

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 DE CYCLE

MASTER

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Construction Mécanique

Thème

**Analyse du comportement
thermomécanique des matériaux composites
en usinage**

Préparé par :

MEKKI Kamel et SALATIEL Eugénio Almeida

Soutenu publiquement le 06/07/2022, devant le Jury composé de :

M. MAZARI Djamel	Maître Assistant «A» (Univ. Ibn Khaldoun de Tiaret)	Président
M. MOULGADA Abdelmadjid	Maître de Conférences «A» (Univ. Ibn Khaldoun de Tiaret)	Examineur
M. MADANI Ahmed	Maître Assistant «A» (Univ. Ibn Khaldoun de Tiaret)	Examineur
M. HADDOUCHE Kamel	Professeur (Univ. Ibn Khaldoun de Tiaret)	Encadrant

Année universitaire : 2021 - 2022

Dédicace

Nous dédions ce modeste travail à :

Nos chers parents

Nos frères et sœurs

Toutes nos familles

Tous nos amis.

Remerciements

Tout d'abord nous remercions avant tout Allah le tout puissant qui nous a donné le courage et la volonté pour atteindre notre objectif.

Nous remercions vivement notre Directeur du mémoire de Master Monsieur HADDOUCHE Kamel, Professeur à l'Université Ibn Khaldoun de Tiaret et Directeur du Laboratoire de Recherche des Technologies Industrielles, de nous avoir encadré, orienté, aidé et conseillé.

Nos vifs remerciements aux Membres du Jury pour avoir accepté d'examiner ce modeste travail.

Nous adressons nos remerciements aux Enseignants qui ont contribué à notre formation durant les cycles de Licence et Master.

Un grand merci à toute personne qui a contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.

Enfin, nous tenons à témoigner notre gratitude à nos familles pour leur soutien inestimable.



Table des matières



Nomenclature

Liste des figures

Liste des tableaux

INTRODUCTION GÉNÉRALE 1

Chapitre 1 : Généralités sur les matériaux composites

1.1. Introduction	2
1.2. Définition.....	2
1.3. Constituants principaux de matériaux composites	2
1.3.1. Matrice	2
1.3.2. Renfort.....	3
1.4. Structures de matériaux composites	4
1.4.1. Monocouches	4
1.4.2. Stratifiés	4
1.4.3. Sandwichs.....	5
1.5. Classification des matériaux composites.....	6
1.5.1. Classification suivant la forme des constituants	6
1.5.2. Classification suivant la nature des constituants.....	6
1.5.3. Classification selon le taux d'utilisation	6
1.6. Principales fibres [9].....	7
1.6.1. Fibres de verre.....	7
1.6.2. Fibre de carbone	7
1.6.3. Fibre d'aramide	7
1.6.4. Fibres de bore	7
1.6.5. Fibre de silice (ou de quartz).....	8
1.7. Architecture des renforts [9].....	8
1.8. Charges et additifs [8].....	10
1.9. Avantages et inconvénients des matériaux composites.....	10
1.10. Domaines d'application et mise en œuvre des matériaux composites	11

Chapitre 2 : Procédé de coupe et comportement des composites

2.1. Introduction	15
2.2. Procédés d'usinage	15
2.2.1. Types de procédés de coupe.....	16
2.2.2. Conditions de coupe [18]	17

2.2.3.	Formation du copeau [14]	18
2.2.4.	Configuration de coupe orthogonale	20
2.3.	Lois de comportement des matériaux usinés	20
2.3.1.	Loi de Norton-Hoff	22
2.3.2.	Loi de Johnson-Cook :	22
2.4.	Usinage des matériaux composites	23
2.5.	Comportement mécanique d'un composite unidirectionnel	25

Chapitre 3 : Résultats de simulation et interprétation

3.1.	Introduction	29
3.2.	Domaine de modélisation de la coupe [14]	29
3.2.1.	Domaine statique	29
3.2.2.	Domaine quasi-statique	29
3.2.3.	Domaine dynamique	29
3.3.	Présentation du code Abaqus	29
3.4.	Simulation numérique thermomécanique d'un composite	31
3.4.1.	Données relatives au couple outil-matière	31
3.4.2.	Création de la géométrie de l'outil et la pièce dans le module « Part »	33
3.4.3.	Introduction des paramètres de comportement et d'endommagement dans le module « Property »	34
3.4.4.	Modules Assembly et Step	35
3.4.5.	Définition du contact outil-copeau dans le module « Interaction »	35
3.4.6.	Maillage de la pièce et de l'outil dans le module « Mesh »	36
3.5.	Résultats de la simulation numérique	37
3.6.	Synthèse des résultats de la simulation numérique	44
CONCLUSION GÉNÉRALE		45
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES		46



Nomenclature



NOMENCLATURE

Symbole	Désignation	Unité de mesure
A, B	Paramètres de la loi de Johnson-Cook	MPa
a_p	Profondeur de passe	mm
b	Largeur de la poutre sandwich	mm
C	Paramètres de la loi de Johnson-Cook	
C_{ij}	Coefficients de la matrice de rigidité	MPa
D	Rigidité en flexion	$N.m^2$
D_0	Contribution à la rigidité en flexion des peaux par rapport à l'axe neutre du sandwich	$N.m^2$
D_c	Rigidité apportée par l'âme par rapport à son axe neutre	$N.m^2$
D_f	Rigidité des peaux	$N.m^2$
d	Distance entre l'axe neutre des deux peaux	mm
d_1, \dots, d_5	Paramètres d'endommagement du matériau usiné	
E	Module d'Young de la poutre en matériau isotrope	MPa
E_c	Module d'élasticité de l'âme	MPa
E_{f1}, E_{f2}	Modules d'élasticité des peaux supérieure et inférieure	MPa
E_m	Module d'Young de la matrice	MPa
E_p	Module d'Young du matériau de peau	MPa
E_r	Module d'Young du renfort	MPa
f	Avance	mm/tr
G_c	Module de cisaillement de l'âme	MPa
G_m	Module de cisaillement de la matrice	MPa
G_r	Module de cisaillement du renfort	MPa
h	Epaisseur de la poutre sandwich	mm
I_{GZ}	Moment quadratique de la section de la poutre	mm^4
L	Distance entre les appuis	mm
M	Moment fléchissant	N.m
m	Coefficient de la loi de Johnson-Cook relatif à l'adoucissement thermique	
n	Coefficient de la loi de Johnson-Cook traduisant l'écrouissage	
\bar{n}	Paramètre de la loi de Norton-Hoff	
P	Charge appliquée	N
S	Rigidité en cisaillement	N
S_{ij}	Coefficient de la matrice de souplesse	MPa^{-1}
T	Température	$^{\circ}C$
T_0	Température initiale du matériau usiné	$^{\circ}C$
T_m	Température de fusion	$^{\circ}C$
T_{mod}	Température modifiée	K
t	Temps	s
t_c	Epaisseur de l'âme	mm
t_f	Epaisseur de peau	mm
t_{f1}, t_{f2}	Epaisseurs des peaux supérieure et inférieure	mm

NOMENCLATURE

V	Vitesse du projectile	m/s
V_c	Vitesse de coupe	m/min
V_f	Vitesse d'avance	mm/min
V_m	Fraction volumique de la matrice	
V_r	Fraction volumique du renfort	
w_1	Flèche due à la flexion	mm
w_2	Flèche due au cisaillement	mm
y	Distance par rapport à la fibre neutre	mm
y_{max}	Distance maximale par rapport à la fibre neutre	mm
Z	Coordonnée suivant l'épaisseur du sandwich	mm
α	Angle de dépouille	(°)
β	Angle de taillant	(°)
γ	Angle de coupe	(°)
ε	Déformation	
$\varepsilon_1 \dots \varepsilon_6$	Eléments du tenseur de déformations	
$\dot{\varepsilon}$	Vitesse de déformation	s^{-1}
$\dot{\varepsilon}_0$	Vitesse de déformation de référence du matériau usiné	s^{-1}
θ	Angle d'orientation des fibres	(°)
ν_m	Coefficient de Poisson de la matrice	
ν_r	Coefficient de Poisson du renfort	
σ	Contrainte	MPa
$\sigma_1 \dots \sigma_6$	Eléments du tenseur de contraintes	MPa
$\bar{\sigma}_1$	Paramètre de la loi de Norton-Hoff	MPa
ϕ	Angle de cisaillement primaire	(°)



Liste des figures



Chapitre 1 : Généralités sur les matériaux composites

Figure 1.1 : Composition d'un matériau composite [4]. 2

Figure 1.2 : Différents types de matrice [5]. 3

Figure 1.3 : Différents types de renfort [5]..... 3

Figure 1.4 : Composite stratifié [6]. 4

Figure 1.5 : Composite sandwichs [7]. 5

Figure 1.6 : Matériaux sandwichs à âme pleine [8]..... 5

Figure 1.7 : Matériaux sandwichs à âme creuse [8]. 6

Figure 1.8 : Chaîne et trame d'un tissu [8]. 8

Figure 1.9 : Architecture des renforts [8]. 9

Figure 1.10 : Tissus multidirectionnels [8]. 9

Figure 1.11 : Moulage au contact [8]. 11

Figure 1.12 : Moulage par projection simultanée [8]. 12

Figure 1.13 : Moulage sous vide [8]..... 12

Figure 1.14 : Moulage par injection de résine [8]. 13

Figure 1.15 : Moulage par compression [8]. 13

Figure 1.16 : Moulage par centrifugation [8]. 13

Figure 1.17 : Moulage en continu de plaques [8]. 14

Figure 1.18 : Moulage par pultrusion [8]. 14

Figure 1.19 : Enroulement filamentaire [12]. 14

Chapitre 2 : Modélisations analytiques thermiques en coupe

Figure 2.1 : Opération de tournage [15]. 16

Figure 2.2 : Opération de fraisage [16]. 16

Figure 2.3 : Opération de perçage [17]..... 17

Figure 2.4 : Angles d'un outil de coupe [14]..... 18

Figure 2.5 : Zones liées à la formation du copeau [19]. 19

Figure 2.6 : Configuration de coupe orthogonale [14]. 20

Figure 2.7 : Schéma général du dispositif SHPB [20]. 21

Figure 2.8 : Essai de Taylor [20]. 21

Figure 2.9 : Variations de $\bar{\sigma}_1$ et \bar{n} en fonction de T_{mod} pour 3 aciers [20]..... 22

Figure 2.10 : Mécanismes de formation du copeau en coupe orthogonale du composite
carbone/époxy unidirectionnel [23]. 24

Figure 2.11 : Sollicitations par flexion d'une poutre [25].	26
Figure 2.12 : Comportement d'une poutre sandwich en flexion.	27

Chapitre 3 : Résultats de simulation et interprétation

Figure 3.1 : Interface du code Abaqus.	30
Figure 3.2 : Schéma illustratif d'une simulation sur Abaqus [28].	30
Figure 3.3 : Géométrie de l'outil.	33
Figure 3.4 : Géométrie de la matrice avec la ligne de séparation.	33
Figure 3.5 : Géométrie des fibres.	34
Figure 3.6 : Création du composite par immersion des renforts.	34
Figure 3.7 : Paramètres de comportement de la matrice.	34
Figure 3.8 : Paramètres d'endommagement de la matrice.	35
Figure 3.9 : Vue dans le module « Interaction ».	35
Figure 3.10 : Introduction du coefficient de frottement.	36
Figure 3.11 : Maillage de la pièce et de l'outil.	36
Figure 3.12 : Contraintes de Von-Misès dans la zone de coupe.	37
Figure 3.13 : Température dans la zone de coupe.	37
Figure 3.14 : Contraintes pour $\gamma = 0^\circ$.	38
Figure 3.15 : Température pour $\gamma = 0^\circ$.	38
Figure 3.16 : Contraintes pour $\gamma = -5^\circ$.	39
Figure 3.17 : Température pour $\gamma = -5^\circ$.	39
Figure 3.18 : Contraintes pour $V_c = 200$ m/min.	40
Figure 3.19 : Température pour $V_c = 200$ m/min.	40
Figure 3.20 : Contraintes pour $V_c = 400$ m/min.	41
Figure 3.21 : Température pour $V_c = 400$ m/min.	41
Figure 3.22 : Contraintes pour $f = 0.05$ mm/tr.	42
Figure 3.23 : Température pour $f = 0.05$ mm/tr.	42
Figure 3.24 : Contraintes pour $f = 0.15$ mm/tr.	43
Figure 3.25 : Température pour $f = 0.15$ mm/tr.	43
Figure 3.26 : Coupe du renfort pour $f = 0.05$ mm/tr.	44



Liste des tableaux



Chapitre 1 : Généralités sur les matériaux composites

Tableau 1.1 : Avantages et inconvénients des matériaux composites [10]..... 10

Chapitre 3 : Résultats de simulation et interprétation

Tableau 3.1 : Propriétés de la pièce et de l’outil de coupe [29]. 32

Tableau 3.2 : Paramètres de coupe et géométrie de l’outil [29]..... 32

Tableau 3.3 : Paramètres de comportement de Johnson-Cook [29]..... 32

Tableau 3.4 : Paramètres d'endommagement de Johnson-Cook [30]. 32

Tableau 3.5 : Choix des unités. 32

Tableau 3.6 : Variation des contraintes et de la température avec l'angle de coupe. 39

Tableau 3.7 : Variation des contraintes et de la température avec la vitesse de coupe..... 41

Tableau 3.8 : Variation des contraintes et de la température avec l’avance. 43



Introduction générale



Les matériaux composites sont de plus en plus utilisés de nos jours en construction mécanique surtout pour le secteur de l'aérospatial. Ils remplacent progressivement les matériaux traditionnels tels que l'aluminium et alliages métalliques. Avec des propriétés mécaniques similaires à ces derniers et un poids inférieur, les matériaux composites deviennent des matériaux de choix pour l'industrie aéronautique [1].

Face à de nouveaux matériaux et à des géométries complexes du produit fabriqué, le procédé de coupe constitue un souci industriel pour ses différentes opérations. La satisfaction de ce besoin ne sera réalisée qu'à l'aide d'un choix judicieux des conditions opératoires de coupe. Toutefois, les techniciens ou opérateurs déterminent ces conditions et, en particulier, les paramètres de coupe à partir d'abaques et tableaux réalisés par l'expérimentation, ce qui conduit dans des cas à des résultats plus ou moins insuffisants [2]. Afin d'améliorer ces résultats, il faut s'en remettre à la modélisation et à la simulation.

À cet effet, nous nous intéressons dans la présente étude à l'analyse du comportement thermomécanique d'un matériau composite lors d'un procédé de coupe. L'interaction outil-matière ciblée a priori concerne la coupe orthogonale d'un composite à base métallique (aluminium) renforcé par des particules de carbure de silicium (SiC).

Aussi, le mémoire est organisé principalement en trois chapitres ; à savoir :

✓ Dans le premier chapitre, nous allons présenter des généralités sur les matériaux composites ; à savoir : la définition, la constitution, la structure, la classification, les avantages et les inconvénients, et les domaines d'application ainsi que 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. Enfin, nous allons clôturer le chapitre par le comportement mécanique d'un matériau composite unidirectionnel.

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



Chapitre 1

Généralités sur les matériaux composites



1.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter des généralités sur les matériaux composites ; à savoir : la définition, la constitution, la structure, la classification, les avantages et les inconvénients, et les domaines d'application ainsi que le procédé d'élaboration.

1.2. Définition

Un composite est l'assemblage de plusieurs matériaux non miscibles de nature différente et dont les qualités se complètent afin d'obtenir un matériau hétérogène dont les performances sont supérieures à celles de ses composants. Un matériau composite est constitué d'un renfort (ossature du matériau) et d'une matrice (enveloppe ou peau du matériau) généralement polymérique ou métallique [3].

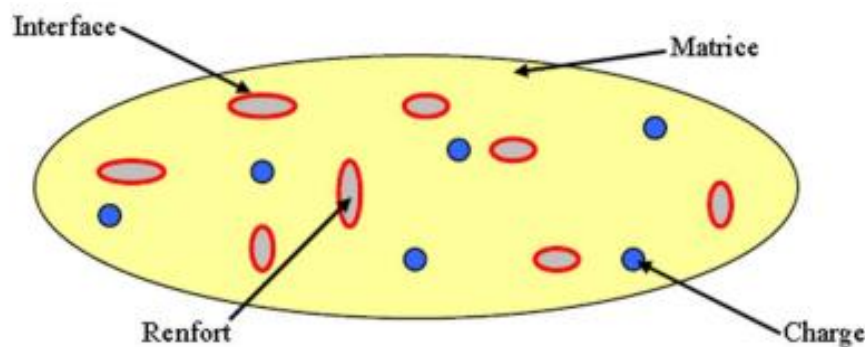


Figure 1.1 : Composition d'un matériau composite [4].

Depuis leur avènement dans les années trente et jusqu'à nos jours, les matériaux composites ont fortement participé au développement de nos technologies. Ces matériaux se démarquent par leur légèreté ; leur résistance physique et chimique offre un large éventail de possibilités en termes d'utilisation et de design. En résumé, les composites sont les matériaux de l'avenir.

1.3. Constituants principaux de matériaux composites

1.3.1. Matrice

La matrice est l'un des deux principaux constituants de base des matériaux composites. Le rôle principal de la matrice est de maintenir les renforts en place et de leur assurer la cohésion et la protection. Elle permet également la transmission des efforts mécaniques vers les renforts [3]. Elle est généralement homogène et isotrope. En pratique, on rencontre différents types de matrice comme le montre le schéma de la figure qui suit.

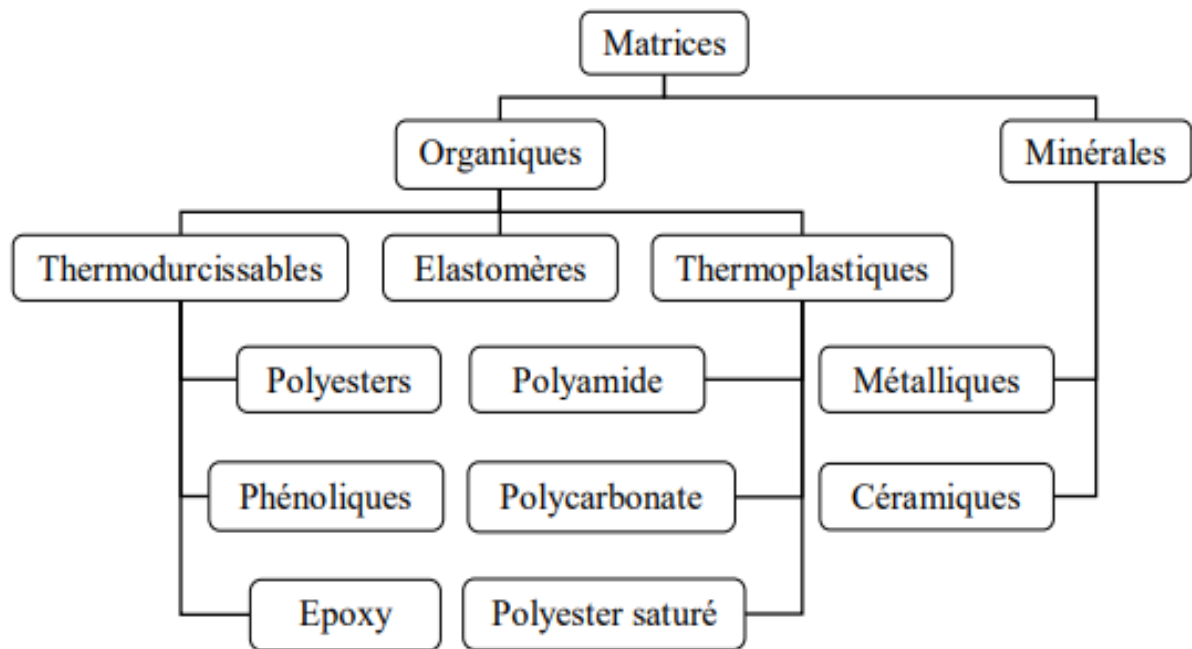


Figure 1.2 : Différents types de matrice [5].

1.3.2. Renfort

Les renforts assurent les propriétés mécaniques du matériau composite et un grand nombre de fibres sont disponibles sur le marché en fonction des coûts de revient recherchés pour la structure réalisée. Différents types de renfort peuvent être rencontrés en pratique comme le schématise la figure qui suit.

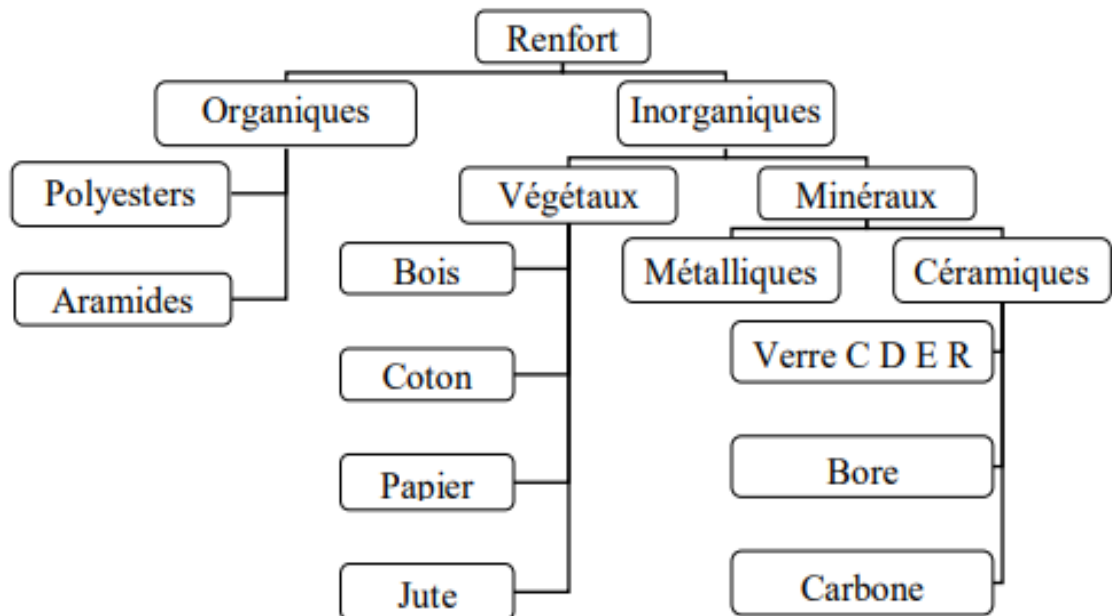


Figure 1.3 : Différents types de renfort [5].

