

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOULOU D MAMMERE DE TIZI-OUZOU
FACULTE DU GENIE DE LA CONSTRUCTION
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE



Mémoire de Master
Spécialité : Construction mécanique
Option : Génie Mécanique

Présentés par :
M^{elle} CHAOUCHÉ Lynda
Mr HADDOUCHE Mounir

Thème

**ETUDE DU COMPORTEMENT D'UN
STRATIFIE SOUS CHARGEMENT DYNAMIQUE**

Soutenue publiquement le : 02 / 10 / 2024

Devant le jury composé de :

Mme MEGHLAOUI Bahia	MC-B	Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou (UMMTO)	Présidente
Mme TEKLAL Fatiha	MC-B	Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou (UMMTO)	Examinatrice
M. OULD OUALI Mohand	Prof.	Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou (UMMTO)	Encadreur

Année universitaire 2023 / 2024

Dédicaces

À mes parents bien-aimés,

À mes chères sœurs, beaux-frères, nièces (Farida, Maya, Nadine, Elena) et neveux (Rayane, Aksel, Nadjib), dont l'amour, la joie et le soutien inébranlables illuminent ma vie, À toute ma famille pour leur présence et leur encouragement sans faille,

À mes amis, pour leur soutien et les moments de répit essentiels,

À mon binôme, pour son engagement et sa complicité tout au long de cette aventure,

À mes enseignants et encadrants, pour leur précieuse guidance et leur inspiration,

Et à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce mémoire.

Lynda

Dédicaces

Je dédie ce mémoire à mes chers parents, dont l'amour, la patience et les encouragements ont été une source inépuisable de force et d'inspiration tout au long de mon parcours. Sans vous, ce projet n'aurait pas été possible.

À mon frère, pour son soutien, sa compréhension et ses précieux conseils, qui m'ont aidée à rester concentrée et motivée dans les moments difficiles.

Je dédie également ce travail à mes enseignants, pour leur savoir transmis avec passion, ainsi qu'à mon encadreur, pour ses conseils avisés et sa disponibilité tout au long de la réalisation de ce mémoire.

Enfin, je tiens à dédier ce mémoire à mon binôme, avec qui j'ai partagé cette aventure académique. Merci pour ton implication, ton esprit d'équipe et ta bonne humeur.

Mounir

Remerciements

Nous tenons avant tout à exprimer notre profonde gratitude envers Dieu pour nous avoir guidés tout au long de ce parcours académique. Sa force et Sa clarté d'esprit nous ont permis de surmonter les défis rencontrés.

À Monsieur OULD OUALI, notre promoteur d'exception, nous sommes infiniment reconnaissantes pour son accompagnement attentif, ses précieux conseils et son soutien indéfectible. Sa disponibilité, sa patience et son expertise ont été pour nous une source constante d'inspiration et de motivation. Son engagement indéfectible et sa conviction en nos compétences ont été des éléments clés dans l'achèvement de ce mémoire.

Nous tenons à exprimer toute notre gratitude envers les enseignants qui ont partagé leur savoir tout au long de cette année universitaire. Leur dévouement et leur expertise ont été des piliers essentiels de notre parcours académique, nous permettant de progresser et de nous développer en tant qu'étudiants.

Je souhaite présenter mes profonds remerciements à Mme. MEGHLAOUI, d'avoir accepté de présider le jury de ce mémoire, ainsi que pour l'attention qu'il lui a portée.

J'adresse également mes sincères remerciements au maître de conférences Mm. TEKLAL pour l'intérêt qu'il a bien voulu manifester à l'égard de ce travail, en acceptant d'examiner ce mémoire et de faire partie des jurys.

Enfin, nous tenons à remercier du fond du cœur notre famille et nos amis pour leur soutien inconditionnel tout au long de cette aventure. Leur présence, leurs encouragements ont été pour nous une source de réconfort et de motivation inestimable. Nous leur sommes infiniment reconnaissants pour leur amour, leur compréhension et leur patience.

C'est grâce à l'appui et à l'encouragement de toutes ces personnes exceptionnelles que nous avons pu accomplir ce travail avec succès. Merci du fond du cœur à chacun d'entre vous.

Sommaire

Table des matières

INTRODUCTION GENERALE	1
Chapitre 1. GENERALITES SUR LES MATERIAUX COMPOSITES	3
1.1. Introduction	3
1.2. Définition.....	3
1.3. Types de matériaux composites.....	3
1.3.1. Grande diffusion	3
1.3.2. Hautes performances	3
1.3.3. Additifs.....	4
1.3.4. Les charges.....	4
1.3.5. L'interface	5
1.3.6. Classification suivant la forme de constituant	5
1.3.7. Fibre de verre	7
1.3.8. Fibre de carbone.....	8
1.4. Matrices	10
1.4.1. Les résines	11
1.4.2. Types de résine.....	12
1.4.3. Les résines thermodurcissables	12
1.4.4. Les avantages	13
1.4.5. Les inconvénients.....	13
1.5. Notions sur les tissus	14
1.6. Sandwich	16
1.7. Unidirectionnel.....	16
1.8. Monocouche	17

1.9. Stratifiés.....	18
1.9.1. Structures composites stratifiées	18
1.10. Procédés de mise en œuvre.....	19
1.10.1. Moulage au contact	20
1.10.2. Moulage par transfert de résine.....	20
1.10.3. Moulage sous vide	21
1.10.4. Moulage par pultrusion	22
1.11. Domaine d'utilisation des composites.....	22
1.12. Définition d'endommagement.....	22
1.13. Avantages et inconvénients des matériaux composites.....	23
1.13.1. Avantages.....	23
1.13.2. Inconvénients	23
1.14. Conclusion.....	24
Chapitre 2. ETUDE DU COMPORTEMENT MECANIQUE DES MATERIAUX COMPOSITES	25
2.1. Introduction	24
2.2. Comportement élastique linéaire	24
2.2.1. Matrice de rigidité	24
2.2.2. Matrice de souplesse ou flexibilité.....	24
2.2.3. Changement de base.....	25
2.2.4. Matériaux isotropes	26
2.2.5. Matériau anisotrope.....	27
2.2.6. Matériau monoclinique	27
2.2.7. Matériau orthotrope.....	28
2.2.8. Matériau unidirectionnel	28
2.3. Caractéristiques du mélange (renfort + matrice)	29
2.3.1. Fractions volumiques	29

2.3.2. Fractions massiques	30
2.3.3. Relations entre fractions volumiques et massiques.....	30
2.4. Épaisseur du pli	31
2.5. Loi de Hooke pour un matériau unidirectionnel.....	32
2.6. Modules d'élasticité en fonction des constantes des rigidité et desouplesse.....	32
2.7. Les modules l'élasticité d'un composite unidirectionnel en fonction des caractéristiques mécaniques de ces constituants	34
2.7.1. Loi de Hooke pour un matériau orthotrope.....	35
2.7.2. Module de l'ingénieur.....	36
➤ Traction dans le sens chaîne	36
➤ Traction dans le sens trame :	36
2.8. Comportement mécanique des stratifiés.....	37
2.8.1. Théorie classique des stratifiés	37
➤ Champ des contraintes.....	40
➤ Résultante en membrane.....	42
➤ Equation du Comportement d'un composite stratifié :	44
2.9. Hashin :.....	45
2.10. Ply fabric	46
2.11. Conclusion.....	48
Chapitre 3. RESULTATS ET DISCUSSIONS.....	50
3.1. Introduction	49
3.2. Présentation du matériau	49
3.3. L'essai de flexion trois points.....	51
3.3.1. Procédé de modélisation de l'essai de flexion trois points	51
3.3.2. Module Part.....	51
3.3.3. Module ASSEMBLY	55
3.3.4. Module LAOD	56

3.3.5. Module MESH	58
3.3.6. Module VISUALISATION.....	60
3.3.7. Résultats d'essai de flexion 3 points	61
3.4. L'essai de traction.....	62
3.4.1. Procède de modélisation de l'essais de traction.....	62
3.4.2. Module PART	62
3.4.3. Module LAOD	65
3.4.4. Module MESH	67
3.4.5. Module VISUALISATION.....	68
3.4.6. Résultats d'essai de traction	69
3.5. L'essai d'impact poids tombant.....	69
3.5.1. Procédé de modélisation de l'essai de poids tombant.....	69
3.5.2. Module PART	70
3.5.3. Le module ASSEMBLY	71
3.5.4. Le module LOAD	72
3.5.5. Module MESH	74
3.5.6. Module VISUALISATION.....	75
3.5.7. Résultats d'essai de masse tombante	77
3.6. Conclusion.....	77
Conclusion générale	78

Liste des figures

Figure 1.1 : Principaux matériaux de renforts.....	5
Figure 1.2 Procéder d'étirage de verre.....	7
Figure 1.3 : Procédé d'étirage de fibre de verre.....	7
Figure 1.4 Principe d'élaboration des fibres en carbone.....	9
Figure 1.5 : Différentes familles de matrice.....	11
Figure 1.6: Types de la matrice.....	12
Figure 1.7 :(a) Armature taffetas- (b)Armure satin- (c)Armure sergé- (d)Armure haut module- (e)Armure unidirectionnelle.....	14
Figure 1.8 : Convention chaîne et trame.....	15
Figure 1.9 : Composite sandwich : a) Ame en nid d'abeille, b) Ame plein (mousse, résine)	16
Figure 1.10 : Composite unidirectionnel.....	17
Figure 1.11 : Monocouche.....	17
Figure 1.12 : Schématisation d'un stratifié.....	18
Figure 1.13 : Désignation du stratifié.....	19
Figure 1.14 : Principe du moulage au contact.....	20
Figure 1.15 : Principe de procédé RTM (Resin Transfer Moulding).....	21
Figure 1.16 : Moulage sous vide.....	21
Figure 1.17 : Moulage par pultrusion.....	22
Figure 2.1 : matériau isotrope.....	26
Figure 2.2 : matériau monocline.....	27
Figure 3.1 : Ordre des plis du stratifié de référence.....	49
Figure 3.2 : Boîte de dialogue de création de pièce dans le module PART d'Abaqus.....	52
Figure 3.3 : Conception géométrique de la pièce avec des dimensions de 250 mm x 25 mm.	53
Figure 3.4 : Boîte de dialogue de création de pièce pour les appuis dans le module PART d'Abaqus.....	54
Figure 3.5 : Conception géométrique des appuis avec des dimensions de 20 mm x 5 mm*...	55
Figure 3.6 : Boîte de dialogue de création d'assemblage dans le module ASSEMBLY d'Abaqus.....	56
Figure 3.7 : Boîte de dialogue de définition des charges dans le module LOAD d'Abaqus. .	57

–

Figure 3.8 : Maillage des appuis.	58
Figure 3.9 : Maillage de l'éprouvette.	59
Figure 3.10 : Visualisation de la contrainte subit par l'éprouvette.	60
Figure 3.13 : Evolution force – déplacement.	61
Figure 3.14 : Géométrie de l'éprouvette de traction.	62
Figure 3.15 : Boîte de dialogue de création de pièce dans le module PART d'Abaqus.	63
Figure 3.16 : Conception géométrique de la pièce avec des dimensions de 250 mm x 25 mm.	64
Figure 3.17 : Division de la pièce en plusieurs sections grâce à la création de partitions.	65
Figure 3.18 : Illustration des charges et des conditions aux limites appliquées sur la pièce dans le module LOAD d'Abaqus.	66
Figure 3.19 : Maillage de la pièce dans le module MESH d'Abaqus, montrant la distribution des éléments finis sur la géométrie.	67
Figure 3.20 : Visualisation des résultats.....	68
Figure 3.21 : Evolution force-déplacement.....	69
Figure 3.22 : Boîte de dialogue de création pour l'impacteur (option Rigid) et la surface d'impact (Deformable).	70
Figure 3.23: Croquis 2D de la surface d'impact déformable.....	71
Figure 3.24 : Croquis 2D de l'impacteur rigide.....	71
Figure 3.25 : Disposition de l'impacteur et de la surface dans l'assemblage, montrant la configuration avant l'impact.	72
Figure 3.26 : Illustration des charges et des conditions aux limites appliquées sur la masse tombante et la surface.....	73
Figure 3.27 : Maillage sur l'éprouvette et l'impacteur dans le module MESH.....	74
Figure 3.28 : Visualisation du choc subit par l'éprouvette.	75
Figure 3.29 : Evolution force – déplacement.	77

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Caractéristiques et applications de divers types de fibres de verre pour matériaux composites	8
Tableau 1.2 Caractéristiques et applications de divers types de fibres de carbone pour matériaux composites.....	9
Tableau 1.3 : les caractéristiques de résine polyester.....	13
Tableau 2.1 Paramètres du modèle Hashin.	45
Tableau 2.2 : Constante de matériau de l'utilisateur pour le model de matériau composite renforce de tissu	46
Tableau 2.3 : Coefficient d'initiation des dommages.	47
Tableau 2.4 : Coefficient d'évolution de l'endommagement.....	47
Tableau 2.5 : Coefficient de plasticité en cisaillement.....	48
Tableau 2.6 : Contrôles pour la défaillance d'un point matériel.....	48
Tableau 3.1 : La géométrie du matériau.....	49

Liste des symboles

- E_L : Module de Young longitudinal. [MPa]
- E_T : Module de Young transversale. [MPa]
- $E_{chaîne}$: Module de Young suivant le sens chaîne. [MPa]
- E_{trame} : Module de Young suivant le sens trame. [MPa]
- ν_{lt} : Coefficient de poisson.
- σ_{xx} : Contrainte normale. [MPa]
- σ_r : Contrainte à rupture en flexion. [MPa]
- σ_e : Contrainte élastique en flexion. [MPa]
- τ : Contrainte de cisaillement. [MPa]
- τ_{IL} : Contrainte de cisaillement interlaminaire. [MPa]
- T_V : Taux de vide du composite. [%]
- F : Charge appliquée. [N]
- F_r : Charge à la rupture. [N]
- Y_r : Flèche a la rupture. [mm]
- F_e : Force élastique. [N]
- Y_e : Flèche élastique. [mm]
- M_f : Taux massique des fibres. [%]
- M_m : Taux massique de la matrice. [%]
- ρ : Masse volumique.[Kg/m³]
- ϵ : Déformation relative.

—

E_{app} : Module de Young apparent. [GPa]

l : Longueur de l'éprouvette. [mm]

b : Largeur de l'éprouvette. [mm]

h : Épaisseur de l'éprouvette. [mm]

h_m : Épaisseur moyenne. [mm]

b_m : Largeur moyenne. [mm]

L : longueur entre appuis (élancement). [mm]

Introduction générale

Démarrée il y a quelques décennies, la forte croissance de l'utilisation des matériaux composites à l'échelle mondiale est due aux techniques de mise en œuvre, initiée par un groupe de chercheurs japonais qui ont proposé de surmonter les difficultés des matériaux en concevant de nouveaux matériaux avec des gradients de composition pour répondre aux transitions continues des propriétés souhaitées. Les matériaux composites à matrice polymère renforcée par les fibres de verre sont de plus en plus employés dans divers domaines tels que l'aéronautique, l'automobile, mais aussi dans le domaine militaire, le bâtiment, l'électricité, les articles de sport et les téléphones portables. Cet attrait est dû à la caractérisation et au processus d'endommagement en tenant compte des sollicitations mécaniques complexes.

Ces matériaux ont des caractéristiques complémentaires qui répondent à certaines exigences. En effet, ils offrent des propriétés mécaniques élevées, une faible densité, une bonne résistance à la traction, à la flexion et au choc, ainsi qu'une grande résistance à la température et à l'humidité. Enfin, ils sont considérés comme peu sensibles à la fatigue. Cependant, l'utilisation de ces matériaux peut endommager leurs structures, notamment par des ruptures brutales. Pour éviter cette complication, il est crucial de prêter attention aux techniques d'assemblage et d'analyser la durée de vie.

Cependant, les composites stratifiés sont souvent présentés comme des matériaux futuristes consistant en un empilement de plis de fibres imprégnés de résine, qui offrent une gamme de fonctions classées selon leur durée de vie, leurs objectifs de sécurité et leur flexibilité de conception.

Cette étude est centrée sur la modélisation des éprouvettes qui ont été réalisées auparavant, afin de mener des essais dynamiques. En s'appuyant sur des données expérimentales antérieures, cette approche permet d'analyser les comportements et les performances des matériaux sous différentes conditions. L'objectif est de valider les modèles théoriques développés et d'identifier les variables clés influençant les résultats

Ce mémoire est subdivisé en trois chapitres. Nous présentons au premier chapitre, une présentation générale sur les matériaux composites ainsi que les notions de base, en nous concentrant sur les différents types de composites, principalement les stratifiés.

Le deuxième chapitre concerne les notions théoriques du comportement mécanique des matériaux composites, les lois de comportement en traction et en flexion, etc.

A travers le troisième chapitre, nous nous concentrons sur la partie théorique concernant le logiciel ABAQUS, dans le but d'obtenir des résultats significatifs pour la partie expérimentale.

Nous terminerons par une conclusion générale et des perspectives.

***Chapitre 1. GENERALITES SUR LES MATERIAUX
COMPOSITES***

1.1. Introduction

Ce chapitre est concentré à une présentation générale sur les matériaux composites. Les notions de base de ces matériaux (renfort et matrices), en tenant compte de divers types des composites basés sur les stratifiés et les multiplies en vue d'une optimisation sous chargements dynamique. Et finir par le procédé de fabrication.

1.2. Définition

Un composite est l'assemblage de deux ou plusieurs matériaux non miscibles de natures différentes, et dont les qualités se complètent afin d'obtenir un matériau hétérogène et fortement anisotrope dont les performances sont supérieures à celles de ses constituants de base, ou mieux encore, par effets de synergie. Les matériaux composites ne sont pas alliés, mais associés [1].

Un matériau composite nécessite l'association intime d'au moins deux composants : le renfort et la matrice, qui doivent être compatibles entre eux et se solidariser ; ce qui introduit la notion d'un agent de liaison, l'interface assure la compatibilité renfort matrice, transmet les contraintes d'un constituant à l'autre sans déplacement relatif.

1.3. Types de matériaux composites

1.3.1. Grande diffusion

Le matériau composite à grande diffusion largement utilisé présente des avantages importants, qui sont : l'optimisation des coûts grâce à la réduction des coûts, sa composition en polyester avec des fibres de verre longues ou courtes (sous forme de mats ou de tissus) et la simplicité du principe de développement du matériau (moulage par contact), SMC et injection) [2,3].

1.3.2. Hautes performances

Les matériaux composites à hautes performances comprennent essentiellement des résines thermodurcissables. Il est intéressant de focaliser l'attention sur la fibre de carbone qui est la base des composites de type aéronautiques indispensables par exemple au programme Airbus [2].

1.3.3. Additifs

Sont des substances ajoutées que l'on dépose sur la fibre pour faire adhérer à la matrice [4]. On trouve :

- ❖ Des agents de démoulage ;
- ❖ Des stabilisants qui retardent les dégradations dues à l'oxygène, UV même à l'ozone ;
- ❖ Des colorants ;
- ❖ Des retardateurs de flamme ;
- ❖ Catalyseur ;
- ❖ Pigment.

Les composites peuvent être renforcés par un matériau granulé : ce sont les charges.

1.3.4. Les charges

Ce sont des particules solides que l'on disperse au sein de la matrice. Leur but est de modifier les caractéristiques du produit : résistance à la contrainte en flexion ou en choc, dureté superficielle, amélioration du comportement au feu ainsi la diminution du pouvoir calorifique et réduit souvent le prix de revient. Les plus couramment utilisées sont le carbonate de calcium sous forme poudreux, le kaolin, la silice, le mica, l'hydrate d'alumine et les microbilles de verre [5].

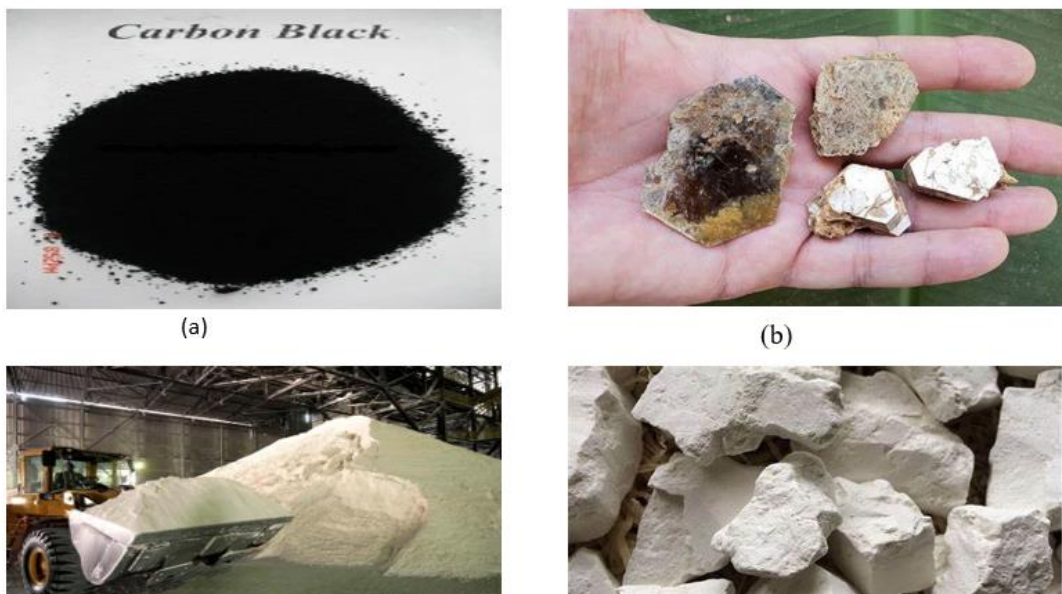


Figure 1.1 : (a) Le noir du carbone. (b) Le mica. (c) L'hydrate d'alumine
(d) Kaolin.

1.3.5. L'interface

L'interface n'est pas une entité bien définie ; c'est un maillon très important au niveau d'un matériau composite ; elle est la surface de jonction entre deux matériaux en contact. C'est l'élément qui conditionne le degré de synergie de l'association fibre/matrice qui s'établit entre les constituants lors de l'élaboration du composite. A l'échelle macroscopique l'interface est une surface sans épaisseur qui peut être classée en deux groupes :

- les interfaces générées par le procédé de mise en œuvre du matériau. L'interface inter plis, défini par la superposition des plis et intra-plis ou inter-mèches au niveau d'un pli.

