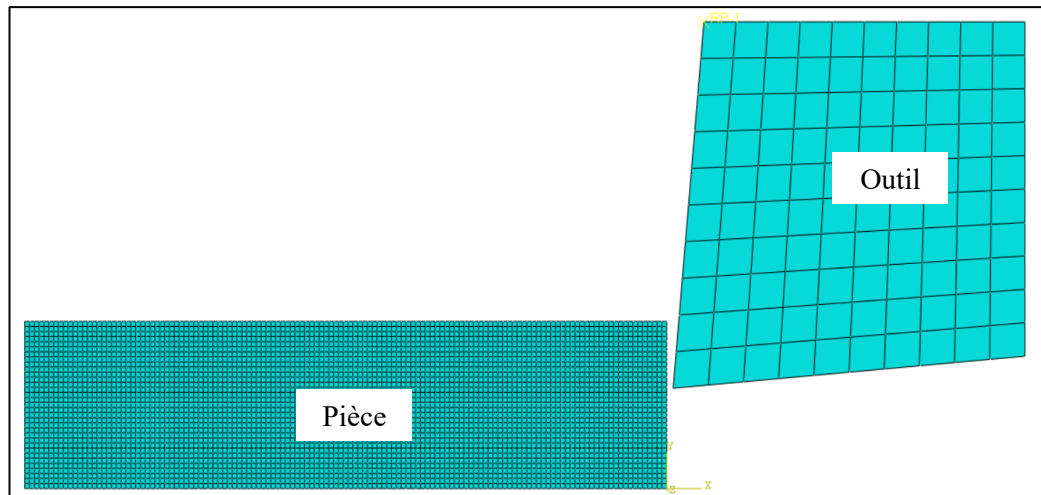


Figure III.7 : Maillage de la pièce et de l’outil.

Aussi, la taille de l’élément est choisie de telle sorte à avoir une simulation qui puisse converger. Les régions les plus sollicitées reçoivent un maillage fin ; la taille adoptée est en moyenne égale à $7.5 \mu\text{m}$.

III.2.3 Hypothèses du modèle

Le modèle orthogonal peut être utilisé pour approcher le tournage à condition que l’avance soit faible par rapport à la profondeur de coupe [37]. La figure indique la conversion d’une situation de coupe à l’autre.

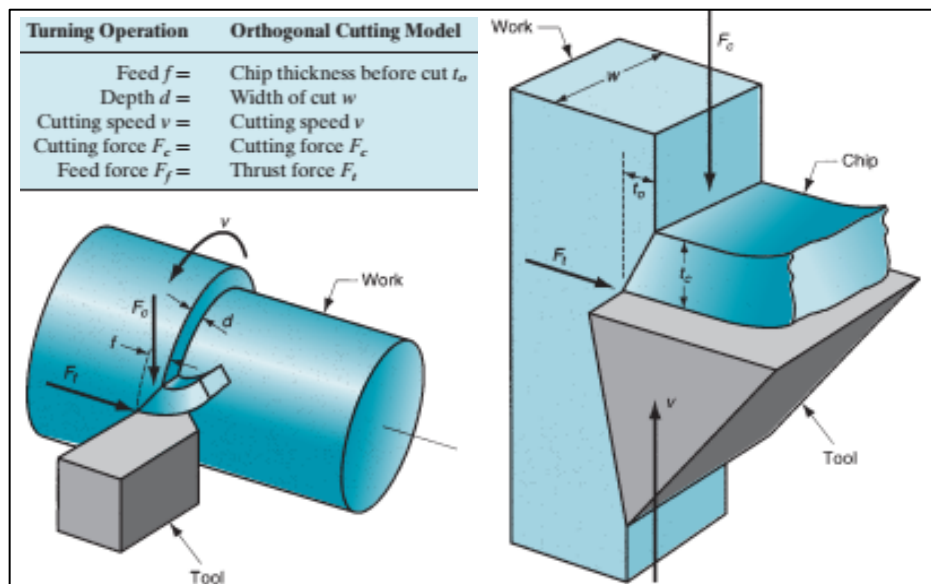


Figure III.8 : Approximation par le modèle orthogonal [37].

On remarque que d’après cette approximation, dans le modèle orthogonal relatif à une opération de tournage la partie de la pièce, objet de la simulation, sera mobilisée et l’outil est animé d’un mouvement de translation qui correspond à la vitesse de coupe.

Pour conclure sur l'approximation, nous allons considérer la simulation numérique de deux cas : dans le premier, la pièce étant fixe et l'outil est animé en translation ; pour le second, la pièce est mobile et l'outil sera considéré comme fixe.

Les figures qui suivent montrent les champs de température dans les deux cas pour les conditions de coupe : $V_c = 200$ m/min, $f = 0.1$ mm/tr, et $\gamma = 5^\circ$.

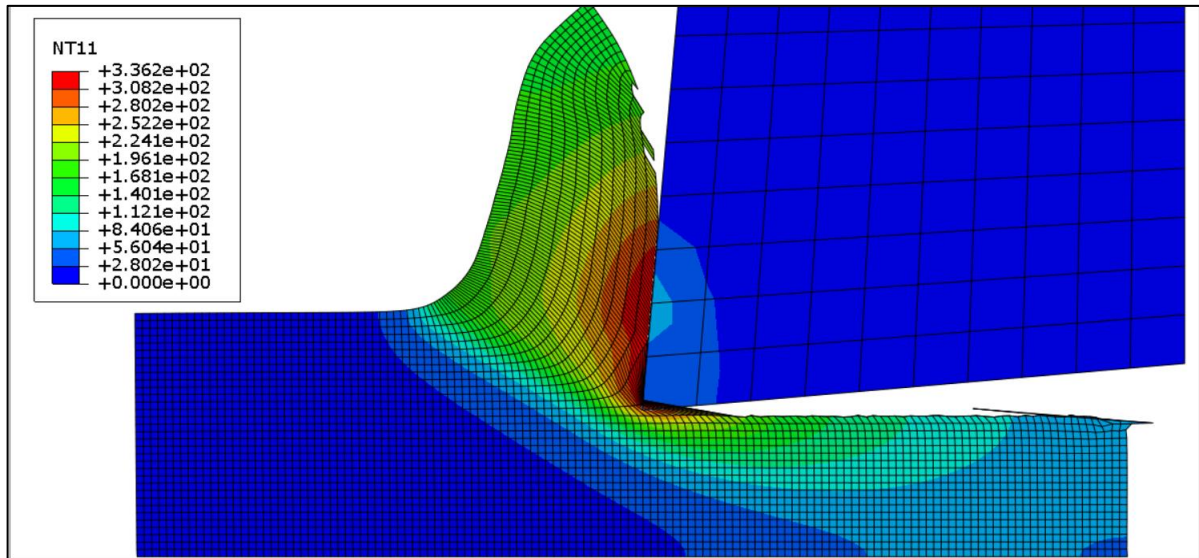


Figure III.9 : Température dans la zone de coupe (Pièce fixe).

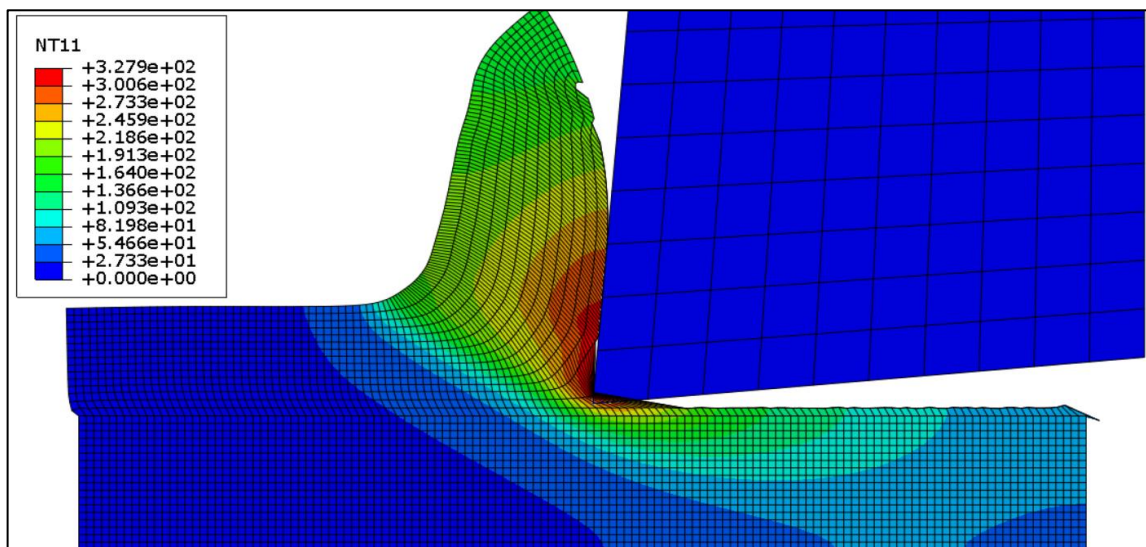


Figure III.10 : Température dans la zone de coupe (Pièce mobile).

Nous remarquons une ressemblance entre les deux résultats et les températures maximales sont proches.

Nous allons maintenant analyser la situation vis-à-vis des contraintes de Von-Mises dans la zone de coupe.

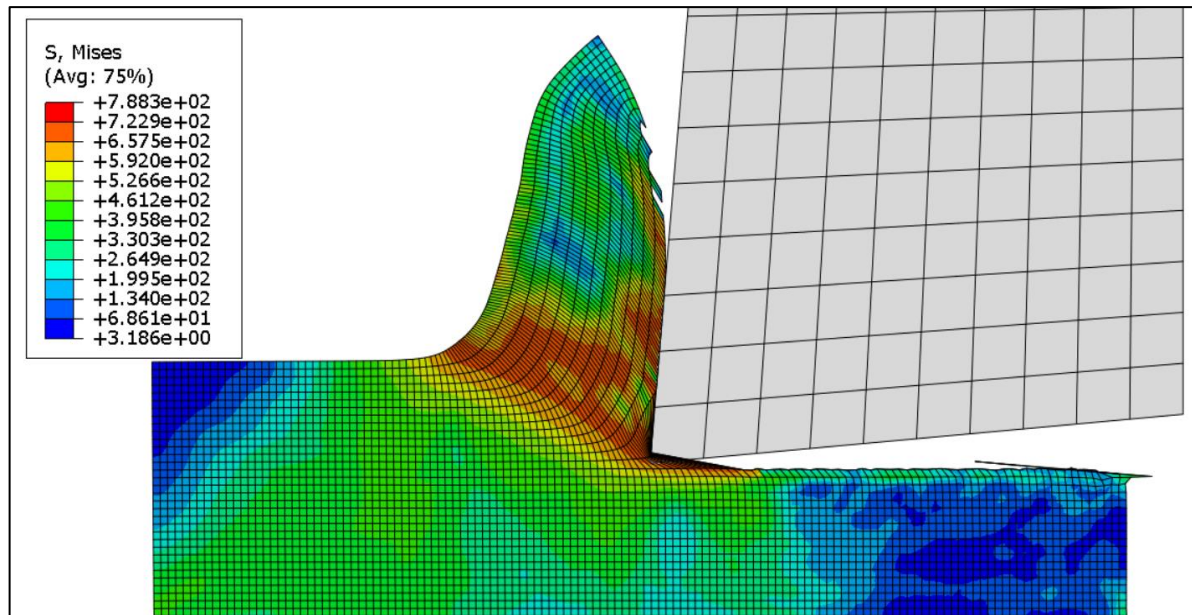


Figure III.11 : Contraintes de Von-Misès dans la zone de coupe (Pièce fixe).