1.4. Structures de matériaux composites

Les structures des matériaux composites peuvent être classées en trois types :

- ✓ Les monocouches.
- ✓ Les stratifiés.
- ✓ Les sandwiches.

1.4.1. Monocouches

Les monocouches représentent l'élément de base de la structure composite. Les différents types de monocouches sont caractérisés par la forme du renfort.

1.4.2. Stratifiés

Le composite stratifié ou multicouches est un ensemble de couches empilées et orientées suivant un ordre de drapage défini et rendues solidaires (figure 1.4). Le drapage c'est l'orientation des plis par rapport à un référentiel donné. Il définit les propriétés mécaniques, électromagnétiques et thermiques globales du matériau composite [6].

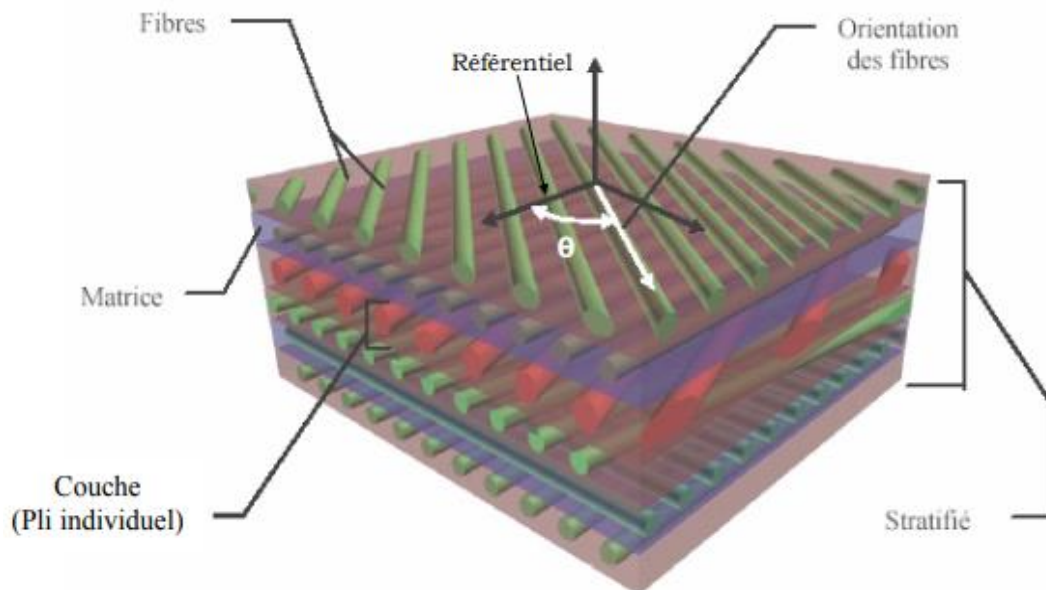


Figure 1.4 : Composite stratifié [6].

Les stratifiés peuvent être de trois types :

- ✓ Équilibrés : le stratifié contient autant de couches orientées suivant la direction $+ \theta$ que de couches suivant la direction $- \theta$.
- ✓ Symétriques : les couches du stratifié sont disposées symétriquement par rapport à un plan moyen (miroir).
- ✓ Orthogonaux : le stratifié comporte autant de couches à 0° que de couches à 90° .

1.4.3. Sandwichs

Les sandwichs sont des matériaux possédant deux peaux de grande rigidité et de faible épaisseur renfermant un cœur (âme ou noyau) de forte épaisseur et de faible résistance (figure 1.5). Le matériau sandwich possède une bonne résistance à la flexion et est un excellent isolant thermique [6].

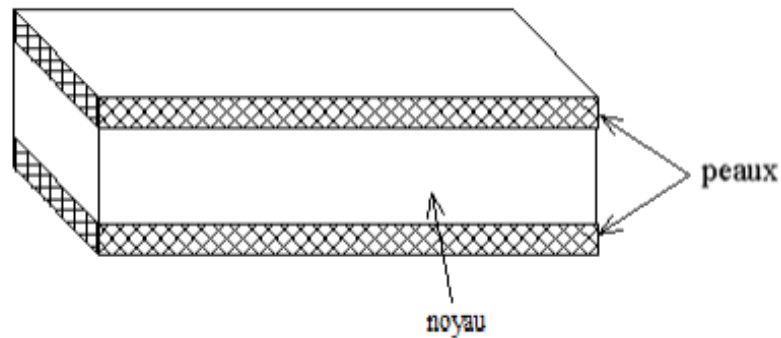
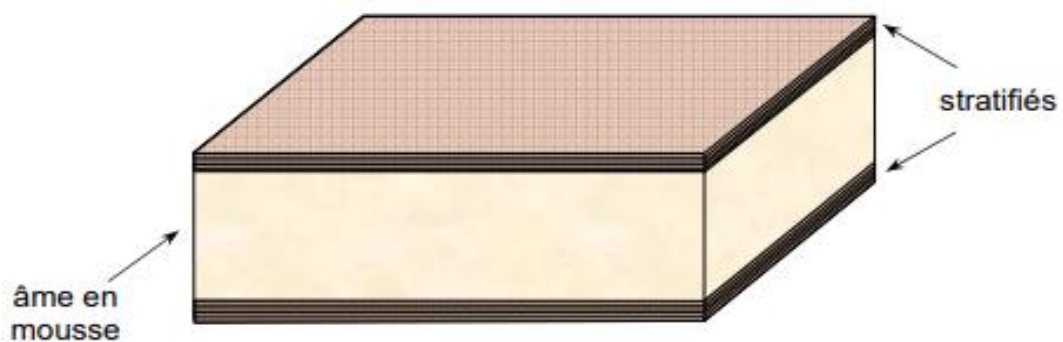


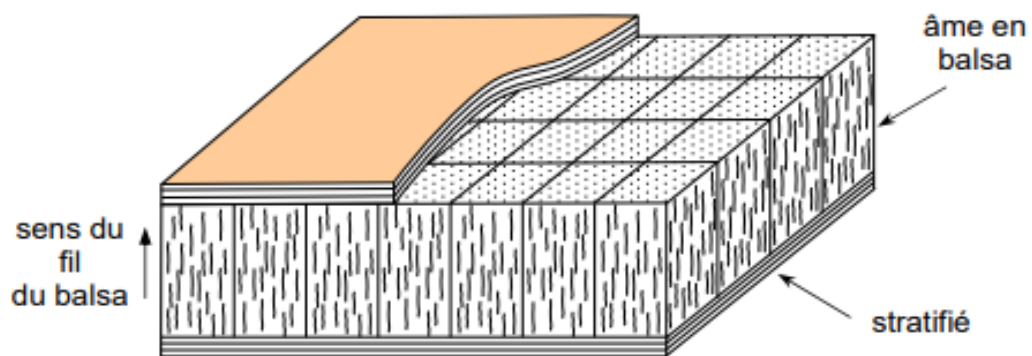
Figure 1.5 : Composite sandwichs [7].

Les composites sandwichs les plus couramment utilisés sont :

- ✓ **Matériaux sandwichs à âme pleine :**



(a) : Âme en mousse



(b) : Âme en balsa

Figure 1.6 : Matériaux sandwichs à âme pleine [8].

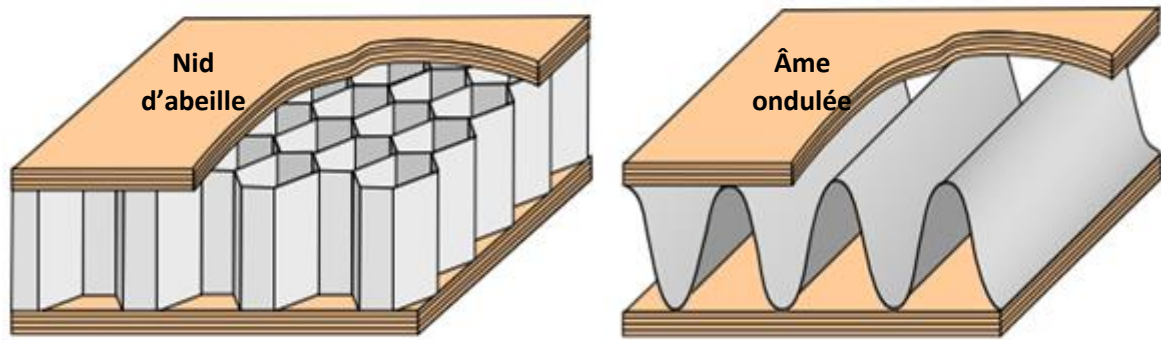
✓ **Matériaux sandwichs à âme creuse :**

Figure 1.7 : Matériaux sandwichs à âme creuse [8].

1.5. Classification des matériaux composites

Les composites peuvent être classés suivant la forme des constituants, la nature des composants ou selon le taux d'utilisation.

1.5.1. Classification suivant la forme des constituants

En fonction de la forme des constituants, les composites sont classés en deux grandes classes ; à savoir : les matériaux composites à fibres et ceux à particules [8].

✓ **Composites à fibres :** Un matériau composite est un composite à fibres si le renfort se trouve sous forme de fibres. Les fibres utilisées se présentent soit sous forme de fibres continues, soit sous forme de fibres discontinues : fibres coupées, fibres courtes, etc.

✓ **Composites à particules :** Un matériau composite est un composite à particules lorsque le renfort se trouve sous forme de particules. Une particule, par opposition à une fibre, ne possède pas de dimension privilégiée. Les particules sont généralement utilisées pour améliorer certaines propriétés des matériaux ou des matrices comme la rigidité, la tenue à la température, la résistance à l'abrasion, la diminution du retrait, etc.

1.5.2. Classification suivant la nature des constituants

Selon la nature de la matrice, les matériaux composites sont classés suivant des composites à matrice organique, à matrice métallique ou à matrice minérale. Divers renforts sont associés à ces matrices. Seuls certains couples d'association ont actuellement un usage industriel d'autres font l'objet d'un développement dans les laboratoires de recherche [8].

1.5.3. Classification selon le taux d'utilisation

Selon leur taux d'utilisation, les composites sont classés en deux grandes classes : les composites à grande diffusion et les composites à hautes performances [3].

✓ **Composites à grande diffusion** : Ils occupent une portion de 95 % des composites utilisés. Ce sont, en général, des plastiques armés ou des plastiques renforcés ; le taux de renfort est de 30 %.

Dans 90 % des cas, l'anisotropie n'est pas maîtrisée car les renforts sont des fibres courtes. Les principaux constituants de bases sont des résines avec des fibres de verre.

✓ **Composites à hautes performances** : Ils sont principalement utilisés dans l'aéronautique et sont d'un coût élevé. Les renforts sont plutôt des fibres longues et le taux de renfort est supérieur à 50 % ; ce sont les renforts qui influent sur le coût. Les propriétés mécaniques sont largement supérieures à celles des métaux.

1.6. Principales fibres [9]

1.6.1. Fibres de verre

Elles constituent le renfort essentiel des composites à grande diffusion. La fibre est obtenue à partir de sable (silice) et d'additifs (alumine, carbonate de chaux, magnésie, oxyde de bore). On distingue trois types de fibres :

E : pour les composites à grande diffusion et les applications courantes.

R : pour les composites à hautes performances.

D : pour la fabrication de circuits imprimés (propriétés diélectriques).

1.6.2. Fibre de carbone

C'est la fibre la plus utilisée dans les composites à hautes performances. Elle est obtenue par carbonisation de la fibre de PAN (Polyacrylonitrile). Selon la température de combustion, on distingue deux types de fibres :

✓ Fibres haute résistance (HR) : pour une combustion de 1000 à 1500 °C.

✓ Fibres haut module (HM) : pour une température de combustion de 1800 à 2000 °C.

1.6.3. Fibre d'aramide

Souvent appelée KEVLAR, la fibre d'aramide est issue de la chimie des polyamides aromatiques. Il est possible de trouver deux types de fibres d'aramide de rigidités différentes :

✓ Les fibres bas module : utilisées pour les câbles et les gilets pare-balles.

✓ Les fibres haut module : employées dans le renforcement pour les composites à hautes performances.

1.6.4. Fibres de bore

Ce sont des fibres de haut module et insensibles à l'oxydation à haute température ; elles sont obtenues par dépôt en phase gazeuse sur un substrat en tungstène.

1.6.5. Fibre de silice (ou de quartz)

Elles sont produites comme le verre par fusion, et sont essentiellement utilisées pour leur haute tenue chimique et thermique dans les tuyères pour des moteurs de fusée.

1.7. Architecture des renforts [9]

Les structures composites sont anisotropes ; la plupart des renforts travaillent bien en traction mais offrent de moins bonnes performances en compression et cisaillement. Il est donc impératif de jouer sur la texture et la géométrie des renforts pour créer une architecture adaptée. Il existe différentes géométries et textures de renforts ; à savoir :

✓ **Les UniDirectionnels (UD)** : Dans une nappe UD, les fibres sont assemblées parallèlement les unes par rapport aux autres à l'aide d'une trame très légère. Les tissus se composent de fils de chaîne et de trames perpendiculaires entre eux. Le mode d'entrecroisement ou armure les caractérise.

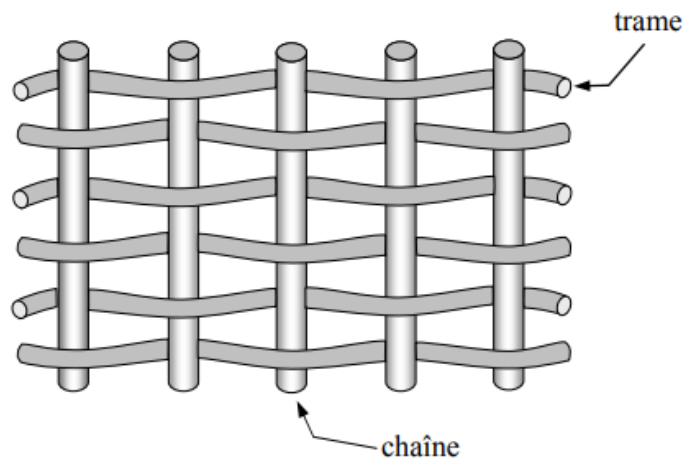


Figure 1.8 : Chaîne et trame d'un tissu [8].

✓ **Toile ou taffetas** : Chaque fil de chaîne passe en-dessus puis en-dessous de chaque fil de trame, et réciproquement. Le tissu présente une bonne planéité et une relative rigidité mais il est peu déformable pour la mise en œuvre. Les nombreux entrecroisements successifs génèrent un embuvage important et réduisent les propriétés mécaniques.

✓ **Sergé** : Chaque fil de chaîne flotte au-dessus de plusieurs fils de trame et chaque fil de trame flotte au-dessus de fils de chaîne. Armure de plus grande souplesse que le taffetas ayant une bonne densité de fils.

✓ **Satin** : Chaque fil de chaîne flotte au-dessus de plusieurs fils de trame et réciproquement. Ces tissus ont des aspects différents de chaque côté. Ces tissus sont assez souples et adaptés à la mise en forme de pièces à surfaces complexes. Ce type de tissus présente une forte masse spécifique.

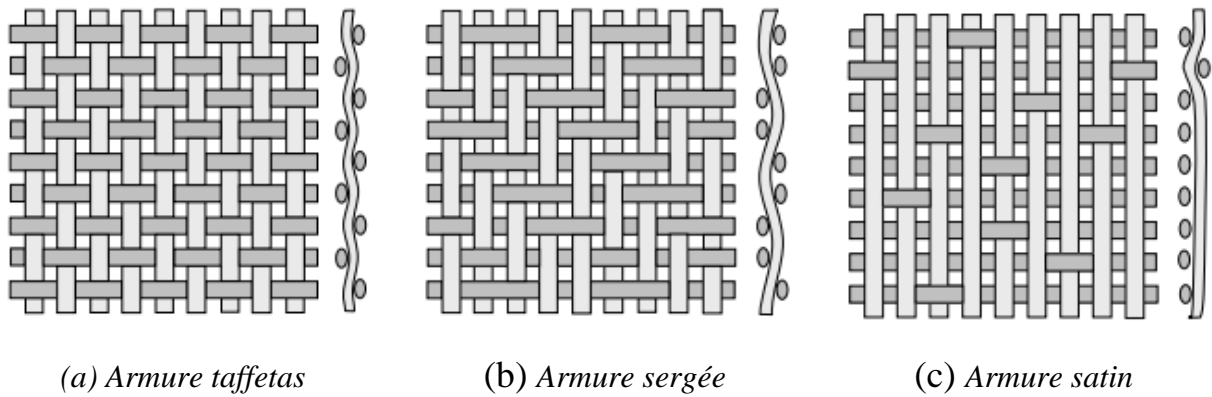
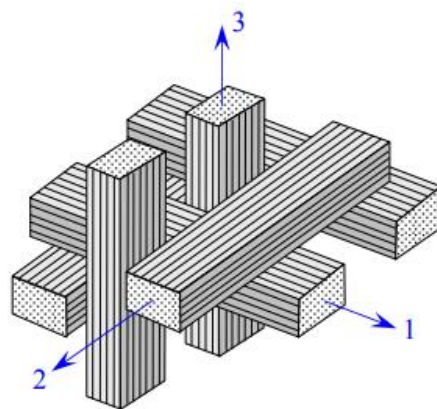


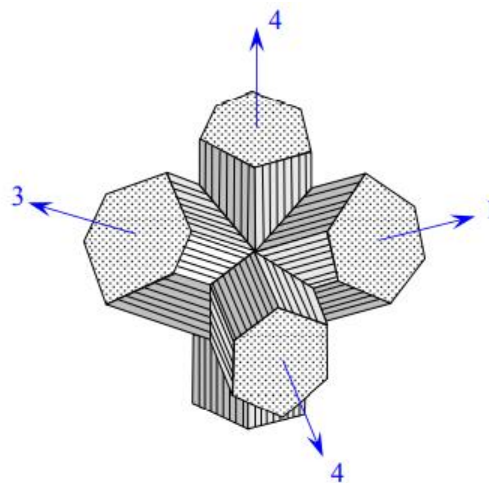
Figure 1.9 : Architecture des renforts [8].

✓ **Tissus multidirectionnels :** Des tissages volumiques sont également utilisés et caractérisés par le nombre de directions de tissage : 3D, 4D, etc.

La structure la plus simple est celle du tissage 3D où les fils sont disposés suivant 3 directions orthogonales (figure 1.10-a). Dans un tissage 4D, les fils sont disposés suivant 4 directions (figure 1.10-b) ; l'objectif est d'obtenir des matériaux composites isotropes.



(a) Tissage 3D orthogonal



(b) Tissage 4D

Figure 1.10 : Tissus multidirectionnels [8].

1.8. Charges et additifs [8]

Différents produits peuvent être incorporés à la résine pour lui conférer des caractéristiques particulières ou en réduire le coût. La quantité des produits ajoutés peut varier de quelques dizaines de % dans le cas de charges et à quelques % et moins dans le cas d'additifs. L'addition de ces produits a pour fonction soit d'améliorer les caractéristiques mécaniques du produit fini, soit d'en faciliter la mise en œuvre.

Pour des charges renforçantes, l'objet est d'améliorer les caractéristiques mécaniques de la résine. Ces charges peuvent être classées suivant leur forme géométrique en charges sphériques ou non sphériques.

Les charges non renforçantes ont pour rôle soit de diminuer le coût des résines en conservant les performances des résines, soit d'améliorer certaines propriétés des résines.

Les additifs se trouvent en faible quantité (quelques % et moins) et interviennent comme :

- ✓ Lubrifiants et agents de démoulage.
- ✓ Pigments et colorants.
- ✓ Agents anti-retrait.
- ✓ Agents anti-ultraviolets.

1.9. Avantages et inconvénients des matériaux composites

Le tableau qui suit résume les avantages et les inconvénients des matériaux composites.

Avantages	Inconvénients
1) Des propriétés qui se complètent : - Légèreté des matériaux - Rigidité plus élevée - Résistance à la corrosion - Résistance à la fatigue (fissures, conservation des propriétés) - Ne favorise pas la propagation des dommages. 2) Excellentes caractéristiques mécaniques - Résistance à la torsion - Résistance à l'écrasement et à la dilatation verticale. 3) Des géométries diverses et paramétrables. 4) Infinité des combinaisons et des formes possibles.	1) Des matériaux relativement chers. 2) Le processus de fabrication peut être long et difficile. Cet aspect est en évolution par la découverte de nouvelles techniques qui facilitent la fabrication. 3) Mauvaise résistance à l'écrasement et à la dilatation horizontale. Cette faiblesse est compensée par la présence des nervures (dans le sens de mouvement).

Tableau 1.1 : Avantages et inconvénients des matériaux composites [10].

1.10. Domaines d'application et mise en œuvre des matériaux composites

Le développement des composites modernes est dû essentiellement aux besoins de plus en plus poussés de l'industrie surtout dans les secteurs de [3] :

- ✓ l'aérospatial ou l'aéronautique,
- ✓ la défense,
- ✓ le port,
- ✓ la biomécanique.

Les procédés de mise en œuvre des matériaux composites sont nombreux mais le plus utilisé est par moulage. Parmi ces procédés, on peut citer les techniques qui suivent.

✓ **Moulages sans pression** : Les méthodes de moulage à froid et sans intervention d'une presse sont les méthodes les plus simples à mettre en œuvre. Elles nécessitent un minimum d'équipement. Cette facilité a été à l'origine du succès des matériaux composites à fibres de verre dans l'industrie et l'artisanat.

✓ **Moulage au contact [11]** : 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 :

- un agent de démoulage ;
- un gel Coat ;
- une couche de résine thermodurcissable liquide de viscosité aux alentours de $0.35 \text{ Pa}\cdot\text{s}$;
- 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 (figure 1.11).

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

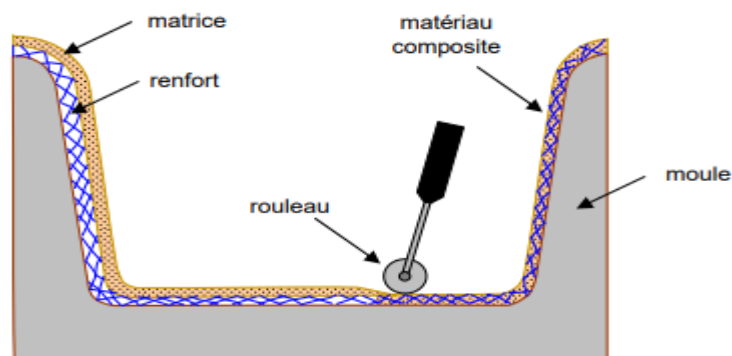


Figure 1.11 : Moulage au contact [8].

✓ **Projection simultanée [11]** : 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.