- les interfaces liées à la structure elle-même du composite, créées par l'association des composants de base (matrice/renfort) [5].

Le renfort du matériau composite est le constituant qui va supporter la plus grosse partie des efforts mécaniques. Il existe les types du renfort indiquée la (**Figure 1.1**) [6].

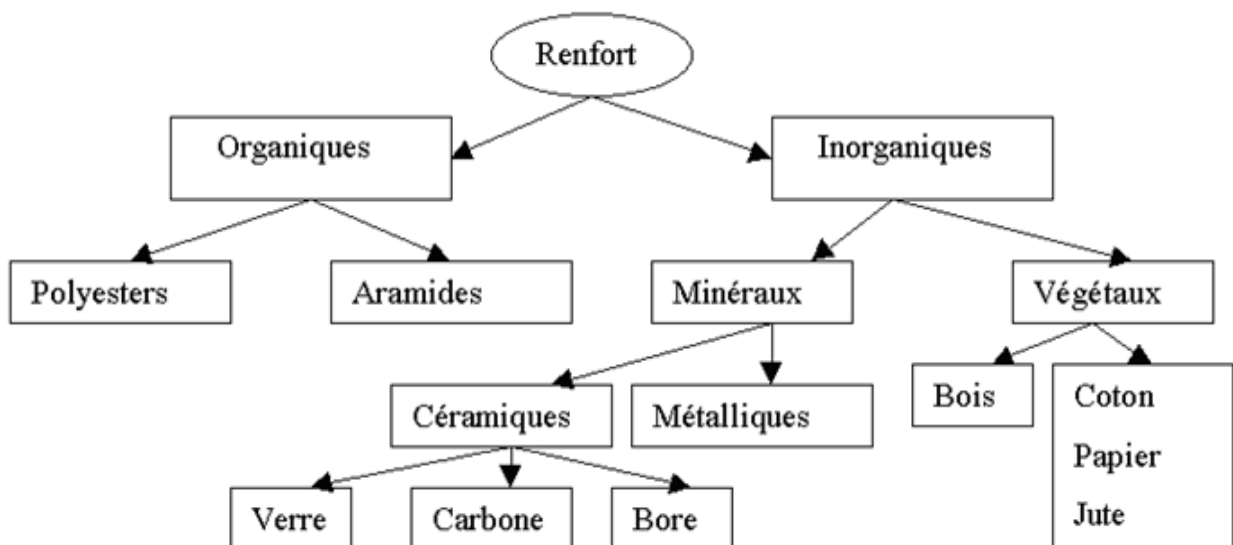


Figure 1.1 : Principaux matériaux de renforts.

1.3.6. Classification suivant la forme de constituant

a) Composites à fibres

Composites à fibres Un matériau composite est un composite à fibres si le renfort se trouve sous forme de fibres. Celles-ci peuvent être soit continues ou discontinues.

b) Composites à particules

Un composite est dit à particules lorsque le renfort se trouve sous forme de particules. Celles-ci 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 ; dans de nombreux cas ; les particules sont simplement utilisées comme charge pour réduire le coût du matériau, sans en altérer les autres caractéristiques du matériau.

Les fibres se présentent sous diverses forme commerciales :Il peut se présenter sous différentes formes (**Figure1.3**)[7].

- Linéiques (fils, mèches, ...etc.) ;
- Tissus surfaciques (tissus simple, mats, etc.) ;
- Multidirectionnelles (tresses, tissus complexe, ...etc.) .

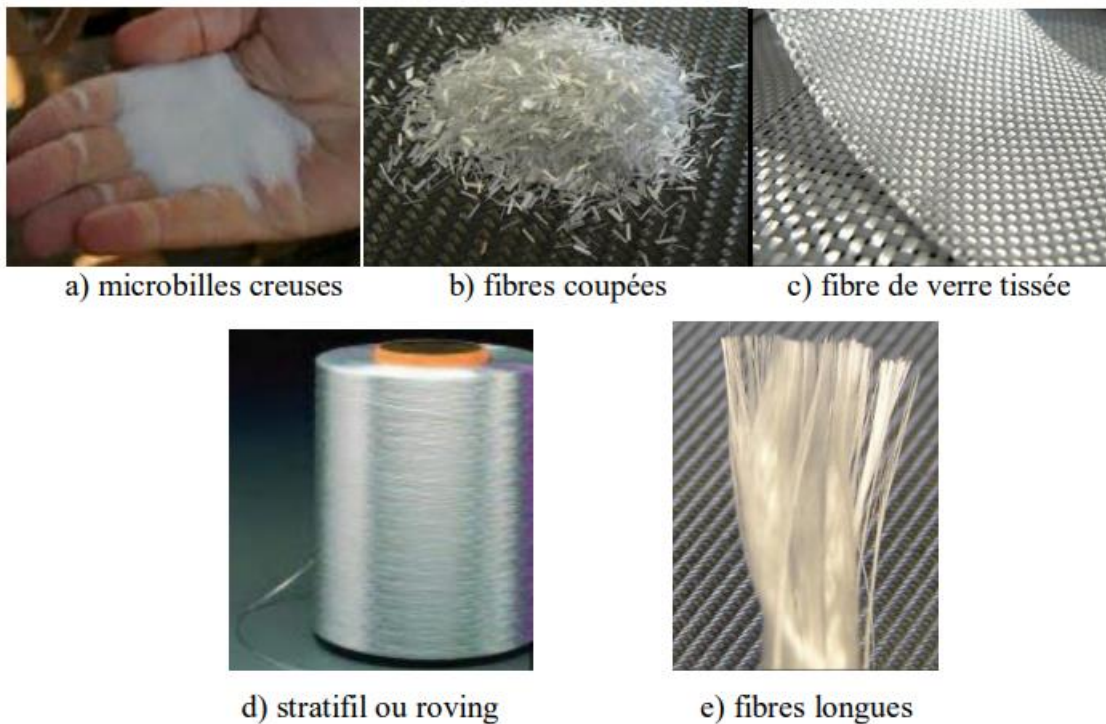


Figure 1.3 : Les différentes formes de fibre de verre.

Parmi les fibres les plus utilisées, on peut citer :

1.3.7. Fibre de verre

Le verre est composé essentiellement de silice (SiO_2), abondante puisqu'elle est le constituant principal du sable est moins cher. Cependant la silice possède une température de fusion d'environ 1750°C et cette température élevée fait abstraction à la possibilité de filer de la silice fondue à travers une filière. Afin de réguler la température à environ 1200°C , les oxydes [sodium (Na_2O), potassium (K_2O), le fluor (F), calcium (CaO), de magnésium (MgO) le bore (B_2O_3) et alumine (Al_2O_3)] sont utilisés de manière plus efficace pour réduire cette température.

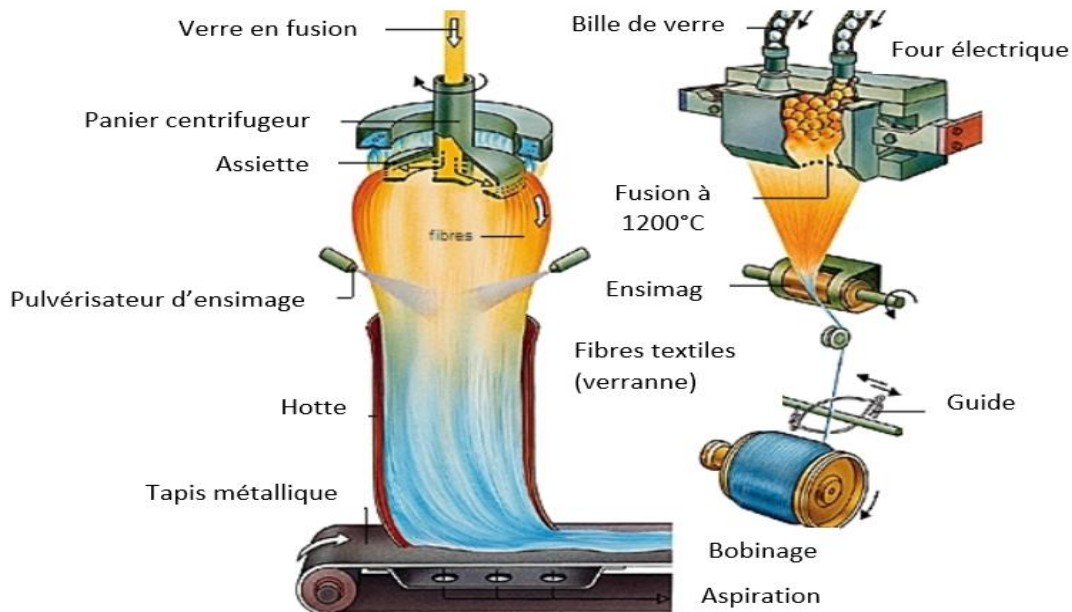


Figure 1.2 Procéder d'étirage de verre.

Tableau 1.1 : Caractéristiques et applications de divers types de fibres de verre pour matériaux composites [08].

Fibres	Verre E	Verres R et S	Verre D	Verre C
Caractéristiques principales	Qualité courante	Hautes performances mécaniques et thermiques	Rigidité diélectrique	Bonne tenue chimique
Masse volumique (Mg/m ³)	2,6	2,53	2,14	2,5
Résistance à la traction R_m (MPa)	2 400	3 600	2 500	2 800
Module de Young E (GPa)	73	86	55	70
Allongement à la rupture A (%)	4,5	5,2	4,8	4
Température maximale d'utilisation (°C)	500	650	450	450
Coefficient de dilatation thermique ($10^{-6}/K$)	5	4	3,5	8,5
Applications	Composites de grande diffusion	Armement, aéronautique, spatial	Radomes, capots perméables aux ondes électromagnétiques	Réacteurs chimiques, renforcement du béton, panneaux de façades

1.3.7.1. Avantages

- Bonne adhérence avec toutes les résines ;
- Tenue à la température élevée ;
- Bonne résistance ;
- Incombustible ;
- Faible dilatation.

1.3.7.2. Inconvénients

- Un faible module ;
- Maturation au contact de l'eau.

1.3.8. Fibre de carbone

Les fibres de carbone sont produites par un processus de pyrolyse réalisé dans une atmosphère régulée, à partir d'un polymère fondamental appelé précurseur qui est couramment constitué de fibres acryliques (**Figure 1.4**) [4]. Ce procédé spécifique aboutit à la formation des fibres de carbone avec des propriétés distinctives.

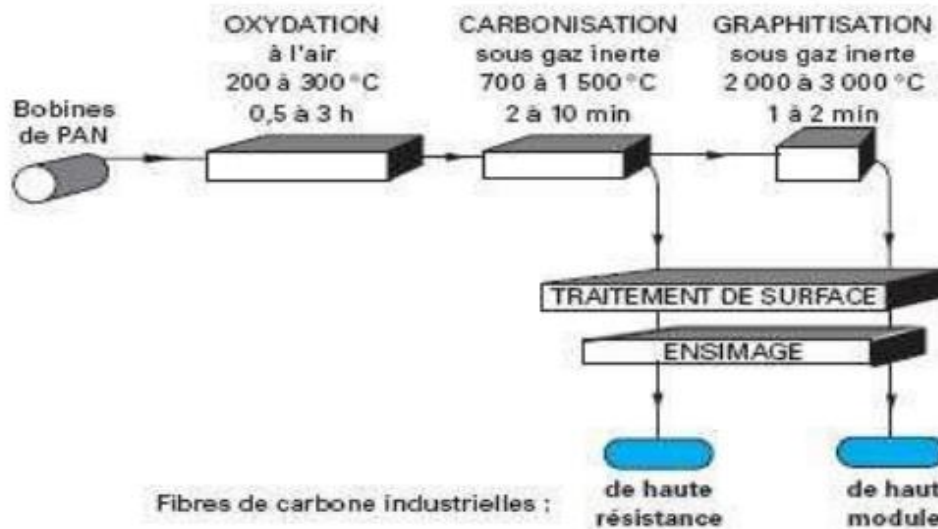


Figure 1.4 Principe d'élaboration des fibres en carbone.

Tableau 1.2 Caractéristiques et applications de divers types de fibres de carbone pour matériaux composites.[08]

Fibres	Carbone à haute résistance HR	Carbone à bas module BM	Carbone à haut module HM	Carbone à très haut module THM
Masse volumique (Mg/m ³)	1,85	1,70	1,90	1,95
Résistance à la traction R_m (MPa)	3 500 à 4 900	1 800	2 800 à 4 400	2 300
Module de Young E (GPa)	200 à 250	180	400 à 600	750 à 820
Allongement à la rupture A (%)	1,3 à 2,1	2	0,7 à 1,2	0,3

1.3.8.1. Avantages

- Aucune dilatation thermique ;
- Excellentes propriétés mécaniques ;
- Très bonne tenue à la température ;
- Bonne conductibilité thermique et électrique ;
- Faible densité [8].

1.3.8.2. Inconvénients

- Couteuse ;
- Fibre cassante ;
- Mauvaise approbation avec les résines ;
- Tenue limitée aux choc et l'abrasion ;
- Antipathique avec l'oxygène et les acides oxydants et les métaux [8].

1.4. Matrices

Cette phase est indispensable à la liaison des divers éléments constitutifs, est composée d'une résine (polyester, époxyde, etc....) et d'une charge (carbonate de calcium, graphite, etc). Leur rôle est de lier les renforts, de répartir les charges (contraintes, résistance à la traction et rigidité) et d'assurer la protection chimique contre les agents agressifs extérieurs tels que (acides, humidité, corrosion...) et donne la forme au produit réalisé; pour les composites plastiques, elle est par définition un polymère ou une résine organique. Le choix de la matrice dépend de l'utilisation à laquelle est destinée le matériau composite. La figure 1.5 présente les différentes familles de matrice.

Trois catégories de ces matières plastiques peuvent cependant être distinguées :

- Les polymères thermoplastiques (cristallins, semi-cristallins ou amorphes).
- Les polymères thermodurcissables (amorphes).
- Les élastomères (amorphes).

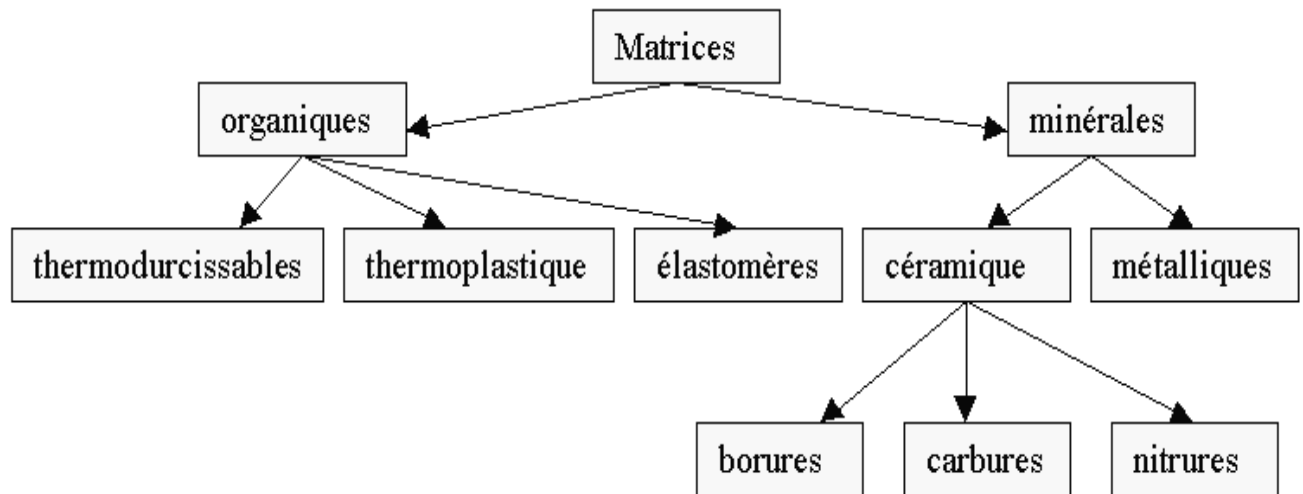


Figure 1.5 : Différentes familles de matrice.

1.4.1. Les résines

Les résines utilisées dans les matériaux composites ont pour rôle de transférer les sollicitations mécaniques aux fibres et de les protéger de l'environnement extérieur. Elles doivent donc être assez déformables et présenter une bonne compatibilité avec les fibres. Les résines doivent avoir, par contre, une masse volumique faible de manière à conserver aux matériaux composites des caractéristiques mécaniques spécifiques élevées (la matrice d'un composite organique peut appartenir à différents types de polymères [4]).

1.4.2. Types de résine

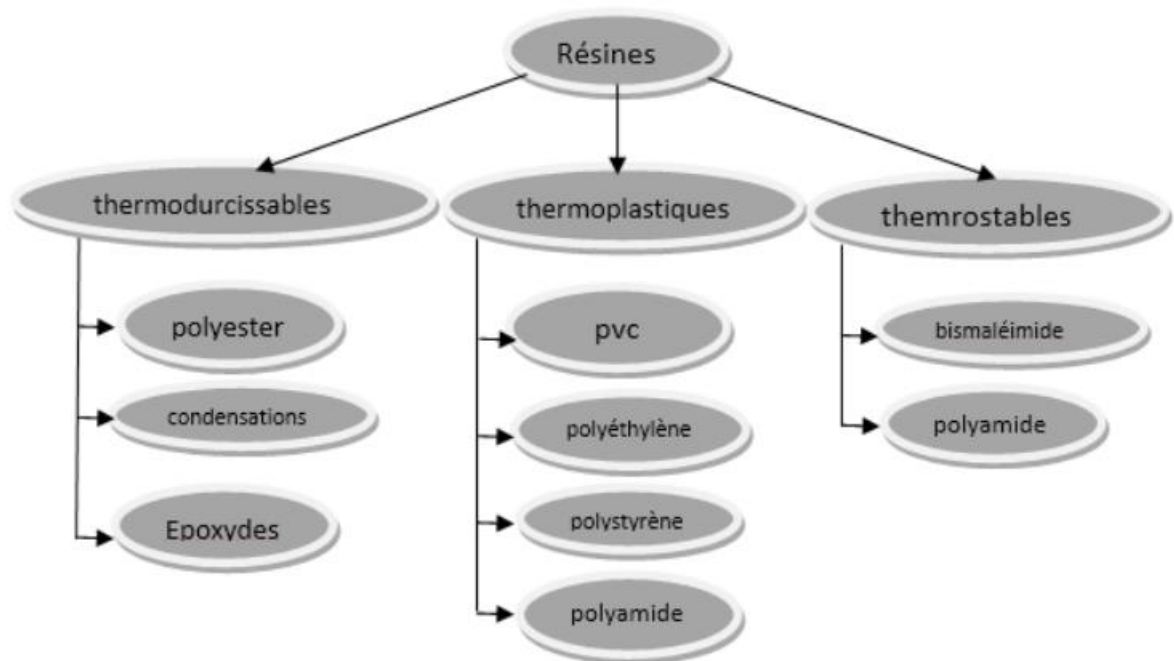


Figure 1.6: Types de la matrice.

1.4.3. Les résines thermodurcissables

Les principales résines thermodurcissables utilisées dans la mise en œuvre des matériaux composites sont par ordre décroissant en tonnage [9] :

- Les résines polyesters insaturées : polyesters condensés, vinylesters, dérivée Allylique...etc.
- Les résines de condensation : phénoliques, aminoplastes, furaniques...etc.
- Les résines époxydes.

1.4.3.1. Les résines polyesters

Les résines polyesters insaturées viennent de très loin en tête dans la mise en œuvre des matériaux composites. Leur développement est le résultat de son faible coût de production, de leur diversité offrant de multiples possibilités et aussi de son adaptation à des procédés de fabrication facile à mettre en œuvre et à automatiser, d'où un développement industriel sans cesse croissant.[9]. Suivant leur module d'élasticité (Tableau 1.3), les résines polyesters sont classées en : résines souples, résines semi-rigides et résines rigides.

Les résines habituellement utilisées dans la mise en œuvre des matériaux composites sont des types rigides, et nous retiendrons pour ces résines durcies les caractéristiques suivantes :

Tableau 1.3 : les caractéristiques de résine polyester.

Caractéristique	Polyester
Masse volumique	1200 kg/m ³
Module d'élasticité en traction	2,8 à 3,5 GPa
Module d'élasticité en flexion	3 à 4,5 GPa
Contrainte a la rupture en traction	50 à 80 MPa
Contrainte a la rupture en flexion	90 à 130 MPa
Allongement a la rupture en traction	2 à 5 %
Allongement a la rupture en flexion	7 à 9 %
Résistance en compression	90 à 200 MPa
Résistance au cisaillement	10 à 20 MPa
Température de fléchissement sous charge	60 à 100 °C

1.4.4. Les avantages

- Une bonne rigidité résultant d'un module d'élasticité assez élevé ;
- Une bonne stabilité dimensionnelle ;
- Une bonne mouillabilité des fibres est des tissus ;
- La facilité de mise en œuvre ;
- Une bonne tenue chimique ;
- Un faible cout de production ;
- Une bonne résistance chimique aux hydrocarbures (essence, fuel, etc.) à température ambiante, etc.

1.4.5. Les inconvénients

- Une tenue médiocre en température : inférieur à 120 °C en service continu ;
- Une sensibilité à la fissuration, essentiellement dans le cas de chocs ;
- Un retrait important de l'ordre de 8 à 10 % ;
- Un mauvais comportement à la vapeur, à l'eau bouillante avec risque d'hydrolyse ;

- La nécessité de recouvrir les matériaux composites à résines polyesters d'une couche de «gel-coat» de manière à les rendre étanches ;
- Une dégradation à la lumière par les rayons ultraviolets ;
- Une inflammabilité.

1.5. Notions sur les tissus

L'entrecroisement des fils disposés dans le sens de la chaîne et de fils dans le sens de la trame forme un tissu (**Figure 1.7**) [1].