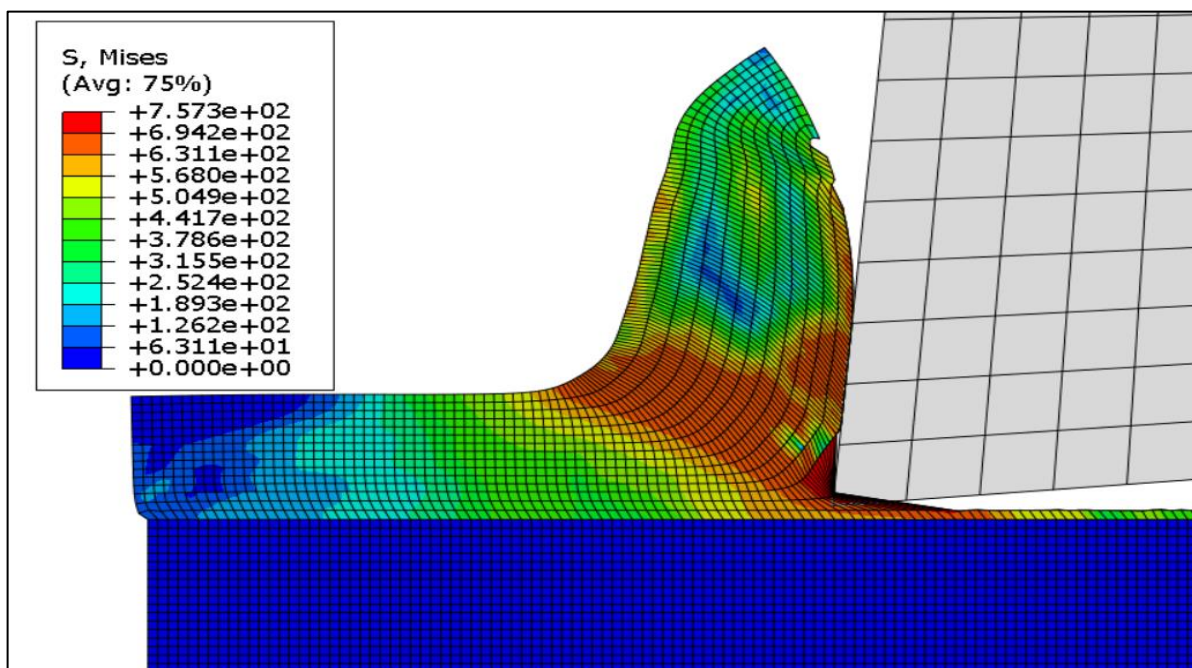


Figure III.12 : Contraintes de Von-Misès dans la zone de coupe (Pièce mobile).

À travers ces deux dernières figures, nous constatons une différence remarquable entre les champs de contraintes ; dans le cas de la pièce fixe, le champ des contraintes se répartit dans toute la pièce. Par contre, dans le cas de la pièce mobile, le champ de contraintes ne se limite qu'au copeau.

De ce fait, nous avons choisi le cas où la pièce est immobile pour éviter le problème de localisation des contraintes, et de rester conforme avec l'approximation du modèle orthogonal de la figure III.8.

III.2.4 Choix de la formulation

Pour choisir la formulation adéquate pour mener la simulation numérique, nous avons testé les deux formulations Lagrangienne et Arbitraire Lagrangienne-Eulérienne (ALE). Pour la formulation Lagrangienne, on se réfère à la figure III.9.

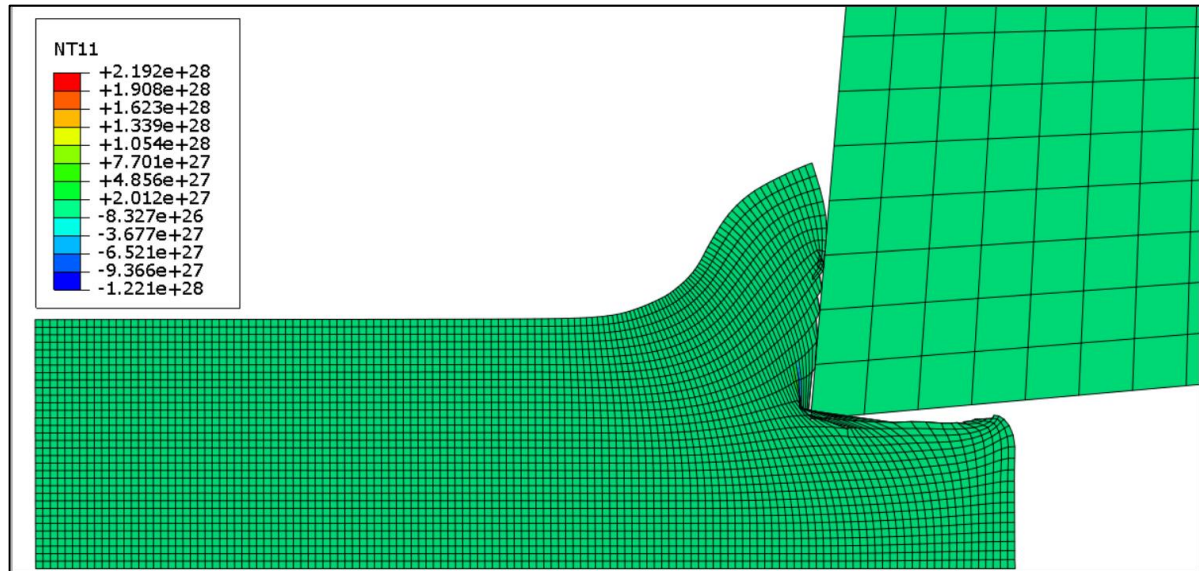


Figure III.13 : Température dans la zone de coupe (Formulation ALE).

Pour cette dernière figure, on observe que l'outil coupe une longueur de 0.2 mm, et après cette longueur, on obtient des valeurs de température excessives. De ce fait, nous allons retenir la formulation Lagrangienne.

Nous allons maintenant présenter les résultats de simulation et leur interprétation.

III.3 Résultats de simulation et discussion

Rappelons que dans la simulation, nous considérons deux formes de particules (circulaire et elliptique). Aussi, les conditions de coupe (vitesse de coupe, avance, et angle de coupe) seront variées pour analyser leurs influences.

Aussi, compte tenu de ce qui a précédé, la simulation sera effectuée avec la formulation Lagrangienne, et la pièce étant fixe avec l'outil qui se déplace.

III.3.1 Cas de simulation avec des particules de forme circulaire

➤ Variation de la vitesse de coupe

Nous allons maintenant faire varier la vitesse de coupe pour voir son influence sur la température et sur les contraintes de Von-Mises tout en fixant : $\gamma = 5^\circ$ et $f = 0.1$ mm/tr.

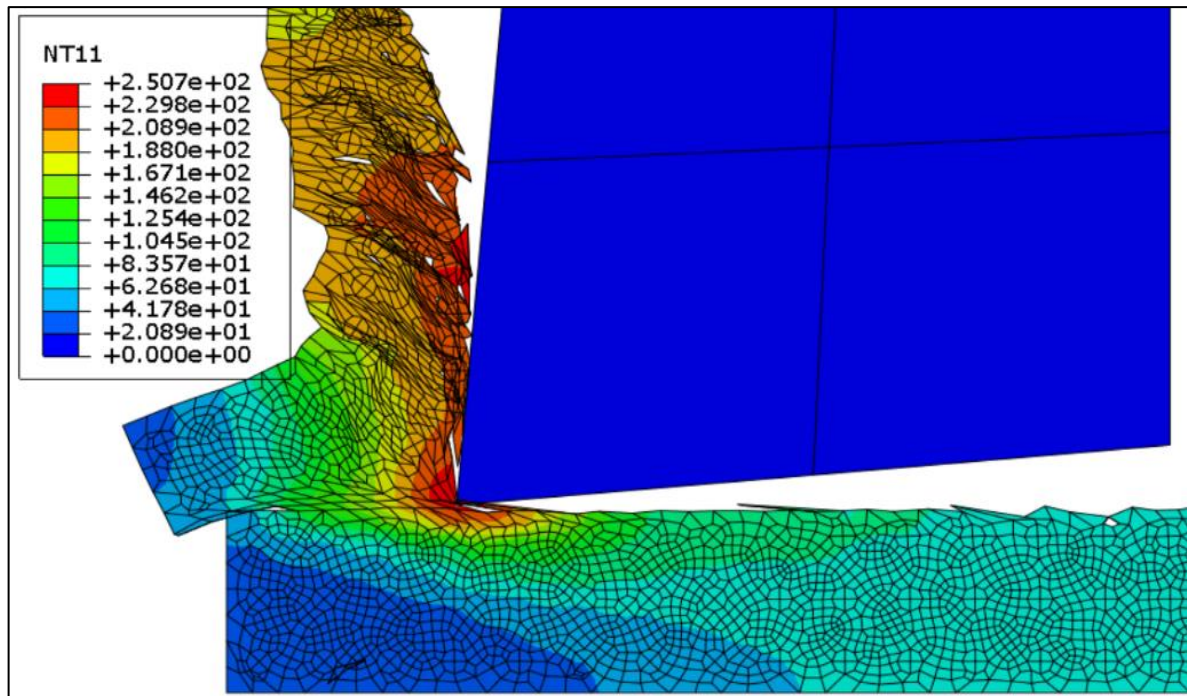


Figure III.14 : Température pour $V_c = 200$ m/min ($\gamma = 5^\circ$ et $f = 0.1$ mm/tr).

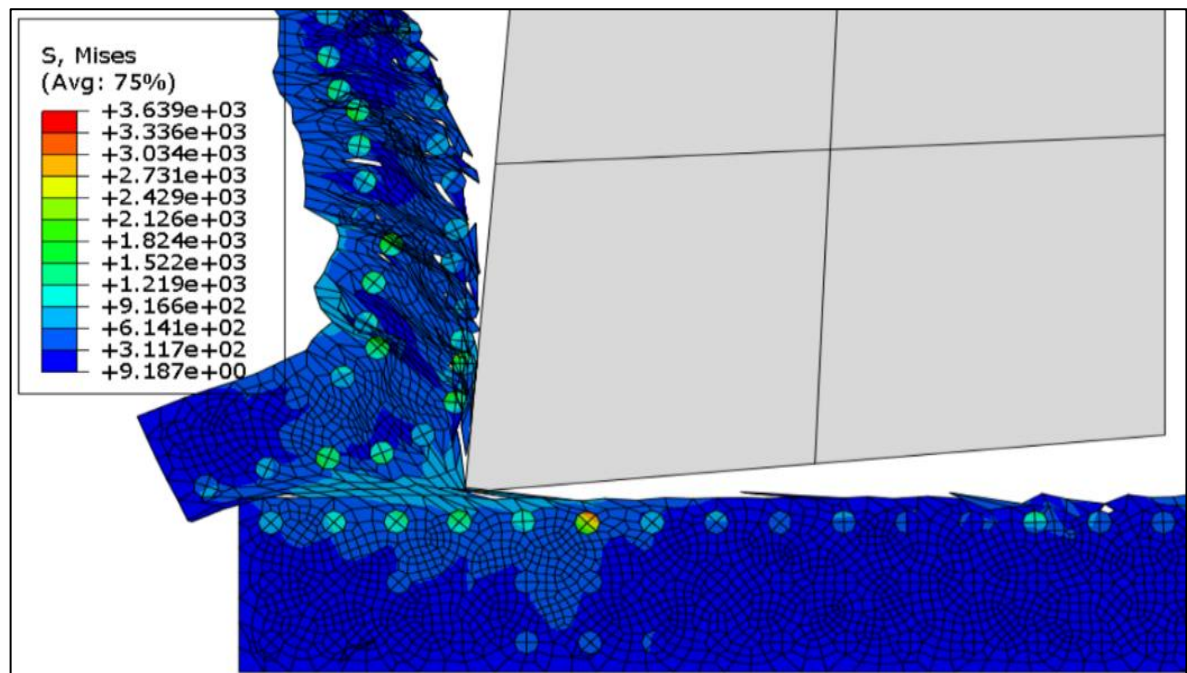


Figure III.15 : Contraintes de Von-Misès pour $V_c = 200$ m/min ($\gamma = 5^\circ$ et $f = 0.1$ mm/tr).