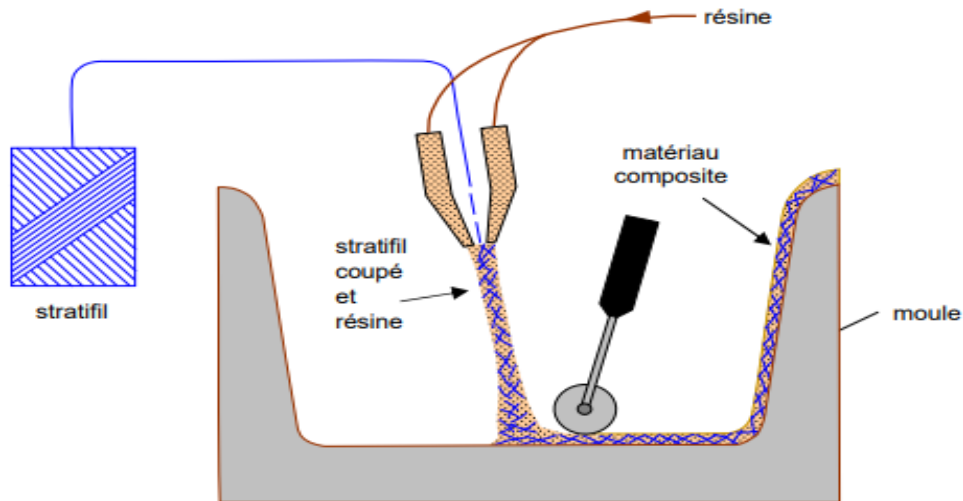


Figure 1.12 : Moulage par projection simultanée [8].

✓ **Moulage sous vide [11]** : 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.

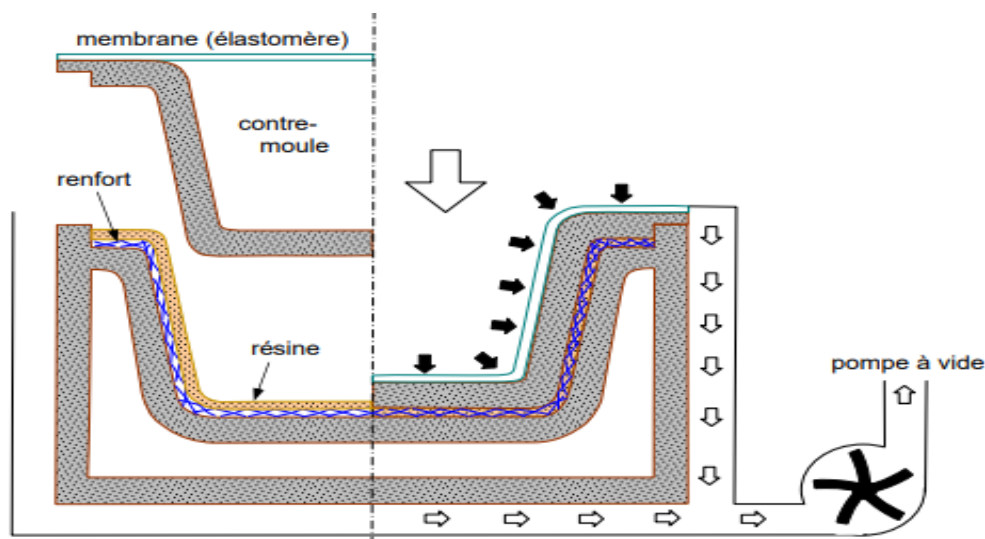


Figure 1.13 : Moulage sous vide [8].

✓ **Moulage par injection de résine [11]** : 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.

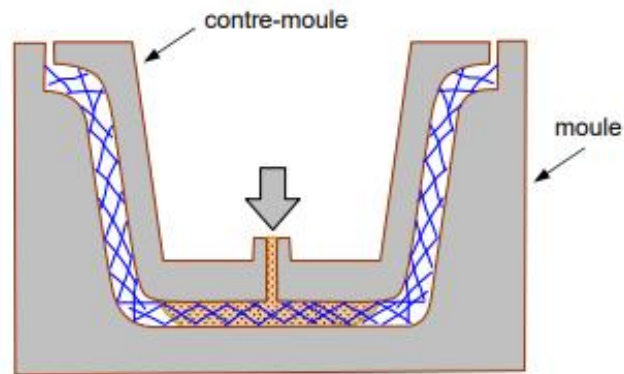


Figure 1.14 : Moulage par injection de résine [8].

✓ **Moulage par compression à froid ou à chaud :**

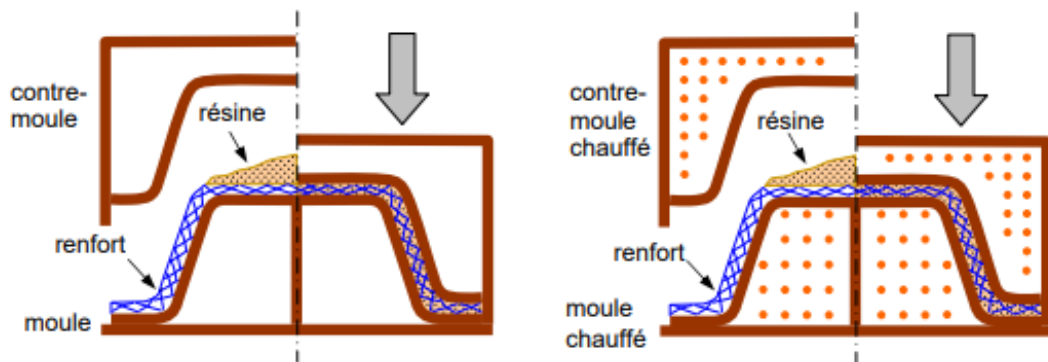


Figure 1.15 : Moulage par compression [8].

✓ **Moulage par centrifugation [11] :** 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.

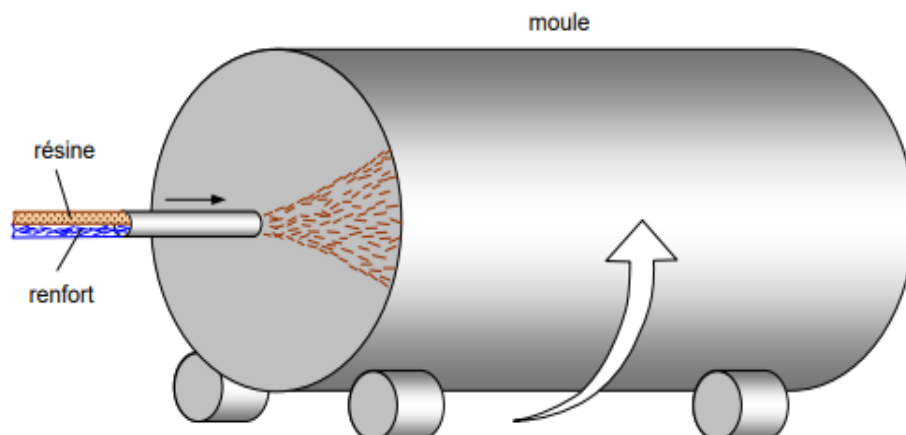


Figure 1.16 : Moulage par centrifugation [8].

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 en continu [11]** : Le moulage en continu permet la fabrication de plaques planes, panneaux, sandwichs de panneaux ondulés pour toitures, plaques nervurées, etc.

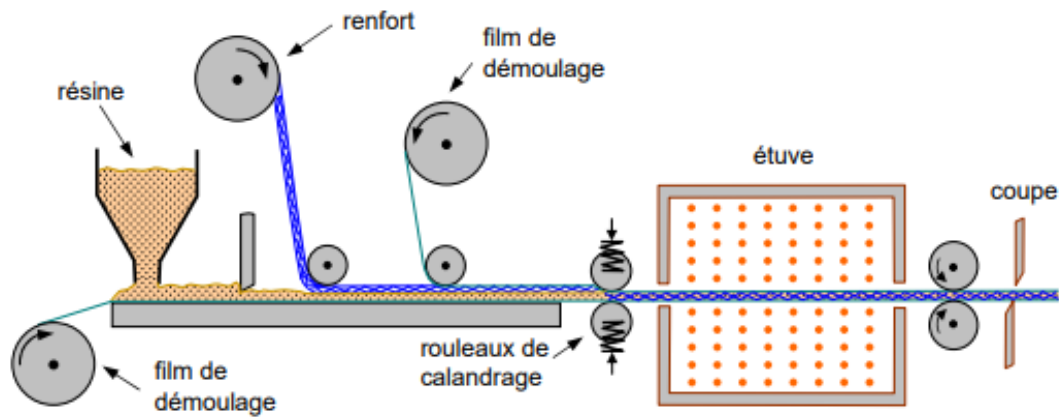


Figure 1.17 : Moulage en continu de plaques [8].

✓ **Moulage par pultrusion [11]** : Le procédé de moulage par pultrusion sert pour la fabrication de profilés, rectilignes ou courbes, à section constante, hautement renforcés dans la direction principale.

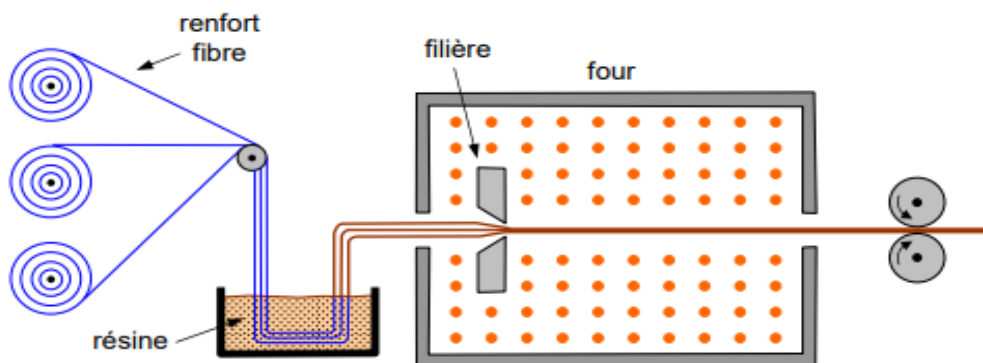


Figure 1.18 : Moulage par pultrusion [8].

✓ **Moulage par enroulement filamentaire [8]** :

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

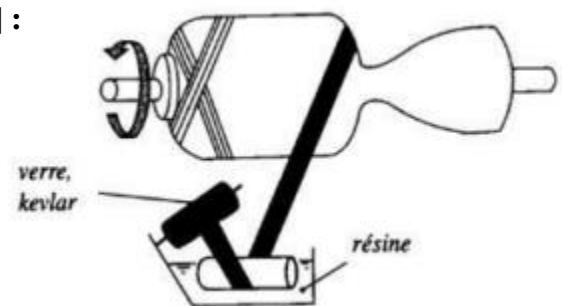


Figure 1.19 : Enroulement filamentaire [12].



Chapitre 2

Procédé de coupe et comportement des composites



2.1. 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, la formation du copeau et la configuration de coupe orthogonale. Aussi, les lois régissant le comportement des matériaux usinés seront abordées. Enfin, nous allons clôturer le chapitre par le comportement mécanique d'un matériau composite unidirectionnel.

2.2. Procédés d'usinage

L'usinage est la transformation d'une pièce-brute, de matériau défini, en une pièce fonctionnelle de forme géométrique, de dimensions et d'état de surface spécifiés. On distingue assez souvent les procédés d'usinage dits traditionnels des procédés d'usinage non traditionnels ; cette dernière appellation désigne les procédés qui sont apparus après 1945 en grande partie pour usiner des matériaux se prêtant difficilement aux techniques d'usinage traditionnels. On peut classer les procédés d'usinage, selon les phénomènes physiques correspondants, en trois catégories principales [13] ; à savoir :

- **Procédés de coupe** : L'enlèvement de matière se fait par action mécanique d'un outil coupant ; la force appliquée induit la formation, à l'échelle macroscopique, de copeaux. Il existe un grand nombre de procédés dont les principaux sont :

- les procédés à forte vitesse (≥ 15 m/min) et grand débit de matière (fraisage, tournage, perçage) ;

- les procédés de vitesse plus faible (sciage, rabotage, mortaisage, brochage, taraudage et alésage, ...).

- **Procédés par abrasion** : L'enlèvement de matière est dû à l'action mécanique d'un grand nombre de grains abrasifs de petite taille et de haute dureté. Ces grains agissent selon deux modalités différentes ; ils sont soit :

- liés à un support solide (abrasion à deux corps) : par exemple, rectification ;

- transportés par un milieu fluide (abrasion à trois corps) : par exemple, rodage et polissage à la pâte abrasive.

- **Procédés physico-chimiques** : Ils sont tous qualifiés de non traditionnels ; l'enlèvement de matière est réalisé (à l'exception de l'impact d'un jet d'eau) par des actions non mécaniques :

- action thermoélectrique d'un arc électrique (électroérosion), d'un plasma ou d'un faisceau de lumière cohérente (laser) ;

- action thermo-chimique de la flamme d'un chalumeau (oxycoupage) ;

- réaction électrochimique ou chimique (usinage électrochimique ou chimique).

2.2.1. Types de procédés de coupe

Il existe différents types de procédés de coupe, et ce en fonction de la géométrie de la pièce à obtenir ; à cet effet, nous pouvons citer a priori le tournage, le fraisage et le perçage.

En tournage, la pièce est animée d'un mouvement de rotation (mouvement de coupe) qui est le mouvement principal du procédé ; l'outil est animé d'un mouvement complémentaire de translation rectiligne ou non appelé mouvement d'avance permettant de définir le profil de la pièce [14].

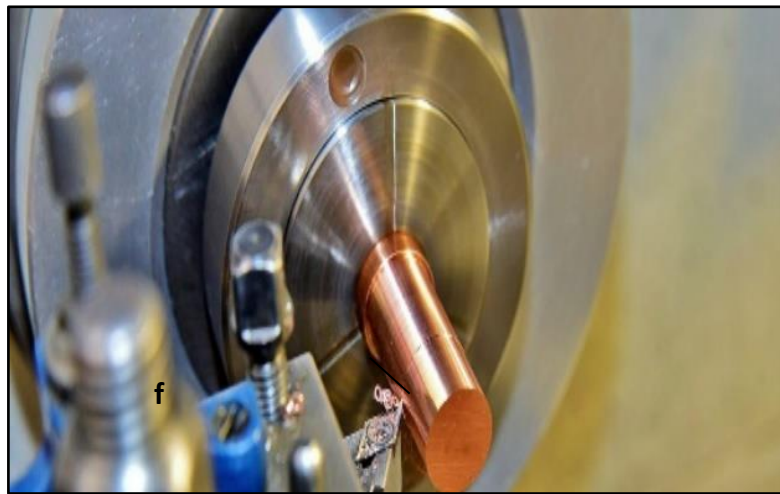


Figure 2.1 : Opération de tournage [15].

Le fraisage permet de générer des surfaces à géométrie plane. Au cours d'une opération de fraisage, la pièce est fixée sur une table à l'aide d'un étau ou d'un outillage spécifique.

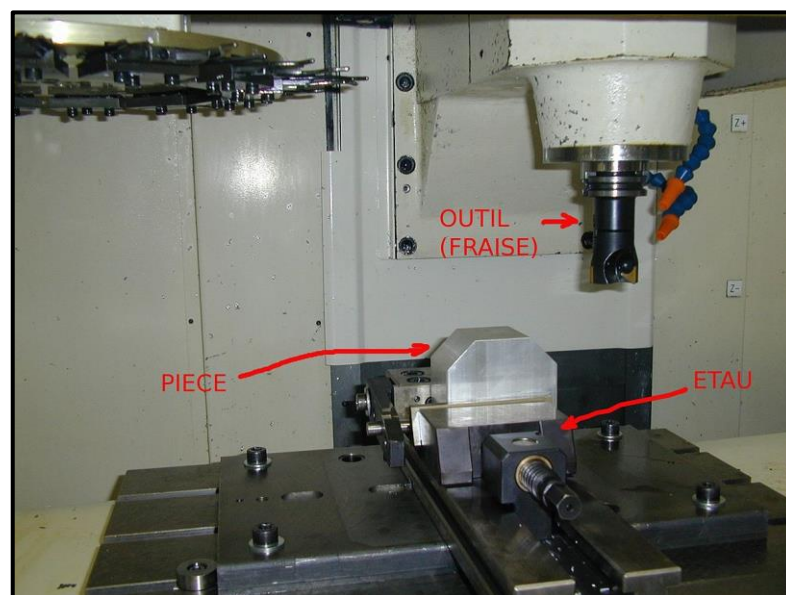


Figure 2.2 : Opération de fraisage [16].

Le **perçage** est une opération qui permet de réaliser généralement des trous par un foret.

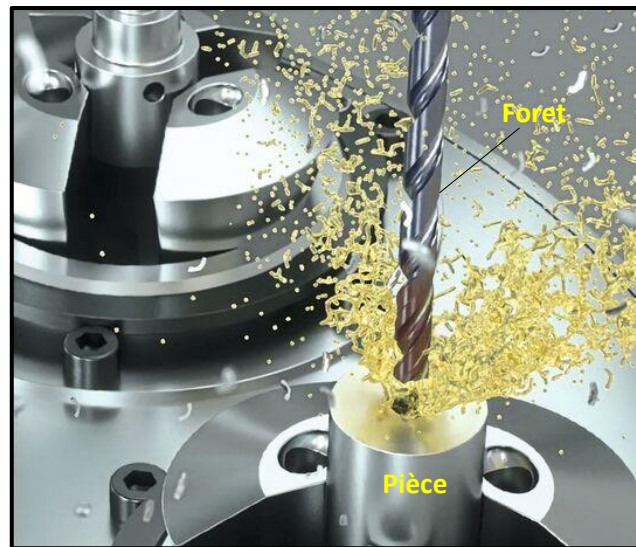


Figure 2.3 : Opération de perçage [17].

2.2.2. Conditions de coupe [18]

Trois paramètres de coupe régissent le processus d'enlèvement de matière qui sont :

◆ **La vitesse de coupe V_c** : définie comme la vitesse tangentielle ; elle dépend de la fréquence de rotation de la pièce (en tournage) ou de l'outil (en fraisage et perçage).

◆ **La vitesse d'avance V_f** : est la vitesse à laquelle la machine déplace l'outil ou la pièce par rapport au bâti, et ce selon l'opération menée. Souvent, on utilise **l'avance f** qui correspond au déplacement de l'outil ou de la pièce pour une révolution de la broche.

◆ **La profondeur de passe a_p** : est l'engagement de l'arête de coupe dans la matière. En chariotage, par exemple, elle correspond à la différence entre le rayon de la pièce avant et après une passe.

◆ **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 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. Cette dernière 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 [14].

Trois angles des faces de l'outil de coupe, dont la somme est égale à 90° , sont nécessaires pour définir les caractéristiques géométriques d'un outil ; à savoir :

- Angle de coupe (γ) : c'est l'angle entre la face de coupe et un plan de référence Pr (perpendiculaire à la direction d'usinage). L'angle de coupe affecte la capacité de l'outil

à cisailer le matériau à usiner. Il peut être positif, négatif ou nul. Les angles de coupe positifs réduisent les efforts de coupe tandis que des angles de coupe négatifs apportent de la robustesse à l'arête de coupe de l'outil. Sa valeur se trouve généralement entre -5° et $+5^\circ$, quelque fois entre -10° et $+10^\circ$ et plus rarement entre -20° et $+20^\circ$.

- Angle de dépouille (α) : c'est l'angle entre la face de dépouille et la surface usinée. Sa valeur est nécessairement positive, généralement entre 2° et 10° .
- Angle de taillant (β) : c'est l'angle entre la face de coupe et la face de dépouille.

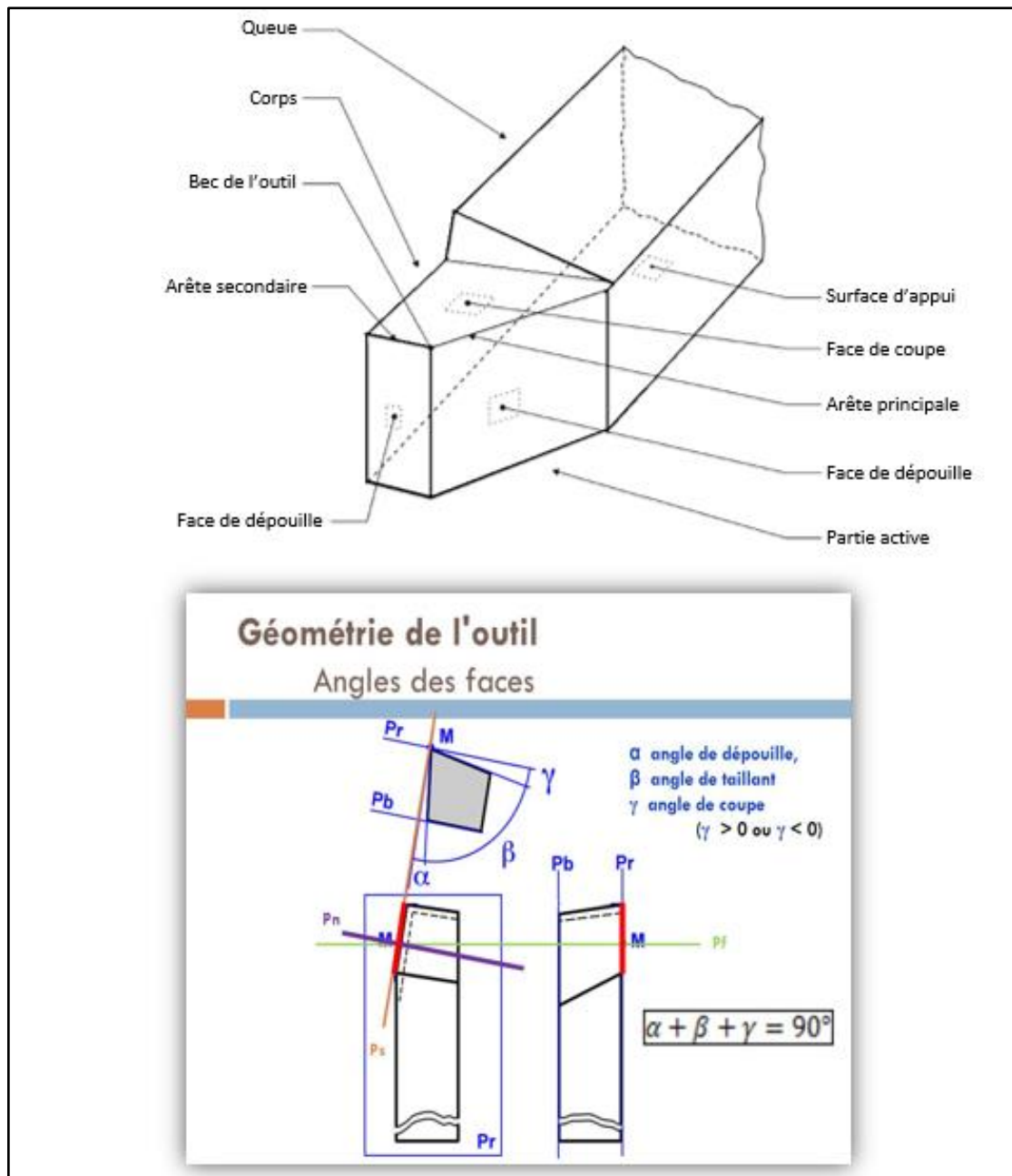


Figure 2.4 : Angles d'un outil de coupe [14].