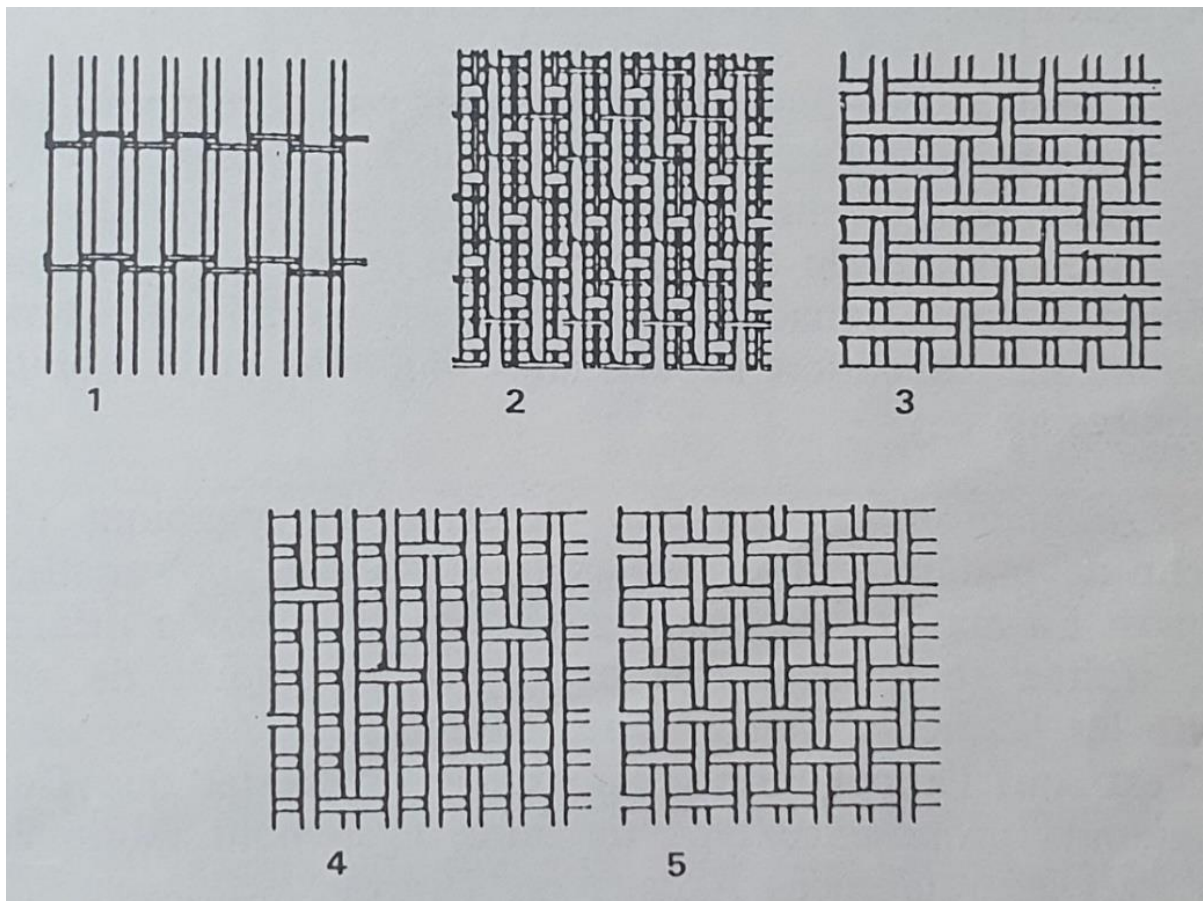


Figure 1.7 : (a) Armature taffetas- (b) Armure satin- (c) Armure sergé- (d) Armure haut module- (e) Armure unidirectionnelle.

L'armure du tissu est créée par l'entrecroisement de fils orientés dans le sens de la chaîne et de fils orientés dans le sens de la trame (**figure 1.8**).

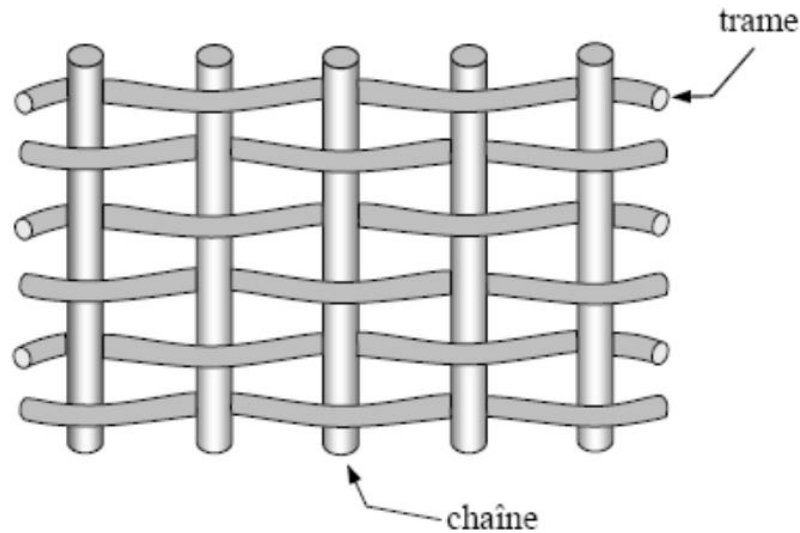


Figure 1.8 : Convention chaîne et trame.

Chaîne : ensemble des fils parallèles au sens d'avancement du tissu en cours de fabrication.

Trame : ensemble des fils perpendiculaires aux fils de chaîne, nommé aussi duites. Les mèches présentent une ondulation dans le cas des structures tissées. Cette ondulation est quantifiée par l'embuvage et le retrait exprimé en pourcentage et calculé à partir des longueurs de mèches et de tissu par l'équation suivante :

$$\text{Embuvage} = \frac{\text{longueur de la mèche} - \text{longueur du tissu dint elle est extraite}}{\text{longueur du tissu}} \times 100$$

Embuvage : différence entre la longueur de fil de chaîne extrait du tissu à l'état tendu et la longueur de ce même fil inséré dans le tissu.

Retrait : différence entre la longueur de fil de trame extrait du tissu à l'état tendu et la longueur de la même trame insérée dans le tissu.

Un composite structural est constitué d'un matériau homogène et d'un matériau composite. Ses propriétés dépendent de celles de ses constituants et de leur géométrie. Les composites stratifiés et les structures sandwiches sont les composites structuraux les plus courants [10].

1.6. Sandwich

Matériaux composés de deux semelles (ou peaux) de grande rigidité et de faible épaisseur enveloppant une âme de forte épaisseur et faible résistance. L'ensemble forme une structure d'une grande légèreté. Le matériau sandwich possède une grande légèreté en flexion et c'est un excellent isolant thermique[11].

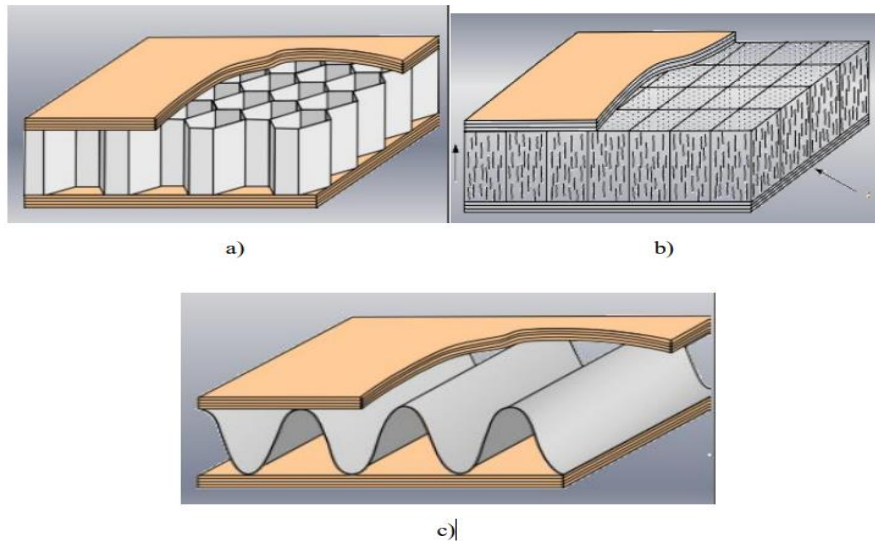


Figure 1.9 : Composite sandwichs : a) Ame en nid d'abeille, b) Ame plein (mousse, résine)

c) Ame ondulé.

De plus ces structures ont une grande rigidité en flexion et torsion. L'âme de la structure sandwich résiste principalement aux contraintes de cisaillement et de compression hors plan, les peaux inférieures et supérieures supportent quant à elles les efforts dans leur plan. Les technologies de mise en œuvre, les techniques de fabrication jouent un rôle dans les composites car chacune des opérations influe de manière irréversible sur le résultat final.

1.7. Unidirectionnel

La cellule élémentaire d'un composite unidirectionnel peut être considérée comme une fibre entourée d'un cylindre de matrice (**figure 1.10**). Le matériau se comporte comme un matériau orthotrope possédant de plus un axe de révolution [2].

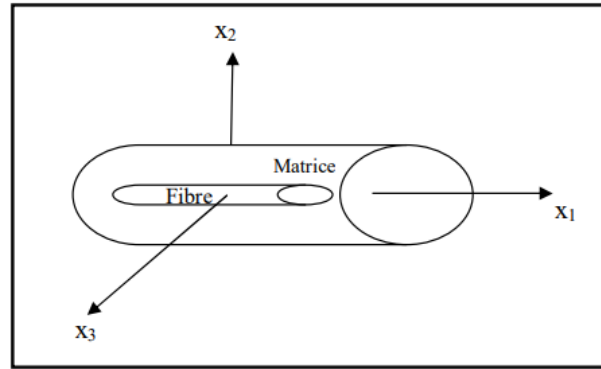


Figure 1.10 : Composite unidirectionnel.

1.8. Monocouche

Les monocouches constituent l'élément de base des structures composites, et elles se distinguent par la forme du renfort utilisé. On y trouve des monocouches à fibres continues, à fibres courtes, ainsi que des tissus et des mats. Chaque monocouche, également appelée couche de base ou strate, représente une unité de base épaisse, qui peut être assemblée à partir d'une ou plusieurs couches identiques, telles que des tresses, des structures unidirectionnelles.

Ces couches, qui sont des semi-produits de matériaux composites, se composent de fibres et de matrices. Elles sont généralement de forme quasi bidimensionnelle, avec une épaisseur d'environ 0,125mm. On peut notamment distinguer la couche UD, où le matériau de renforcement adopte une structure unidirectionnelle, et la couche tressée, qui présente une structure directionnelle. Ces différentes configurations permettent d'adapter les propriétés mécaniques des composites en fonction des besoins spécifiques des applications (**Figure1.11**).

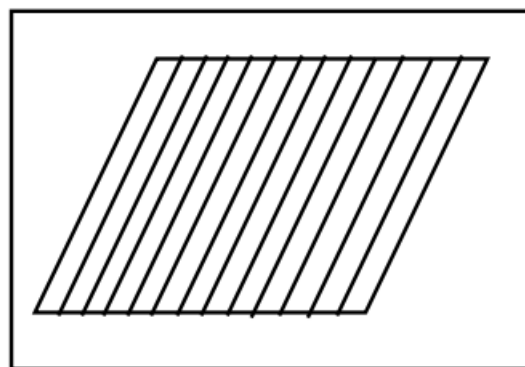


Figure 1.11 : Monocouche.

1.9. Stratifiés

Un stratifié est un composite structural constitué d'un empilement de feuilles dont les propriétés varient selon la direction. Les différentes couches d'un stratifié sont superposées et collées de façon telle que la direction de leurs plus grandes résistances varie d'une couche à l'autre comme le montre la (Figure 1.12) [12].

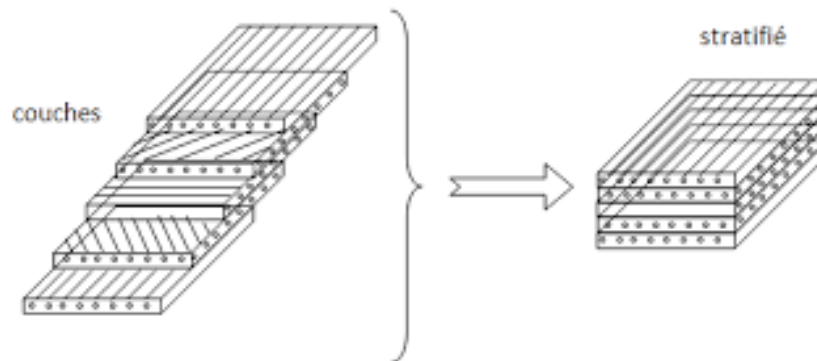


Figure 1.12 : Schématisation d'un stratifié.

Les matériaux composites stratifiés sont constitués de plusieurs couches de matériaux composites unidirectionnels ou de composites à base de tissus. Ces couches possèdent trois plans de symétrie orthogonaux deux à deux, et se comportent d'un point de vue élastique comme un matériau orthotrope.

1.9.1. Structures composites stratifiées

Les structures composites stratifiées sont constituées de couches successives de renforts imprégnés de résines. Les couches sont également nommées plis. Elles sont constituées d'empilements de nappes unidirectionnelles ou bidirectionnelles. Ces nappes sont formées de renforts en fibres longues liées par de la résine. Les pièces structurales sont réalisées par empilement de nappes en optimisant les directions des renforts en fonction des charges qu'elles doivent subir.

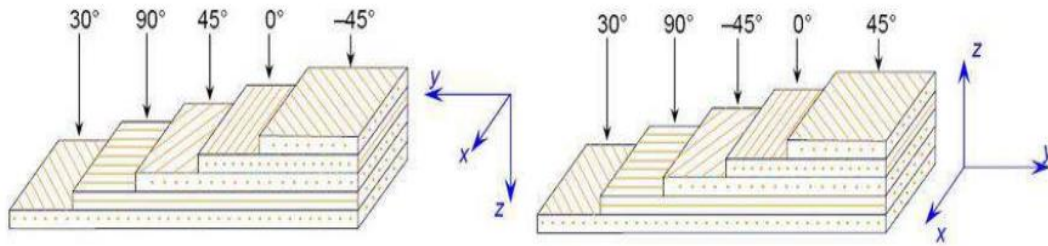


Figure 1.13 : Désignation du stratifié.

Un stratifié est codifié de la façon suivante :

- Chaque couche est désignée par un nombre indiquant la valeur en degré de l'angle que fait la direction des fibres avec l'axe de référence x. Sur les Fibre UD Résine polyester et les couches sont représentées décalées les unes par rapport aux autres. La structure stratifiée est décrite de bas en haut.
- Les couches sont nommées successivement entre crochet en allant de la face inférieure à la face supérieure. Les couches successives sont séparées par le symbole « / » (**Figure1.13**) : [30/90/45/0/-45].
- Les couches successives d'un même matériau et de même orientation sont désignées par un indice numérique, comme l'exemple de la figure : [0/45₂/90/-45₂/0].
- En cas de stratification hybride (différents matériaux dans un même stratifié), il faut préciser par un indice la nature de la couche par exemple les stratifiés constituants de couches successives de fibres de natures différentes.

[90K / 45C / 0v]

0° V V : Fibre de verre

45° C C : Fibre de carbone

90° K K : fibre de Kevlar

1.10.Procédés de mise en œuvre

Les techniques plasturgistes sont les plus fréquemment utilisées dans la mise en forme des matériaux composites. Elles ont pour point commun la réalisation du mélange des matières premières à une température correspondant à une phase ramollie des plastiques.

Ce mélange à chaud (melt-blending) est obtenu de plusieurs manières et conduit à différents modes de fabrication. Parmi ces procédés de mise en œuvre, on distingue :

- Le moulage au contact ;
- Le moulage par compression de mat préimprégné (SMC) ;
- Le moulage par injection de compound (BMC) ;
- Le moulage par injection basse pression de résine (RTM) ;
- Moulage sous vide ;
- Moulage par pultrusion.

1.10.1. Moulage au contact

Le moulage au contact est utilisé dans les composites à « grande diffusion » sur un moule ouvert. Le processus consiste à déposer une série de couches ou une couche composite. Tous ces plis forment une pile selon un ordre préalablement défini. La première couche a pour fonction de protéger les pièces traitées en utilisant du gel-Coat. Ensuite, les couches sont laminées par trempage du matériau de renfort (mat ou tissu) dans une résine (polyester insaturé) et son système catalytique. Pour chaque couche, il est nécessaire de compacter manuellement avec un rouleau afin de chasser l'excès d'air et d'assurer une bonne imprégnation du renfort (**figure 1.14**) [13].

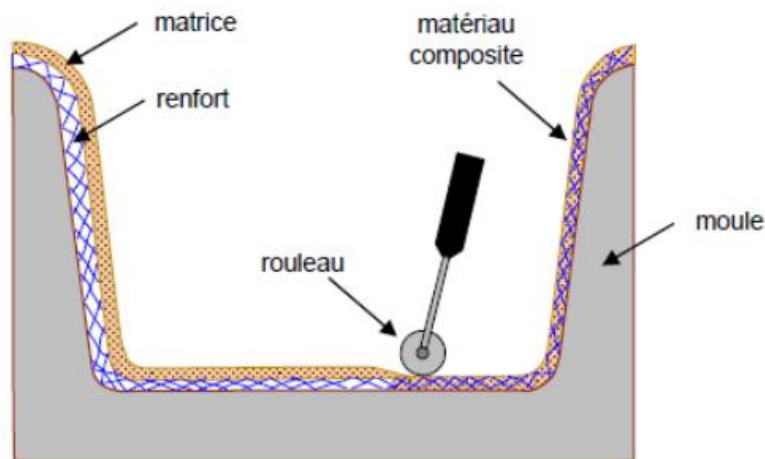


Figure 1.14 : Principe du moulage au contact.

1.10.2. Moulage par transfert de résine

Le moulage par transfert de résine est largement utilisé dans la production industrielle de matériaux composites à matrice thermodurcissable. Ce procédé implique le remplissage de l'empreinte d'un moule rigide et fermé par injection de résine (**Figure 1.15**).

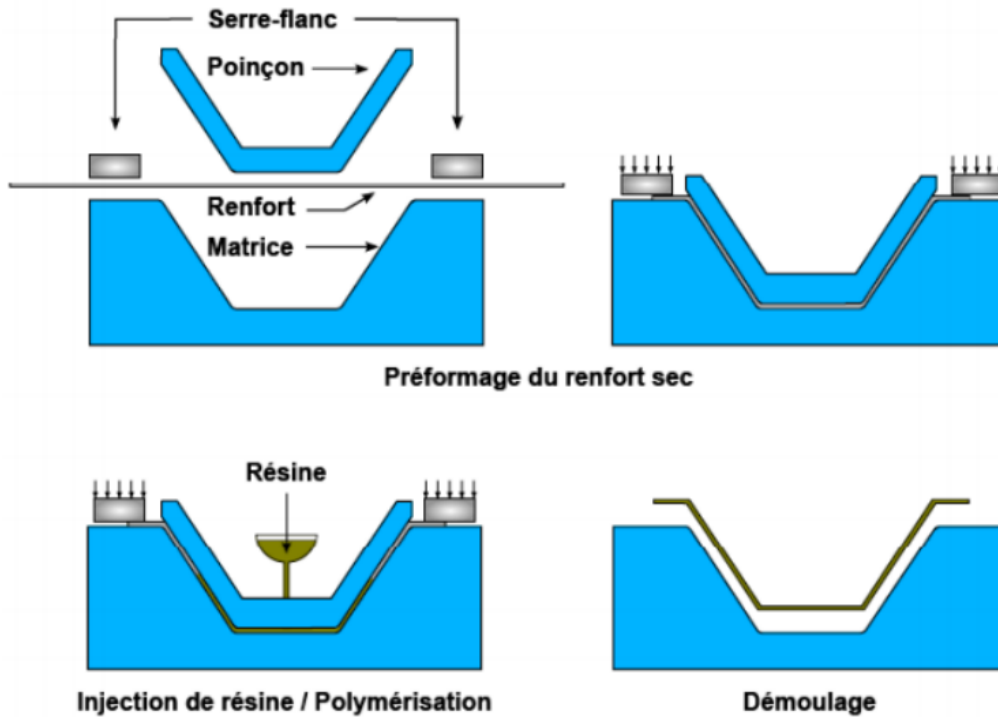


Figure 1.15 : Principe de procédé RTM (Resin Transfer Moulding).

1.10.3. Moulage sous vide

Le moulage s'effectue entre le moule et le contre-moule, en plaçant d'abord le matériau de renfort, puis en injectant la résine. Une fois versée, une contre-forme poreuse recouverte d'une membrane imperméable scelle l'ensemble. L'étalement, l'imprégnation et l'ébullition de la résine sont facilités par les dépressions qui se forment dans le moule [14].

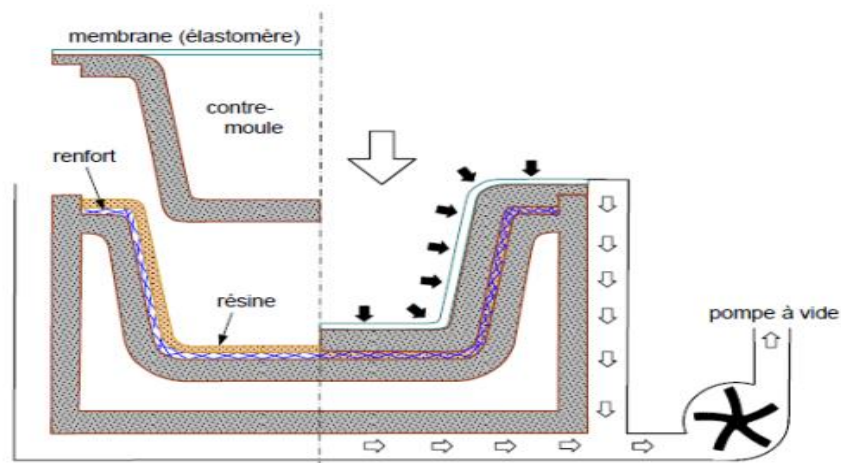


Figure 1.16 : Moulage sous vide.