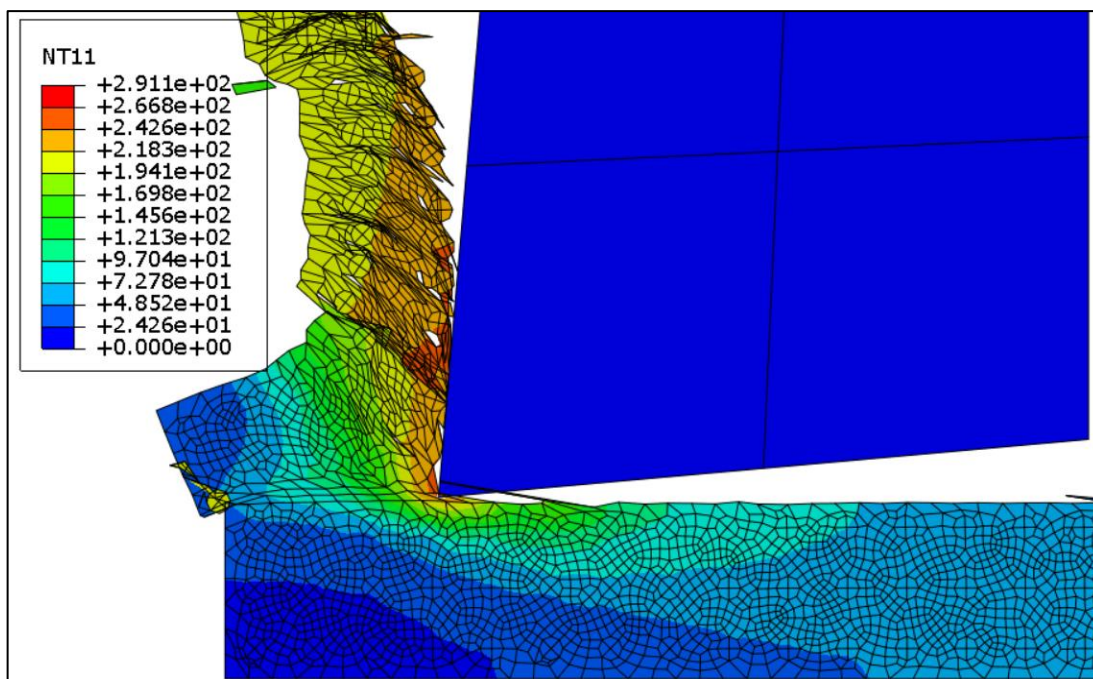


Figure III.16 : Température pour $V_c = 300$ m/min ($\gamma = 5^\circ$ et $f = 0.1$ mm/tr).

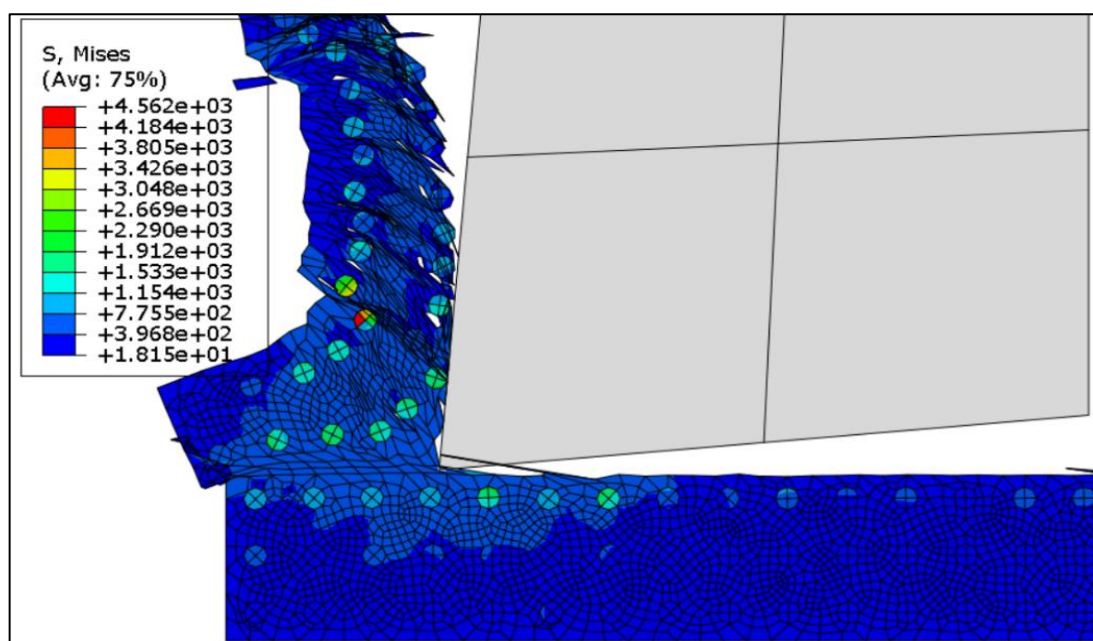


Figure III.17 : Contraintes de Von-Misès pour $V_c = 300$ m/min ($\gamma = 5^\circ$ et $f = 0.1$ mm/tr).

Le tableau qui suit résume les résultats de la température et des contraintes de Von-Misès avec la variation de vitesse de coupe.

Valeur de V_c (m/min)	Température ($^\circ\text{C}$)	Contraintes de Von-Misès (MPa)
200	250.7	3639
300	291.1	4562

Tableau III.1 : Variation de la température et des contraintes avec la vitesse de coupe (FC).

➤ Variation de l'avance

Dans ce qui suit, nous allons faire varier l'avance tout en fixant : $\gamma = 5^\circ$ et $V_c = 300$ m/min.

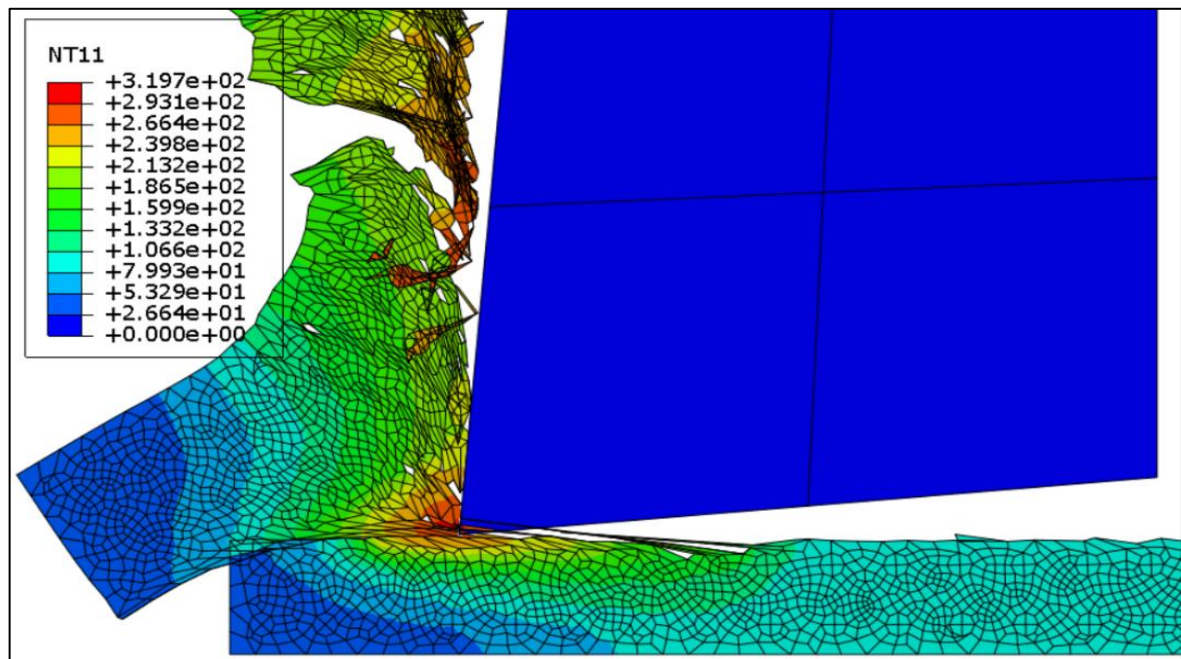


Figure III.18 : Température pour $f = 0.15$ mm/tr ($\gamma = 5^\circ$ et $V_c = 300$ m/min).

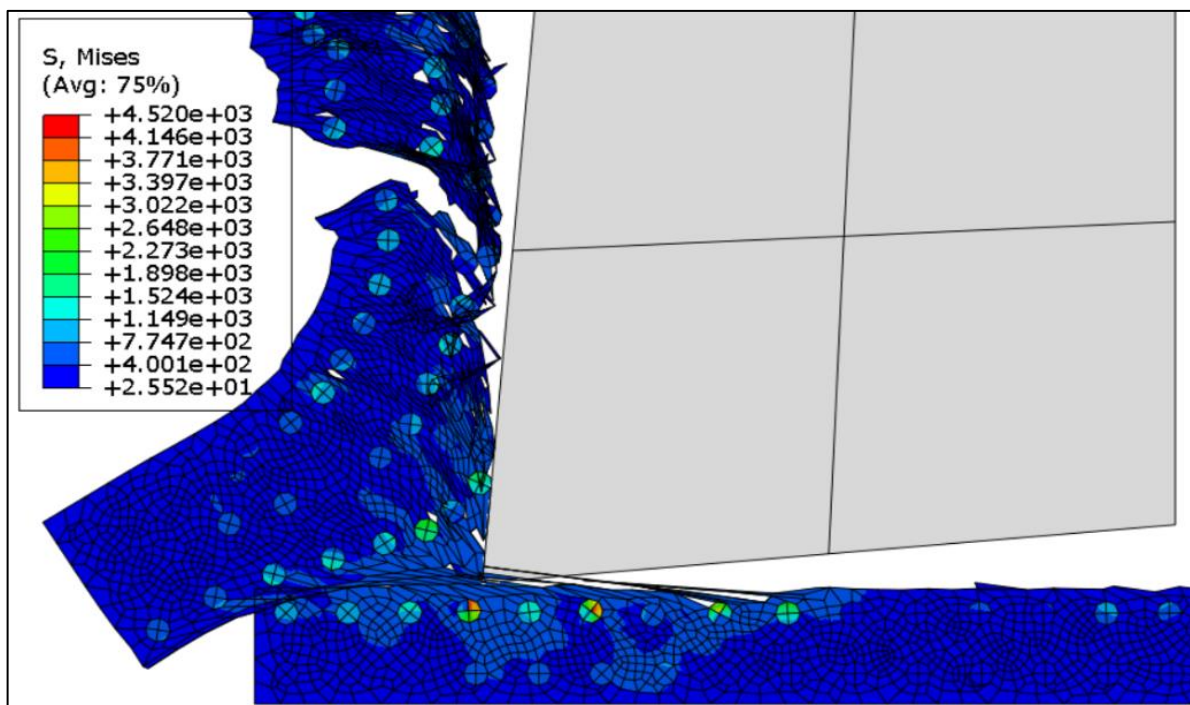


Figure III.19 : Contraintes de Von-Misès pour $f = 0.15$ mm/tr ($\gamma = 5^\circ$ et $V_c = 300$ m/min).

Les résultats de la température et des contraintes de Von-Misès avec la variation de l'avance sont reportés dans le tableau suivant.

Valeur de f (mm/tr)	Température (°C)	Contraintes de Von-Misès (MPa)
0.1	291.1	4562
0.15	319.7	4520

Tableau III.2 : Variation de la température et des contraintes avec l’avance (FC).

➤ Variation de l’angle de coupe

Finalement, nous allons faire varier l'angle de coupe tout en maintenant : $V_c = 300$ m/min et $f = 0.1$ mm/tr.