2.2.3. Formation du copeau [14]

Trois principales zones se distinguent lors de la formation du copeau ; ce sont les zones

de cisaillements primaire et secondaire et la zone de frottement tertiaire.

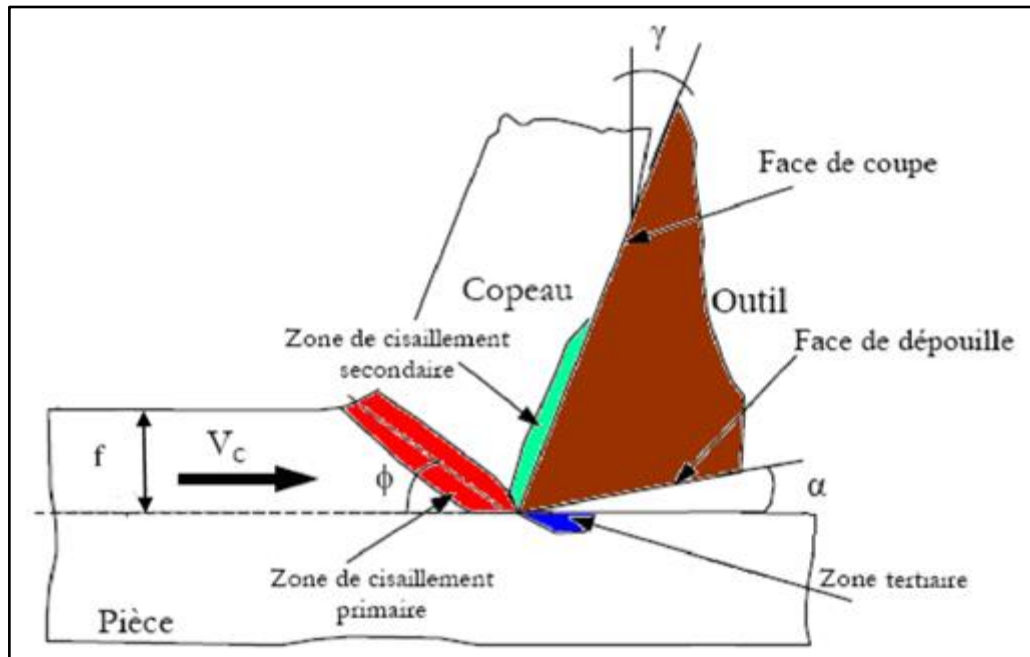


Figure 2.5 : Zones liées à la formation du copeau [19].

➤ **Zone de cisaillement primaire** : Le changement de direction de la matière usinée s'effectue dans cette zone sous l'action de l'outil de coupe. La matière donne naissance au copeau lors de son passage dans cette zone où elle subit en un temps très court une importante déformation plastique. Une grande partie de l'énergie de déformation plastique est convertie en chaleur et va affecter directement la tenue de l'outil de coupe. La quantité de chaleur produite dans cette zone va être partagée entre l'outil, le copeau et la surface usinée. Dans cette zone, les déformations et vitesses de déformation peuvent être respectivement supérieures à 200 % et 10^3 s^{-1} .

➤ **Zone de cisaillement secondaire** : Dans cette zone, il y a un important frottement entre l'outil et le copeau formé suite aux phénomènes intervenant dans la zone de cisaillement primaire. La matière est fortement cisillée au voisinage du contact outil-copeau ; ainsi, se crée une deuxième zone de déformation appelée zone de cisaillement secondaire. L'intense frottement entre le copeau et l'outil va générer une quantité importante de chaleur partagée entre l'outil et le copeau. Les phénomènes intervenant dans cette zone vont jouer un rôle important sur le comportement de l'outil de coupe, et, par conséquent, sur sa durée de vie. Comme dans la zone de cisaillement primaire, la température et la vitesse de déformation sont aussi élevées.

➤ **Zone tertiaire** : Un frottement entre la face de dépouille de l'outil de coupe et la surface usinée est observé dans cette zone. Ce frottement va engendrer une production de chaleur

partagée entre la surface usinée et l'outil de coupe. Les phénomènes intervenant dans cette zone sont déterminants pour l'analyse de l'état des surfaces usinées en raison de la possible présence d'importantes contraintes résiduelles.

2.2.4. Configuration de coupe orthogonale

La coupe orthogonale est une représentation simplifiée du processus de coupe. Elle nécessite que l'arête de coupe soit perpendiculaire aux vitesses de coupe et d'avance [14]. Cette situation est illustrée par la figure qui suit.

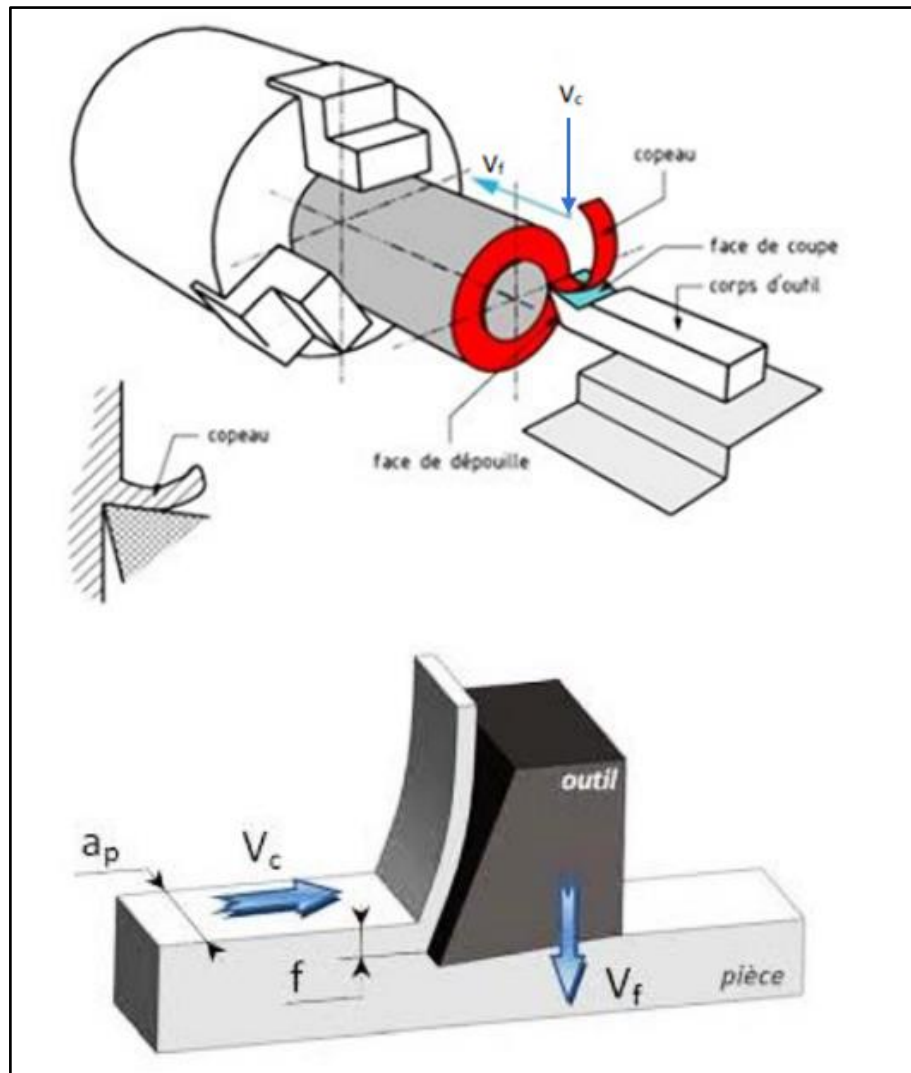


Figure 2.6 : Configuration de coupe orthogonale [14].

2.3. Lois de comportement des matériaux usinés

Ce sont des lois empiriques qui visent à modéliser le comportement d'un matériau lors de sa déformation. Ces lois peuvent être classées en deux catégories [20] :

- lois de comportement basées sur des relations mathématiques empiriques sans tenir compte des mécanismes physiques ;

- lois de comportement physiques qui reposent sur l'introduction de paramètres physiques comme, par exemple, la taille de grain, la densité de dislocations, etc.

En coupe, l'identification des lois rhéologiques est très difficile car elle doit être représentative du comportement du matériau en grandes déformations et en grandes vitesses de déformation et aussi en présence de températures élevées. À cet effet, les essais classiquement privilégiés sont de type : barres de Hopkinson qui consistent en la mise en compression d'une éprouvette entre un massif et une barre destinée à véhiculer l'onde de compression longitudinale induite par le choc d'un projectile à l'extrémité libre de la barre (voir figure 2.8).

Le dispositif SHPB (Split Hopkinson Pressure Bar) utilise deux barres guidées. Ces barres permettent d'appliquer sur un échantillon du matériau utilisé des déformations et des vitesses de déformation qui sont généralement inférieures à celles rencontrées pendant l'usinage. Cette situation est illustrée par la figure qui suit.

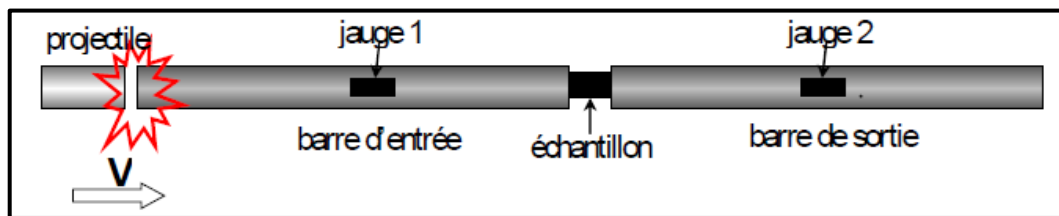


Figure 2.7 : Schéma général du dispositif SHPB [20].

Les essais par le dispositif SHPB ne permettent d'atteindre que des vitesses de déformation de l'ordre de 10^3 - 10^4 s^{-1} . Ils ne permettent donc pas d'atteindre les vitesses de déformation rencontrées lors de la coupe grande vitesse (10^4 - 10^6 s^{-1}).

L'essai de Taylor (projection directe de l'éprouvette sur un massif rigide) permet d'atteindre des déformations très importantes ($\epsilon > 3$) et des vitesses de déformations ($> 10^5$ s^{-1}).

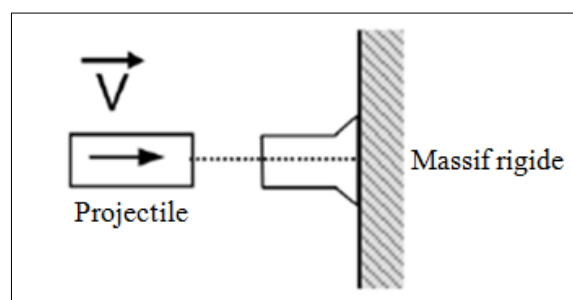


Figure 2.8 : Essai de Taylor [20].

Dans la présente étude, nous allons nous contenter des lois de comportement empiriques ; à savoir : la loi de Norton-Hoff et la loi de Johnson-Cook. Ces lois sont les plus utilisées pour caractériser la rhéologie du matériau usiné en coupe. Ces lois obéissent à l'expression générale :

$$\sigma = f(\dot{\sigma}, \ddot{\sigma}, \dots, \sigma^{(n)}, \dot{\varepsilon}, \ddot{\varepsilon}, \dots, \varepsilon^{(n)}, t, T) \quad (2-1)$$

2.3.1. Loi de Norton-Hoff

Son expression générale s'écrit :

$$\sigma(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T) = \bar{\sigma}_1(\dot{\varepsilon}, T) \cdot \varepsilon^{\bar{n}(\dot{\varepsilon}, T)} \quad (2-2)$$

La figure qui suit montre l'évolution des paramètres : la contrainte ($\bar{\sigma}_1$) et l'indice d'érouissage (\bar{n}) en fonction de la température modifiée (T_{mod}). Cette dernière associe les effets de la vitesse de déformation et de la température du comportement du matériau usiné.

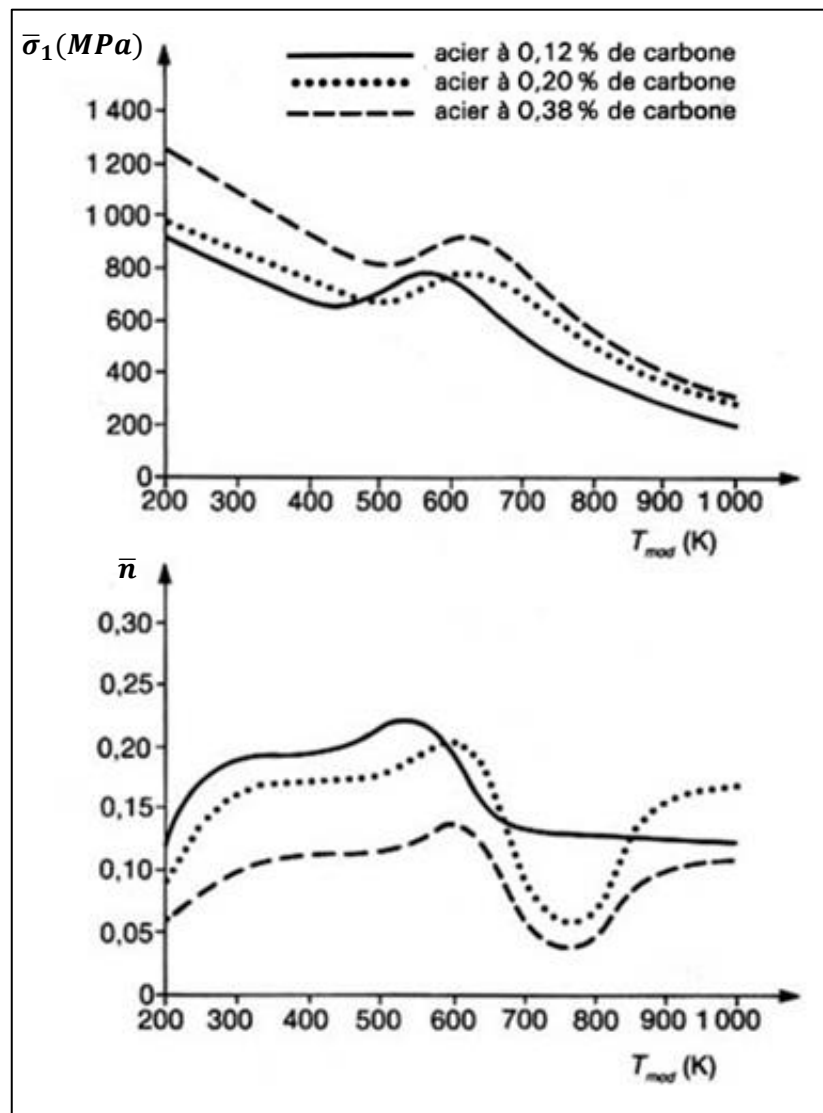


Figure 2.9 : Variations de $\bar{\sigma}_1$ et \bar{n} en fonction de T_{mod} pour 3 aciers [20].

2.3.2. Loi de Johnson-Cook :

Le plus gros avantage de cette loi est sa simplicité car elle présente la particularité de pouvoir identifier séparément les termes en déformation, vitesse de déformation et température [20] ; cette loi est exprimée par :

$$\sigma = \underbrace{[A + B \varepsilon^n]}_1 \left[\underbrace{1 + C \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right)}_2 \right] \left[\underbrace{1 - \left(\frac{T - T_0}{T_m - T_0} \right)^m}_3 \right] \quad (2-3)$$

Le terme 1 traduit la sensibilité de la contrainte à la déformation ainsi que l'effet du phénomène d'écrouissage à travers la puissance.

La dépendance à la vitesse de déformation, donc le caractère visqueux, est soulignée par le **terme 2**.

Enfin, la dépendance à la température se retrouve dans le **terme 3** qui traduit l'adoucissement thermique, c'est-à-dire l'influence de la température sur les propriétés structurales de la matière et donc sur son écoulement.

Les paramètres de la loi de Johnson-Cook pour différents métaux sont identifiés lors d'expériences menées sur des barres de Hopkinson. Aussi, l'approche inverse peut être utilisée ; pour cette dernière, les efforts de coupe et l'épaisseur du copeau sont des données d'entrée.

2.4. Usinage des matériaux composites

Les procédés d'élaboration des matériaux composites ne permettent pas toujours d'obtenir une pièce prête à l'exploitation. Par exemple, une opération de détournage est nécessaire pour éliminer la bavure en périphérie et produire des bords présentant une qualité satisfaisante pour l'utilisation. Aussi, la fabrication aéronautique actuelle utilise des opérations d'usinage de fraisage ou de meulage des panneaux FRP après le retrait des moules, la découpe au jet d'eau pour faire des ouvertures pour les conduits et les fenêtres, le perçage pour faire des trous pour le rivetage de panneaux.

Ainsi, les matériaux composites ne sont pas faciles à usiner en raison de leur nature très hétérogène et de l'énorme variation dans les propriétés mécaniques et thermiques des éléments constituants (renfort + matrice). Ceci rend l'usinage de composites un phénomène complexe où l'interaction outil-matière est distincte de l'usinage des métaux [21]. Néanmoins, l'usinage des composites reste mal maîtrisé vu la complexité des phénomènes intervenant dans la zone de coupe.

Pendant l'enlèvement de la matière et en raison de l'hétérogénéité et de l'anisotropie de ces matériaux, la coupe peut engendrer des endommagements qui vont croître avec la répétition des sollicitations imposées à la structure en service, et, éventuellement, conduire à sa ruine. Ces endommagements sont principalement le délaminage, l'arrachement des fibres, la décohésion et la dégradation d'origine thermique [22].

En s'intéressant aux efforts de coupe ainsi qu'à leurs directions pour différentes géométries d'outil et orientations de fibres, ils proposent les scénarios de formation de copeaux présentés dans la figure qui suit [23].

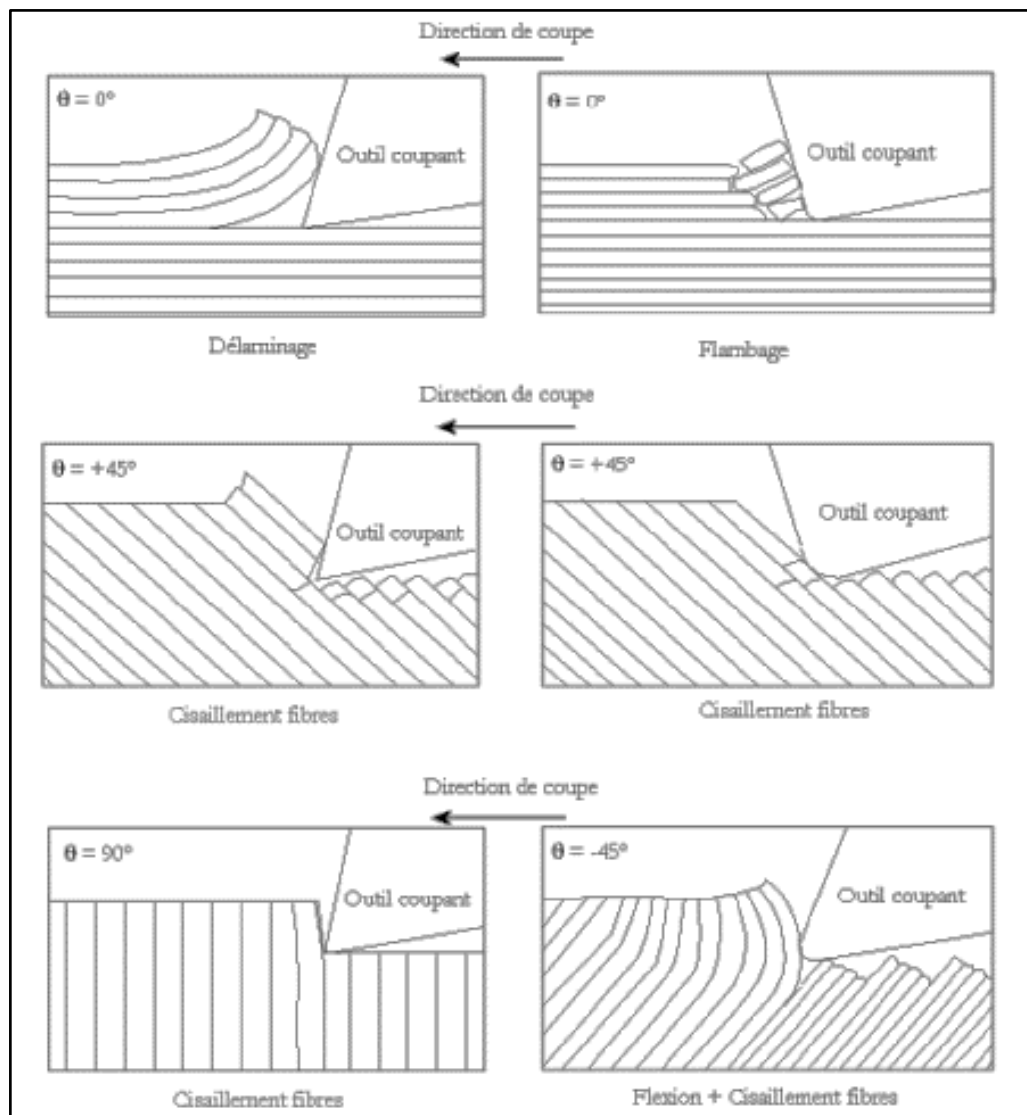


Figure 2.10 : Mécanismes de formation du copeau en coupe orthogonale du composite carbone/époxy unidirectionnel [23].