1.10.4. Moulage par pultrusion

Le principe de moulage par pultrusion, que les renforts : fils, stratifils, rubans, etc...passent dans un bain de résine catalysée où ils sont imprégnés. Ils traversent ensuite une filière chauffée dans laquelle ont lieu simultanément mise en forme du profilé et polymérisation de la résine. Les profilés obtenus ont de propriétés mécaniques élevées (**Figure 1.17**) [15].

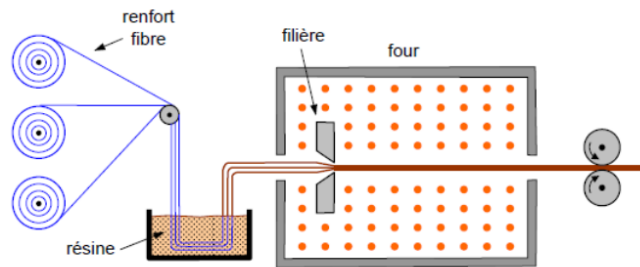


Figure 1.17 : Moulage par pultrusion.

1.11. Domaine d'utilisation des composites

Dans divers secteurs tels que l'aéronautique, l'automobile, le ferroviaire, la construction civile, la construction industrielle, le secteur médical, les équipements de sports et de loisirs, la construction nautique et la construction électrique, les matériaux composites sont abondamment employés. Dans tous les domaines, l'utilisation des matériaux composites entraîne des sollicitations diverses qui entraînent des dommages qui se manifestent à l'échelle microscopique lorsque la contrainte atteint la limite de rupture de l'un des trois composants (fibre, matrice et interface).

1.12. Définition d'endommagement

L'endommagement est comme une augmentation de la taille ou du nombre de fissures. Cela entraîne une diminution des caractéristiques mécaniques du système, conduisant à sa ruine. Les différentes échelles d'observation Plusieurs types d'endommagement au sein d'une structure stratifiée, unidirectionnelle ou tissée se révèlent à différentes échelles d'observation. Les plus significatifs sont les suivants [16]:

- A l'échelle microscopique apparaissent les ruptures d'interfaces : c'est le phénomène de décohésion fibre-matrice et d'autre part, la rupture de fibre et de la matrice.

- A l'échelle macroscopique on observe le phénomène de décollement inter pli : c'est le délaminage.
- A l'échelle mésoscopique on observe l'apparition de nombreuses fissures intra laminaires mais également la rupture de fibres qui intervient au stade ultime de la ruine du matériau, qui sont parallèles à la direction des fibres.

La compréhension des mécanismes de fissuration est abordée de deux manières distinctes :

- par la Mécanique de la Rupture, quand les fissures ont une taille de l'ordre de celle de la structure dans laquelle elles se développent.
- par la Mécanique de l'Endommagement, quand les fissures ont une taille de l'ordre de l'élément de volume du matériau dans lequel elles se développent.

1.13. Avantages et inconvénients des matériaux composites

1.13.1. Avantages

- Gain de masse ;
- Mise en forme de pièces complexes (principe du moulage) et réduction du nombre d'interfaces (boulonnage, rivetage et soudure sur structures métalliques) ;
- Grande résistance à la fatigue ;
- Faible vieillissement sous l'action de l'humidité, de la chaleur, de la corrosion (sauf en cas de contact entre de l'aluminium et des fibres de carbone) ;
- Insensibles aux produits chimiques "mécaniques " comme les graisses, huiles, liquides hydrauliques, peintures, solvants, pétrole.

1.13.2. Inconvénients

- Vieillissement sous l'action de l'eau et de la température ;
- Attention aux décapants de peinture qui attaquent les résines époxydes ;
- Tenue à l'impact moyenne par rapport aux métalliques ;
- Meilleure tenue au feu que les alliages légers mais émission de fumées parfois toxiques pour certaines matrices ;
- Coût parfois prohibitifs (temps et coût études et mise en œuvre), le gain en coût est surtout valable pour des grandes séries.

1.14. Conclusion

Ce chapitre a fait l'objet de généralités sur les matériaux composites qui sont largement utilisés dans des domaines très divers, grâce à leurs propriétés mécaniques et physique. En dépit de ces avantages qu'on a indiqué en dernier lieu, on trouve plusieurs défauts pendant la mise en forme tel que l'endommagement. La connaissance de l'état d'endommagement prolonge sa durée de vie, ces propriétés peuvent être des caractéristiques mécaniques ...dans cet intérêt une étude fera l'objet de ce deuxième chapitre.

***Chapitre 2. ETUDE DU COMPORTEMENT
MECANIQUE DES MATERIAUX
COMPOSITES***

2.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons une théorie générale de l'étude du comportement mécanique des composites. Nous nous sommes intéressés au cas spécifique des stratifiés.

Pour mieux comprendre la théorie, on fait appel à la mécanique des milieux continus et des différents types des matériaux. Pour en arriver au comportement linéaire des composites et à la théorie classique des stratifiés.

2.2. Comportement élastique linéaire

Le comportement élastique linéaire est caractérisé par une relation linéaire entre les contraintes et déformations.

2.2.1. Matrice de rigidité

La relation d'élasticité linéaire s'écrit sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & R_{14} & R_{15} & R_{16} \\ R_{12} & R_{22} & R_{23} & R_{24} & R_{24} & R_{26} \\ R_{13} & R_{23} & R_{33} & R_{34} & R_{35} & R_{36} \\ R_{14} & R_{24} & R_{34} & R_{44} & R_{45} & R_{46} \\ R_{15} & R_{25} & R_{35} & R_{45} & R_{55} & R_{56} \\ R_{16} & R_{26} & R_{36} & R_{46} & R_{56} & R_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Soit sous forme condensée (loi de Hooke généralisée)

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (2.2)$$

R est la matrice de rigidité, symétrique décrite dans le cas général.

2.2.2. Matrice de souplesse ou flexibilité

La relation d'élasticité (2.1) peut être écrite sous la forme matricielle inverse suivante :

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & R_{14} & R_{15} & R_{16} \\ R_{12} & R_{22} & R_{23} & R_{24} & R_{25} & R_{26} \\ R_{13} & R_{23} & R_{33} & R_{34} & R_{35} & R_{36} \\ R_{14} & R_{24} & R_{34} & R_{44} & R_{45} & R_{46} \\ R_{15} & R_{25} & R_{35} & R_{45} & R_{55} & R_{56} \\ R_{16} & R_{26} & R_{36} & R_{46} & R_{56} & R_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Soit sous forme condensée :

$$\varepsilon = S \cdot \sigma \quad (2.4)$$

Avec

$$S = R^{-1} \quad (2.5)$$

2.2.3. Changement de base

Les relations de changement de base relatives aux contraintes et déformation, sont écrites sous forme suivants :

$$R' = T_\sigma \cdot R \cdot T_\varepsilon^{-1} \quad (2.6)$$

$$S' = T_\varepsilon \cdot S \cdot T_\sigma^{-1} \quad (2.7)$$

T_σ : la matrice de changement de base des contraintes.

T_ε : la matrice de changement de base des déformations.

Les relations inverses s'écrivent respectivement :

$$R = T_\sigma^{-1} \cdot R' \cdot T_\varepsilon \quad (2.8)$$

$$S = T_\varepsilon^{-1} \cdot S' \cdot T_\sigma \quad (2.9)$$

2.2.4. Matériaux isotropes

Ce sont des matériaux invariants quel que soit le changement de repère, toutes les directions sont donc identiques.

La relation entre contrainte et déformation est indépendante du repère choisi. Le nombre de constantes d'élasticité indépendantes est donc réduit à deux et conduit à la matrice de rigidité suivante :

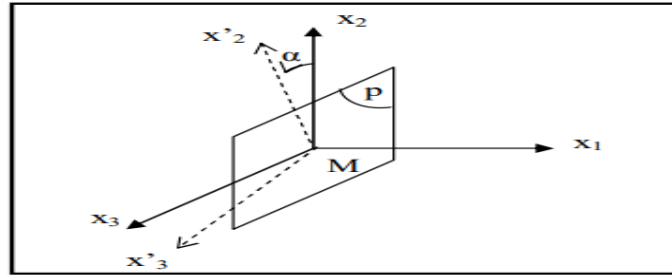


Figure 2.1 : matériau isotrope.

$$R = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{12} & 0 & 0 & 0 \\ R_{12} & R_{11} & R_{12} & 0 & 0 & 0 \\ R_{12} & R_{12} & R_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}(R_{11} - R_{12}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}(R_{11} - R_{12}) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}(R_{11} - R_{12}) \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Les constantes de rigidité sont exprimées en introduisant les coefficients de lamé λ et μ :

$$R_{12} = \lambda, \frac{1}{2}(R_{11} - R_{12}) = \mu \quad (2.11)$$

D'où :

$$R_{11} = \lambda + 2\mu \quad (2.12)$$

La relation (2.10) devient :

$$R = \begin{bmatrix} \lambda + 2\mu & \lambda & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda + 2\mu & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda & \lambda + 2\mu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

2.2.5. Matériau anisotrope

Dans le cas le plus générale, le comportement linéaire est décrit par 21 constantes indépendantes. Ce cas correspond à un matériau ne possédant aucune propriété de symétrie. Un tel matériau est appelé matériau triclinique.

La plupart des matériaux anisotropes possèdent une structure présentant une ou plusieurs symétries. Les propriétés de symétrie géométriques réduisent alors les nombres de constantes indépendantes nécessaires pour décrire le comportement d'un matériau[17].

2.2.6. Matériau monoclinique

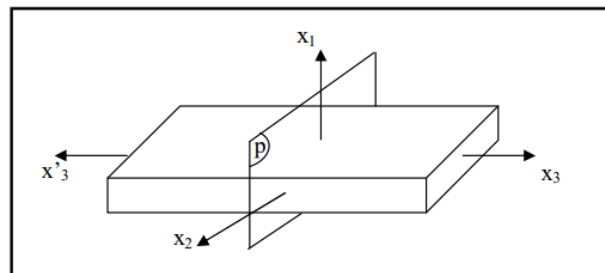


Figure 2.2 : matériau monocline.

Un matériau monoclinique est un matériau qui possède un plan de symétrie. La forme de la matrice de rigidité (souplesse) doit être tel que le changement de base effectué par symétrie

par rapport à ce plan ne modifié pas la matrice [12]. On obtient une matrice de rigidité de la forme :

$$R = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & 0 & 0 & R_{16} \\ R_{12} & R_{22} & R_{23} & 0 & 0 & R_{26} \\ R_{13} & R_{23} & R_{33} & 0 & 0 & R_{36} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_{44} & R_{45} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_{45} & R_{55} & 0 \\ R_{16} & R_{26} & R_{36} & 0 & 0 & R_{66} \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

2.2.7. Matériau orthotrope

Un matériau est dit orthotrope s'il possède trois plans de symétrie orthogonaux entre eux.

La matrice de rigidité et de souplesse est donc obtenue sous cette la forme :

$$R = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & 0 & 0 & 0 \\ R_{12} & R_{22} & R_{23} & 0 & 0 & 0 \\ R_{13} & R_{23} & R_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_{66} \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

Le nombre de constantes d'élasticité indépendantes est ramené à 9.

2.2.8. Matériau unidirectionnel

Un matériau unidirectionnel se comporte comme un matériau orthotrope possédant en plus un axe de révolution. Le matériau est alors appelé matériau orthotrope de révolution ou isotrope transverse et est caractérisé élastiquement par 5 constantes indépendantes.

La matrice de rigidité s'écrit [4] :

$$R = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{12} & 0 & 0 & 0 \\ R_{12} & R_{22} & R_{23} & 0 & 0 & 0 \\ R_{12} & R_{23} & R_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}(R_{22} - R_{23}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_{66} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_{66} \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

Et la matrice de souplesse :

$$S = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{12} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{23} & S_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}(S_{22} - S_{23}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

2.3. Caractéristiques du mélange (renfort + matrice)

Un matériau composite est la proportion relative de matrice et de renfort dans un matériau composite est importante. Cette proportion peut être exprimée soit en fraction volumique V soit en fraction massique M [4].

2.3.1. Fractions volumiques

Considérons un volume v_c de matériau composite, composé d'un volume v_f de fibre et d'un volume v_m de la matrice en (m^3).

Donc le volume total du matériau composite s'écrit :

$$v_c = v_f + v_m \quad (2.18)$$

La fraction volumique de fibre V_f est donnée par la relation suivante :

$$V_f = \frac{v_f}{v_c} \quad (2.19)$$

La fraction volumique de la matrice V_m est donnée par la relation suivante :

$$V_m = \frac{v_m}{v_c} \quad (2.20)$$

$$V_m + V_f = 1 \quad (2.21)$$

2.3.2. Fractions massiques

Considérons une masse m_c de matériau composite, composé d'une masse m_f de fibre et d'une masse m_m de la matrice.

La masse totale du matériau composé est :

$$m_c = m_f + m_m \quad (2.22)$$

La fraction massique de la fibre M_f est donnée par la relation suivante :

$$M_f = \frac{m_f}{m_c} \quad (2.23)$$

2.3.3. Relations entre fractions volumiques et massiques

Les relations entre fractions volumiques et massiques font intervenir les masses volumiques ρ_c , ρ_f et ρ_m respectives du matériau composite, des fibres et de la matrice.

Les masses et volumes sont liée par les relations :

$$\begin{aligned}\rho_c &= \frac{m_c}{v_c} \rightarrow m_c = \rho_c \cdot v_c \\ \rho_f &= \frac{m_f}{v_f} \rightarrow m_f = \rho_f \cdot v_f \\ \rho_m &= \frac{m_m}{v_m} \rightarrow m_m = \rho_m \cdot v_m\end{aligned}\quad (2.24)$$

En combinant les relations (2.18), (2.19), (2.20) et (2.25). On obtient les fractions volumiques et massiques de la fibre et de la matrice :

$$V_f = \frac{\frac{M_f}{\rho_f}}{\frac{M_f}{\rho_f} + \frac{M_m}{\rho_m}}, V_m = \frac{\frac{M_m}{\rho_m}}{\frac{M_f}{\rho_f} + \frac{M_m}{\rho_m}} \quad (2.25)$$

De même pour les fractions massiques de la fibre et de la matrice. En combinant les relations (2.22), (2.23), (2.25) on obtient :

$$\begin{aligned}M_f &= \frac{\rho_f V_f}{\rho_f V_f + \rho_m V_m} \\ M_m &= \frac{\rho_m V_m}{\rho_m V_m + \rho_f V_f}\end{aligned}\quad (2.26)$$

2.4. Épaisseur du pli

On définit le terme de *grammage* la masse m_{of} de renfort par mètre carré.

L'épaisseur du pli notée h est alors telle que :

$$h = \frac{v_c m_{of}}{\rho_f v_f} \quad (2.27)$$

$$h = \frac{m_{of}}{\rho_f v_f} \quad (2.28)$$

Cette expression peut être réécrite en introduisant la fraction massique M_f de renfort au lieu de la fraction volumique V_f ; on obtient :

$$h = m_{of} \left[\frac{1}{\rho_f} + \frac{1}{\rho_f} \left(\frac{1-m_f}{m_f} \right) \right] \quad (2.29)$$

2.5. Loi de Hooke pour un matériau unidirectionnel

La loi de Hooke pour un matériau unidirectionnel s'écrit, en introduisant les constantes de rigidité R_{ij} , les constantes de souplesse S_{ij} suivant les deux formes directes [5] :

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{12} & 0 & 0 & 0 \\ R_{12} & R_{22} & R_{23} & 0 & 0 & 0 \\ R_{12} & R_{23} & R_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}(R_{22} - R_{23}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_{66} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

Ou la forme inverse :

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{12} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{23} & S_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}(S_{22} - S_{23}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

2.6. Modules d'élasticité en fonction des constantes des rigidité et de souplesse

Les modules d'élasticité sont les modules de Young E , les coefficients de poisson ν et les modules de cisaillement G . Ces modules sont mesurés dans des essais simples tels que les essais de traction uni axiale ou de cisaillement [9].

- **Traction longitudinale :**

En fonction des constantes de rigidité :

$$E_{L=} R_{11} - \frac{2R_{12}^2}{R_{22} + R_{23}}, \nu_{LT} = \frac{R_{12}}{R_{22} + R_{23}} \quad (2.32)$$

En fonction des constantes de souplesse :

$$E_{L=} \frac{1}{S_{11}} \quad (2.33)$$

$$\nu_{LT} = \frac{S_{12}}{S_{11}}$$

En fonction des constantes de souplesse :

- **Traction transversale :**

En fonction des constantes de rigidité :

$$E_T = R_{22} - \frac{R_{12}^2 (R_{22} - 2R_{23}) + R_{11} R_{23}^2}{R_{12}^2 - R_{11} R_{22}} \quad (2.34)$$

$$\nu_{TL} = \frac{R_{12}^2 (R_{23} - R_{22})}{R_{12}^2 - R_{11} R_{22}}$$

$$\nu_{TT'} = \frac{R_{12}^2 - R_{11} R_{23}}{R_{12}^2 - R_{11} R_{22}}$$

En fonction des constantes de souplesse :

$$E_T = \frac{1}{S_{22}} \quad (2.35)$$

$$\nu_{TL} = -\frac{S_{12}}{S_{22}}$$

$$\nu_{TT'} = -\frac{S_{23}}{S_{22}}$$

- **Cisaillement longitudinal :**

$$G_{LT} = \frac{1}{S_{66}} \quad (2.36)$$

$$G_{LT} = R_{66}$$

- **Cisaillement transverse :**

$$G_{LT} = \frac{1}{2}(R_{22} - R_{23}) \quad (2.37)$$

$$G_{TT'} = \frac{1}{2}(S_{22} - S_{23})$$

2.7. Les modules l'élasticité d'un composite unidirectionnel en fonction des caractéristiques mécaniques de ces constituants

- Module de Young longitudinal

$$E_L = E_f V_f + E_m (1 - V_f) \quad (2.38)$$

- Module de Young transversal

$$E_T = \frac{E_f E_m}{V_f E_f + V_m E_m} \quad (2.39)$$

- Coefficient de poisson longitudinal

$$\nu_{LT} = \nu_f V_f + \nu_m (1 - V_f) \quad (2.40)$$

ν_f : coefficient de poisson des fibres.

ν_m : coefficient de poisson e la matrice.

- Module de cisaillement longitudinal

$$G_{LT} = G_m \frac{G_f (1 + V_f) + G_m (1 - V_f)}{G_f (1 - V_f) + G_m (1 + V_f)} \quad (2.41)$$

➤ Module de cisaillement transversal

$$G_{TT} = G_m \left(1 + \frac{V_f}{\frac{G_m}{G_f - G_m} + \frac{K_m + \frac{7G_m}{3}}{2K_m + \frac{8G_m}{3}} (1 - V_f)} \right) \quad (2.42)$$

Où : E_f , ν_f , G_m , G_f , k_m , ν_m , E_m sont les modules des fibres et de matrice. Avec :

$$k_m = \frac{E_m}{3(1 - 2\nu_m)} \quad (2.43)$$

$$G_f = \frac{E_f}{2(1 - \nu_f)}, G_m = \frac{E_m}{2(1 - \nu_m)} \quad (2.44)$$

2.7.1. Loi de Hooke pour un matériau orthotrope

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & 0 & 0 & 0 \\ R_{12} & R_{22} & R_{23} & 0 & 0 & 0 \\ R_{13} & R_{23} & R_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix} \quad (2.45)$$

Où :

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{13} & S_{23} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} \quad (2.46)$$

2.7.2. Module de l'ingénieur

➤ Traction dans le sens chaîne

Pour l'essai de traction le module de YOUNG suivant le sens chaîne :

$$\begin{aligned} E_{ch} = E_L = E_1 &= \frac{1}{S_{11}} \\ \nu_{LT} = \nu_{21} &= -\frac{S_{12}}{S_{22}} \\ \nu_{TT'} = \nu_{23} &= -\frac{S_{23}}{S_{22}} \end{aligned} \quad (2.47)$$

➤ Traction dans le sens trame :

Pour l'essai de traction le module de YOUNG suivant le sens trame :

$$\begin{aligned} E_{tr} = E_T = E_2 &= \frac{1}{S_{22}} \\ \nu_{TL} = \nu_{21} &= -\frac{S_{12}}{S_{22}} \\ \nu_{TT'} = \nu_{23} &= -\frac{S_{23}}{S_{22}} \end{aligned} \quad (2.48)$$

➤ Traction transversale :

La traction transversale effectuée dans une direction normale au plan de la couche (suivant T'). D'où :

$$\begin{aligned}
 E_{T'} &= E_3 = \frac{1}{S_{33}} \\
 \nu_{T'L} &= \nu_{31} = -\frac{S_{13}}{S_{33}} \\
 \nu_{T'T} &= \nu_{32} = -\frac{S_{23}}{S_{33}}
 \end{aligned}
 \tag{2.49}$$

2.8. Comportement mécanique des stratifiés

L'étude du comportement mécanique des stratifiés se comporte par 02 méthodes :

2.8.1. Théorie classique des stratifiés

➤ **Le champ des déplacements s'écrit :**

$$\begin{aligned}
 u(x, y, z) &= u_0(x, y) + z\varphi_x(x, y) \\
 v(x, y, z) &= v_0(x, y) + z\varphi_y(x, y) \\
 w(x, y, z) &= w_0(x, y)
 \end{aligned}
 \tag{2.50}$$

Avec : φ_x, φ_y coefficients qui dépendent de (x, y) ;

u_0, v_0, w_0 champ de déplacement du point $M_0(x, y, 0)$ du plan (oxy) .