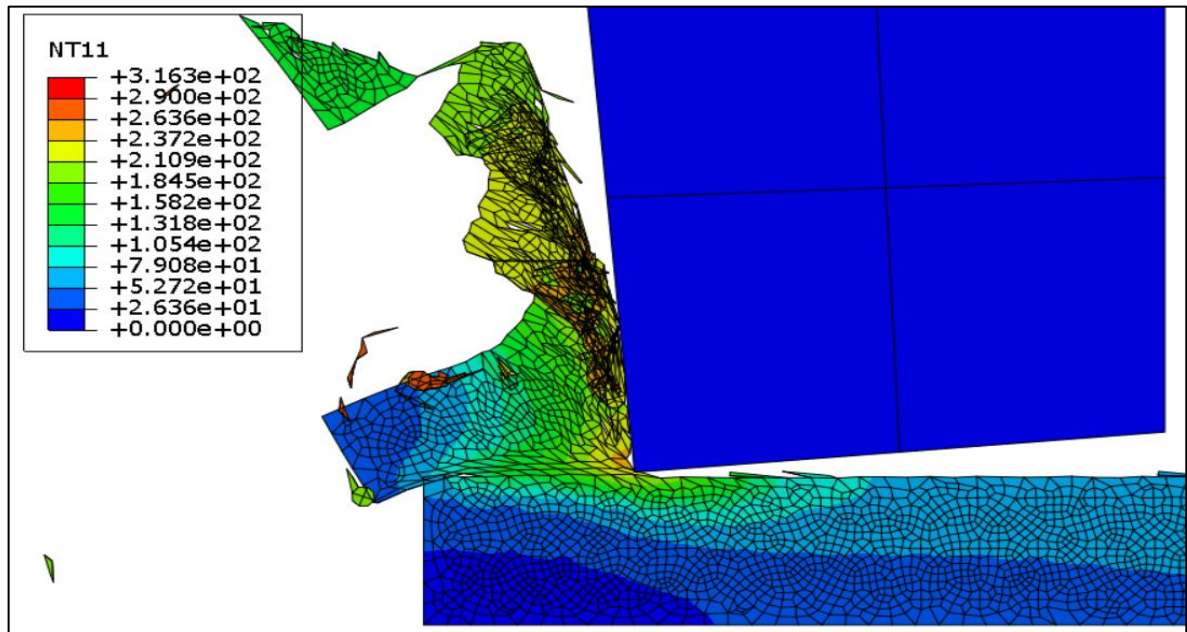


Figure III.20 : Température pour $\gamma = -5^\circ$ ($V_c = 300$ m/min et $f = 0.1$ mm/tr).

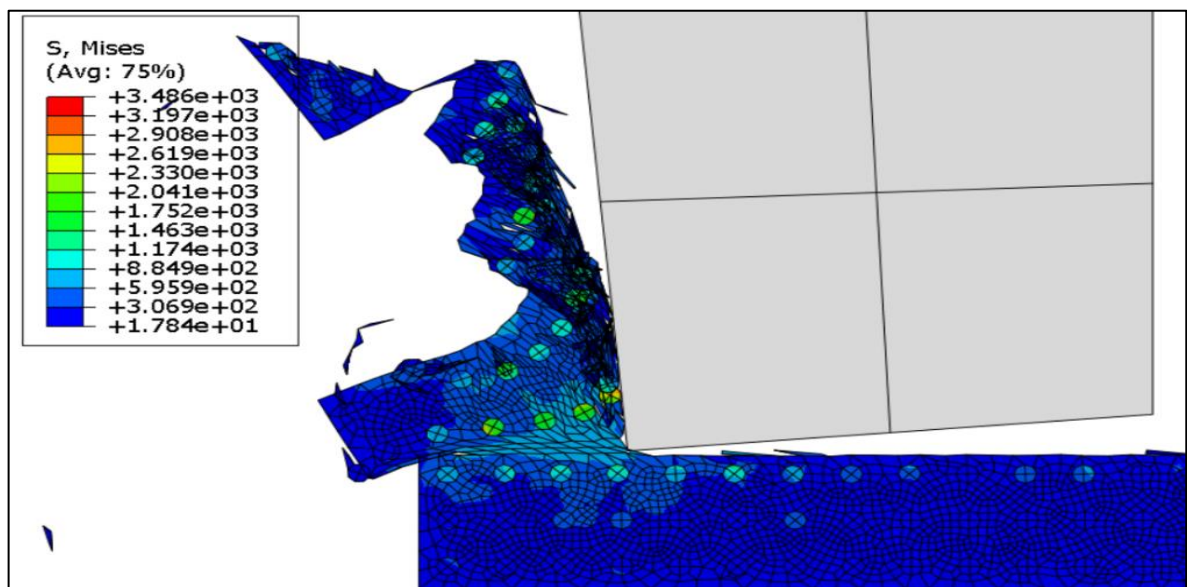


Figure III.21 : Contraintes de Von-Misès pour $\gamma = -5^\circ$ ($V_c = 300$ m/min et $f = 0.1$ mm/tr).

Le tableau suivant résume les résultats des contraintes de Von-Misès et de la température avec la variation de l'angle de coupe.

Valeur de γ (°)	Température (°C)	Contraintes de Von-Misès (MPa)
5	291.1	4562
-5	316.3	3486

Tableau III.3 : Variation de la température et des contraintes avec l'angle de coupe (FC).

✓ Synthèse des résultats de simulation dans le cas des particules circulaires

En se référant aux figures III.14 à III.21 et aux tableaux III.1 à III.3 :

- Nous avons constaté que la température et les contraintes augmentent lorsque la vitesse de coupe augmente.
- Concernant la variation de l'avance, on remarque que la température augmente avec l'augmentation de l'avance ; par contre, les contraintes sont moins influencées.
- Lorsque l'angle de coupe est modifié, on observe une augmentation de la température et une diminution des contraintes tout s'orientant vers une coupe négative.

III.3.2 Cas de simulation avec des particules elliptiques

Les figures qui vont suivre illustrent la température et les contraintes de Von-Misès dans la zone de coupe, et ce pour des particules de forme elliptiques.

➤ Variation de la vitesse de coupe

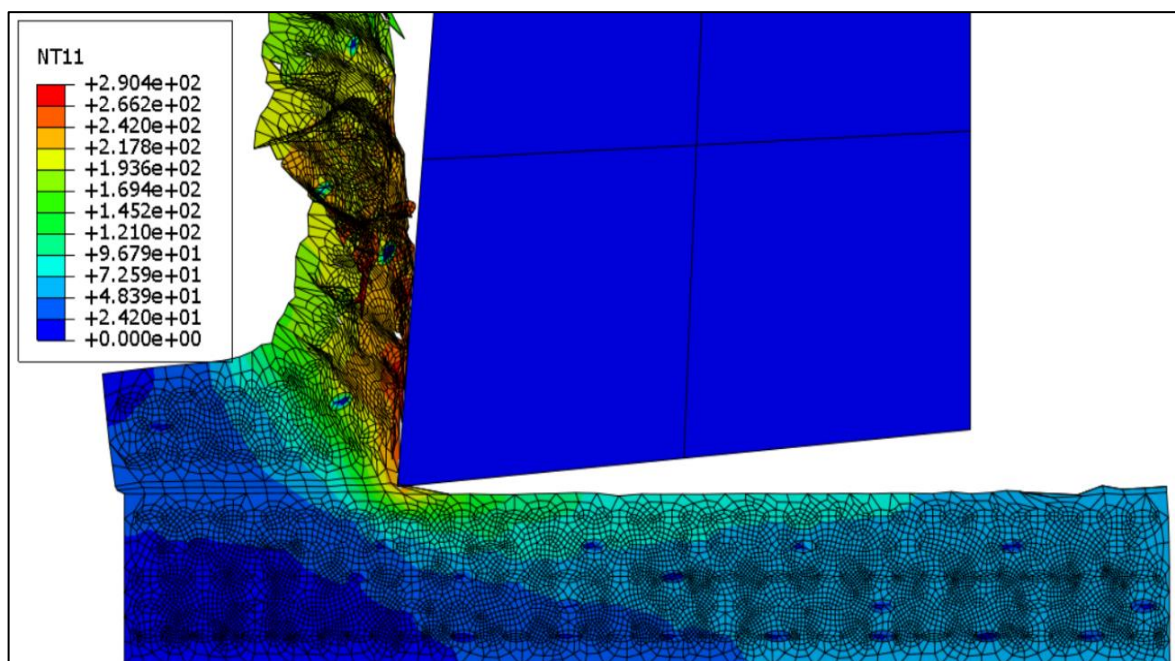


Figure III.22 : Température pour $V_c = 300$ m/min ($\gamma = 5^\circ$ et $f = 0.1$ mm/tr).

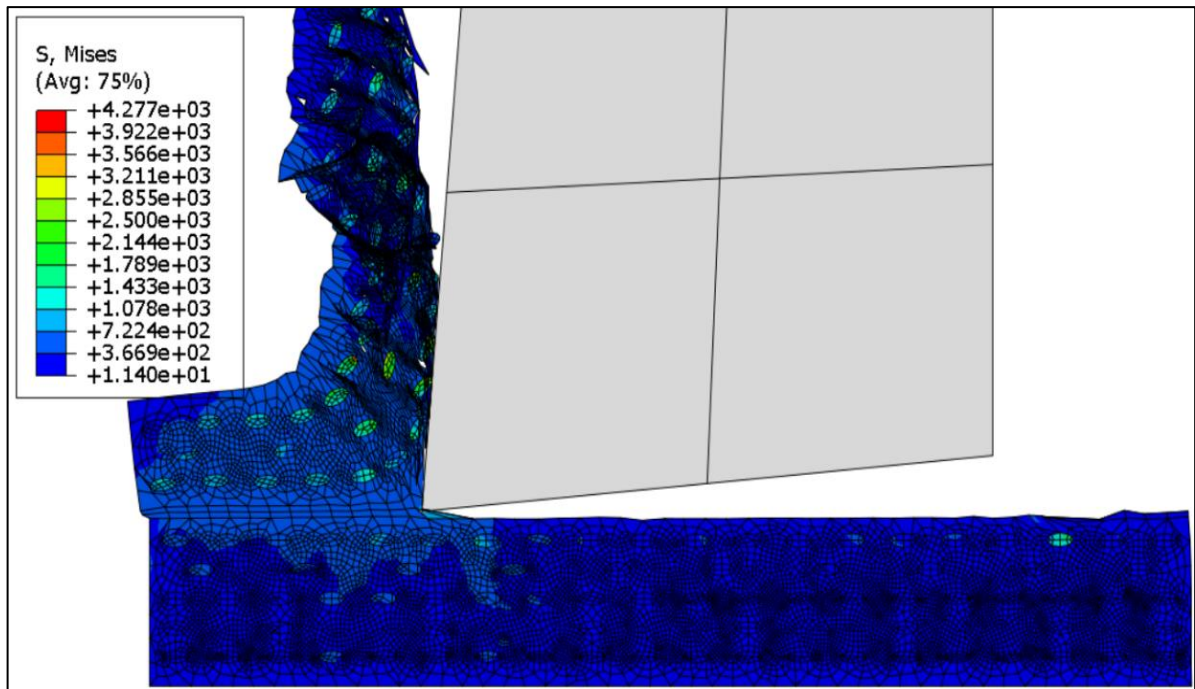


Figure III.23 : Contraintes de Von-Misès pour $V_c = 300$ m/min ($\gamma = 5^\circ$ et $f = 0.1$ mm/tr).