On note que les différentes orientations qui suivent :

- 0° correspond au chargement en mode I (par ouverture) de la section coupée avec une rupture le long de l'interface fibre/matrice combiné à un chargement en mode II (glissement droit) dans la direction d'avance de l'outil. La séparation du copeau se produit ensuite après la rupture des fibres dans une direction perpendiculaire à leur axe.
- $+45^\circ$ correspond au cisaillement des fibres par l'arête de coupe ; le copeau est ensuite formé par cisaillement des interfaces fibres/matrice jusqu'à la surface libre.

➤ 90° correspond à l'ouverture en mode I qui pénètre dans la matière (en dessous de la direction de coupe) en suivant l'interface fibre/matrice prolongée par une rupture secondaire qui remonte jusqu'à la surface en suivant le cisaillement des fibres.

➤ -45° correspond à la flexion des fibres, puis au cisaillement des fibres par paquets.

2.5. Comportement mécanique d'un composite unidirectionnel

Un composite UniDirectionnel est constitué de fibres parallèles disposées dans une matrice. Ce type de matériau constitue la configuration de base des matériaux composites à fibres ; la loi de Hooke s'écrit suivant l'une des deux formes matricielles suivantes [8] :

La forme directe :

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{23} & C_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}(C_{22} - C_{23}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix} \quad (2-4)$$

Ou la forme inverse :

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{12} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{23} & S_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2(S_{22} - S_{23}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} \quad (2-5)$$

Les matrices de rigidité et de souplesse sont inverses l'une de l'autre, et le comportement élastique d'un matériau composite UD est donc caractérisé par 5 coefficients indépendants appelés modules de l'Ingénieur ; soit :

$$C_{11} \quad ; \quad C_{22} \quad ; \quad C_{12} \quad ; \quad C_{23} \quad ; \quad C_{66}$$

Ou bien :

$$S_{11} \quad ; \quad S_{22} \quad ; \quad S_{12} \quad ; \quad S_{23} \quad ; \quad S_{66}$$

Les modules de l'Ingénieur sont les modules d'Young, les coefficients de Poisson et les modules de cisaillement. Ces modules sont mesurés lors d'essais simples tels que des essais de traction uniaxiale ou de cisaillement. Ces modules correspondent donc à une utilisation usuelle plus pratique que les constantes de rigidité ou de souplesse. Généralement, ces essais sont réalisés en imposant un champ connu de contraintes tout en mesurant le champ des déformations. Il en résulte que les constantes de souplesse sont liées aux modules de l'Ingénieur par des relations

plus simples que celles exprimant les constantes de rigidité [8].

Les modules de l'Ingénieur sont formulés comme suit [24] :

- ✓ Module d'élasticité longitudinal :

$$E_{11} = E_m V_m + E_r V_r \quad (2-6)$$

- ✓ Module d'élasticité transversal :

$$E_{22} = \frac{E_m E_r}{E_m V_m + E_r V_r} \quad (2-7)$$

- ✓ Coefficient de Poisson :

$$\nu_{12} = \nu_m V_m + \nu_r V_r \quad (2-8)$$

- ✓ Module de cisaillement (ou de Coulomb) :

$$G_{12} = \frac{G_m G_r}{V_m G_r + V_r G_m} \quad (2-9)$$

Nous allons maintenant considérer le comportement d'une poutre en flexion. Dans un premier cas, la poutre est conçue d'un matériau isotrope. Dans un second cas, nous considérons que la poutre est faite en matériau composite. Cet exemple, nous permet de voir la différence dans la démarche de calcul pour les deux cas.

La poutre, de matériau isotrope reposant sur deux appuis, est soumise à une charge concentrée verticale appliquée à ($x = L/2$).

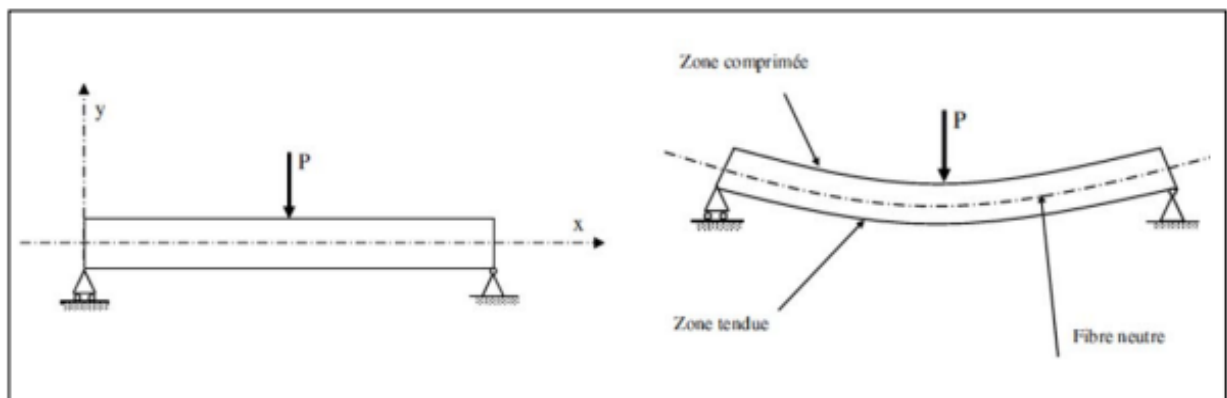


Figure 2.11 : Sollicitations par flexion d'une poutre [25].

Le moment fléchissant peut-être exprimé par :

- ✓ pour $0 < x < L/2$:

$$M(x) = \frac{px}{2} \quad (2-10)$$

✓ pour $L/2 < x < L$:

$$M(x) = \frac{p(L-x)}{2} \tag{2-11}$$

La contrainte de flexion est donnée selon :

$$\sigma_x = -\frac{M(x)}{I_{Gz}} y \tag{2-12}$$

La contrainte maximale peut-être exprimée par :

$$|\sigma_{max}| = \frac{PL/4}{\frac{I_{Gz}}{|y_{max}|}} \tag{2-13}$$

On peut calculer la flèche à partir de l'équation de la déformée déterminée par une double intégration de l'équation du moment fléchissant ; soit :

$$M(x) = E I_{Gz} y''(x) \tag{2-14}$$

Enfin, la flèche est donnée par :

$$|w| = \frac{P L^3}{48 E I_{Gz}} \tag{2-15}$$

Nous allons maintenant relier le calcul relatif au comportement d'une poutre sandwich sollicitée en flexion [26].

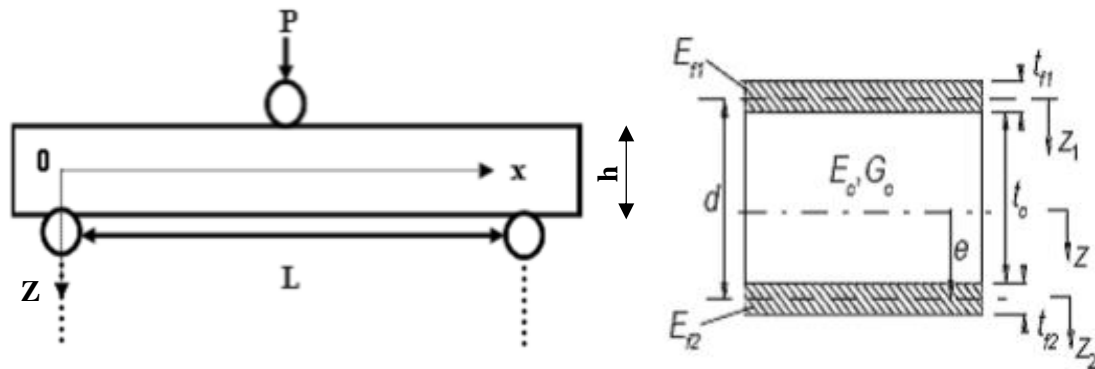


Figure 2.12 : Comportement d'une poutre sandwich en flexion.

(E_{f1}, t_{f1}) et (E_{f2}, t_{f2}) sont respectivement les modules d'élasticités et les épaisseurs des peaux supérieure et inférieure. (d) distance entre les axes neutres des deux peaux, (t_c) épaisseur de l'âme, et (Z) coordonnée suivant l'épaisseur du sandwich. (E_c, G_c) sont respectivement les modules d'Young et de Coulomb de l'âme.

Dans le cas d'un chargement central, le moment fléchissant est exprimé par les équations (2-10) et (2-11).

Les structures sandwichs sont généralement sollicitées en flexion ou en compression-flambement. Afin d'optimiser les caractéristiques des matériaux de l'âme et de la peau pour une application donnée, il convient donc de connaître leur comportement pour ce type de sollicitation. La grandeur caractéristique d'un matériau sandwich est sa rigidité en flexion, notée D , et donnée par la relation suivante :

$$\begin{aligned} D &= \int E_b z^2 dz = \frac{E_f b t_f^3}{6} + 2 E_f b t_f \left[\frac{d}{2} \right]^2 + \frac{E_c b t_c^3}{12} = \frac{E_f b t_f^3}{6} + \frac{E_f t_f b d^2}{2} + \frac{E_c b t_c^3}{12} \\ &= 2D_f + D_0 + D_c \end{aligned} \quad (2-16)$$

Les contraintes de traction ou de compression dans les peaux sont alors pour $t_c/2 < Z < h/2$ et $-t_c/2 < Z < -h/2$:

$$\sigma_f = \frac{M(x) Z}{D} E_f \quad (2-17)$$

Le maximum étant obtenu pour $Z = \pm h/2$ et $x = L/2$; soit :

$$\sigma_{fmax} = \pm \frac{P L h}{8D} E_f \quad (2-18)$$

Pour l'âme, si $-t_c/2 < Z < t_c/2$ nous obtenons :

$$\sigma_c = \frac{M(x) Z}{D} E_c \quad (2-19)$$

La contrainte maximale supportée par l'âme peut être exprimée par :

$$\sigma_{cmax} = \frac{P L t_c}{8D} E_c \quad (2-20)$$

La flèche due, au moment fléchissant, peut être calculée comme suit :

$$w_1 = \frac{P L^3}{48D} \quad (2-21)$$

Le déplacement dû, au cisaillement, peut être calculée comme suit :

$$w_2 = \frac{P L}{4 S} \quad (2-22)$$

La flèche totale est donnée par : $w = w_1 + w_2$.



Chapitre 3

Résultats de simulation et interprétation



3.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons procéder à simulation numérique en coupe orthogonale pour analyser le comportement thermomécanique d'un matériau composite à matrice métallique (aluminium) renforcée par des particules de carbure de silicium (SiC). L'approche Lagrangienne a été adoptée pour la simulation sur le logiciel Abaqus.

3.2. Domaine de modélisation de la coupe [14]

3.2.1. Domaine statique

Dans ce domaine, la modélisation ne tient pas compte du paramètre temporel, ni de l'accélération du système ou de la position angulaire de l'outil. En effet, la section de coupe varie au cours du temps et les efforts de coupe évoluent en fonction de l'épaisseur de matière, elle-même dépendante de la position angulaire de l'arête considérée. La modélisation dans le domaine statique pourrait, par conséquent, être utilisée en tournage où la section est constante lors de la coupe mais pas dans le cadre du fraisage.

3.2.2. Domaine quasi-statique

Les modélisations réalisées dans ce domaine permettent la prise en compte de la section réelle du copeau (en première approximation). Elles s'accompagnent d'hypothèses de rigidité faites pour l'outil et la pièce, n'intègrent pas l'environnement machine et ne permettent donc pas la prise en compte du comportement vibratoire du système pièce-outil-machine.

3.2.3. Domaine dynamique

Les modélisations réalisées dans ce domaine permettent d'effectuer le calcul des efforts de coupe en considérant des incréments de temps très rapprochés et en prenant en compte la masse, l'accélération et l'amortissement du système pièce-outil-machine. Ces approches nécessitent donc la caractérisation complète du système pièce-outil-machine dans le domaine fréquentiel. Leurs applications portent essentiellement sur la définition du comportement vibratoire du système pièce-outil-machine clairement identifié et l'établissement de cartes de stabilité.

3.3. Présentation du code Abaqus

Abaqus est un code de calcul par la méthode des éléments finis créé en 1978. Il est avant tout un logiciel de simulation de problèmes très variés en mécanique. 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 [27].

La figure qui suit illustre l’interface du produit Abaqus/CAE 2017 que nous utilisons dans notre étude.

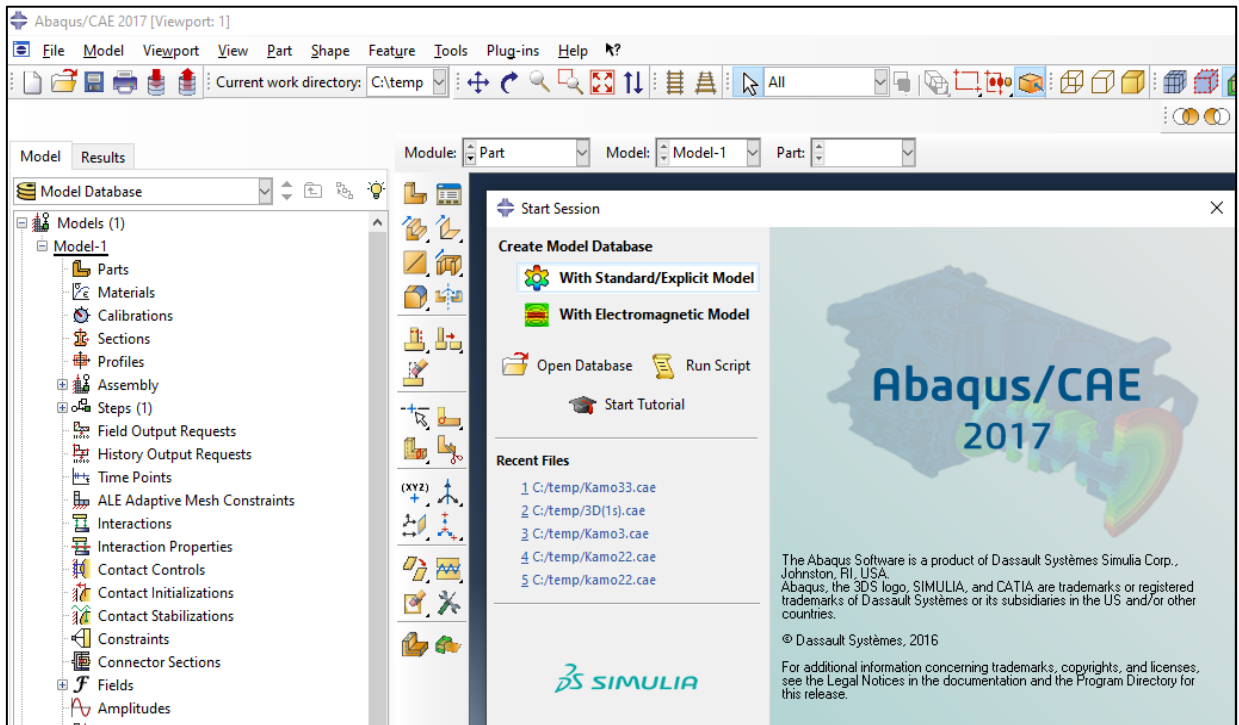


Figure 3.1 : Interface du code Abaqus.

La réalisation d’une simulation numérique s’effectue après un passage successif sur les différents modules représentés sur la figure qui suit :

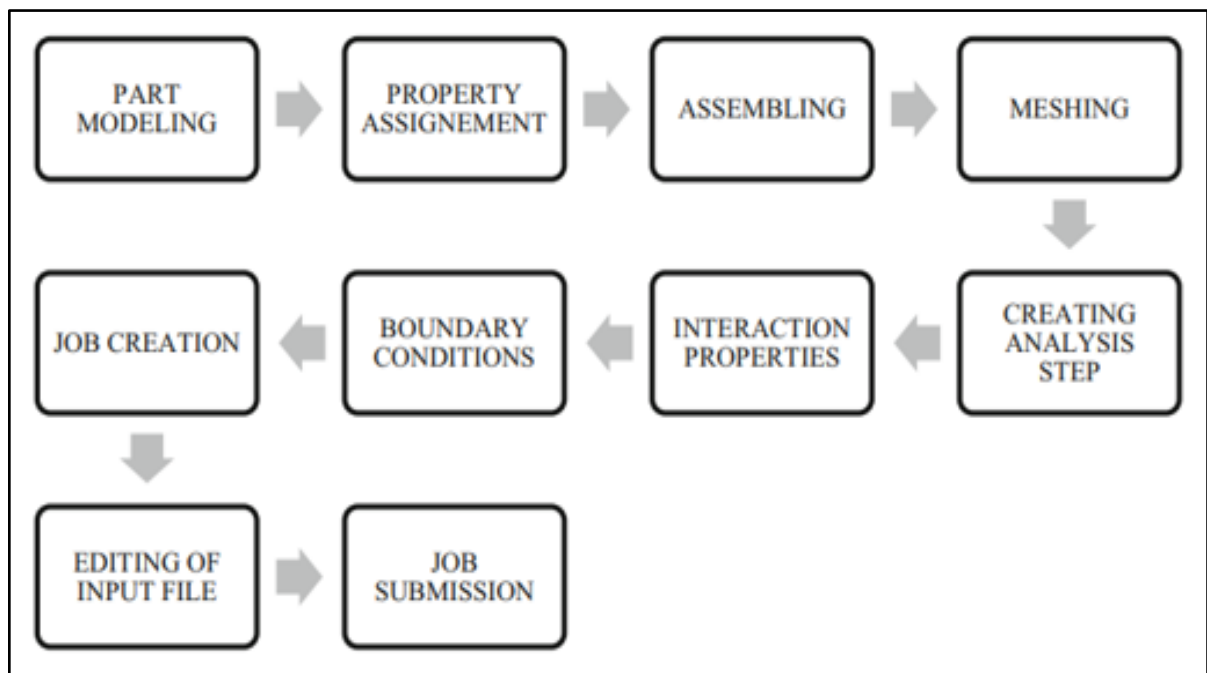


Figure 3.2 : Schéma illustratif d’une simulation sur Abaqus [28].

- **Le module « PART »** : permet de créer tous les objets géométriques nécessaires au problème traité, soit en les dessinant dans Abaqus, soit en les important d'un logiciel de dessin tiers.
- **Le module « PROPERTY »** : permet, comme son nom l'indique, de définir toutes les propriétés d'un objet géométrique ou d'une partie de ces objets.
- **Le module « ASSEMBLY »** : assemble les différents objets géométriques créés dans un même repère de coordonnées global.
- **Le module « STEP »** : permet de définir toutes les étapes et les requêtes pour le post traitement, c'est à dire le moment (temps) à partir duquel une force est appliquée et jusqu'à quand il est aussi possible de créer des forces ou des conditions aux limites qui s'activent à des moments donnés.
- **Le module « INTERACTION »** : grâce à 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. Il faut savoir qu'Abaqus ne prend en compte que les interactions explicitement définies.
- **Le module « LOAD »** : permet de spécifier tous les chargements, conditions aux limites, et champs. Il faut savoir que les chargements et les conditions aux limites sont dépendants du module STEP.
- **Le module « MESH »** : contient tous les outils nécessaires pour générer un maillage élément fini sur un assemblage.
- **Le module « JOB »** : une fois que toutes les tâches de définition du modèle ont été réalisées, il faut utiliser ce module pour réaliser tous les calculs nécessaires et en tirer des résultats.

3.4. Simulation numérique thermomécanique d'un composite

3.4.1. Données relatives au couple outil-matière

Le matériau cible est du type composite constitué d'une matrice métallique à base d'aluminium Al359 allié et d'un renfort en carbure de silicium SiC. Le diamètre des fibres est d'environ 20 μm . La coupe est réalisée par un outil de type PCD (Diamant polycristallin) [29]. Le matériau usiné ainsi que l'outil de coupe seront considérés comme deux corps déformables ; leurs propriétés sont reportées dans les tableaux qui suivent :

	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 3.1 : Propriétés de la pièce et de l'outil de coupe [29].

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 3.2 : Paramètres de coupe et géométrie de l'outil [29].

Paramètres de JC	A (MPa)	B (MPa)	C	n	m
	255	361	0.01	0.18	5.5

Tableau 3.3 : Paramètres de comportement de Johnson-Cook [29].

Paramètres de JC	d ₁	d ₂	d ₃	d ₄	d ₅
	0.071	1.248	1.142	0.147	0.1

Tableau 3.4 : Paramètres d'endommagement de Johnson-Cook [30].

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

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

Tableau 3.5 : Choix des unités.

3.4.2. Création de la géométrie de l'outil et la pièce dans le module « Part »

Dans un usinage, les éléments mis en interaction sont l'outil et la pièce ; les figures qui suivent montrent les géométries retenues pour ces éléments. Pour l'outil, l'angle de coupe (γ) est pris a priori égal à 5° , et l'angle en dépouille (α) est fixé à 5° .

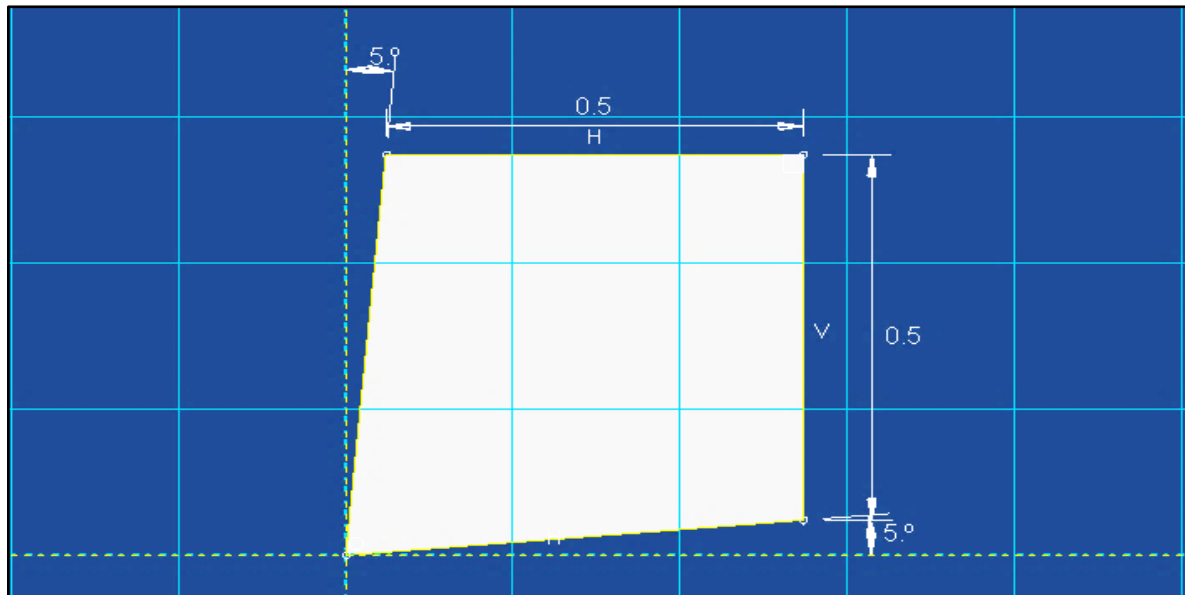


Figure 3.3 : Géométrie de l'outil.