Ou :

$$\begin{aligned}
 u_0 &= u_0(x, y) = u(x, y, 0) \\
 v_0 &= v_0(x, y) = v(x, y, 0) \\
 w_0 &= w_0(x, y) = w(x, y, 0)
 \end{aligned}
 \tag{2.51}$$

Dans le cas d'un schéma du premier degré, le champ des déformations s'écrit :

$$\begin{aligned}
\varepsilon_{xx} &= \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial u_0}{\partial x} + z \frac{\partial \varphi_x}{\partial x}, \\
\varepsilon_{yy} &= \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{\partial v_0}{\partial y} + z \frac{\partial \varphi_y}{\partial y}, \\
\varepsilon_{zz} &= \frac{\partial w}{\partial z} = \frac{\partial w_0}{\partial z} = 0 \\
\gamma_{yz} &= 2\varepsilon_{yz} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} = \varphi_y + \frac{\partial w_0}{\partial y} \\
\gamma_{xz} &= 2\varepsilon_{xz} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} = \varphi_x + \frac{\partial w_0}{\partial x} \\
\gamma_{xy} &= 2\varepsilon_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} = \left(\frac{\partial u_0}{\partial y} + \frac{\partial v_0}{\partial x} \right) + z \left(\frac{\partial \varphi_x}{\partial y} + \frac{\partial \varphi_y}{\partial x} \right)
\end{aligned} \tag{2.52}$$

Cette théorie fait ensuite une hypothèse supplémentaire qui ne prend pas en compte le cisaillement transverse : $\gamma_{xz} = 0$ et $\gamma_{yz} = 0$

Cette hypothèse implique :

$$\begin{aligned}
\varphi_x(x, y) &= -\frac{\partial w_0}{\partial x} \\
\varphi_y(x, y) &= -\frac{\partial w_0}{\partial y}
\end{aligned} \tag{2.53}$$

Les champs de déplacements s'écrivent alors :

$$\begin{aligned}
u(x, y, z) &= u_0(x, y) - z \frac{\partial w_0}{\partial x}(x, y) \\
v(x, y, z) &= v_0(x, y) - z \frac{\partial w_0}{\partial y}(x, y) \\
w(x, y, z) &= w_0(x, y)
\end{aligned} \tag{2.54}$$

➤ Expression du champ des déformations

Le tenseur de déformation :

$$\varepsilon(M) = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} & 0 \\ \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{2.55}$$

Avec :

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_{xx} &= \frac{\partial u_0}{\partial x} - z \frac{\partial^2 \varphi_x}{\partial x^2} \\
 \varepsilon_{yy} &= \frac{\partial v_0}{\partial y} - z \frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} \\
 \varepsilon_{zz} &= 0, \gamma_{yz} = 0, \gamma_{xz} = 0 \\
 \gamma_{xy} &= \left(\frac{\partial u_0}{\partial y} + \frac{\partial v_0}{\partial x} \right) - 2z \frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y}
 \end{aligned} \tag{2.56}$$

Et la matrice de déformation se réduit à trois composantes non nulles [4] :

$$\varepsilon(M) = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{xy} \end{bmatrix} \tag{2.57}$$

Le champ déformations est la superposition :

- Des déformations en membrane :

$$\varepsilon_m(M) = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx}^0 \\ \varepsilon_{yy}^0 \\ \varepsilon_{xy}^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial u_0}{\partial x} \\ \frac{\partial v_0}{\partial y} \\ \frac{\partial u_0}{\partial y} + \frac{\partial v_0}{\partial x} \end{bmatrix} \tag{2.58}$$

- Des déformations en flexion et torsion :

$$\varepsilon_f(M) = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx}^f \\ \varepsilon_{yy}^f \\ \varepsilon_{xy}^f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -z \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} \\ -z \frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} \\ -2z \frac{\partial^2 w_0}{\partial y \partial x} \end{bmatrix} \tag{2.59}$$

- Généralement, les déformations en flexion et torsion s'expriment suivant la relation :

$$\varepsilon_f(M) = zk(x, y) \tag{2.60}$$

Ou :

$$k(x, y) = \begin{bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} \\ -\frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} \\ -2\frac{\partial^2 w_0}{\partial y \partial x} \end{bmatrix} \quad (2.61)$$

La matrice $k(x,y)$ est appelée matrice des courbures de la plaque sollicitée en flexion. Finalement, le champ des déformations s'écrit :

$$\varepsilon(M) = \varepsilon_m(M) + \varepsilon_f(M) \quad (2.62)$$

Ou bien :

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx}^0 \\ \varepsilon_{yy}^0 \\ \varepsilon_{xy}^0 \end{bmatrix} + z \begin{bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{bmatrix} \quad (2.63)$$

Sous la forme abrégée, le champ des déformations s'écrit donc :

$$\varepsilon(M) = \varepsilon(x, y, z) = \varepsilon_m(x, y) + zk(x, y) \quad (2.64)$$

Les déformations en membrane $\varepsilon_m(x, y)$ ne dépendent que des coordonnées (x,y) du plan moyen du stratifié[4].

➤ Champ des contraintes

La forme de la matrice de rigidité d'une couche de composite unidirectionnel ou tissu, rapportée aux axes $(Oxyz)$ du stratifié. Si le point M appartient à la couche k du stratifié, le champ des contraintes s'écrit donc [4] :

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R'_{11} & R'_{12} & R'_{13} & 0 & 0 & R'_{16} \\ R'_{12} & R'_{22} & R'_{23} & 0 & 0 & R'_{26} \\ R'_{13} & R'_{23} & R'_{33} & 0 & 0 & R'_{36} \\ 0 & 0 & 0 & R'_{44} & R'_{45} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R'_{45} & R'_{55} & 0 \\ R'_{16} & R'_{26} & R'_{36} & 0 & 0 & R'_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{xy} \end{bmatrix} \quad (2.65)$$

La théorie des plaques a pour objet de simplifier le problème de l'analyse du comportement mécanique d'une plaque en trois dimension (x,y,z) en un problème à deux dimension (x,y) .

Cette théorie fait l'hypothèse que les contraintes normales σ_{zz} sont négligeables dans le volume de la plaque, par rapport aux autres composantes $\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{xy}$, soit : $\sigma_{zz} = 0$

L'état de contraintes $\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{xy}$ et des déformations $\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}, \varepsilon_{zz}, \gamma_{xy}$ correspond à l'état de contrainte planes.

Le tenseur des contraintes en M est donc de la forme :

$$\sigma(M) = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & 0 \\ \sigma_{xy} & \sigma_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.66)$$

Le champ des contraintes dans le cadre de la théorie classique des stratifiés s'écrit [2] :

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} \sigma = \begin{bmatrix} Q'_{11} & Q'_{12} & Q'_{16} \\ Q'_{12} & Q'_{22} & Q'_{26} \\ Q'_{16} & Q'_{26} & Q'_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (2.67)$$

Ou bien :

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} = Q'_k \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{xy} \end{bmatrix} \quad (2.68)$$

En tenant compte des relations (2.39), les contraintes dans la couche k s'expriment alors :

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q'_{11} & Q'_{12} & Q'_{16} \\ Q'_{12} & Q'_{22} & Q'_{26} \\ Q'_{16} & Q'_{26} & Q'_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx}^0 \\ \varepsilon_{yy}^0 \\ \varepsilon_{xy}^0 \end{bmatrix} + z \begin{bmatrix} Q_{11}' & Q_{12}' & Q_{16}' \\ Q_{12}' & Q_{22}' & Q_{26}' \\ Q_{16}' & Q_{26}' & Q_{66}' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{bmatrix} \quad (2.69)$$

Ou :

$$\sigma_k(M) = \sigma_k(x, y, z) = Q'_k \varepsilon_m(x, y) + z Q'_K K(x, y) \quad (2.70)$$

La matrice $\sigma_k(M)$ représente la matrice des contraintes dans la couche k :

$$hk-1 \leq z \leq hk.$$

Q_k La matrice de rigidité réduite varie d'une couche à l'autre. Il en résulte donc une discontinuité du champ des contraintes entre couches successives.

➤ Résultante en membrane

Le champ de résultantes en membrane, noté $N(x, y)$, est défini par :

$$N(x, y) = \begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \sigma_k(M) dz = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} dz \quad (2.71)$$

Les composantes N_x , N_y , N_{xy} sont les résultantes, par unité de longueur des plaques respectivement des contraintes normales (suivant x et y) et es contraintes de cisaillements, dans le plan (x, y) [4].

$$N(x, y) = \begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} = \sum_{k=1}^n \int_{hk-1}^{hk} \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} \quad (2.72)$$

L'expression (2.79) associée à la relation (2.75) conduit à l'expression des résultantes en membrane, dans le cadre de la théorie classique des stratifiés, nous obtenons (2.80) :

$$N(x, y) = \sum_{k=1}^n \int_{h_{k-1}}^{h_k} [Q'_k \varepsilon_m(x, y) + z Q'_k k(x, y)] dz \quad (2.73)$$

L'expression de la matrice des résultantes peut finalement s'écrire sous la forme :

$$N(x, y) = \sum_{k=1}^n \left[Q'_k \varepsilon_m(x, y) \int_{h_{k-1}}^{h_k} dz + Q'_k k(x, y) \int_{h_{k-1}}^{h_k} z dz \right] \quad (2.74)$$

Soit :

$$N(x, y) = \sum_{k=1}^n \left[Q'_k \varepsilon_m(x, y) \int_{h_{k-1}}^{h_k} dz + Q'_k k(x, y) \int_{h_{k-1}}^{h_k} z dz \right] \quad (2.75)$$

L'expression de la matrice des résultantes peut finalement s'écrire sous la forme :

$$N(x, y) = A \varepsilon_m(x, y) + B k(x, y) \quad (2.76)$$

Avec :

$$\begin{aligned} A &= [A_{ij}] = \sum_{k=1}^n (h_k - h_{k-1}) (Q'_{ij})_k \\ B &= [B_{ij}] = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n (h_k^2 - h_{k-1}^2) (Q'_{ij})_k \end{aligned} \quad (2.77)$$

L'expression développées des résultantes en membrane s'écrit donc :

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx}^0 \\ \varepsilon_{yy}^0 \\ \varepsilon_{xy}^0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{bmatrix} \quad (2.78)$$

N : Résultantes en membrane.

A : La matrice de rigidité en membrane.

B : La matrice de couplage membrane-flexion-torsion.

➤ Comportement en flexion et torsion

➤ En flexion

Les stratifiés font intervenir les moments résultant des contraintes sur un élément du stratifié. Les moments de flexion et torsion sont définis par :

$$M_f(x, y) = \begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \sum_{k=1}^n \int_{h_{k-1}}^k \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} z dz \quad (2.79)$$

M_x : moment de flexion suivant la direction x.

M_y : moment de flexion suivant la direction y.

M_{xy} : moment de torsion.

➤ Le champ des moments de flexion et de torsion sous la forme suivante :

$$M_f(x, y) = \sum_{k=1}^n \int_{h_{k-1}}^k [z Q'_k \varepsilon_m(x, y) + z^2 Q'_k k(x, y)] dz \quad (2.80)$$

Ou :

$$\begin{aligned} M_f(x, y) &= B \varepsilon_m(x, y) + D k(x, y) \\ D = [D_{ij}] &= \frac{1}{3} \sum_{k=1}^n (h_k^3 - h_{k-1}^3) (Q'_{ij})_k \end{aligned} \quad (2.81)$$

M_f : Moments de flexion et de torsion.

D : La matrice de rigidité en flexion.

L'expression développée des moments s'écrit sous la forme :

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx}^0 \\ \varepsilon_{yy}^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{bmatrix} \quad (2.82)$$

➤ **Equation du Comportement d'un composite stratifié :**

En regroupant les expressions (2.78) et (2.82) une écriture matricielle exprime les résultantes et moments en fonction des déformations en membrane et courbures sous forme :

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \\ M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} & B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} & B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} & B_{16} & B_{26} & B_{66} \\ B_{11} & B_{12} & B_{16} & D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} & D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} & D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx}^0 \\ \varepsilon_{yy}^0 \\ \gamma_{xy}^0 \\ k_{xy}^0 \\ k_y \\ k_{xy} \end{bmatrix} \quad (2.83)$$

Sous la forme contractée :

$$\begin{bmatrix} N \\ M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_m \\ k \end{bmatrix} \quad (2.84)$$

Les paramètres de l'exemple du critère de Hashin et Ply Fabric sont présentés dans les tableaux ci-dessous :

2.9. Hashin :

Tableau 2.1 Paramètres du modèle Hashin.

E_{11}	Module de Young dans la direction des fibres (direction 1)
E_{22}	Module de Young dans la direction de la matrice (direction 2)
E_{33}	Module de Young dans la direction de la matrice (direction 3)
ν_{12}	Coefficient de poisson
ν_{13}	Coefficient de poisson
ν_{23}	Coefficient de poisson
G_{12}	Module de cisaillement dans le plan 1-2
G_{13}	Module de cisaillement dans le plan 1-3
G_{23}	Module de cisaillement dans le plan 2-3
X_{1t}^+	Contrainte ultime en traction dans la direction des fibres (1)
X_{1c}^+	Contrainte ultime en compression dans la direction des fibres (1)

X_{2t}^+	Contrainte ultime en traction dans la direction transverse aux fibres (2)
X_{2c}^+	Contrainte ultime en compression dans la direction transverse aux fibres (2)
X_{3t}^+	Contrainte ultime en traction dans la direction transverse aux fibres (3)
X_{3c}^+	Contrainte ultime en compression dans la direction transverse aux fibres (3)
S_{12}	Contrainte ultime en cisaillement dans le plan 1-2
S_{13}	Contrainte ultime en cisaillement dans le plan 1-3
S_{23}	Contrainte ultime en cisaillement dans le plan 2-3

2.10. Ply fabric

Ligne 1 [17] :

Tableau 2.2 : Constante de matériau de l'utilisateur pour le model de matériau composite renforce de tissu

Pos	Symbole	Description
1	E_{1+}	Module de Young le long de la direction des fibres 1.
2	E_{2+}	Module de Young le long de la direction 2.
3	ν_{12+}	Coefficient de Poisson lorsque.
4	G_{12}	Module de cisaillement.
5	E_{1-}	Module de Young le long de la direction des fibres 1 lorsque.
6	E_{2-}	Module de Young le long de la direction des fibres 1 lorsque.
7	ν_{12+}	Coefficient de Poisson lorsque.

Ligne 2 :

Tableau 2.3 : Coefficient d'initiation des dommages.

Pos	Symbole	Description
1	X_{1+}	Résistance à la traction dans la direction des fibre 1.
2	X_{1-}	Résistance à la compression dans la direction des fibre 1.
3	X_{2+}	Résistance à la traction dans la direction des fibre 2.
4	X_{2-}	Résistance à la compression dans la direction des fibre 2.
5	S	Contrainte de cisaillement au début des dommages par cisaillement.

Ligne 3 :

Tableau 2.4 : Coefficient d'évolution de l'endommagement.

Pos	Symbole	Description
1	G_f^{1+}	Énergie par unité de surface pour la rupture en traction le long de la direction des fibres 1
2	G_f^{1-}	Énergie par unité de surface pour la rupture en compression le long de la direction des fibres 1".
3	G_f^{2+}	Énergie par unité de surface pour la rupture en traction le long de la direction des fibres 2.
4	G_f^{2-}	Énergie par unité de surface pour la rupture en compression le long de la direction des fibres 2".
5	α_{12}	Paramètre dans l'équation des dommages par cisaillement.
6	d_{12}^{max}	Dommage par cisaillement maximum

Ligne 4 :

Tableau 2.5 : Coefficient de plasticité en cisaillement.

Pos	Symbole	Description
1	$\tilde{\sigma}_{y_0}$	Contrainte de cisaillement efficace initiale de seuil de limite".
2	C	Coefficient dans l'équation de durcissement".
3	P	Terme de puissance dans l'équation de durcissement.

Ligne 5 :

Tableau 2.6 : Contrôles pour la défaillance d'un point matériel.

Pos	Symbole	Description
1	DelFlag	Élément deletion flag : IDelFlag=0 : L'élément n'est pas supprimé (par défaut)". IDelFlag=1: L'élément est supprimé lorsque l'une des fibres échoue". DelFlag=2 : L'élément est supprimé lorsque les deux fibres échouent.
2	d_{\max}	Valeur maximale de la variable de dommage utilisée dans le critère de suppression de l'élément.
3	$\bar{\varepsilon}_{m_{ax}}^{PL}$	Valeur maximale de la déformation plastique équivalente pour le critère de suppression de l'élément.
4	$\hat{\varepsilon}_{m_{ax}}$	Déformation logarithmique principale maximale (positive) au-delà de laquelle l'élément sera supprimé. IDelFlag=0 .
5	$\hat{\varepsilon}_{m_{ax}}$	Déformation logarithmique principale minimale (négative) au-delà de laquelle l'élément sera supprimé IDelFlag=0.

2.11. Conclusion

L'évaluation d'un matériau composite doit prendre en compte les conditions pour mieux spécifier leurs rôles et leurs performances. La théorie des stratifiés permet de calculer les contraintes et les déformations dans chaque pli d'une structure composite après avoir donné les étapes principales pour mener le calcul. Nous allons ajuster dans chapitre 3 des essais mécaniques (flexion trois point, traction, poids tombant) dans le but d'étudier le comportement d'un stratifié et élaborer ces propriétés tel que l'endommagement.

***Chapitre 3. RESULTATS ET
DISCUSSIONS***

3.1. Introduction

Le comportement mécanique des matériaux composites est très complexe. Plusieurs méthodes ont été développées pour la caractérisation de ces matériaux. Cette partie présente la procédure de la modélisation du matériau étudié, les essais mis en œuvre pour déterminer ces propriétés et son comportement mécanique en statique et en dynamique. Les résultats et les mécanismes d'endommagement engendrés seront analysés et discutés.

3.2. Présentation du matériau

Le matériau composite utilisé dans cette étude est principalement destiné à la fabrication des équipements de navigation maritime et de pêche qui est un stratifié avec quatre couches, (**Figure 3.1**) [19].

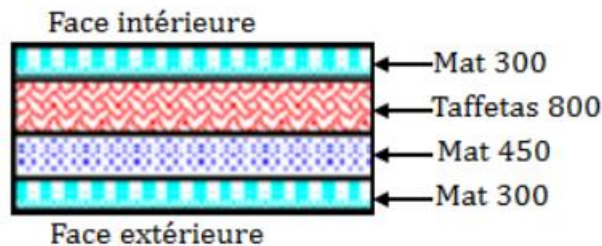


Figure 3.1 : Ordre des plis du stratifié de référence.

Dans cette étude Les renforts utilisés sont en verre de type E, sous forme de mats et de taffetas avec des épaisseurs [19].

Tableau 3.1 : La géométrie du matériau.

Matériaux	Épaisseur
Mat 300	0.75mm
Mat 450	1mm
Taffetas 800	0.85mm
Mat 300	0.75mm

Une résine thermodurcissable en polyester insaturé (Polylite®440-800 avec un durcisseur approprié Norpol Peroxyde N°1 produit par Reichhold) utiliser pour l'imprégnation des différents empilements.

Sur ce matériau on a mené plusieurs expériences notamment l'essai de flexion trois points, traction, masse tombante.

Ligne 1 :

E_{1+}	28450 (GPa)
E_{2+}	28450 (GPa)
ν_{12+}	0.086
G_{12}	1770 (GPa)
E_{1-}	27000 (GPa)
E_{2-}	27000 (GPa)
ν_{12+}	0.086

Ligne 2 :

X_{1+}	541.5
X_{1-}	541.5
X_{2+}	93
X_{2-}	93
S	42

Ligne 3 :

G_f^{1+}	167069420
G_f^{1-}	26299648510
G_f^{2+}	1471397180
G_f^{2-}	2363444640
α_{12}	0.4
d_{12}^{max}	0.955

Ligne 4 :

$\tilde{\sigma}_{y_0}$	20.678
C	133.983
P	0.197272

Ligne 5 :

$\bar{\epsilon}_{m_{ax}}^{pL}$	0,5
$\hat{\epsilon}_{m_{ax}}$	-5. e-2
$\hat{\epsilon}_{m_{ax}}$	-5. e-2

3.3. L'essai de flexion trois points

3.3.1. Procédé de modélisation de l'essai de flexion trois points

L'essai de flexion trois points modélisé sur Abaqus simule la réponse mécanique d'une éprouvette soumise à une charge centrale entre deux supports [20,21]. La géométrie comprend des dimensions prédéfinies (longueur, largeur, épaisseur), et les supports sont placés à une distance spécifique. Le matériau est caractérisé par ses propriétés, telles que le module d'élasticité et le coefficient de Poisson. Un maillage adapté (des éléments 3D) et un raffinement autour des zones de contact. Les conditions aux limites fixent les supports en translation verticale, et une force de 150 kN est appliquée au centre de l'éprouvette.

3.3.2. Module Part

Pour commence il faut paramétrer la pièce en définissant son espace de modélisation et son type. Comme illustré dans la **Figure 3.2**, la boîte de dialogue de création de pièce dans Abaqus permet de spécifier :

- **L'espace de modélisation (Modeling Space)** : Nous choisissons un espace 3D pour représenter la pièce en trois dimensions.

- **Le type de pièce (Type) :** La pièce est définie comme Déformable (Deformable), car elle doit être soumise à des charges et subir des déformations durant la simulation.

Après validation de ces paramètres, la pièce est prête pour la phase de conception géométrique.

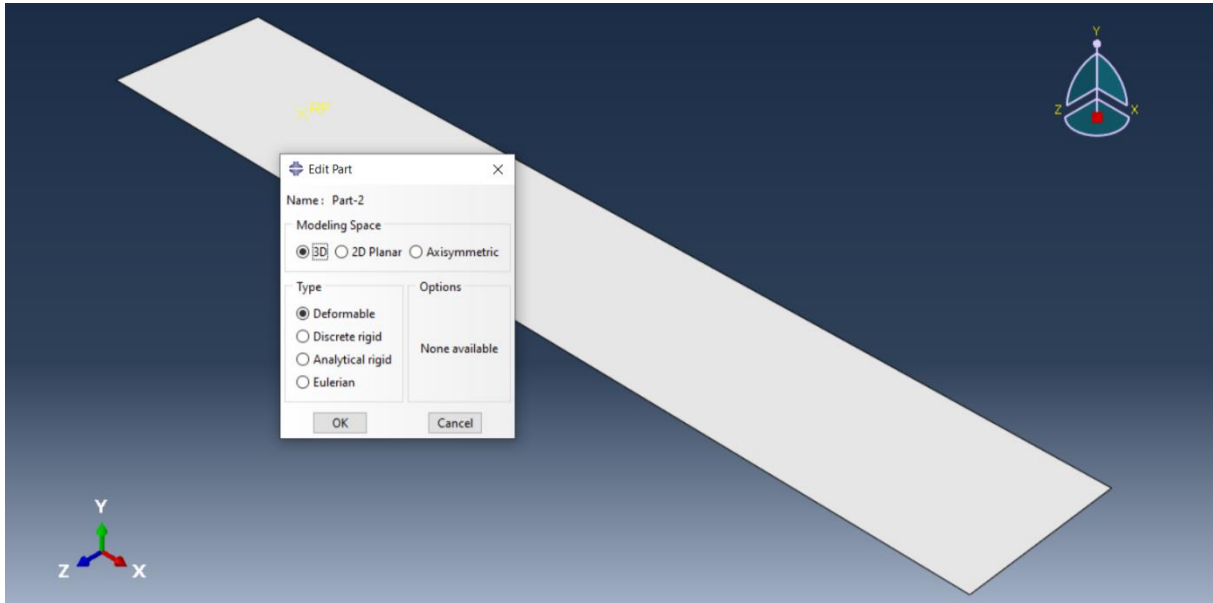


Figure 3.2 : Boîte de dialogue de création de pièce dans le module PART d’Abaqus.