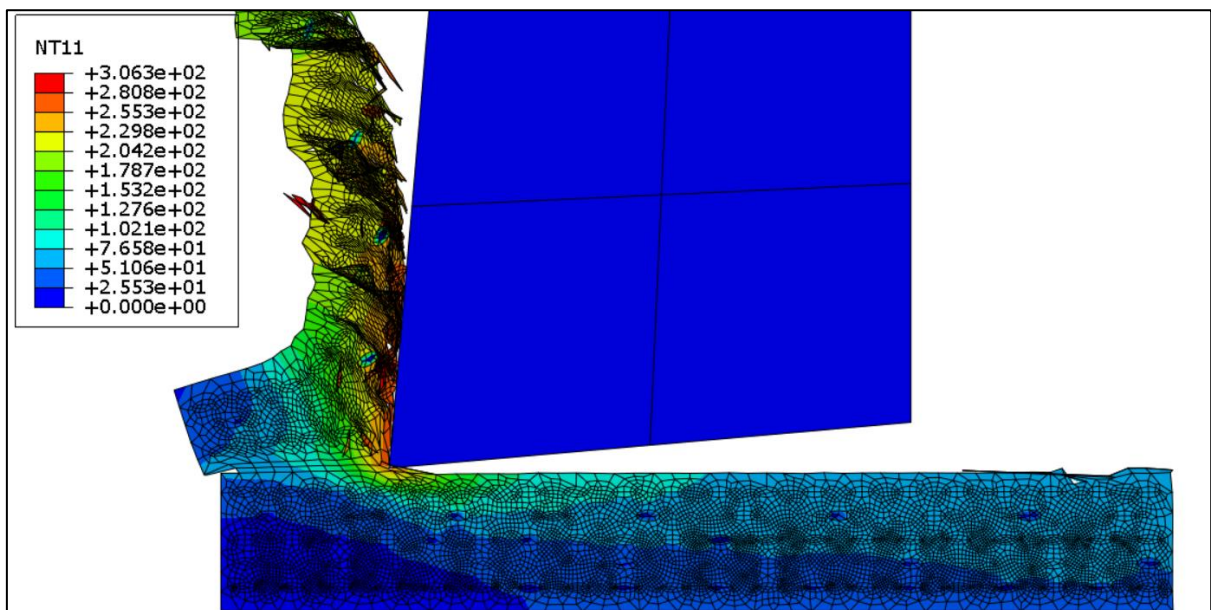


Figure III.24 : Température pour $V_c = 400$ m/min ($\gamma = 5^\circ$ et $f = 0.1$ mm/tr).

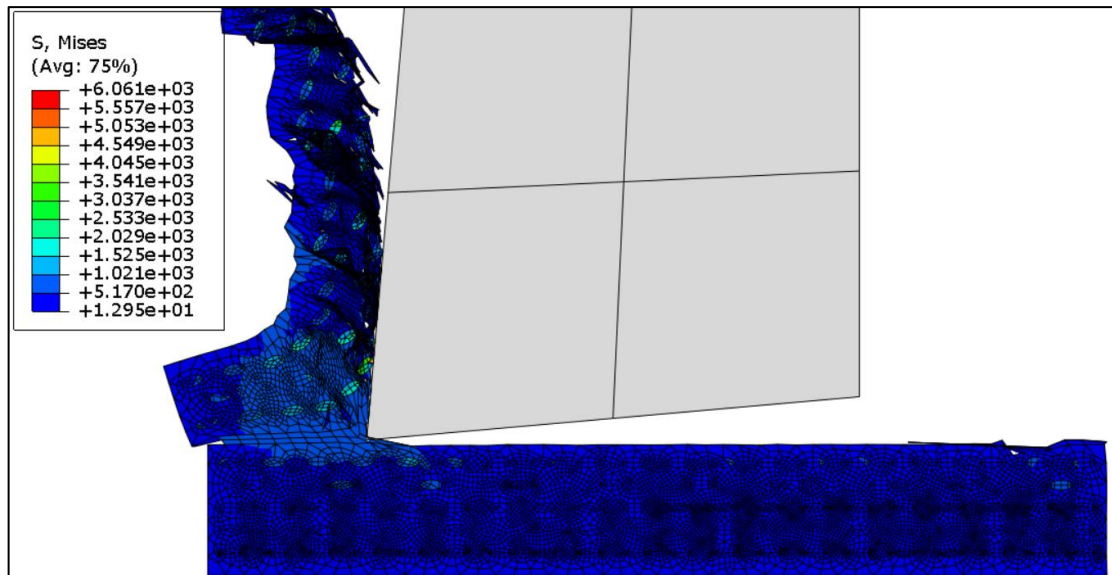


Figure III.25 : Contraintes de Von-Misès pour $V_c = 400$ m/min ($\gamma = 5^\circ$ et $f = 0.1$ mm/tr).

Les résultats de simulation sont résumés dans le tableau qui suit :

Valeur de V_c (m/min)	Température (°C)	Contraintes de Von-Misès (MPa)
300	290.4	4277
400	306.3	6061

Tableau III.4 : Variation de la température et des contraintes avec la vitesse de coupe (FE).

➤ **Variation de l’avance**

Dans ce qui suit, nous allons varier l'avance, il est nécessaire de modifier cette dernière, tout en fixant : $\gamma = 5^\circ$ et $V_c = 300$ m/min.

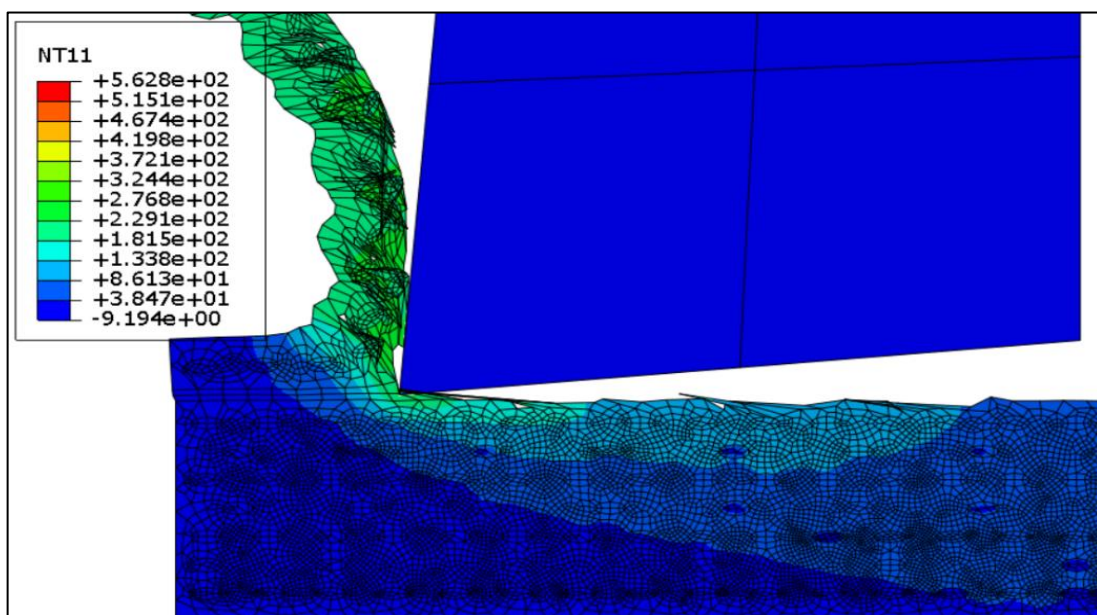


Figure III.26 : Température pour $f = 0.05$ mm/tr ($\gamma = 5^\circ$ et $V_c = 300$ m/min).

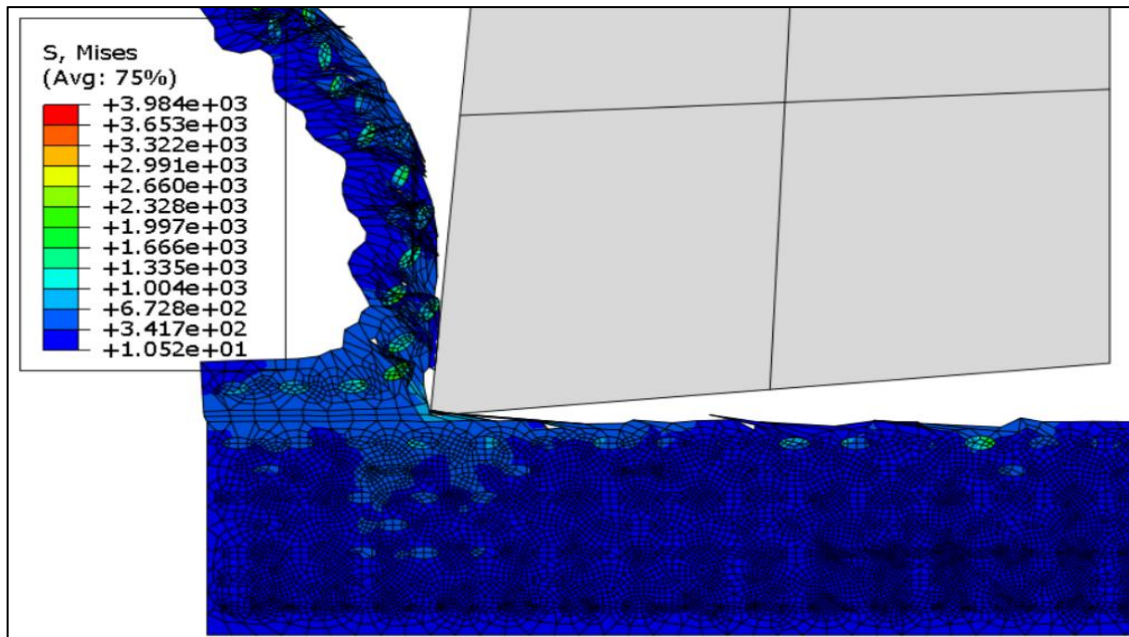


Figure III.27 : Contraintes de Von-Misès pour $f = 0.05$ mm/tr ($\gamma = 5^\circ$ et $V_c = 300$ m/min).

Le tableau qui suit résume les résultats de la température et des contraintes de Von-Misès avec la variation de l'avance.

Valeur de f (mm/tr)	Température (°C)	Contraintes de Von-Misès (MPa)
0.05	562.8	3984
0.1	290.4	4277

Tableau III.5 : Variation de la température et des contraintes avec l'avance (FE).

➤ Variation de l'angle

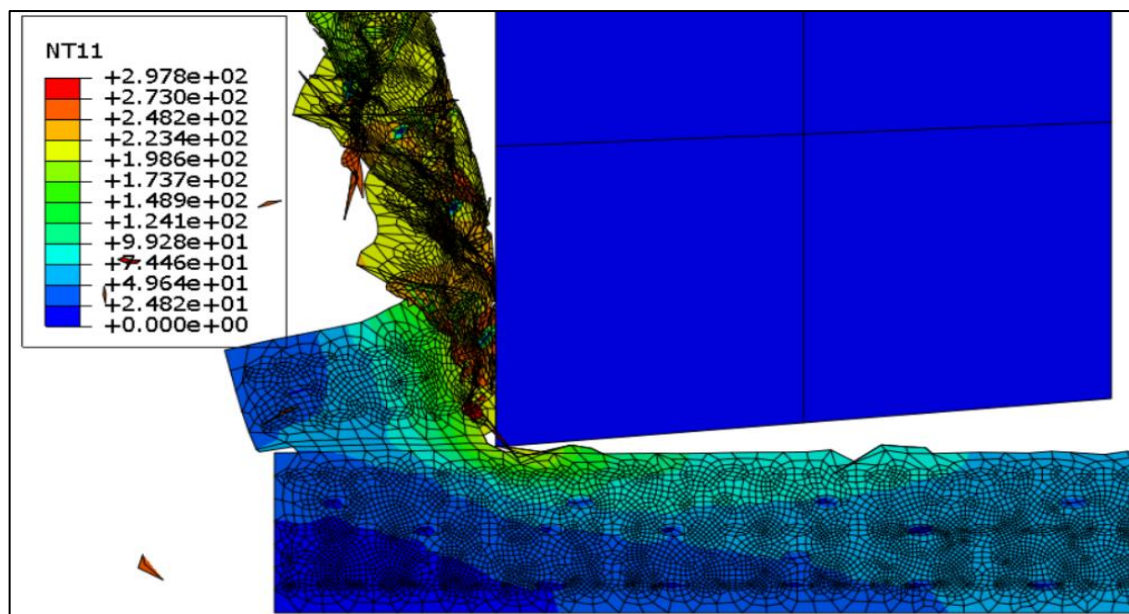


Figure III.28 : Température pour $\gamma = 0^\circ$ ($V_c = 300$ m/min et $f = 0.1$ mm/tr).