Pour la pièce, la matrice est créée une ligne ou un espace de séparation, et elle a comme dimensions : 1 mm de longueur et 0.25 mm de hauteur.

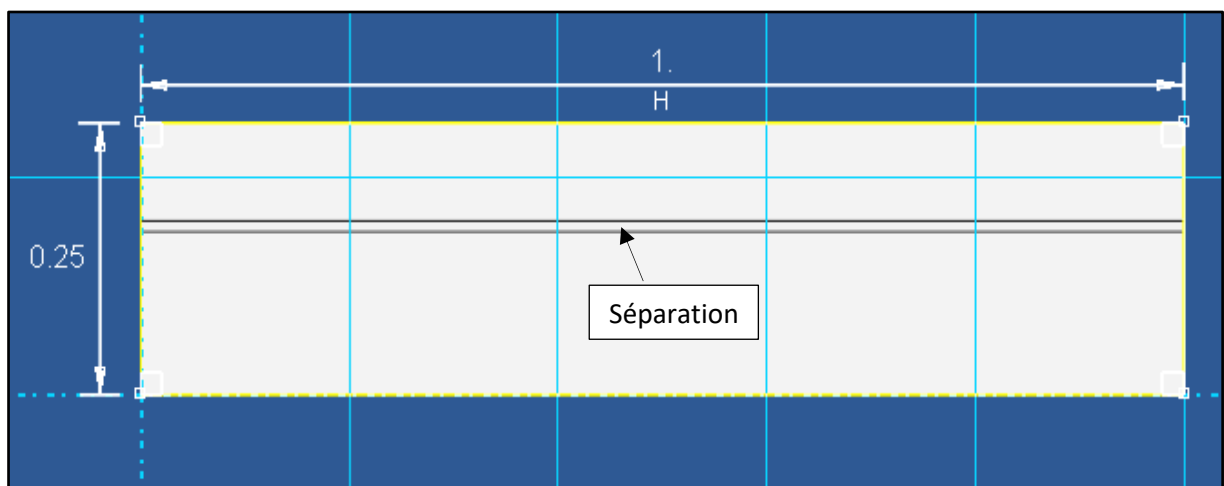


Figure 3.4 : Géométrie de la matrice avec la ligne de séparation.

La ligne de séparation permet le contrôle du maillage pour éviter une distorsion ainsi que la facilité de détachement du copeau.

Dans la matrice seront insérés les renforts ayant un diamètre de $20\ \mu\text{m}$; la figure qui suit illustre cette situation.

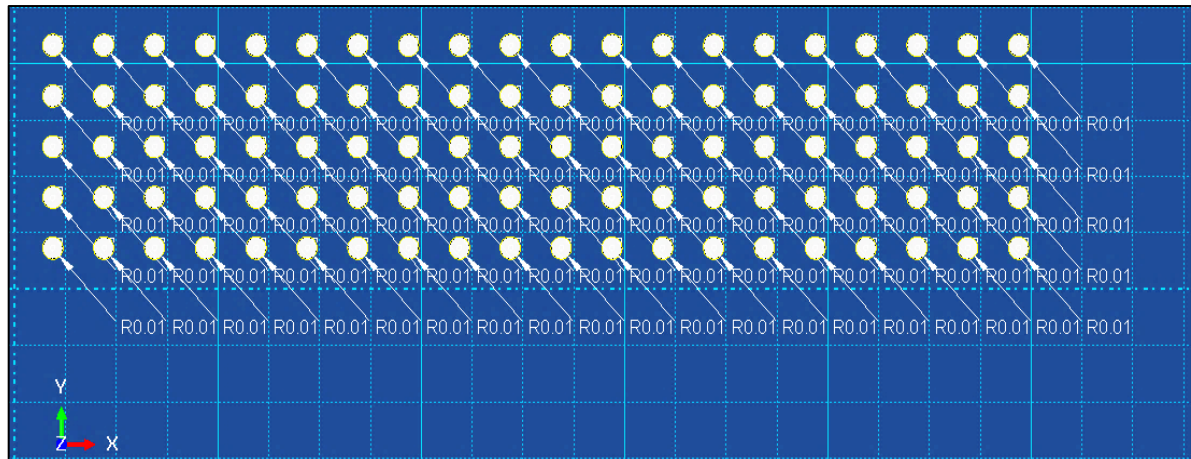


Figure 3.5 : Géométrie des fibres.

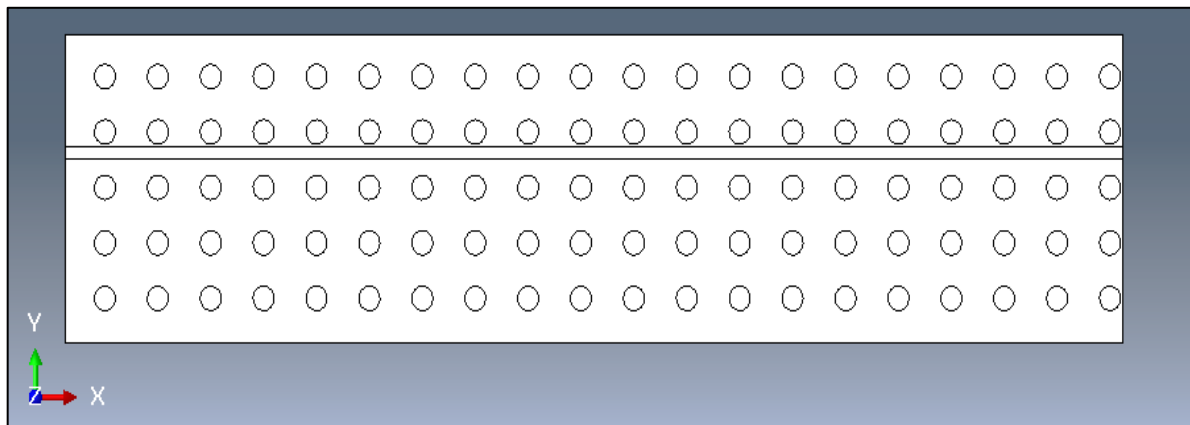


Figure 3.6 : Création du composite par immersion des renforts.

3.4.3. Introduction des paramètres de comportement et d'endommagement dans le module « Property »

Le modèle de comportement du matériau de la matrice (aluminium) est celui de Johnson-Cook ; la figure qui suit montre l'introduction des paramètres dans le code Abaqus.

Density							
Elastic							
Plastic							
Rate Dependent							
Specific Heat							
General Mechanical Thermal Electrical/Magnetic Other							
Plastic							
Hardening: Johnson-Cook							
Data							
	A	B	n	m	Melting Temp	Transition Temp	
1	255	361	0.18	5.5	593	20	

Figure 3.7 : Paramètres de comportement de la matrice.

La figure qui suit montre l'introduction des paramètres d'endommagement de la matrice.

Material Behaviors								
Conductivity								
Johnson-Cook Damage								
Damage Evolution								
Density								
Elastic								
General Mechanical Thermal Electrical/Magnetic Other								
Johnson-Cook Damage								
Data								
	d1	d2	d3	d4	d5	Melting Temperature	Transition Temperature	Reference Strain Rate
1	0.071	1.248	-1.142	0.147	0.1	593	20	1

Figure 3.8 : Paramètres d'endommagement de la matrice.

Pour l'outil de coupe, il est supposé comme étant un corps déformable élastique ; à cet effet, on introduit ses propriétés reportées dans le tableau 3.1.

3.4.4. Modules Assembly et Step

Dans le module « Assembly », nous avons effectué le positionnement relatif des éléments de l'interaction outil-matière ; à savoir : la pièce (composite) et l'outil de coupe.

Dans le module « Step », nous avons défini le temps de simulation qui a été choisi égal à 0.0625 ms, et la procédure d'exécution.

3.4.5. Définition du contact outil-copeau dans le module « Interaction »

Dans le module « Interaction », nous allons définir les conditions du contact outil-pièce ainsi que le coefficient de frottement. Ce dernier a été pris comme étant constant et égal à 0.15 d'après la référence [30].

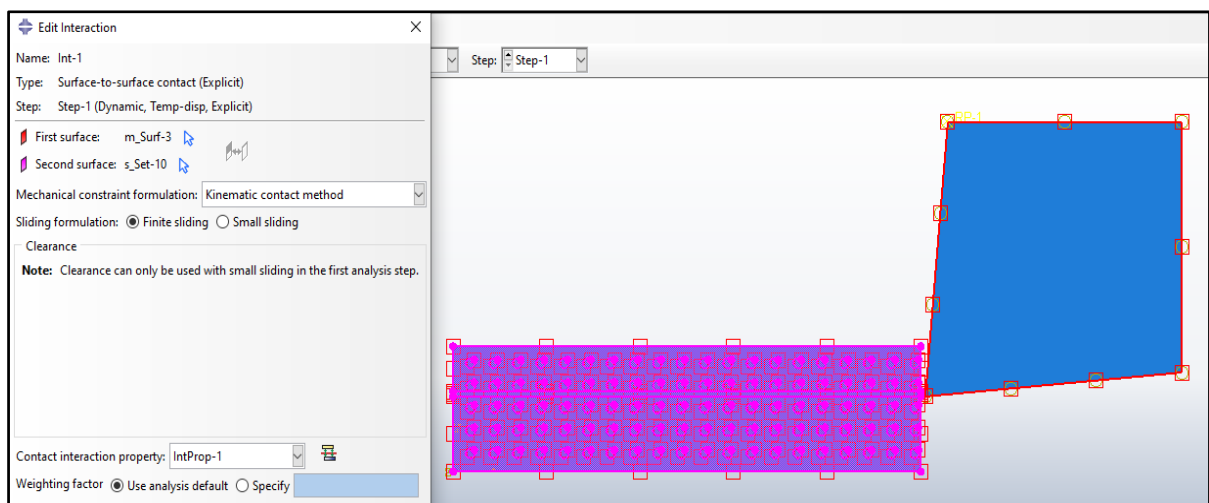


Figure 3.9 : Vue dans le module « Interaction ».

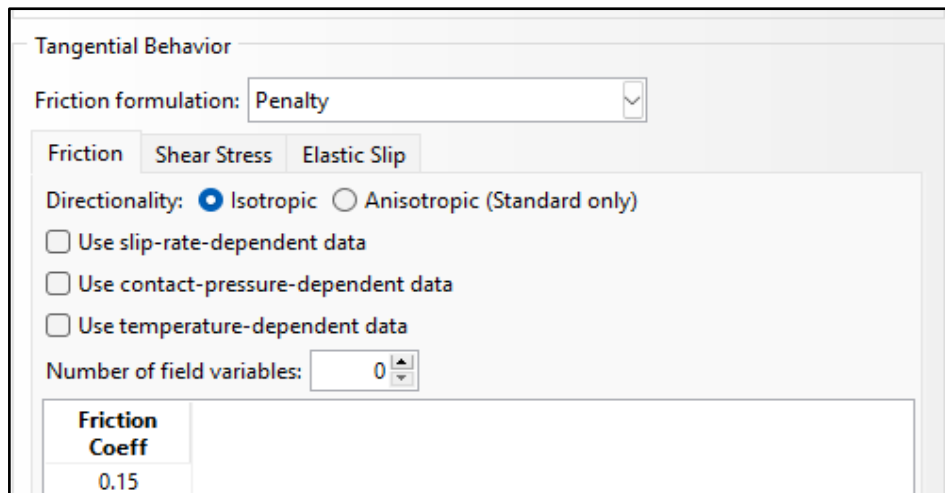


Figure 3.10 : Introduction du coefficient de frottement.

Aussi, dans ce module les conditions aux limites relatives à l'outil et à la pièce seront définies. En coupe orthogonale même dans un processus de tournage, on adopte une approximation qui consiste à attribuer la vitesse de coupe à l'outil et de considérer la pièce immobile (encastrée). Ceci nous conduit à introduire la vitesse de l'outil de coupe dans le module « Load ».

3.4.6. Maillage de la pièce et de l'outil dans le module « Mesh »

Le progiciel Abaqus propose différents types d'éléments finis (triangulaire, quadrilatéral, etc.) ; pour notre cas, nous avons choisi a priori des éléments quadrilatéraux pour des raisons de simplicité.

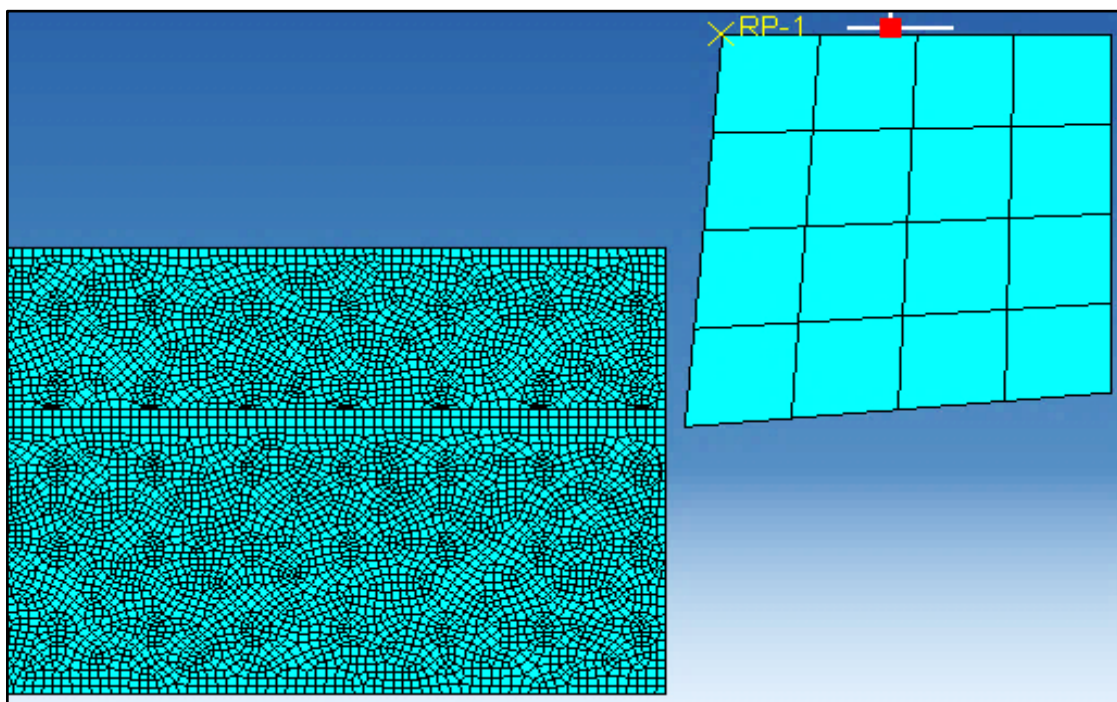


Figure 3.11 : Maillage de la pièce et de l'outil.

Nous allons maintenant présenter les résultats relatifs à la simulation numérique de la coupe orthogonale du composite Al359-SiC tout en considérant les conditions de coupe relatées dans le tableau 3.2.

3.5. Résultats de la simulation numérique

Après divers réglages sur le code Abaqus, les figures qui suivent montrent les contraintes de Von-Misès et la température dans la zone de coupe.

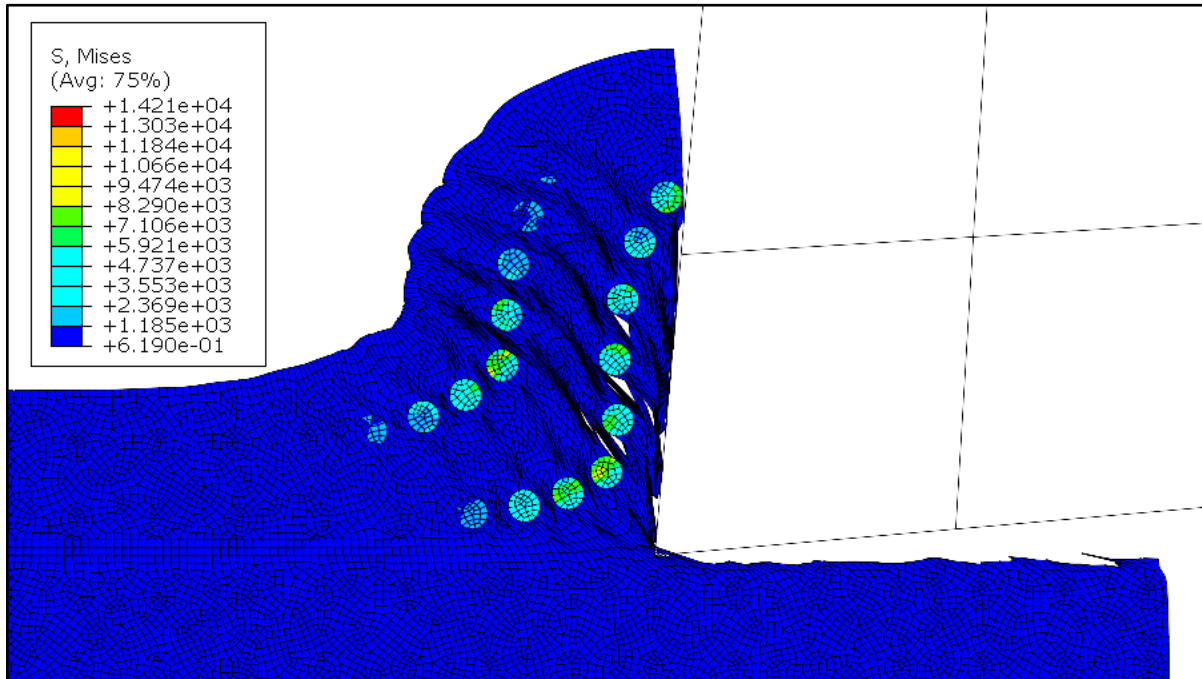


Figure 3.12 : Contraintes de Von-Misès dans la zone de coupe.

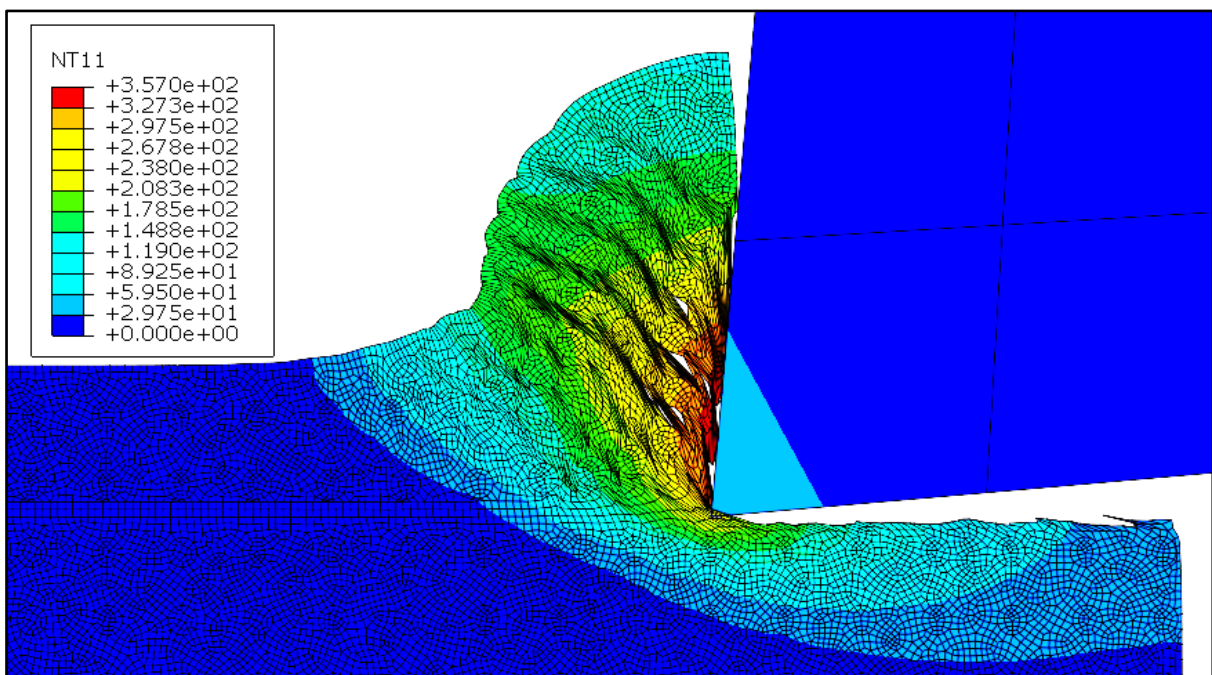


Figure 3.13 : Température dans la zone de coupe.

Dans ce qui suit, nous allons considérer la variation de l'angle de coupe, de la vitesse de coupe, et de l'avance pour analyser leur influence sur les contraintes de Von-Misès et sur la température. À cet effet, nous commençons dans un premier temps par la variation de l'angle de coupe tout en gardant $V_c = 300$ m/min et $f = 0.1$ mm/tr.