Une fois les paramètres définis, la conception géométrique de la pièce est réalisée en utilisant un croquis 2D. Comme le montre la **Figure 3.3.**, nous utilisons les outils de dessin pour créer un rectangle, correspondant à la section de la pièce :

La longueur de la pièce est définie à 250 mm, tandis que sa largeur est de 25 mm, conformément aux spécifications de l’expérience.

Ce croquis est essentiel pour obtenir la forme de base de la pièce et sera utilisé dans les étapes suivantes pour l’assemblage et l’analyse.

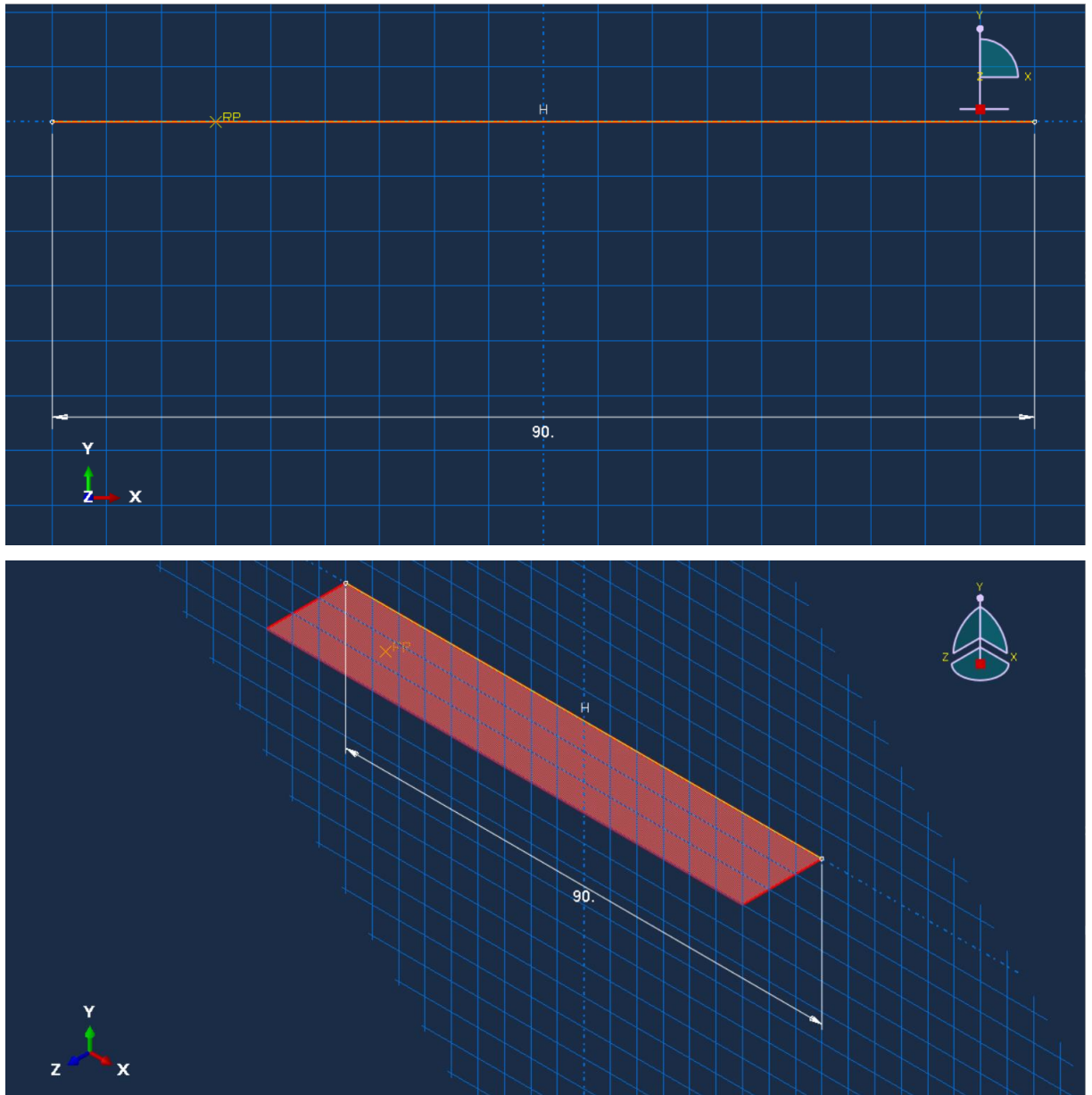


Figure 3.3 : Conception géométrique de la pièce avec des dimensions de 250 mm x 25 mm.

On a aussi paramétré les appuis en spécifiant leur type et leurs dimensions. Comme le montre la **Figure 3.4**, la boîte de dialogue de création de pièce dans Abaqus permet de définir:

- **L'espace de modélisation (Modeling Space)** : Nous choisissons un espace 3D pour représenter les appuis.
- **Le type de pièce (Type)** : Les appuis sont définis comme **Non Déformables (Rigid)**, car ils doivent rester rigides et ne pas subir de déformations sous l'effet des charges appliquées.

Une fois ces paramètres validés, les appuis sont prêts à passer à la phase de conception géométrique.

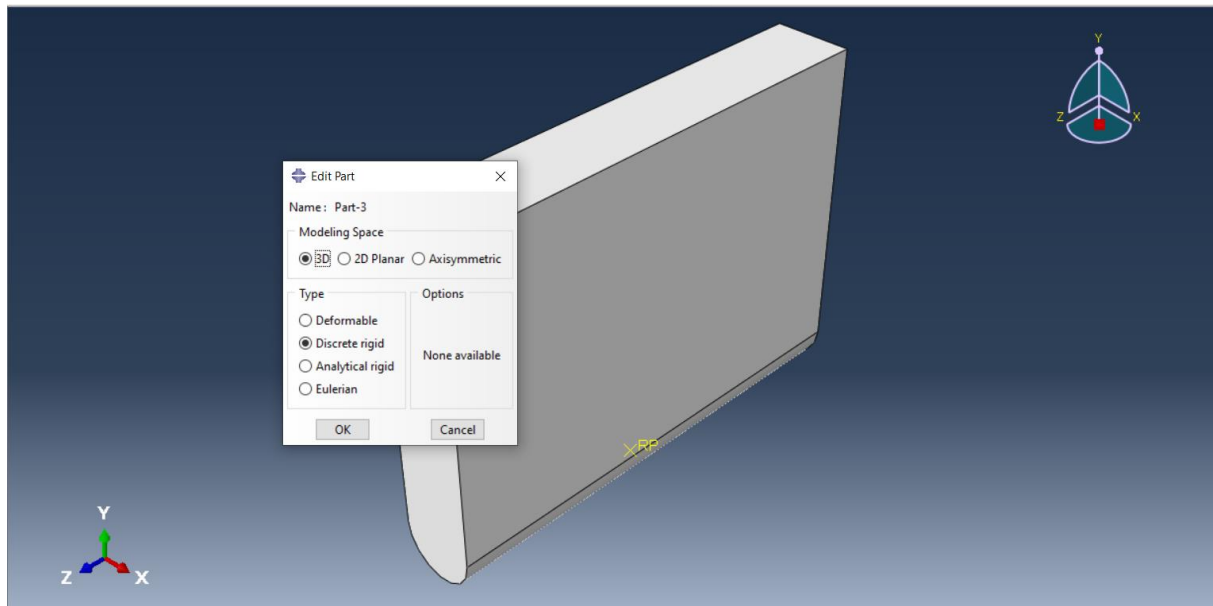


Figure 3.4 : Boîte de dialogue de création de pièce pour les appuis dans le module PART d'Abaqus.

Après avoir défini les paramètres, la conception géométrique des appuis est réalisée à l'aide d'un croquis 2D. Comme illustré dans la **Figure 3.5** nous utilisons les outils de dessin pour créer des formes rectangulaires correspondant aux dimensions des appuis :

- La longueur des appuis est fixée à 20 mm et leur largeur à 5 mm, ce qui assure un soutien adéquat à l'éprouvette pendant l'essai.

Ce croquis est essentiel pour établir la forme de base des appuis, qui seront intégrés dans les étapes suivantes de l'assemblage et de l'analyse.

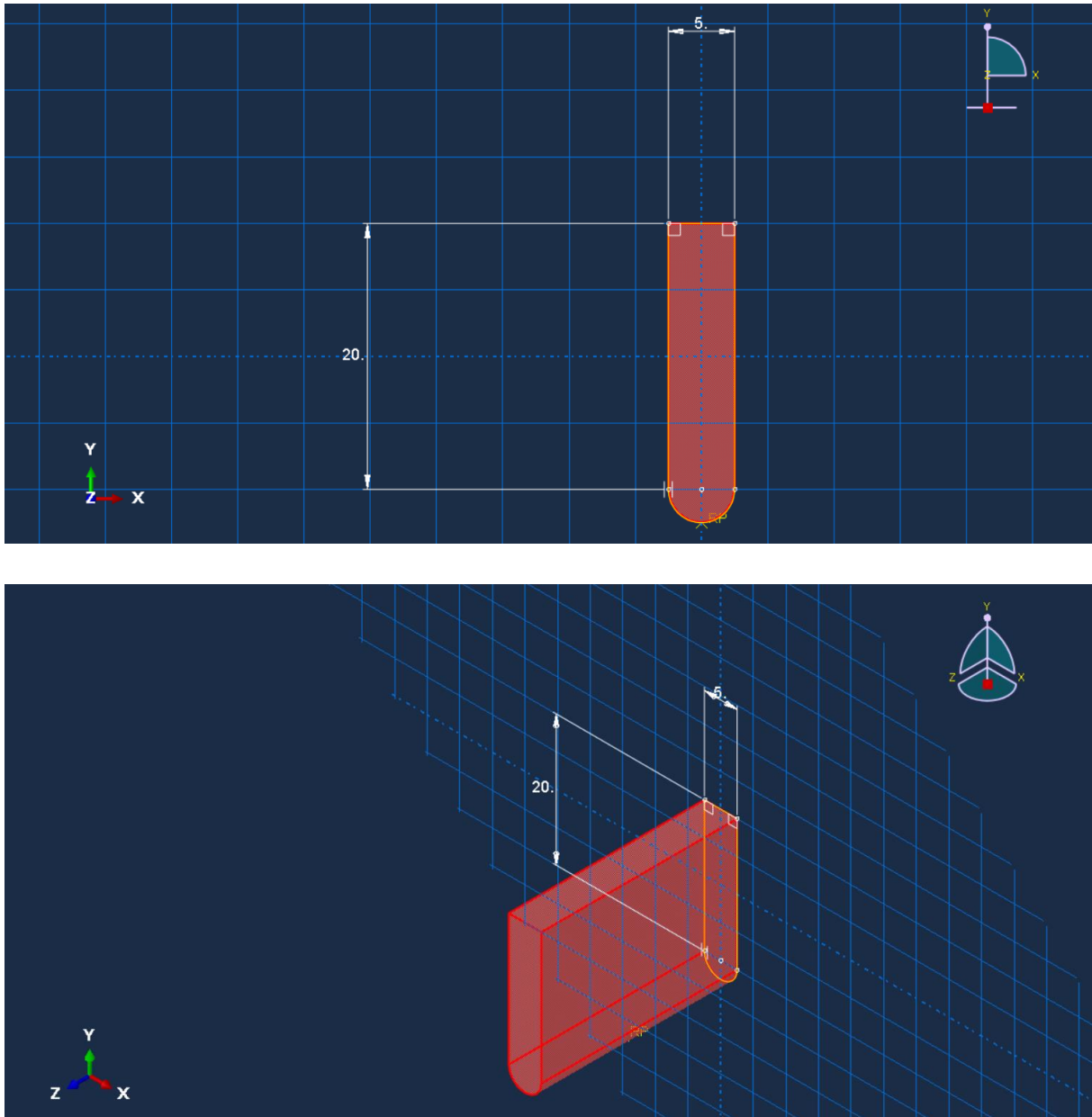


Figure 3.5 : Conception géométrique des appuis avec des dimensions de 20 mm x 5 mm*

3.3.3. Module ASSEMBLY

Par la suite on a créer un nouvel assemblage. Comme illustré dans la **Figure 3.6**, la boîte de dialogue d'assemblage dans Abaqus permet de spécifier :

- **L'assemblage de la pièce (Assembly) :** Nous choisissons de créer un assemblage qui inclut l'éprouvette, les appuis rigides aux extrémités et un appui central qui appliquera la charge.

- **Le type d'assemblage (Assembly Type) :** L'assemblage est configuré comme **Déformable (Deformable)** pour permettre l'interaction correcte entre les différentes pièces lors de la simulation.

Une fois ces paramètres validés, l'assemblage est prêt pour l'intégration des différentes pièces.

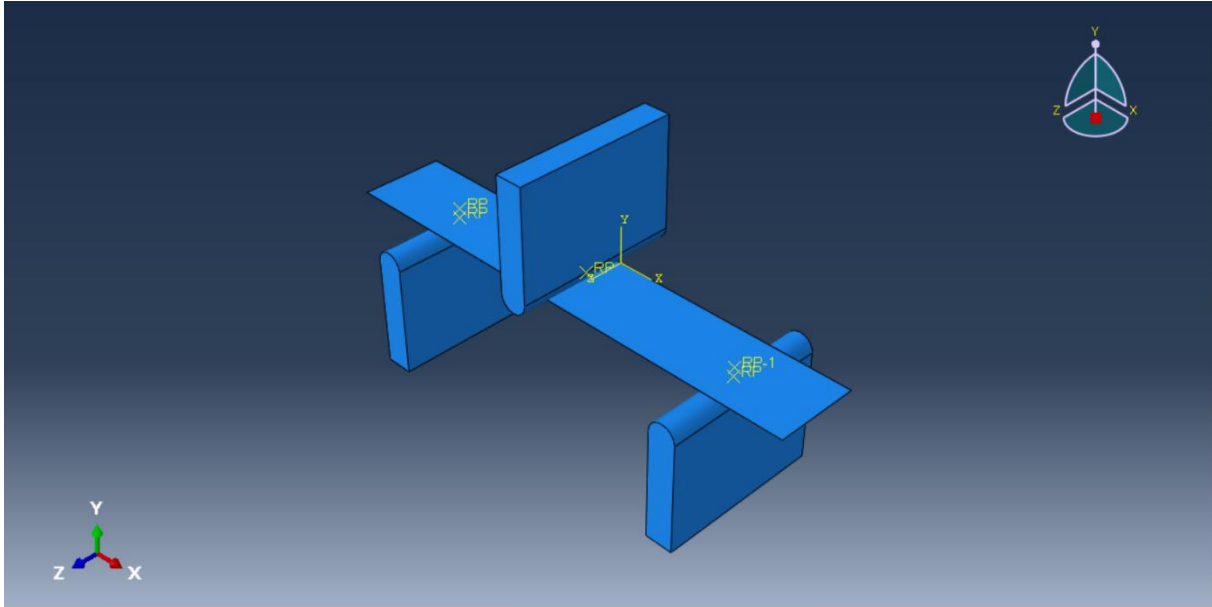


Figure 3.6 : Boîte de dialogue de création d'assemblage dans le module ASSEMBLY d'Abaqus.

3.3.4. Module LAOD

Définir les types de charges à appliquer. Comme illustré dans la **Figure 3.7**, la boîte de dialogue du module LOAD permet de spécifier :

- **Type de charge :** Nous appliquons une charge concentrée au centre de la poutre, générée par l'appui central.
- **Magnitude de la charge :** La charge est définie en Newtons (N), conformément aux spécifications de l'expérience. Une charge de 250 N est appliquée pour simuler les conditions de l'essai.

En plus de cette charge centrale, il est important de noter que la poutre est encastree aux deux extrémités par les appuis rigides.

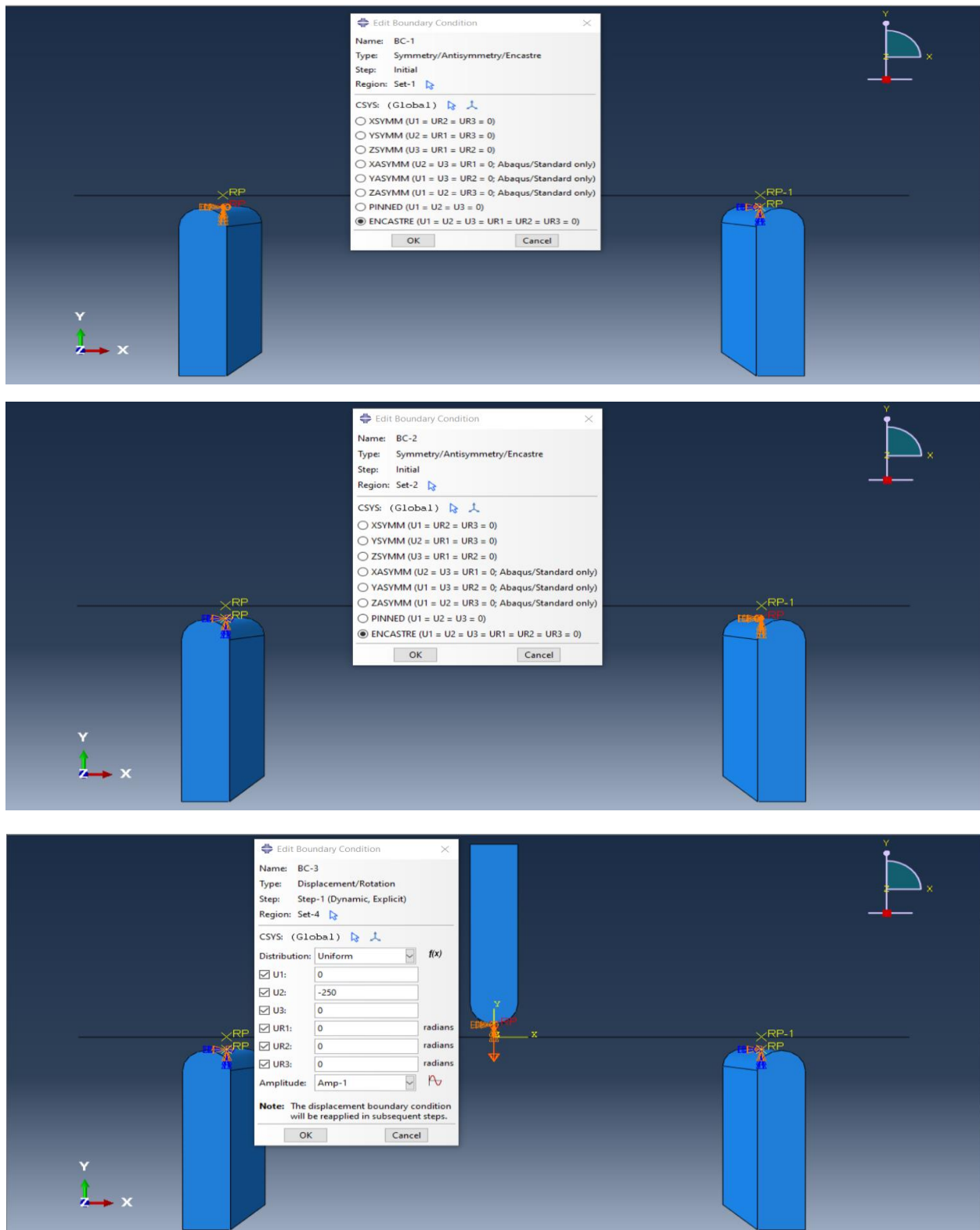


Figure 3.7 : Boîte de dialogue de définition des charges dans le module LOAD d'Abaqus.

3.3.5. Module MESH

Après avoir défini les paramètres, nous procédons à la génération du maillage. Comme le montre la **Figure 3.8**, cette étape consiste à :

- **Appliquer le maillage** : En utilisant l'outil de maillage d'Abaqus, nous appliquons le maillage à l'ensemble de la géométrie, y compris la poutre et les appuis.
- **Vérification du maillage** : S'assurer que le maillage est uniforme et qu'il ne présente pas d'éléments déformés ou trop petits ou trop grand, car cela pourrait affecter la qualité des résultats de la simulation [20,21].