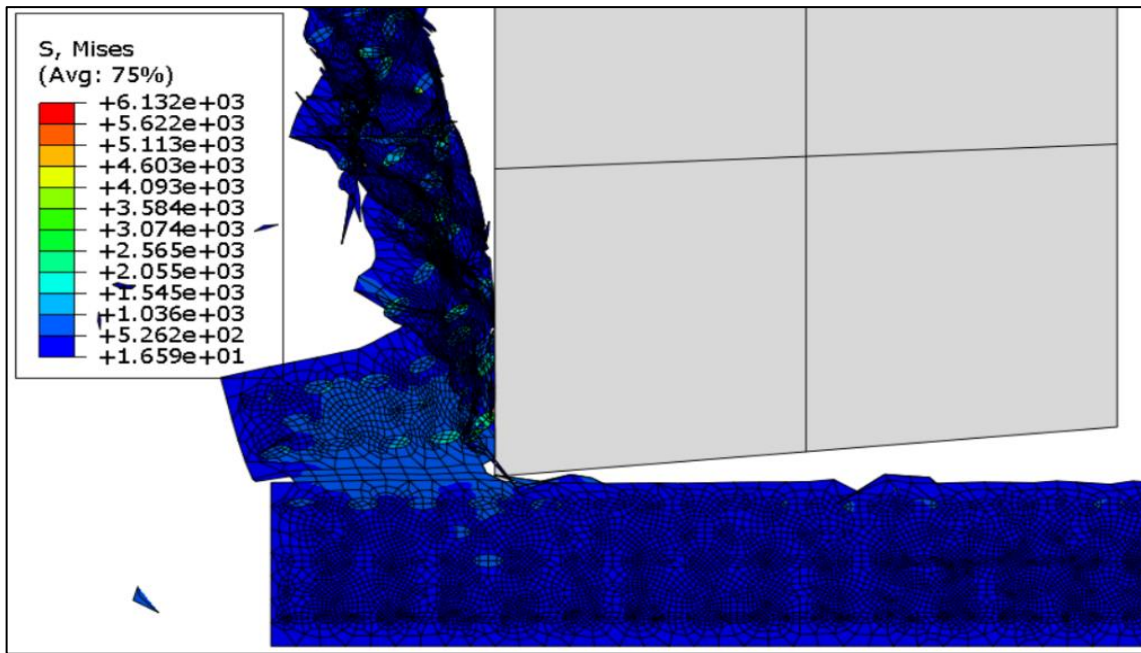


Figure III.29 : Contraintes de Von-Misès pour $\gamma = 0^\circ$ ($V_c = 300$ m/min et $f = 0.1$ mm/tr).

Le tableau qui suit synthétise les résultats de la température et des contraintes de Von-Misès en fonction de la variation de l'angle de coupe.

Valeur de γ ($^\circ$)	Température ($^\circ\text{C}$)	Contraintes de Von-Misès (MPa)
5	290.4	4277
0	297.8	6132

Tableau III.6 : Variation de la température et des contraintes avec l'angle de coupe (FE).

✓ Synthèse des résultats du deuxième cas

En se référant aux figures III.22 à III.29 et aux tableaux III.4 à III.6 :

- Nous avons constaté que la température et les contraintes augmentent lorsque la vitesse de coupe augmente.
- Concernant la variation de l'avance, on remarque que la température diminue et que les contraintes augmentent avec l'augmentation de l'avance.
- Lorsque l'angle de coupe diminue, on observe une augmentation de la température et des contraintes.



Conclusion générale

CONCLUSION GENERALE



Conclusion générale

L'objectif de cette étude concerne la simulation numérique d'une coupe orthogonale par un outil PCD d'un matériau composite constitué d'une matrice en aluminium (Al359) et d'un renfort en carbure de silicium (SiC). La simulation, effectuée sous le logiciel Abaqus CAE, utilise une formulation Lagrangienne basée sur la méthode des éléments finis. La loi rhéologique et le critère d'endommagement du matériau usiné sont de type Johnson-Cook. Aussi, nous considérons un frottement de Coulomb à l'interface outil-copeau.

Dans un premier temps, des simulations ont été menées sur un matériau homogène en aluminium (Al359) pour valider l'hypothèse du modèle orthogonal qui consiste à octroyer à l'outil la vitesse de déplacement égale à la vitesse de coupe, et de maintenir la pièce fixe.

Dans une seconde étape, nous avons relaté les résultats de simulation qui montrent l'effet de variation, d'une part, des conditions de coupe (vitesse de coupe, avance, et angle de coupe), et, d'autre part, de la forme des particules (circulaire et elliptique) sur la température et sur les contraintes de Von-Mises. À cet effet, deux cas relatifs à la forme des particules ont été considérés ; à savoir : les formes circulaire et elliptique.

Pour ces deux cas, nous avons constaté que la température et les contraintes augmentent lorsque la vitesse de coupe augmente. Ceci peut être expliqué par le fait que la formation du copeau à des vitesses élevées entraîne un cisaillement intense et un frottement important lors de l'interaction outil-matière.

Concernant la variation de l'avance, nous avons remarqué qu'en général la température et les contraintes augmentent avec l'augmentation de l'avance. Ceci peut être expliqué par le fait que lorsque l'épaisseur du copeau augmente, le dégagement de la chaleur devient lent et, par conséquent, la température augmente. Quant aux contraintes, elles augmentent avec la présence d'efforts de coupe plus grands dus à l'augmentation de l'avance.

De plus, il a été remarqué que lorsque l'angle de coupe diminue tout en s'orientant vers une coupe négative, la température augmente. Ceci peut être expliqué par la conséquence d'entassement du copeau sur la face de coupe, ce qui engendre l'élévation de la température et des efforts de coupe. Cette dernière constatation coïncide bien avec le cas des particules de forme elliptique, mais nous conduit à revoir le résultat dégagé pour les particules de forme cylindrique qui stipule que les contraintes diminuent.

Perspectives :

Nous souhaitons que la présente étude soit enrichie par la considération et la possibilité de génération de formes aléatoires pour les particules, et par la prédiction dans le cadre de la coupe oblique (3D).



Annexe

▽UUGXG



Description du logiciel utilisé dans la simulation (Abaqus)

Abaqus est un code de calcul par la méthode des éléments finis, créé en 1978 par Dassault Systèmes. Il offre les meilleures solutions pour des problèmes linéaires, non linéaires, dynamiques, etc. Il est avant tout un logiciel de simulation de problèmes très variés en mécanique [31], [38].

Simuler la réponse physique des structures soumises à des chargements, des températures, des impacts ou autres conditions extérieures. Il est connu et répandu, en particulier, pour ses traitements performants de problèmes non-linéaires. La figure qui suit illustre l'interface du produit Abaqus/CAE 2017 que nous utilisons dans notre étude.

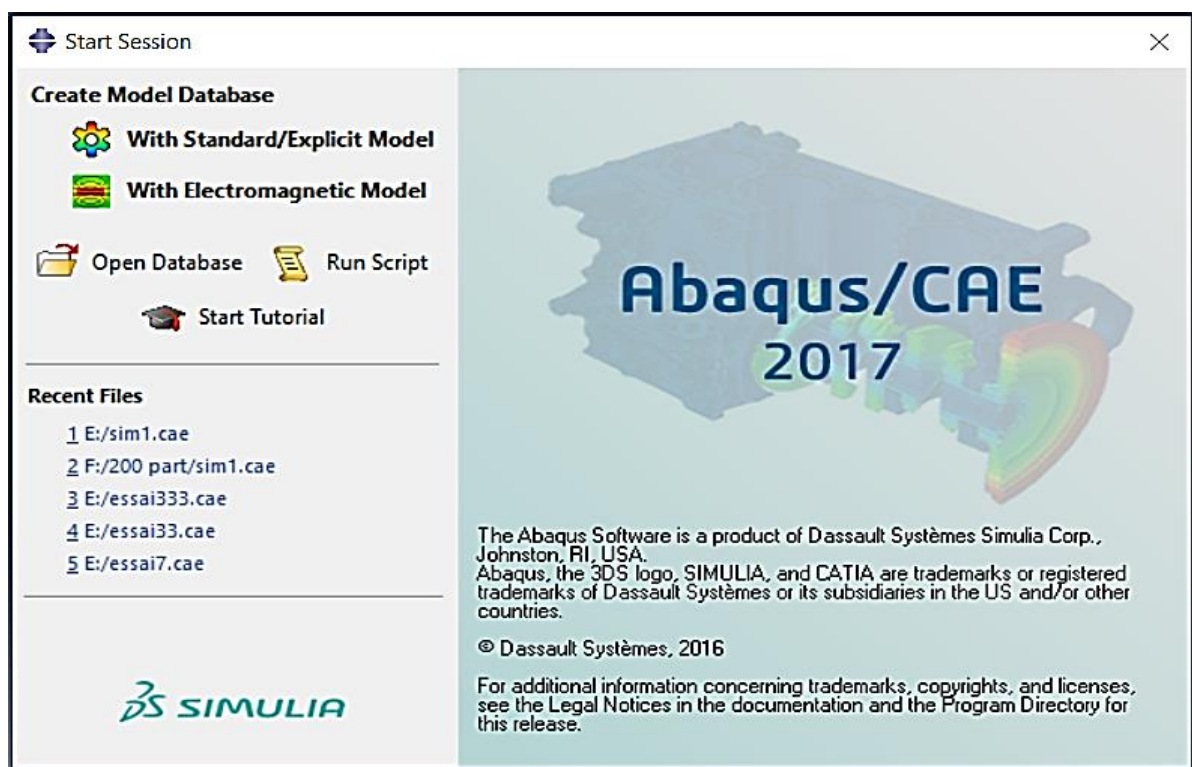


Figure A.1 : Interface du code Abaqus.

A.1 Unités

Le logiciel Abaqus n'indique pas les unités des grandeurs physiques ; c'est à l'utilisateur de faire un choix d'unités. Pour notre travail, nous avons choisi les unités suivantes :

Distance	Temps	Masse	Masse volumique	Force	Contrainte	Température
[mm]	[s]	Tonnes [t]	[t.mm ⁻³]	[N]	[MPa]	[°C]

Tableau A.1 : Choix des unités.

A.2. Modules

Abaqus est structuré en plusieurs modules. La réalisation complète d'un projet de simulation s'effectue après un passage successif dans les modules qui suivent :

➤ **Module PART (Création d'une géométrie)**



Ce module permet de créer et d'éditer des géométries et des entités. Ces entités peuvent être déformables ou rigides. Une fois accédé à ce module, on peut sélectionner convenablement :

- L'espace de modélisation : 3D / 2D Planar / Axisymmetric.
- Le type d'entité à générer : Deformable / Discret rigid / Analytical rigid / Eulerian.
- La forme de l'entité : Solid / Shell / Wire/ Point.