✓ **Contraintes et température pour l'angle $\gamma = 0^\circ$ ($V_c = 300$ m/min ; $f = 0.1$ mm/tr) :**

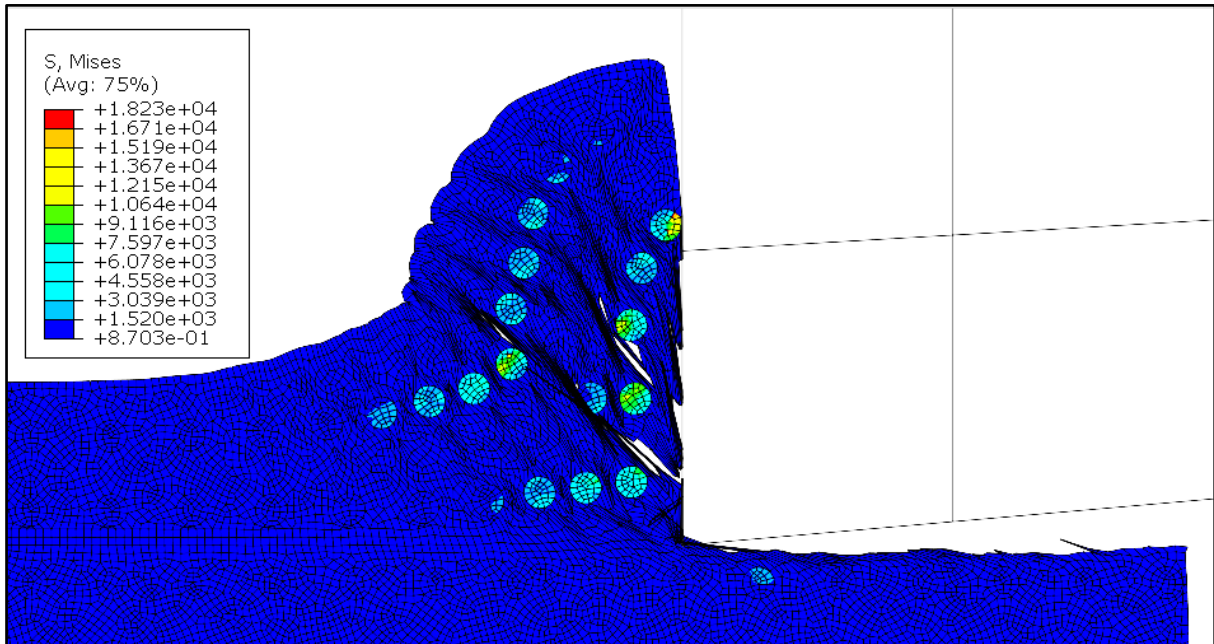


Figure 3.14 : Contraintes pour $\gamma = 0^\circ$.

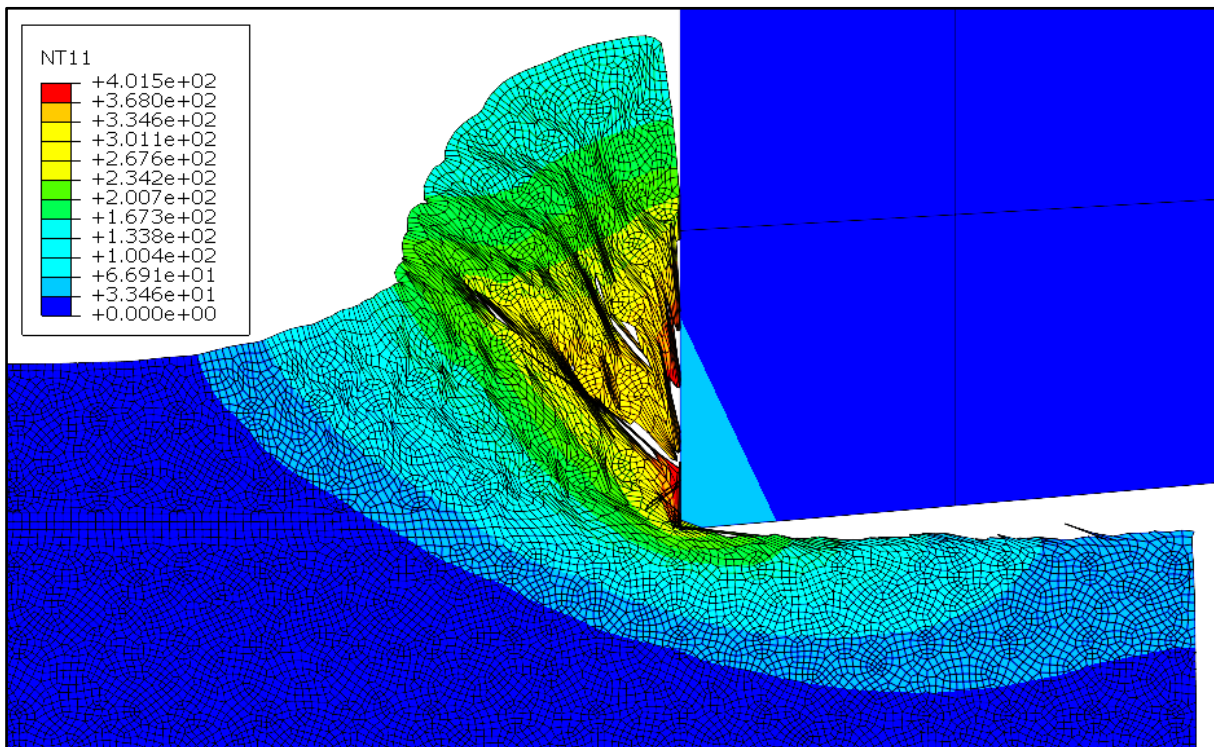


Figure 3.15 : Température pour $\gamma = 0^\circ$.

✓ Contraintes et température pour l'angle $\gamma = -5^\circ$ ($V_c = 300$ m/min ; $f = 0.1$ mm/tr) :

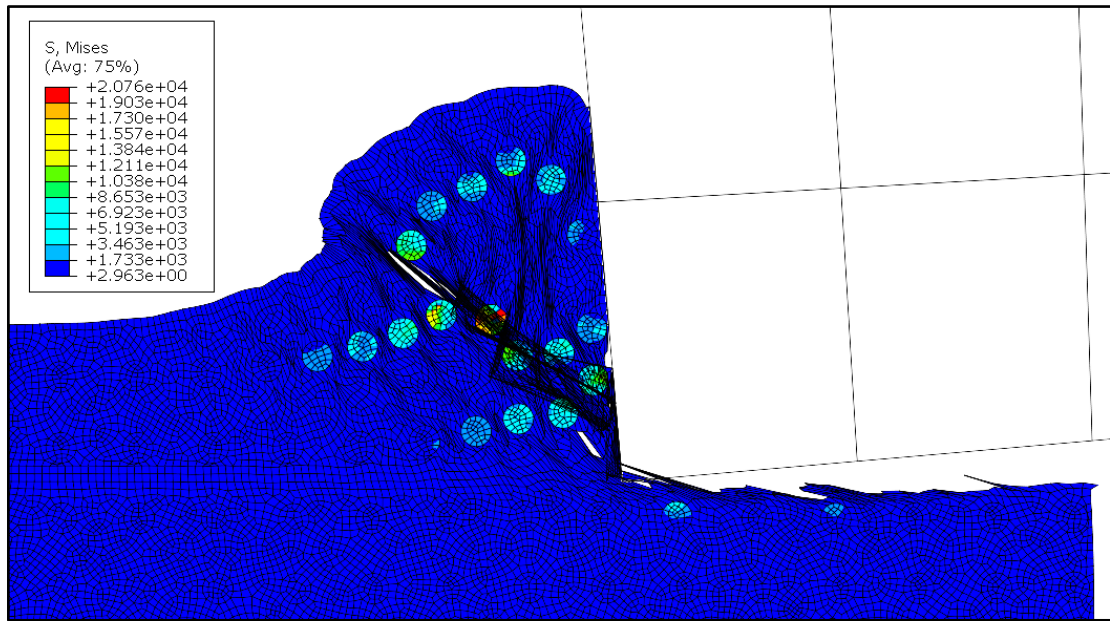


Figure 3.16 : Contraintes pour $\gamma = -5^\circ$.

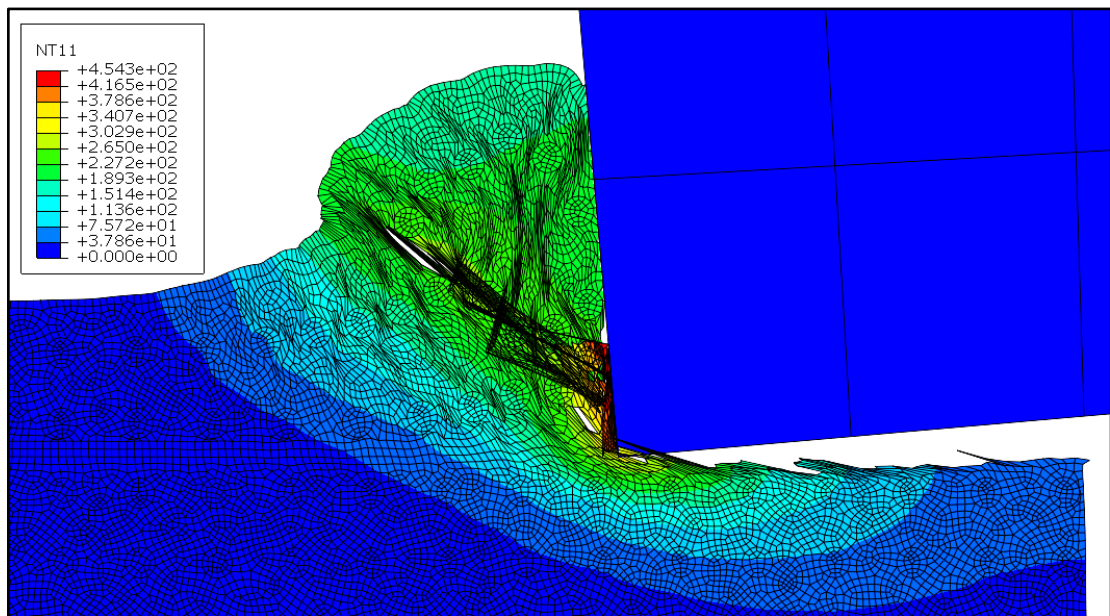


Figure 3.17 : Température pour $\gamma = -5^\circ$.

Le tableau qui suit résume la variation des contraintes de Von-Misès et de la température avec l'angle de coupe.

Valeur γ ($^\circ$)	Contraintes de Von-Misès (MPa)	Température ($^\circ$ C)
5	14210	357
0	18230	401.5
-5	20760	454.3

Tableau 3.6 : Variation des contraintes et de la température avec l'angle de coupe.

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

✓ **Contraintes pour $V_c = 200$ m/min ($\gamma = 5^\circ$; $f = 0.1$ mm/tr) :**

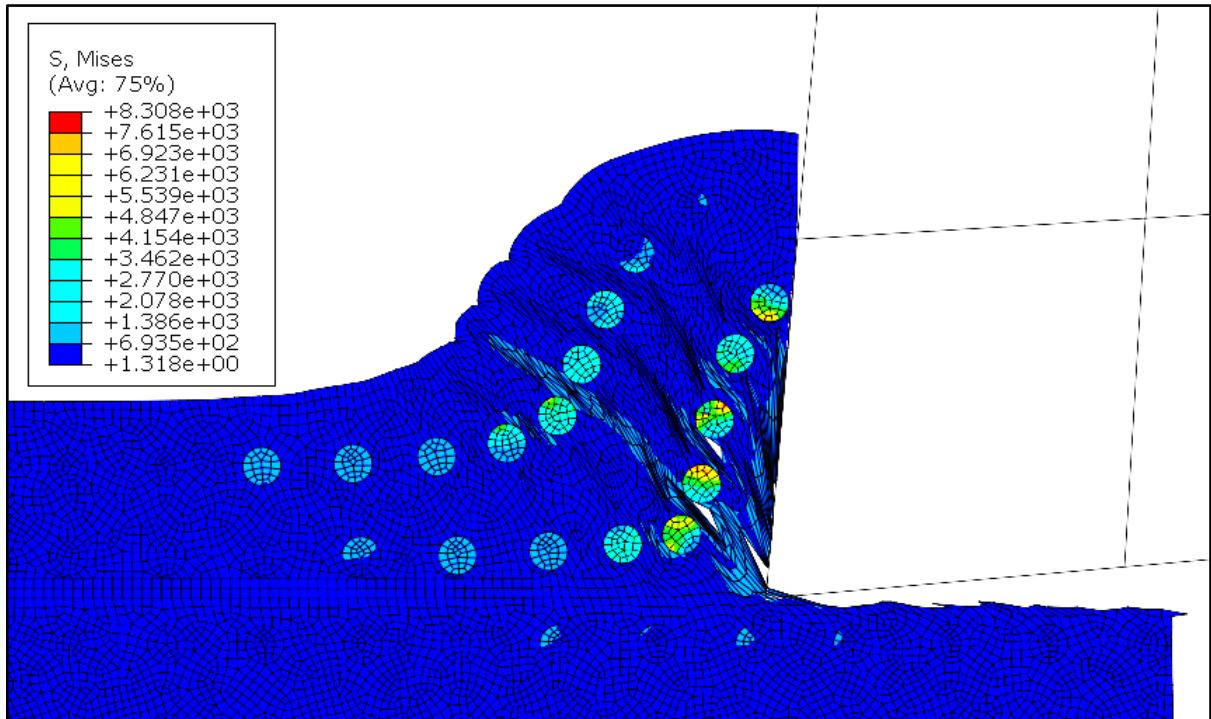


Figure 3.18 : Contraintes pour $V_c = 200$ m/min.

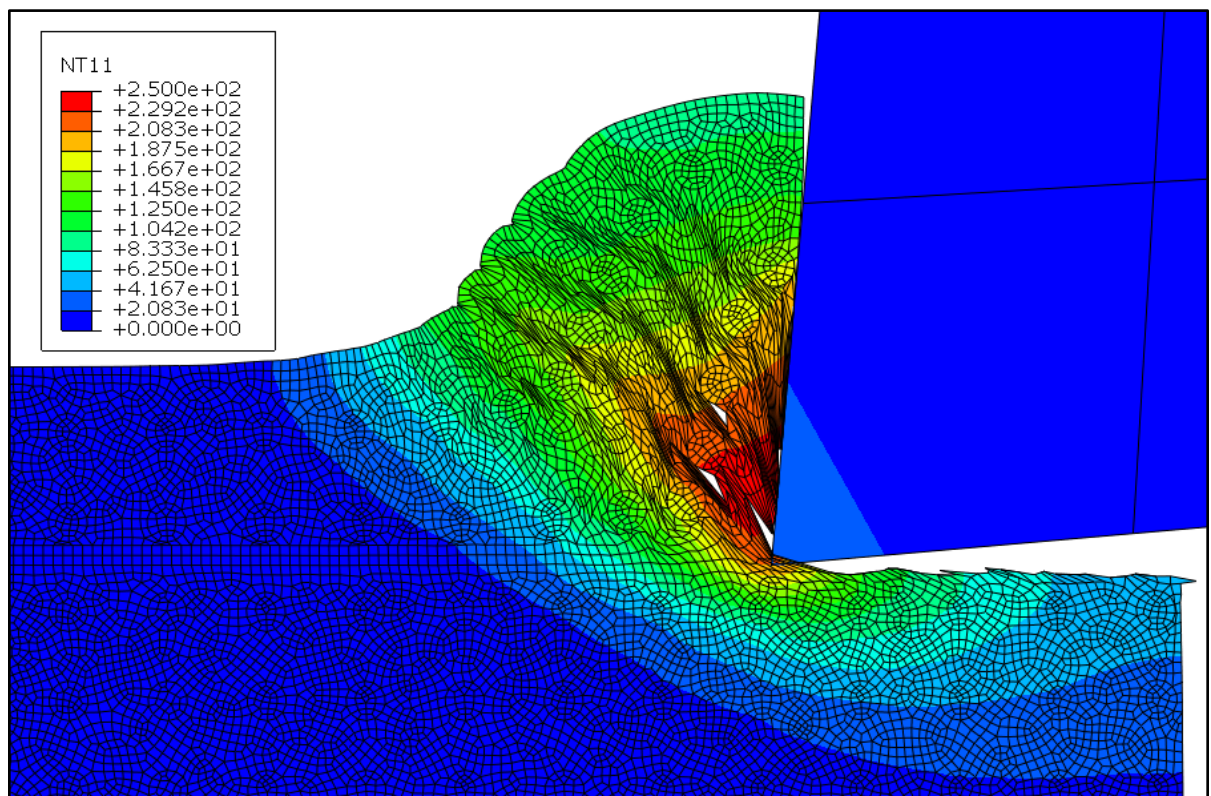


Figure 3.19 : Température pour $V_c = 200$ m/min.

✓ Contraintes pour $V_c = 400$ m/min ($\gamma = 5^\circ$; $f = 0.1$ mm/tr) :

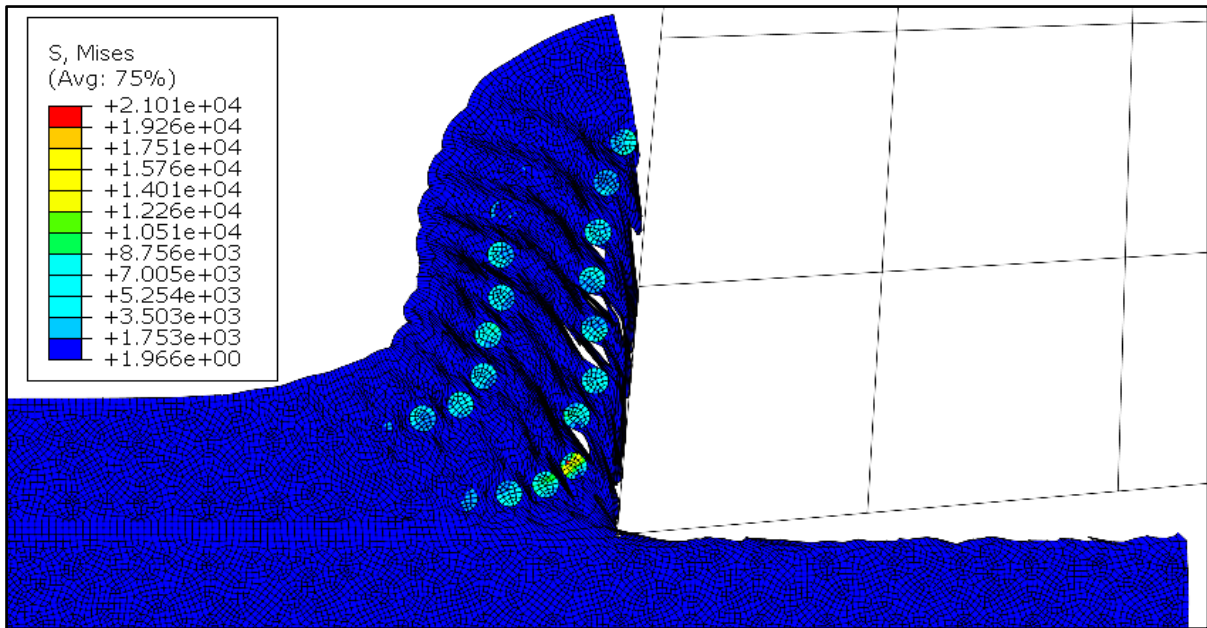


Figure 3.20 : Contraintes pour $V_c = 400$ m/min.

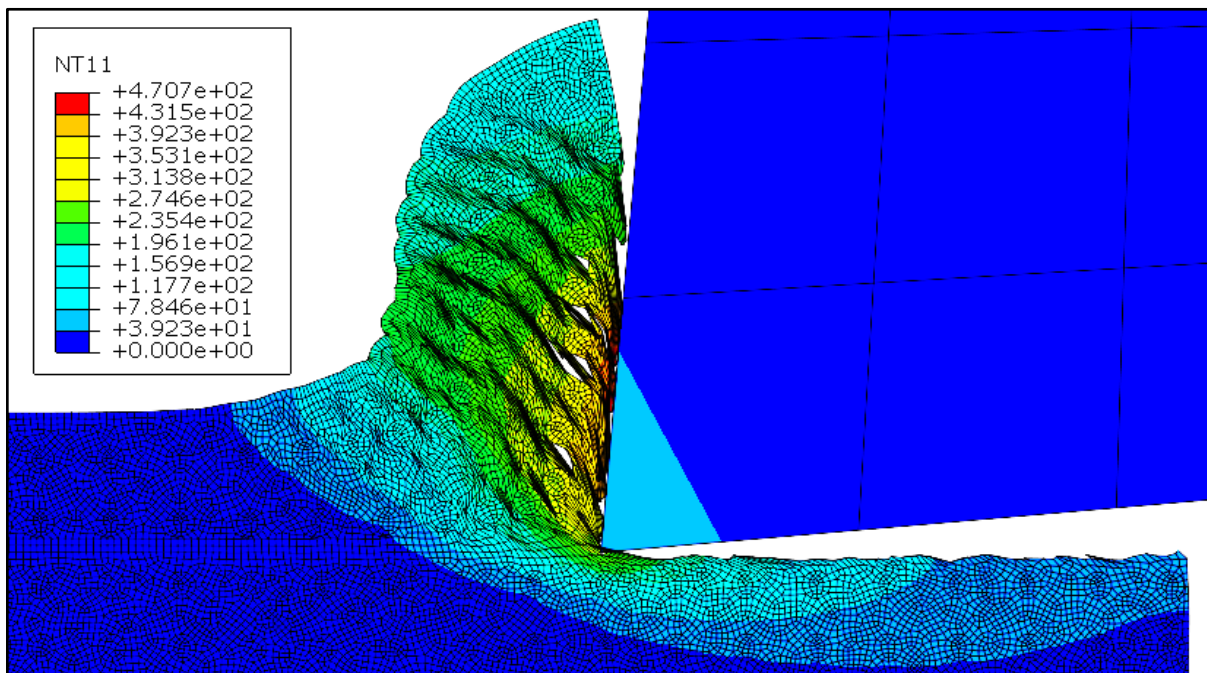


Figure 3.21 : Température pour $V_c = 400$ m/min.

Le tableau qui suit donne un récapitulatif vis-à-vis de la variation de la vitesse de coupe.

Valeur de V_c (m/min)	Contraintes de Von-Misès (MPa)	Température ($^\circ\text{C}$)
200	8308	250
300	14210	357
400	21010	470.7

Tableau 3.7 : Variation des contraintes et de la température avec la vitesse de coupe.

Enfin, nous allons maintenant faire varier l'avance pour voir le comportement thermomécanique du composite cible en usinage. Puisque, nous avons effectué la simulation pour une avance $f = 0.1$ mm/tr, il convient maintenant de faire varier cette dernière en prenant les valeurs $f = 0.05$ et $f = 0.15$ mm/tr, et ce pour : $\gamma = 5^\circ$ et $V_c = 300$ m/min.