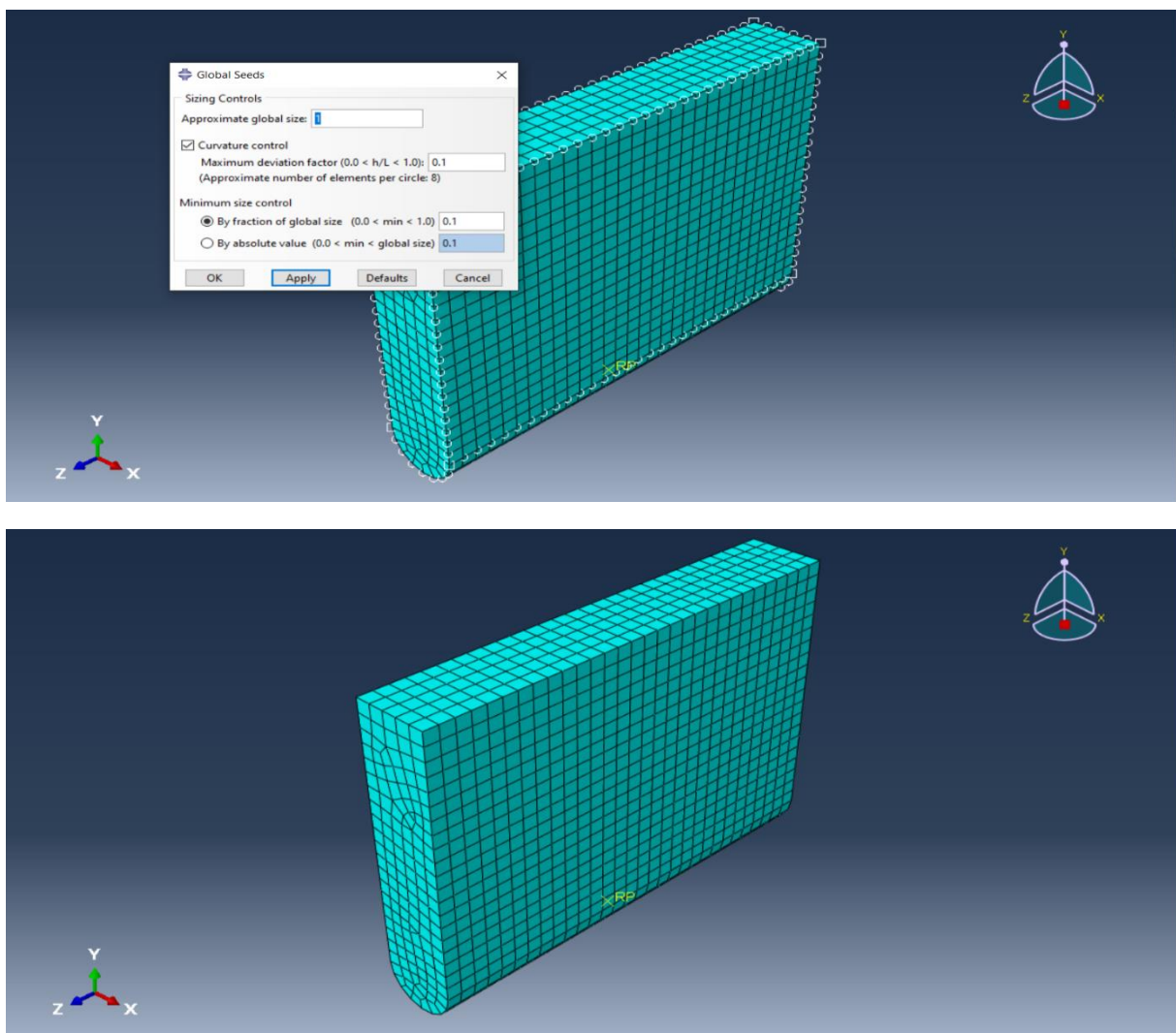


Figure 3.8 : Maillage des appuis.

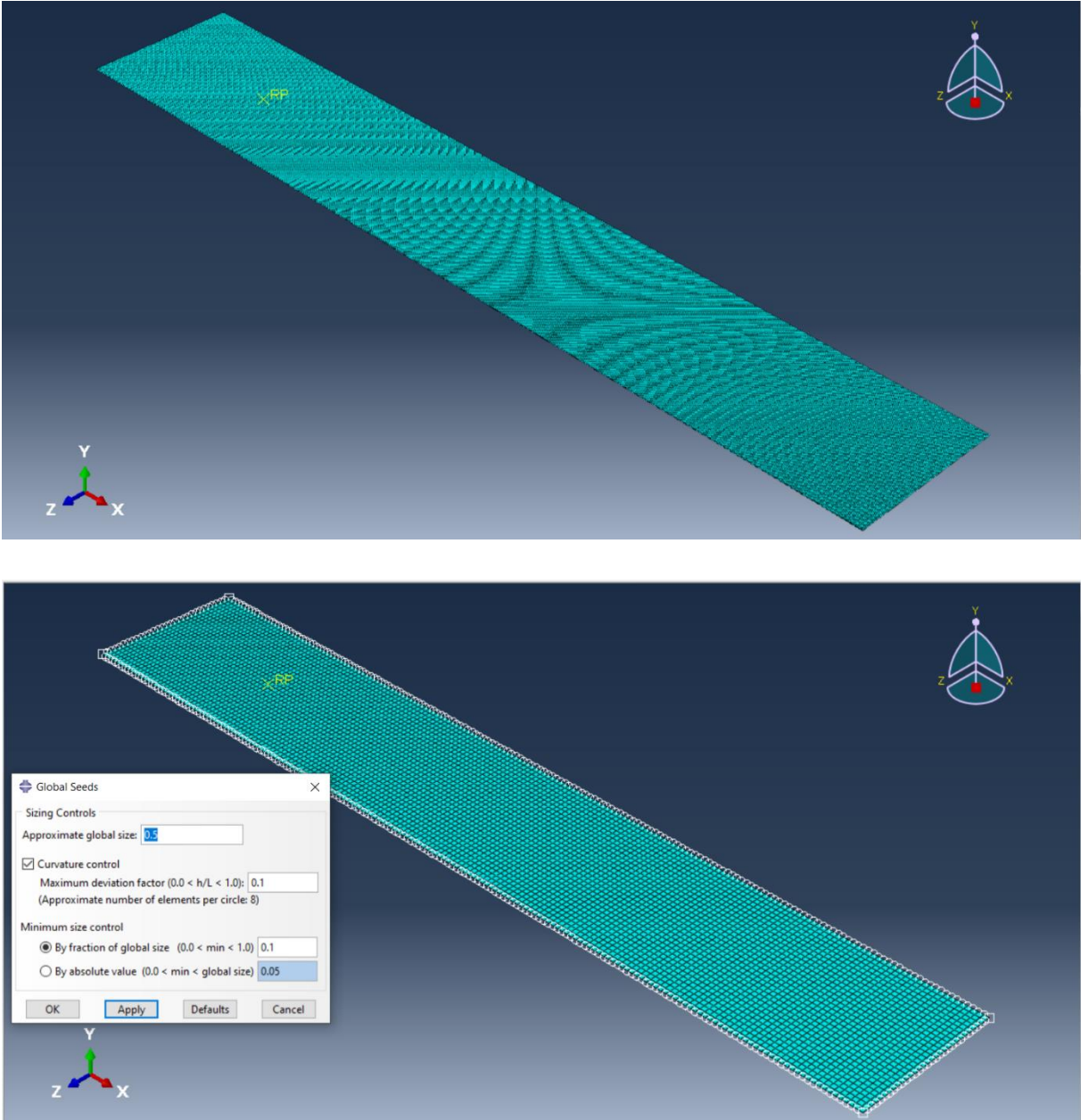


Figure 3.9 : Maillage de l'éprouvette.

3.3.6. Module VISUALISATION

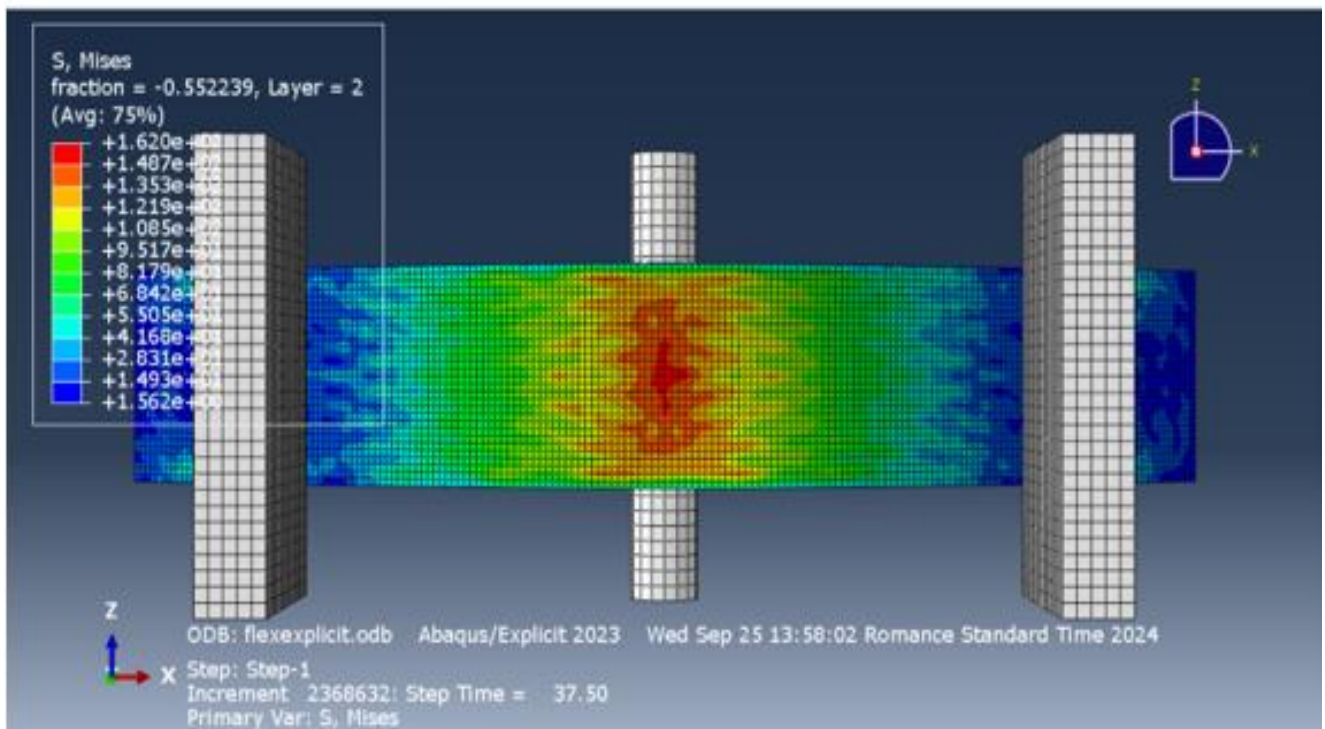
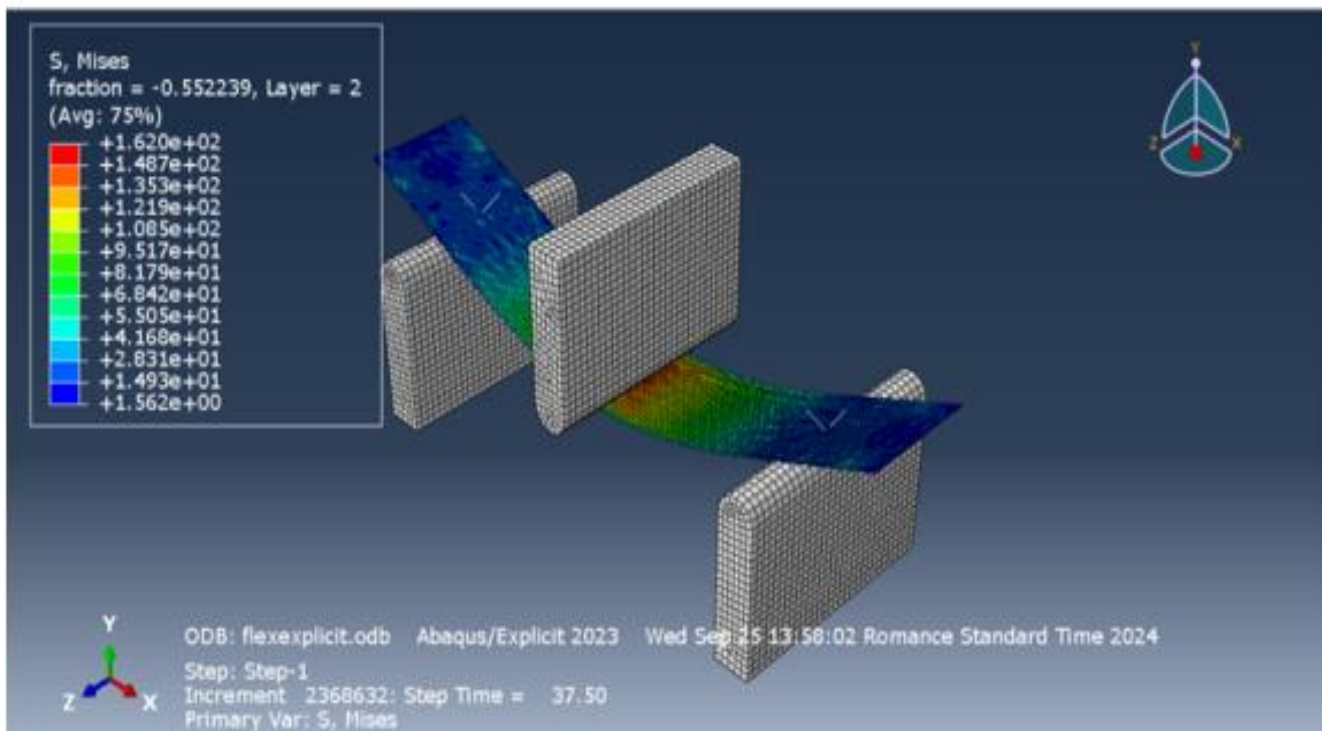


Figure 3.10 : Visualisation de la contrainte subit par l'éprouvette.

3.3.7. Résultats d'essai de flexion 3 points

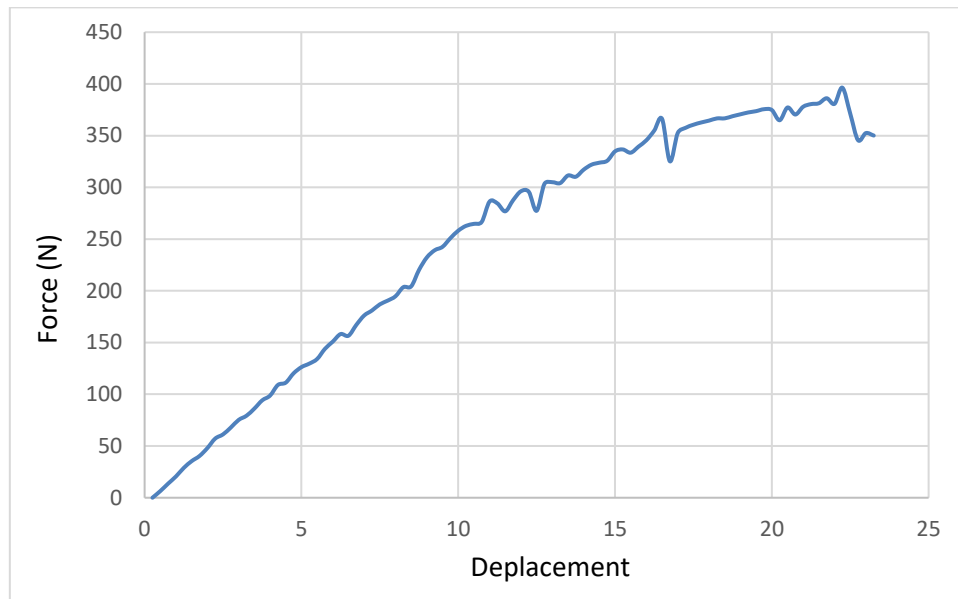


Figure 3.11 : Evolution force – déplacement.

Le comportement du matériau illustré par la courbe montre d'abord une phase élastique, où la force augmente de manière linéaire avec le déplacement, indiquant une réponse proportionnelle à la contrainte appliquée. Cette phase se poursuit jusqu'à environ 10 unités de déplacement, où le matériau reste dans sa zone élastique. Par la suite, des fluctuations apparaissent, suggérant des signes de fragilité ou de déformation interne alors que le matériau approche de sa limite de résistance. Enfin, une rupture brutale survient, marquée par une chute soudaine de la force à zéro, signalant que le matériau a atteint sa limite maximale et s'est rompu.

3.4. L'essai de traction

3.4.1. Procède de modélisation de l'essais de traction

L'essai de traction modélisé sur Abaqus simule la réponse mécanique d'un matériau soumis à une force de traction uniaxiale. Les conditions limites imposent des déplacements ou des forces opposées aux extrémités de l'éprouvette.

Les dimensions des éprouvettes qui ont été utiliser dans cet essai : $h = 2$ à 10 mm ; $b = 25$ à 50 mm ; $L_T = 50$ mm ; $L_0 = 150$ mm ; $L = 250$ mm.

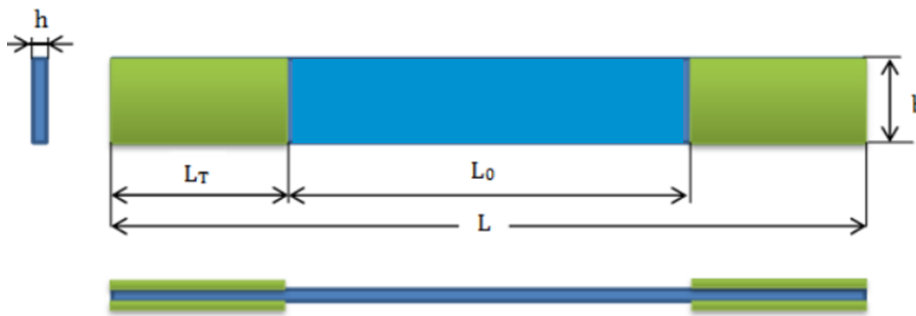


Figure 3.12 : Géométrie de l'éprouvette de traction.

3.4.2. Module PART

La première étape consiste à paramétrer la pièce en définissant son espace de modélisation et son type. Comme illustré dans la **Figure 3.13**, la boîte de dialogue de création de pièce dans Abaqus permet de spécifier :

- **L'espace de modélisation (Modeling Space)** : Nous choisissons un espace $3D$ pour représenter la pièce en trois dimensions.
- **Le type de pièce (Type)** : La pièce est définie comme *Déformable (Deformable)*, car elle doit être soumise à des charges et subir des déformations durant la simulation.

Après validation de ces paramètres, la pièce est prête pour la phase de conception géométrique.

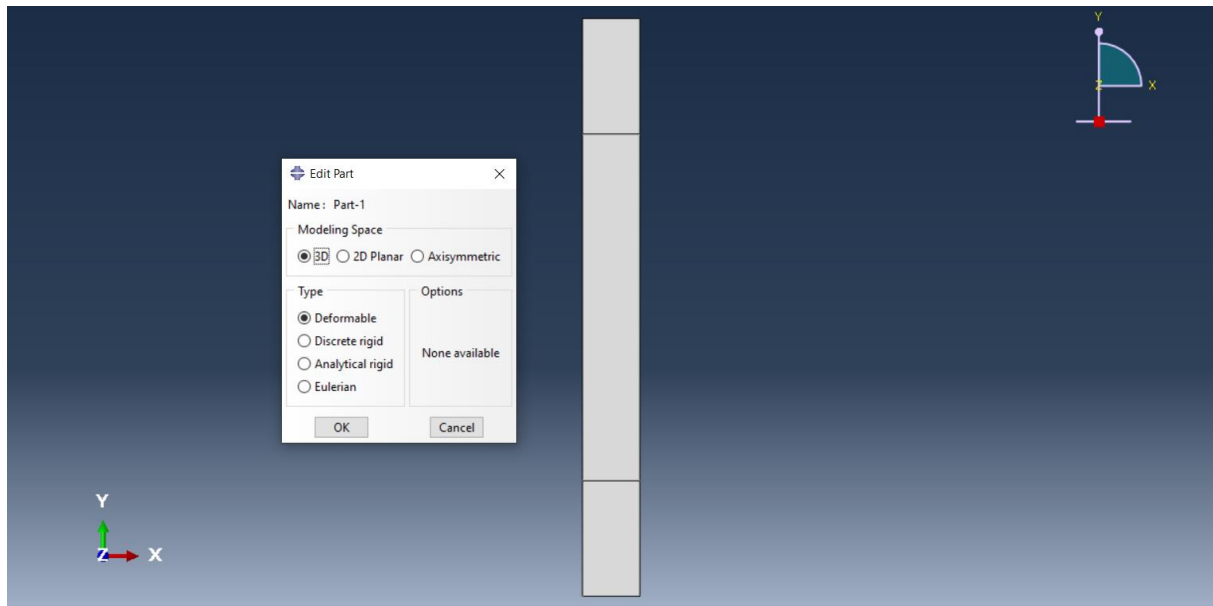


Figure 3.13 : Boîte de dialogue de création de pièce dans le module PART d’Abaqus.

Une fois les paramètres définis, la conception géométrique de la pièce est réalisée en utilisant un croquis 2D. Comme le montre la **Figure 3.14**, nous utilisons les outils de dessin pour créer un rectangle, correspondant à la section de la pièce :

La longueur de la pièce est définie à 250 mm, tandis que sa largeur est de 25 mm, conformément aux spécifications de l’expérience.

Ce croquis est essentiel pour obtenir la forme de base de la pièce et sera utilisé dans les étapes suivantes pour l’assemblage et l’analyse.

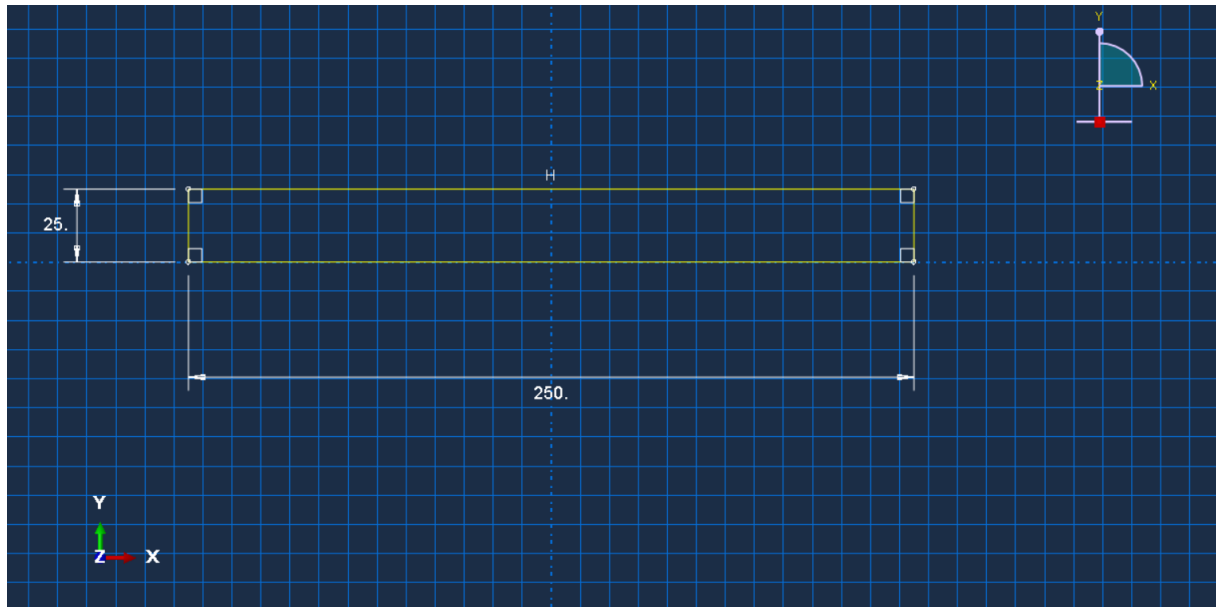


Figure 3.14 : Conception géométrique de la pièce avec des dimensions de 250 mm x 25 mm.