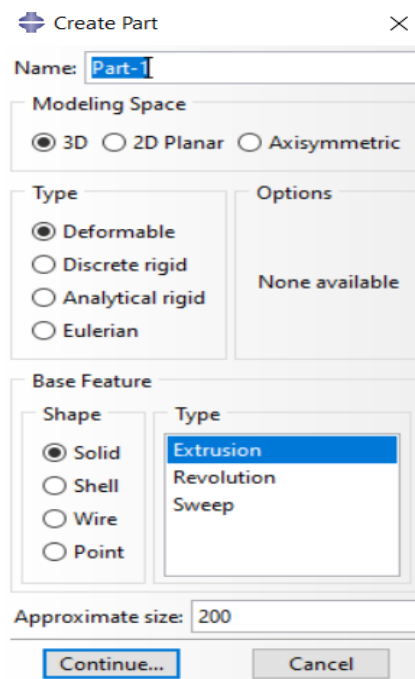
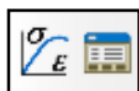


Figure A.2 : Création d'une géométrie.

➤ **Le module PROPERTY (Création d'un matériau)**



Permet de définir les propriétés du ou des matériaux des parties déformables qui constituent le modèle. Dans ce module et selon le cas étudié, on est amené à définir des propriétés élastiques et/ou plastiques (ou autres). Il suffit de cliquer sur l'icône (Création d'un matériau). Il est préférable de donner un nom spécifique à chacun des matériaux ce qui permet la création d'une base de données propre au projet. On définit par la suite : les propriétés élastiques via Mechanical / Elasticity / Elastic (module d'Young et le coefficient de Poisson

pour le cas, par exemple, d'un matériau isotrope) et les propriétés plastiques via Mechanical / Plasticity / Plastic. Dans ce module, on crée aussi la section du matériau et son attribution.

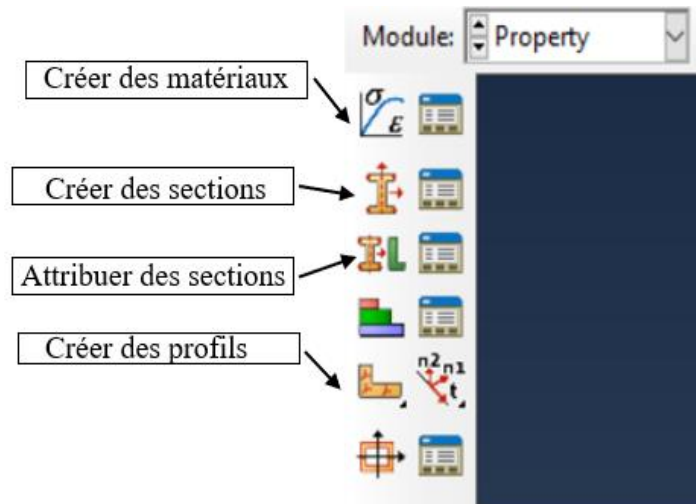


Figure A.3 : Création d'un matériau.

➤ **Module ASSEMBLY (Création de l'instance)**



Ce module permet de créer une instance à partir des entités déjà définies dans le module Part. Ces instances seront celles qu'on manipulera par la suite dans le modèle. Dans le cas général, à partir de l'icône en haut à gauche, on crée une instance en sélectionnant tous les éléments créés dans le module Part. On peut aussi dans certains cas faire subir des mouvements d'ensemble à ces instances pour les repositionner dans l'espace. Le module Assembly permet d'assembler les différentes pièces créées dans un projet. Cette étape est nécessaire même si le projet n'est composé que d'une seule pièce.

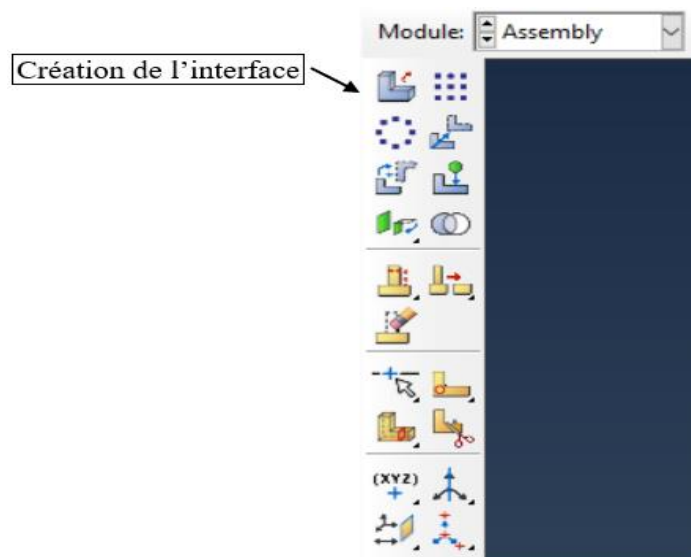


Figure A.4 : Création de l'instance.

➤ Module STEP (Création d'un Step)



Le module Step permet d'effectuer les étapes de calcul. Selon le cas une analyse peut comporter un ou plusieurs Steps. On choisit par exemple un mode Static, General comme, par exemple, dans le cas d'une analyse statique ou bien Dynamic explicit dans le cas d'études de crash ou d'impact.

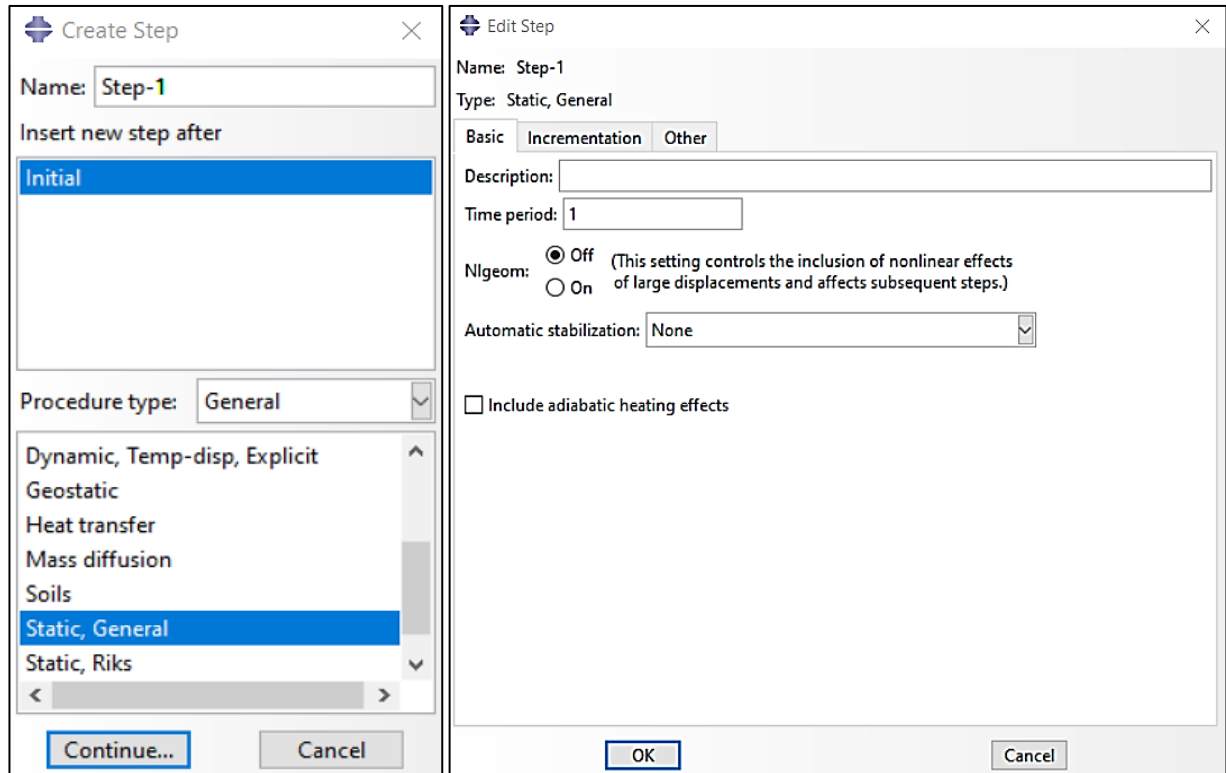


Figure A.5 : Création du Step.

➤ Module INTERACTION (Création d'interactions)

Grâce ce module, il est possible de spécifier toutes les interactions entre les différentes parties et régions du modèle qu'elles soient mécaniques, thermiques ou autres. Le passage par ce module n'est obligatoire que s'il y a plusieurs instances qui sont en contact.

➤ Module LOAD (Création d'un chargement)



Le module permet de définir les contraintes subies par le système étudié. Ce module permet de spécifier tous les chargements et toutes les conditions aux limites du problème étudié. Les chargements et les conditions aux limites sont dépendantes des Steps, par exemple, une force qui est appliquée au Step 1 peut être inactive au Step 2.

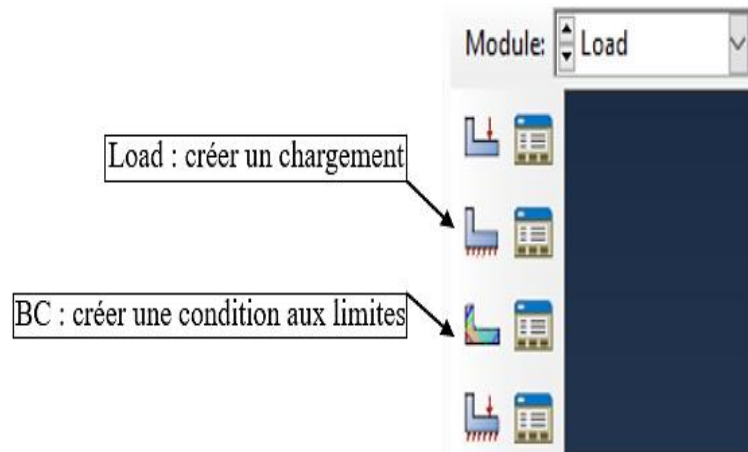


Figure A.6 : Création d'un chargement.

➤ **Module MESH (Création du maillage)**

Le module MESH permet de créer le maillage de la pièce. Il contient tous les outils nécessaires pour générer le maillage élément fini sur un assemblage. Il n'est pas nécessaire que le maillage soit régulier, en effet on peut resserrer le maillage près des endroits d'intérêts (par exemple aux endroits où l'on pense que la solution va beaucoup varier, cependant il faut veiller à avoir des éléments faiblement distordus (se rapprocher d'un polygone régulier). Plus ce maillage est resserré plus la solution que l'on obtient par la méthode des éléments finis sera précise. Il existe plusieurs éléments classiques pour mailler notre pièce (hexaèdre, tétraèdre...).

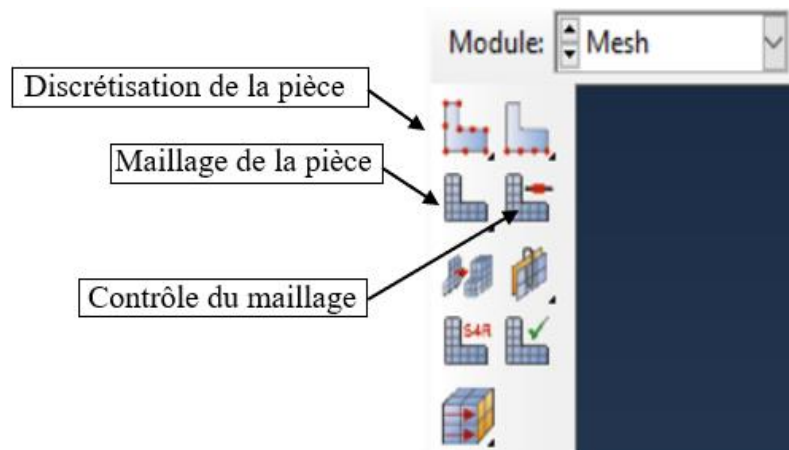


Figure A.7 : Création du maillage.

➤ **Module JOB (Création du job)**



Le module JOB permet de lancer le calcul. Les contraintes, les déformations et les déplacements de notre pièce ou système étudié sont ainsi calculés.