✓ **Contraintes et température pour $f = 0.05$ mm/tr ($\gamma = 5^\circ$; $V_c = 300$ m/min) :**

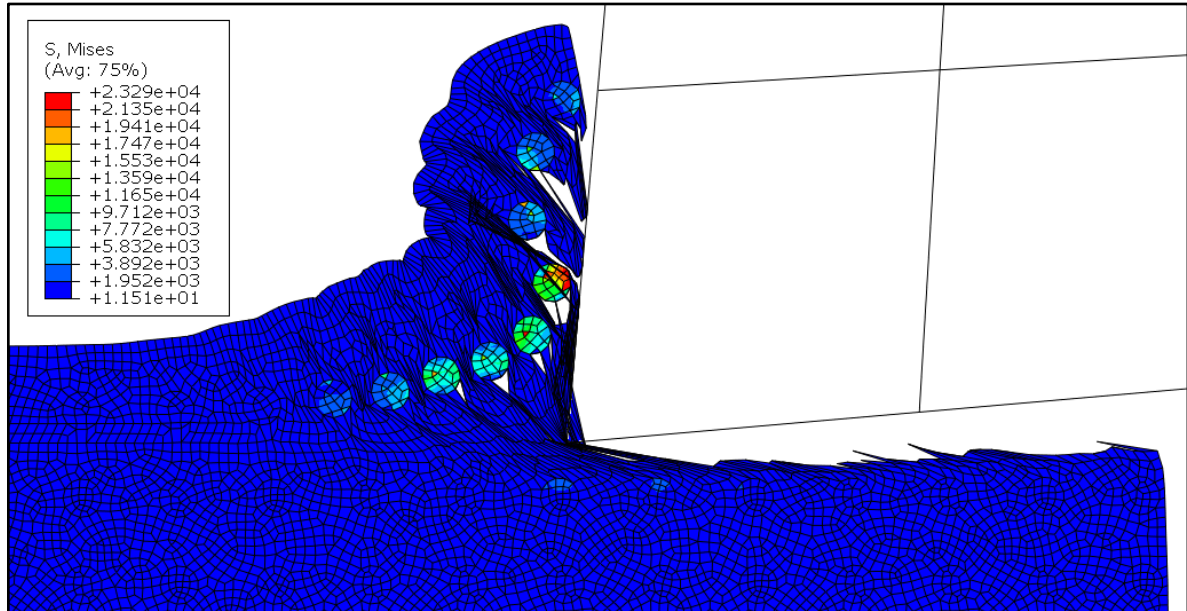


Figure 3.22 : Contraintes pour $f = 0.05$ mm/tr.

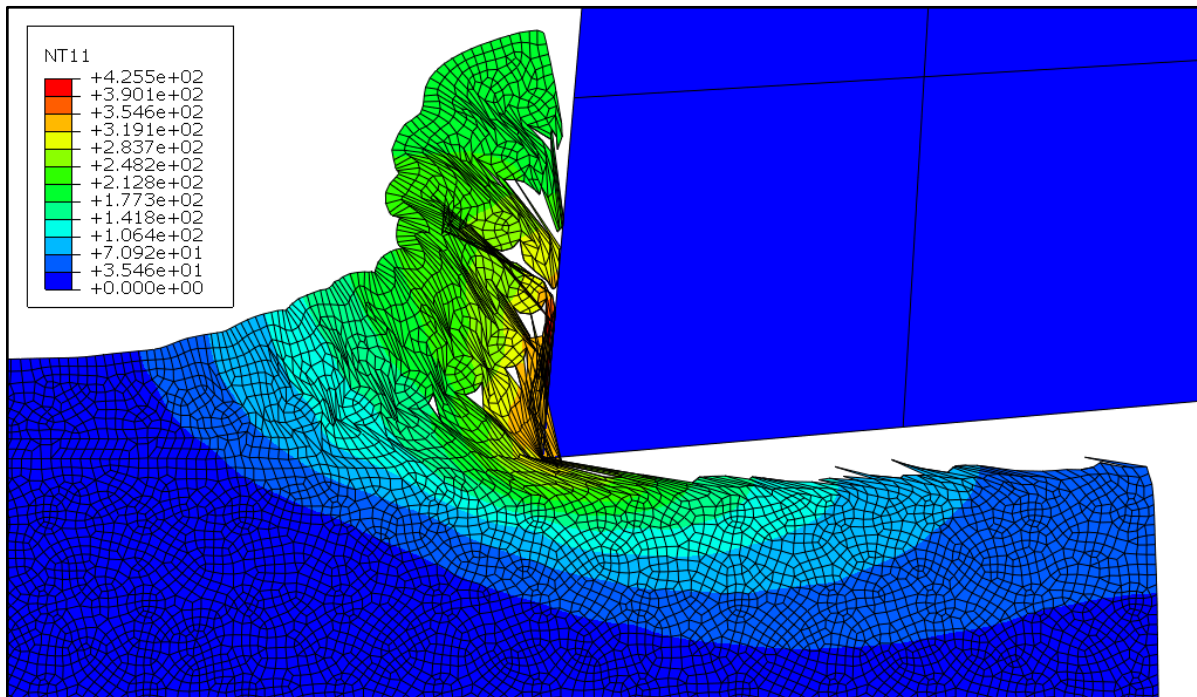


Figure 3.23 : Température pour $f = 0.05$ mm/tr.

✓ Contraintes et température pour $f = 0.15 \text{ mm/tr}$ ($\gamma = 5^\circ$; $V_c = 300 \text{ m/min}$) :

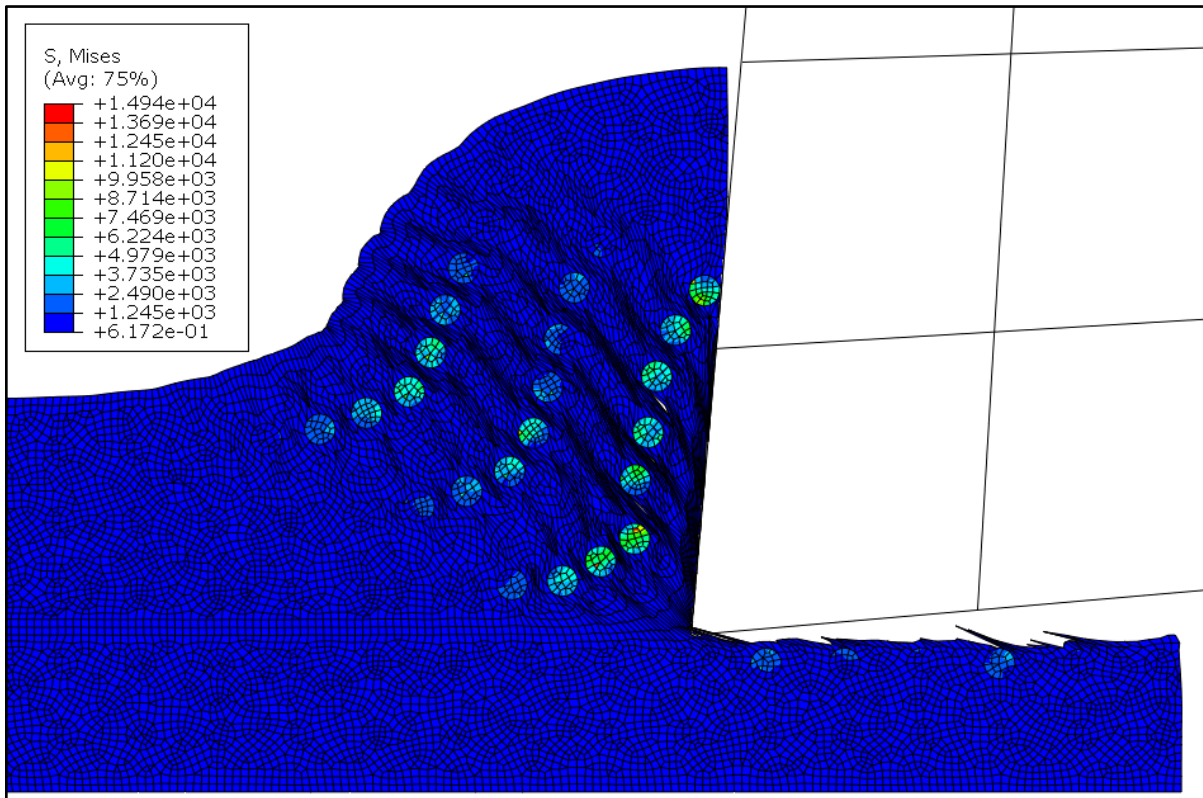


Figure 3.24 : Contraintes pour $f = 0.15 \text{ mm/tr}$.

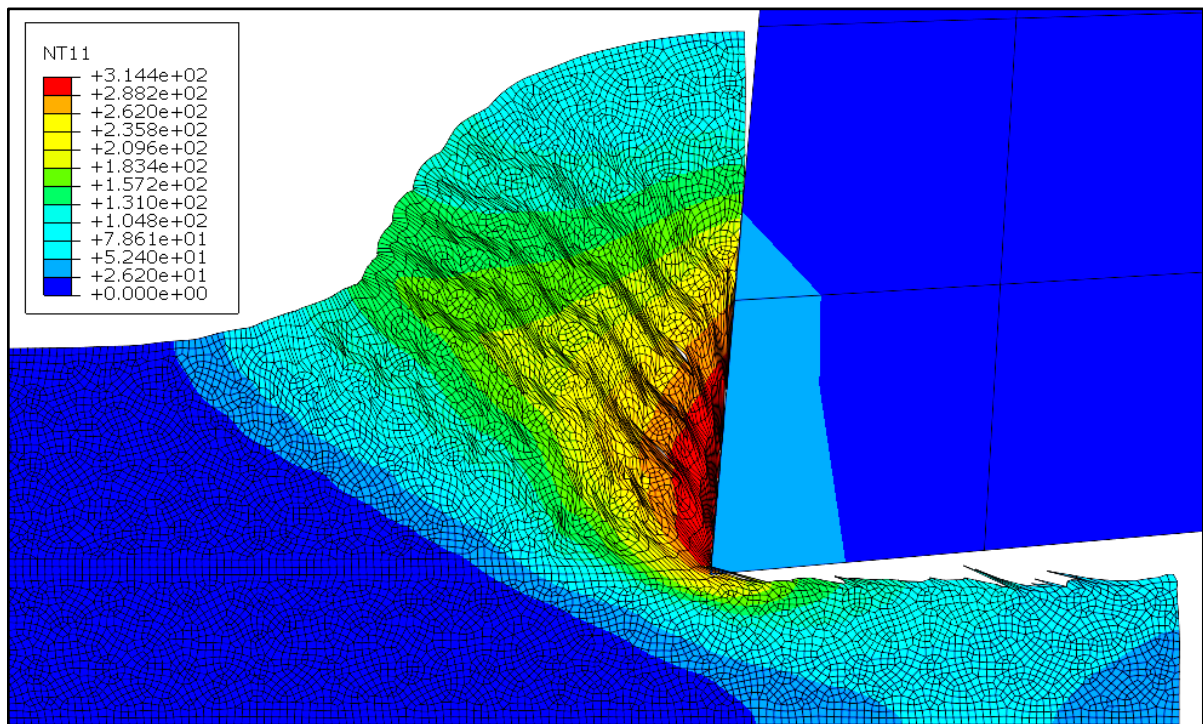


Figure 3.25 : Température pour $f = 0.15 \text{ mm/tr}$.

Le tableau qui suit résume la variation des contraintes et de la température avec l'avance.

Valeur de f (mm/tr)	Contraintes de Von-Misès (MPa)	Température (°C)
0.05	23290	425.5
0.1	14210	357
0.15	14940	314.4

Tableau 3.8 : Variation des contraintes et de la température avec l'avance.

3.6. Synthèse des résultats de la simulation numérique

Lors de la simulation, les contraintes de Von-Misès dans la zone de coupe atteignent une valeur d'environ 14210 MPa ; aussi, la température est aux alentours de 357 °C. Ces résultats, obtenus pour une vitesse de coupe de 300 m/min, une avance de 0.1 mm/tr et un angle de coupe de 5°, se rapprochent en valeur de ceux reportés dans la référence [29].

D'après les figures 3.12 à 3.17 et le tableau 3.6, lorsqu'on fait varier l'angle de coupe, on remarque que les contraintes et la température augmentent tout en allant vers une coupe négative. Ceci est dû au tassement du copeau devant la face de coupe de l'outil.

À travers les figures 3.18 à 3.21 et le tableau 3.7, nous constatons que les contraintes et la température augmentent avec l'augmentation de la vitesse de coupe. Ceci peut être expliqué par le fait que la formation du copeau sous des vitesses importantes donne naissance à un intense cisaillement et un frottement important lors l'interaction outil-matière.

Pour ce qui est de la variation de l'avance, nous constatons que la température diminue à chaque fois que l'avance augmente ; c'est le cas des avances $f = 0.1$ mm/tr et $f = 0.15$ mm/tr. Pour ces dernières, les contraintes augmentent avec l'augmentation de l'avance. Ceci peut être interprété par le fait que lorsque l'avance augmente le débit des copeaux augmente et les efforts sont aussi importants, mais en contrepartie le flux de chaleur se dissipe dans une surface plus grande ; d'où, l'abaissement de la température pour une avance de 0.15 mm/tr.

Pour le cas de l'avance $f = 0.05$ mm/tr, l'augmentation des contraintes et de la température peut être expliqué par le fait que la coupe a coïncidé avec les renforts plus rigides que la matrice ; chose qui est remarquable sur la figure qui suit.

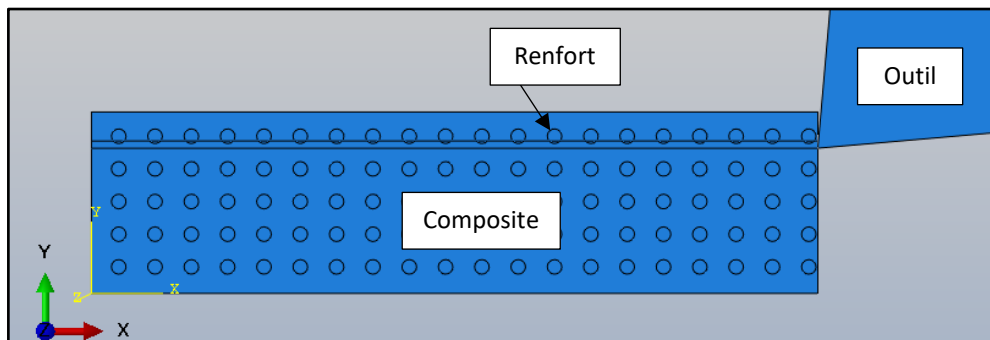


Figure 3.26 : Coupe du renfort pour $f = 0.05$ mm/tr.



Conclusion générale et perspectives



CONCLUSION GÉNÉRALE & PERSPECTIVES

Ce travail a pour objectif l'analyse du comportement thermomécanique des matériaux composites en usinage. À cet effet, nous avons effectué une simulation numérique relative à une coupe orthogonale d'un matériau composite constitué d'une matrice à base d'aluminium Al359 allié et d'un renfort en carbure de silicium SiC ; la coupe est réalisée par un outil de type PCD (Diamant polycristallin).

Pour la simulation numérique, objet de la présente étude, tout en utilisant le code Abaqus CAE, nous avons adopté une formulation Lagrangienne en faisant appel à la méthode des éléments finis. La loi rhéologique du matériau usiné et son critère d'endommagement sont de type Johnson-Cook. Afin que nous puissions confronter nos résultats de simulation, nous avons retenu a priori les mêmes conditions de coupe ainsi que le même jeu de paramètres choisis dans la référence [29]. Après introduction des données et simulation par le code Abaqus, la confrontation des résultats est prometteuse. Néanmoins, notre utilisation du code nécessite davantage l'acquis de ses fonctionnalités en matière d'interaction entre les éléments : matrice, fibres et outil de coupe.

Aussi pour nos simulations, lorsqu'on fait varier l'angle de coupe, on remarque que les contraintes et la température augmentent tout en allant vers une coupe négative. Ceci est dû au tassement du copeau devant la face de coupe de l'outil.

Les contraintes et la température augmentent avec l'augmentation de la vitesse de coupe. Ceci peut être expliqué par le fait que la formation du copeau sous des vitesses importantes donne naissance à un intense cisaillement et un frottement important lors l'interaction outil-matière.

Pour ce qui est de la variation de l'avance, nous constatons que la température diminue à chaque fois que l'avance augmente ; c'est le cas des avances $f = 0.1$ mm/tr et $f = 0.15$ mm/tr. Pour ces dernières, les contraintes augmentent avec l'augmentation de l'avance. Ceci peut être interprété par le fait que lorsque l'avance augmente le débit des copeaux augmente et les efforts sont aussi importants, mais en contrepartie le flux de chaleur se dissipe dans une surface plus grande ; d'où, l'abaissement de la température pour une avance de 0.15 mm/tr. Pour le cas de l'avance $f = 0.05$ mm/tr, l'augmentation des contraintes et de la température peut être expliqué par le fait que la coupe a coïncidé avec les renforts plus rigides que la matrice.

Perspectives :

Nous souhaitons que la présente étude soit enrichie par la maîtrise du code Abaqus CAE et étendue à la prédiction en coupe oblique (3D) voire appliquée à d'autres procédés de coupe.



**Références
bibliographiques**



RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] S. ZENIA, « Modélisation numérique de l'usinage des matériaux composites à matrice polymère et fibres longues de carbone », Thèse de Doctorat, Université de Lorraine, 2017.
- [2] A. KESSAD, « Conception et réalisation d'une mini-machine CNC à trois axes ». Mémoire de Master, Université de Tiaret, 2021.
- [3] https://www.researchgate.net/publication/356289155_Materiaux_Composites
- [4] J. AUCHER, « Etude comparative du comportement composite à matrice thermoplastique ou thermodurcissable », Thèse de Doctorat, INSA de Rouen, 2009.
- [5] <http://thesis.univ-biskra.dz/1136/3/CHAPITRE%20I.pdf>
- [6] S. BENSAD, « Contribution à la caractérisation et à la modélisation électromagnétique et thermique des matériaux composites anisotropes », Thèse de Doctorat, Université de Nantes, 2006.
- [7] M. HADDADI. « Etude numérique avec comparaison expérimentale des propriétés thermophysiques des matériaux composites à matrice polymère », Mémoire de Magister, Université de Batna, Algérie, 2011.
- [8] J. M. BERTHELOT, « Matériaux composites, comportement mécanique et analyse des structures », 4^{ème} édition, TEC & DOC, Le Mans, 2010.
- [9] <http://gaetanmabille.free.fr/eco-conception/glossaire%20composites%20biodegradables%20CARMA.pdf>
- [10] <http://tpaile.weebly.com/avantagesdeacutesavantages.html>.
- [11] F. BERBAIN & A. CHEVALIER, « Mise en œuvre des composites », Techniques de l'Ingénieur, A 3720.
- [12] D. GAY, « Matériaux composites », 5^{ème} édition, Lavoisier, 2005.
- [13] E. FELDER, « Procédés d'usinage », Techniques de l'Ingénieur, traité Génie mécanique, B 7000 / 1-16.
- [14] M. GHOUINI & K. M KOUADRIA, « Modélisation du contact à l'interface outil-copeau : Approche analytique et numérique ». Mémoire de Master, Université de Tiaret, 2019.
- [15] <https://www.opmm.fr/tournage/>
- [16] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Fraisage>
- [17] <https://www.msm.ch/perages-longs-dans-les-inox-et-les-alliages-tenaces-a-822879/>

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [18] M. GUEDICHE, « Modélisation et Simulation de l'Usure des Outils de Coupe au cours du processus d'enlèvement de matière : Approche expérimentale et numérique (MOSUOC) ». Thèse de Doctorat, Université de Lyon, 2017.
- [19] https://www.researchgate.net/figure/3-Formation-du-copeau-en-coupe-orthogonale_fig2_48907217
- [20] B. KEITA, « Synthèse des rhéologies en usinage : Application pour la prédiction des échauffements dans la zone de coupe de l'acier 42CrMo4 », Mémoire de Master, Université de Tiaret, 2017.
- [21] N. NGUYEN-DINH, A. HEJAJI, R. ZITOUNE, C. BOUVET & L. CROUZEIX, « Futuristic Composites: Behavior, Characterization, and Manufacturing » Springer, 2018.
- [22] Y. TURKI, M. HABAK, R. VELASCO, P. VANTOMME, Z. ABOURA « Etude expérimentale du détourage d'un composite carbone/époxy », 17^{ème} colloque national de la recherche dans les IUT, CNRIUT, 8–10 juin, Cherbourg-Octeville, France, 2011.
- [23] D. ILIESCU. « Approches expérimentale et numérique de l'usinage à sec des composites carbone/époxy », Thèse de Doctorat, ENSAM de Paris, 2008.
- [24] W. TOUMI, « Optimisation de la configuration des tubes en matériaux composites sous pression », Mémoire de Master, Université de Biskra, 2019.
- [25] <https://www.technologuepro.com/resistance-des-materiaux-2/chapitre-6-flexion-simple>
- [26] J. E. ARBAOUI, « Etude comparative et caractérisations mécaniques des structures sandwichs multicouches », Thèse de Doctorat, Université de Metz, 2009.
- [27] H. SEKLOKA, G. RAOUL, « Modélisation statique et dynamique par ABAQUS d'une plaque de chaussée multicouches reposant sur un sol élastique », Rapport de stage, Université d'Abomey Calavi (UAC), Bénin, 2016.
- [28] G-D. WANG & S. K. MELLY « Three-dimensional finite element modeling of drilling CFRP composites using Abaqus/CAE: a review », The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, volume 94, pages 599–614, 2018.
- [29] U. UMER, M. ASHFAQ, J. A. QUDEIRI H. M. A. HUSSEIN A. R. AL-AHMARI, « Finite Element Modeling of The Orthogonal Machining of Particle Reinforced Aluminum Based Metal Matrix Composites », FARCAMT, Advanced Manufacturing Institute, King Saud University, 2014.
- [30] <https://grabcad.com/tutorials/video-tutorial-how-to-model-metal-matrix-composites-in-an-orthogonal-cutting-simulation-with-abaqus-cae>.

ملخص:

من خلال هذه الدراسة، نهتم بعملية محاكاة رقمية خاصة بقطع مصفوفة معدنية (ألومنيوم) معززة بجزئيات كربيد السليسيوم (SiC). الهدف هو تحليل مدى تأثير ظروف القطع (زاوية القطع، سرعة القطع وتقدم أداة القطع) على اجهادات (Von-Misès) ودرجة الحرارة في منطقة القطع. تم تنفيذ المحاكاة التي تبدو واعدة بواسطة البرنامج (Abaqus CAE).

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 (aluminium) renforcée par des particules de carbure du silicium (SiC). L'objectif sera d'analyser l'influence des conditions de coupe (angle de coupe, vitesse de coupe et avance) sur les contraintes de Von-Misès et la température dans la zone de coupe. La simulation, qui semble être prometteuse, a été effectuée sous le progiciel Abaqus CAE.

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 particle reinforced aluminum based metal matrix composite. The goal will be to analyze the influence of cutting conditions (rake angle, cutting speed and feed) on Von-Misès stresses and temperature in the cutting zone. The simulation, which seems to be promising, was conducted under the Abaqus CAE package.

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