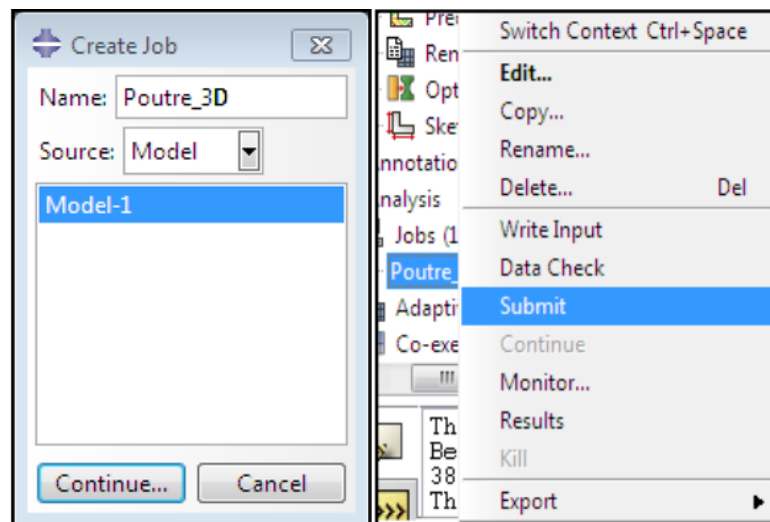


Figure A.8 : Création du job.

➤ **Module VISUALIZAION**

Le module VIZUALISATION permet de visualiser les résultats des calculs lancés précédemment.

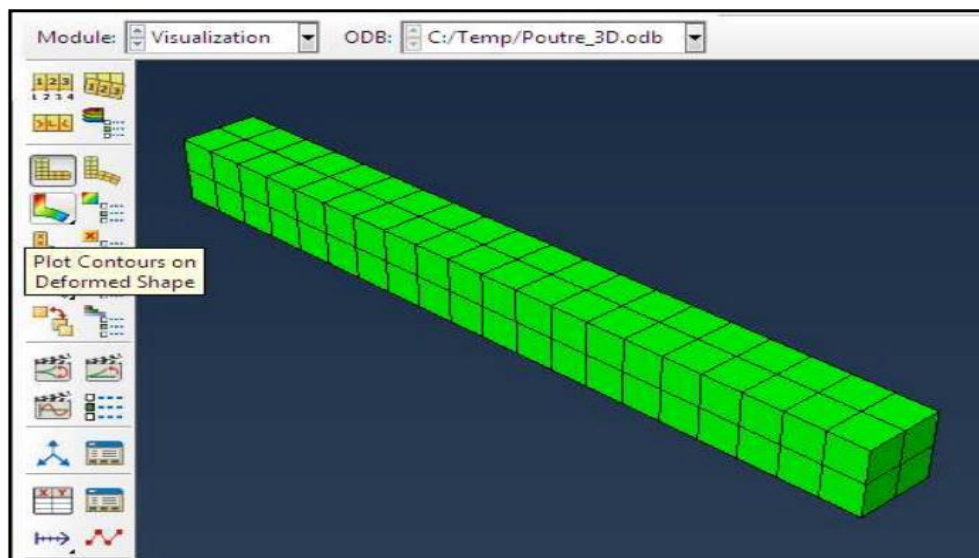


Figure A.9 : Visualisation des résultats.



Références bibliographiques

Βεβηλενυεεε ριρριοαλσβριανεεε



Références bibliographiques

- [1] <https://www.materiel-du-pro.fr/quelle-utilite-pour-les-materiaux-composites/>, Consulté le 07/04/2024.
- [2] https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Matériau_composite&oldid=214702231, Consulté le 07/04/2024.
- [3] S. ZENIA, "Modélisation numérique de l'usinage des matériaux composites à matrice polymère et fibres longues de carbone", Thèse de Doctorat, Université de Lorraine, France, 2017.
- [4] M. SADDOK, "Comportement mécanique des tubes sandwichs sous pression", Mémoire de Master, Université de Biskra, 2019.
- [5] E. BRAHIM et K. KHANOUS, "Etude du comportement mécanique en flexion 3 points d'un matériau composite carbone/epoxy par le code Abaqus", Mémoire de Master, Université de Tiaret, 2020.
- [6] L. GORNET, "Généralités sur les matériaux composites", Mémoire de Master, École d'Ingénieurs, France, 2008.
- [7] M. MARZANO, "Les matériaux composites", Dossier pédagogique, ANFA, 2014.
- [8] CARMA - Centre d'Animation Régional en Matériaux Avancés, "Glossaire des matériaux composites", 2006.
- [9] Image internet, libre accès, <https://www.shutterstock.com/fr/>, Consulté le 07/04/2024.
- [10] S. BELHENINI, "Matériaux Composites", Cours, Université d'Ain Témouchent, 2023.
- [11] L. MERAD, "Étude par spectroscopie Raman et modélisation d'une résine composite RTM", Mémoire de Master, Université de Tlemcen, 2010
- [12] A. KHALDOUNE, "Effet des paramètres d'élaboration sur le comportement mécanique d'un bio-composite", Mémoire de Master, Université de Msila, 2016.
- [13] <https://langue-francaise.tv5monde.com/>, Consulté le 18/04/2024.
- [14] T. MASRI, "Contribution à la modélisation des phénomènes de rupture des matériaux composites", Thèse de Doctorat, Université de Biskra, 2006.
- [15] L. GENDRE, "Matériaux composites et structures composites", Mémoire de Master, Université Paris-Saclay, France, 2011.
- [16] ASTM. "ASTM C393 / C393M - 11 Standard Test Method for Core Shear Properties of Sandwich Constructions by Beam Flexure e1", 2008.
- [17] D. ZENKERT, "The handbook of sandwich construction". Engineering Materials Advisory Services Ltd, 1997.
- [18] F. ALILA, "Analyse de la tenue en fatigue de structures composites sandwichs", Thèse de Doctorat, Université de Nantes, France, 2018.
- [19] O. LAGGOUN et B. MADANI, "Comportement mécanique des panneau sandwichs avec âme en nid d'abeille", Mémoire de Master, Université de Ouargla, 2020.

Références bibliographiques

- [20] M. KHAROUBI, "Étude du comportement mécanique de matériaux composites sous chargement cyclique et dynamique", Thèse de Doctorat, Université de Guelma, 2009.
- [21] L. GENDRE, "Les grandes familles de matériaux composites", Mémoire de Master, Université Paris-Saclay, France, 2011.
- [22] S. DRAPIER, "Mécanique des composites hautes performances version 3", Document de cours, École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne, France, 2019.
- [23] L. TOUAHRI, "Caractérisation d'un matériau composite stratifié à fibre de verre/époxy en traction", Mémoire de Master, Université d'Annaba, 2015.
- [24] J. M. BERTHLOT, "Mécanique des matériaux et structures composites", Institut Supérieur des Matériaux Le Mans, France et Mécaniques Avancés, Le Mans, France, 2010.
- [25] F. BERBAIN et A. CHEVALIER, " Mise en œuvre des composites : Méthodes Et Matériels", Techniques de l'Ingénieur, A 3720.
- [26] <https://www.har-tech.com/les-differents-procedes-dusinage/>, Consulté le 05/05/2024.
- [27] <https://www.rapiddirect.com/fr/blog/types-of-machining-operations/>, Consulté le 05/05/2024.
- [28] H. ATHMANI, "Étude de manifestations thermiques et énergétiques associés à l'usinage des matériaux", Mémoire de Magister, Université de Tiaret, 2008.
- [29] M. BOUAITA, "Etude, modélisation et simulation de l'usinage orthogonal par la méthode des éléments finis", Mémoire de Master, Université d'Annaba, 2017.
- [30] L. HIMED, "Modélisation et simulation de la coupe orthogonale en utilisant un code de calcul par la méthode des éléments finis." Mémoire de Magister, Université de Batna, 2009.
- [31] K. MEKKI et E. A. SALATIEL, "Analyse du comportement thermomécanique des matériaux composites en usinage", Mémoire de Master, Université de Tiaret, 2022.
- [32] Y. LAROCHE et J. NARCISSE, "Simulation numérique de l'usinage avec ABAQUS", Rapport d'étude, Université François - Rabelais, 2012.
- [33] M. SADEGHIFAR, R. SEDAGHATIL, W. JOMAA, V. SONGMENE, "A comprehensive review of finite element modeling of orthogonal machining process: chip formation and surface integrity predictions", The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, London, 2018
- [34] R. A. LAGHARI, L. JIANGUNG et W. YONGXIANG, "Study of machining process of SiC/Al particle reinforced metal matrix composite using finite element analysis and experimental verification", Harbin institute of technology, School of Mechatronics Engineering, Harbin, China, 2020.
- [35] E. A. FLORES-JOHNSON, G. D. NGUYEN, L. SHEN, "Finite element modeling of impact behavior of nacre-like Aluminum composite ", Trans tech, Switzerland, 2015.
- [36] U. UMER, J. ABU QUDEIRI, A. MOHAMMAD et H. MOHAMED, "Finite element modeling of the orthogonal machining of particle reinforced aluminum-based metal matrix", FARCAMT, Advanced Manufacturing Institute, King Saudi University, Saudi Arabia, 2014.

Références bibliographiques

- [37] M. P. GROOVER, Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems, Handbook 4th Edition, 2010.
- [38] S. DEGHOUDJ, "Logiciel de Simulation en Génie Mécanique Abaqus." Polycopié de Travaux Pratiques, Université de Tébessa, 2019.

ملخص:

من خلال هذه الدراسة، نهتم بعملية محاكاة رقمية خاصة بقطع مصفوفة معدنية (ألومنيوم) معززة بجزيئات كربيد السليسيوم. الهدف هو تحليل مدى تأثير ظروف القطع (سرعة القطع، تقدم أداة القطع وزاوية القطع) على درجة الحرارة واجهادات فون ميزس في منطقة القطع. أيضا، استعملت أشكال دائرية وبيضاوية للجزيئات. تم تنفيذ المحاكاة، التي تبدو واعدة، تحت برنامج (Abaqus CAE) أثناء استخدام صيغة لاغرانج مع قانون السلوك ومعيار الضرر لجونسون كوك. كما تم اعتماد احتكاك كولوم في واجهة أداة القطع-الشريحة.

كلمات المفاتيح: مركب، محاكاة رقمية، تفاعل حراري ميكانيكي، اجهادات، درجة الحرارة، برنامج (Abaqus).

Résumé :

Dans la présente étude, nous nous intéressons à la simulation numérique de la coupe orthogonale d'un matériau composite à matrice métallique (Al359) renforcée par des particules en carbure du silicium (SiC). L'objectif sera d'analyser l'influence des conditions de coupe (vitesse de coupe, avance et angle de coupe) sur la température et les contraintes de Von-Mises dans la zone de coupe. Aussi, les formes circulaire et elliptique ont été considérées pour les particules. La simulation, qui semble être prometteuse, a été effectuée sous le progiciel Abaqus CAE tout en utilisant la formulation Lagrangienne avec une loi de comportement et un critère d'endommagement de type Johnson-Cook. Un frottement de Coulomb a été adopté à l'interface outil-copeau.

Mots-clés : Composite, Simulation numérique, Comportement thermomécanique, Contraintes, Température, Abaqus.

Abstract:

In the present study, we are interested to the numerical simulation of the orthogonal machining of (SiC) particle reinforced aluminum (Al359) based metal matrix composite. The goal will be to analyze the influence of cutting conditions (cutting speed, feed and rake angle) on temperature and Von-Mises stresses in the cutting zone. In addition, circular and elliptical shapes were considered for particles. The simulation, which seems to be promising, was carried out under the Abaqus CAE software package by using the Lagrangian formulation with a behavior law and damage criterion of Johnson-Cook. A Coulomb friction was adopted at the tool-chip interface.

Keywords: Composite, Numerical simulation, Thermomechanical behavior, Stresses, Temperature, Abaqus.