Pour faciliter l'application des conditions aux zones spécifiques de la pièce, une partition est introduite dans la géométrie, comme illustré dans la **Figure 3.15** Cette opération permet de :

- Diviser la surface en plusieurs sections afin de mieux contrôler les régions où les charges et les contraintes seront appliquées.
- Améliorer le maillage en concentrant les éléments dans les zones critiques pour l'analyse.

La création de partitions est une étape clé pour assurer une modélisation précise et une simulation réaliste.

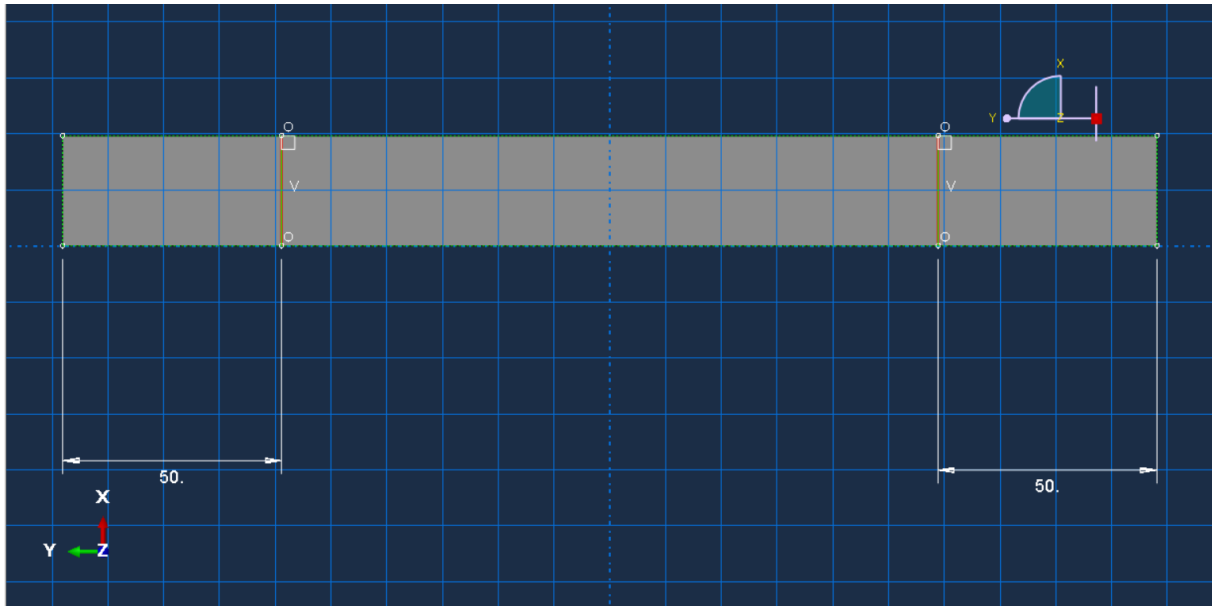


Figure 3.15 : Division de la pièce en plusieurs sections grâce à la création de partitions.

3.4.3. Module LAOD

Dans le cadre de cette modélisation, nous appliquons une charge de traction uniforme sur une extrémité de la pièce pour simuler les conditions de traction uniaxiale. Cette charge est définie par une force constante appliquée perpendiculairement à la surface d'extrémité, en spécifiant son intensité et sa direction dans le cadre de référence global d'Abaqus.

Les conditions aux limites sont définies pour restreindre les déplacements et les rotations sur certaines parties de la pièce, garantissant ainsi que la simulation reflète les contraintes expérimentales :

- Une des extrémités de la pièce est fixée (en restriction de déplacement), de sorte qu'aucun mouvement dans la direction longitudinale ne soit permis.
- D'autres conditions peuvent être ajoutées pour éviter les déplacements dans les directions perpendiculaires si cela est requis par l'expérience.

L'application de ces charges et conditions aux limites est illustrée dans la **Figure 3.16**.

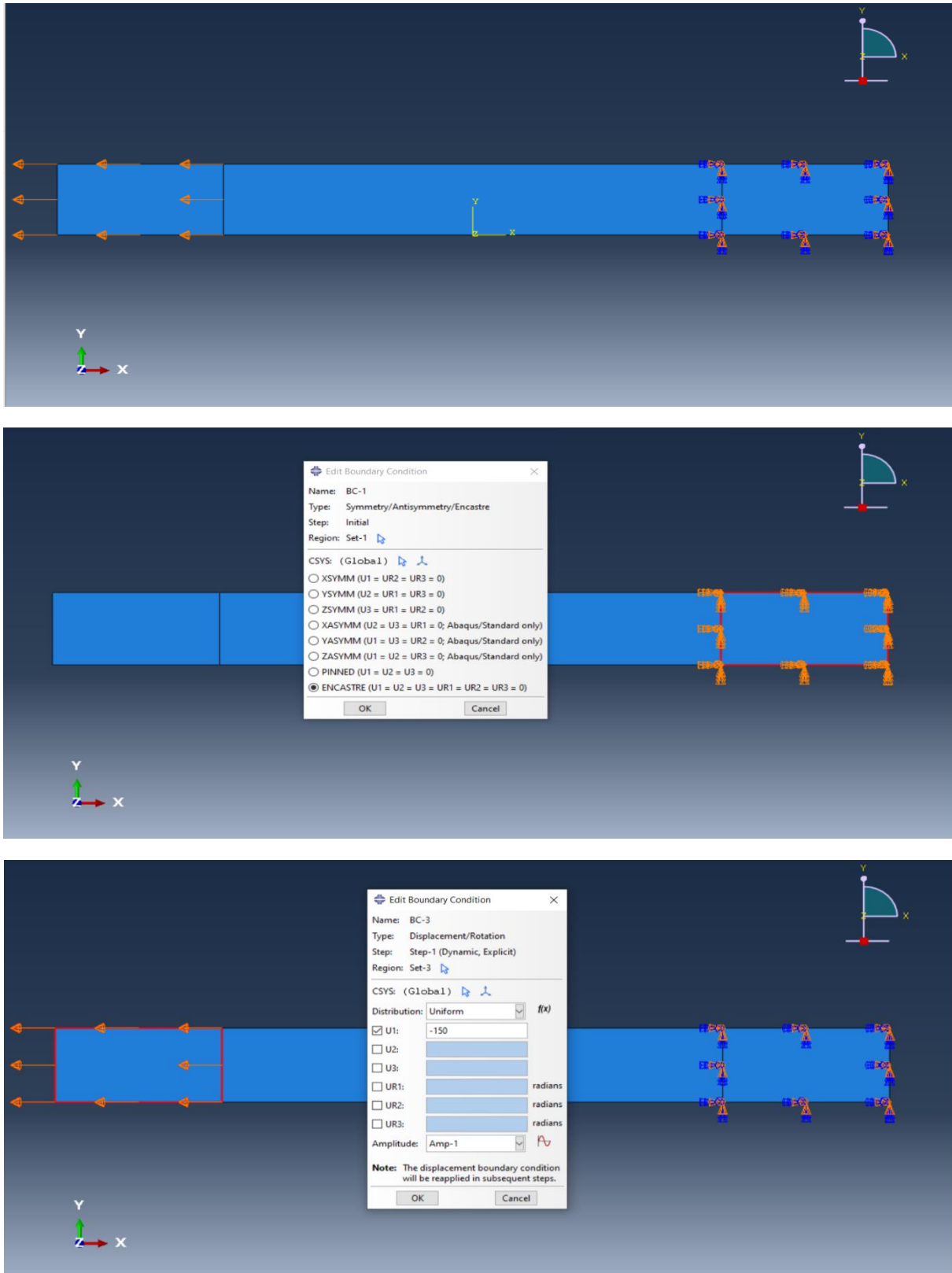


Figure 3.16 : Illustration des charges et des conditions aux limites appliquées sur la pièce dans le module LOAD d'Abaqus.

3.4.4. Module MESH

La taille des éléments est spécifiée en fonction des régions critiques de la pièce et de la précision requise pour l'analyse. Une taille de maillage uniforme est appliquée pour garantir la régularité de la discrétisation, mais des éléments plus fins sont utilisés dans les zones où des contraintes élevées sont attendues (par exemple, autour des charges appliquées).

Une fois les paramètres définis, le maillage est généré automatiquement sur l'ensemble de la pièce. La **Figure 3.17** présente la pièce maillée, montrant la discrétisation en éléments finis

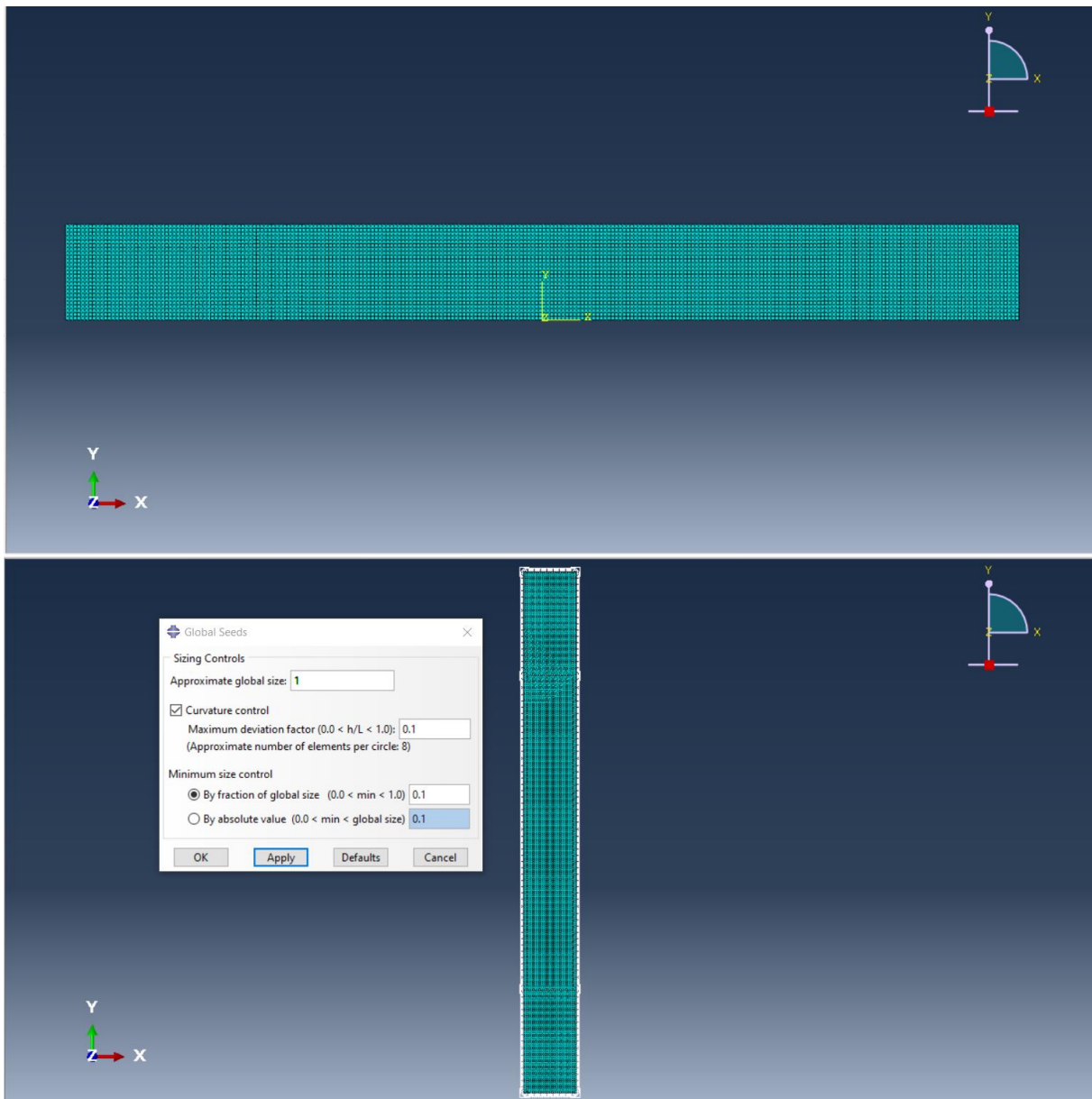


Figure 3.17 : Maillage de la pièce dans le module MESH d'Abaqus, montrant la distribution des éléments finis sur la géométrie.

3.4.5. Module VISUALISATION

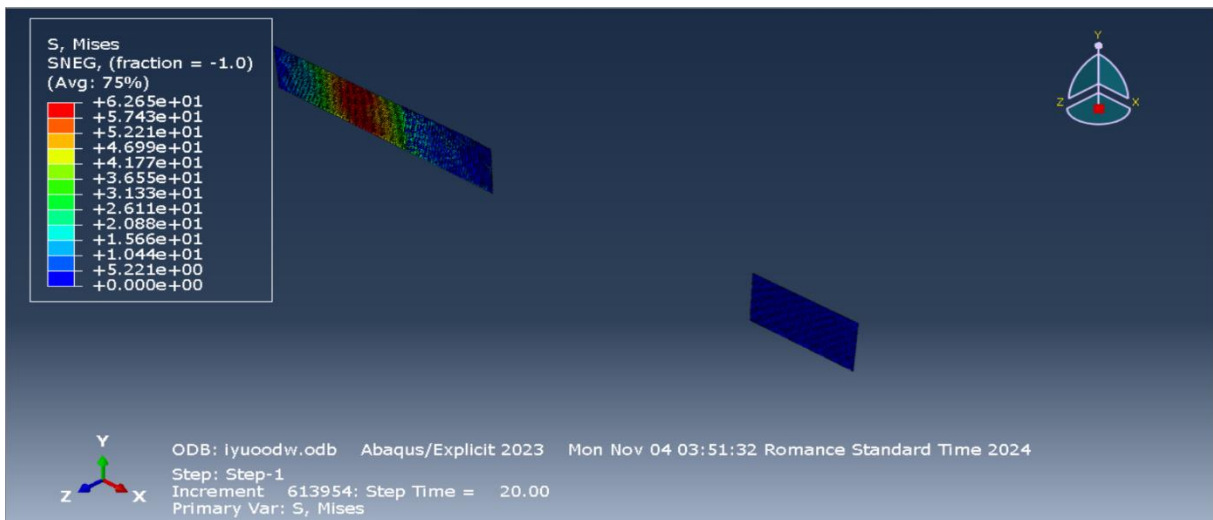
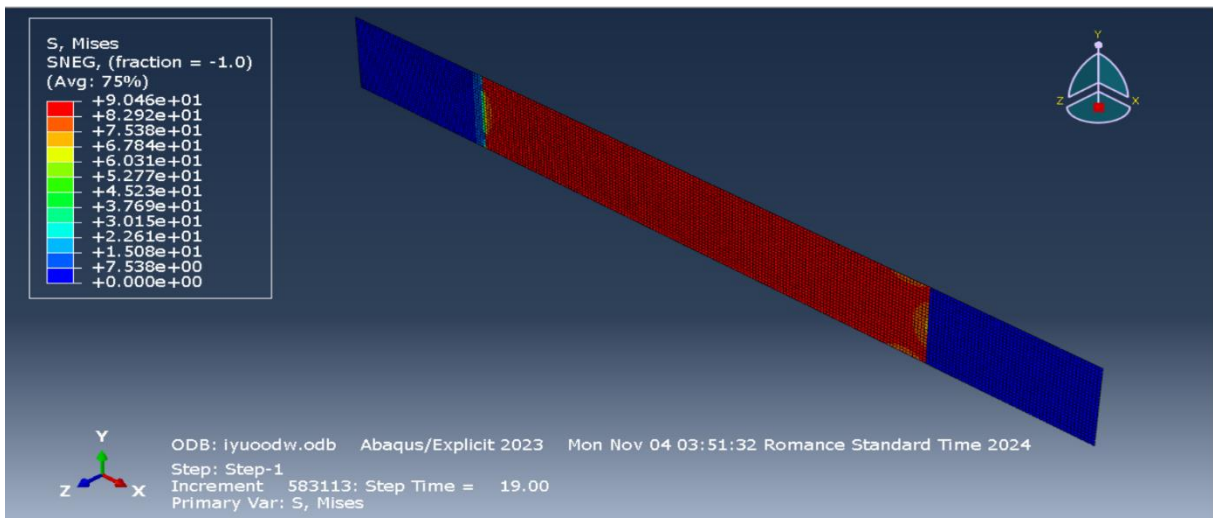
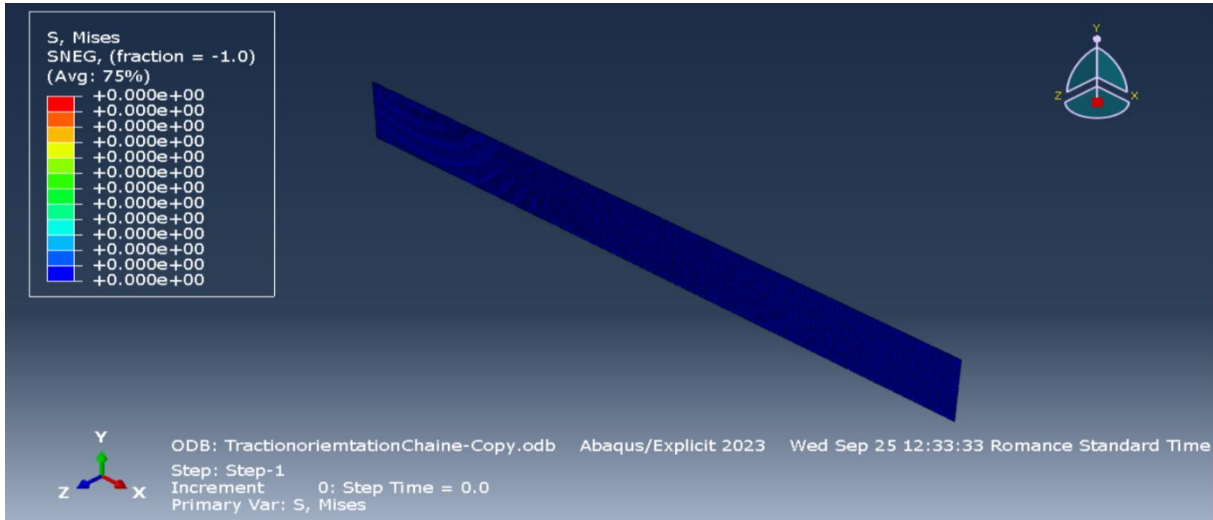


Figure 3.18 : Visualisation des résultats.

3.4.6. Résultats d'essai de traction

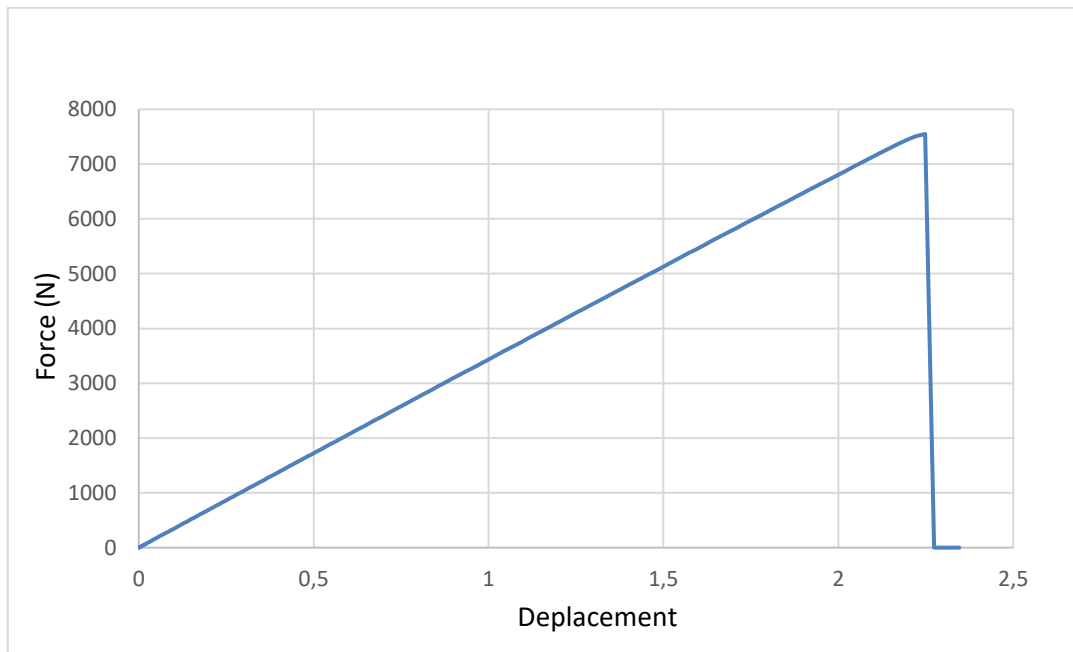


Figure 3.19 : Evolution force-déplacement.

La courbe montre une augmentation linéaire de la force en fonction du déplacement jusqu'à environ 2.3, indiquant une relation proportionnelle entre ces deux variables. Cependant, à ce point critique, une brusque chute de la force à zéro suggère un changement soudain dans le système, probablement dû à un relâchement ou à une rupture, entraînant une perte instantanée de résistance.

3.5. L'essai d'impact poids tombant

3.5.1. Procédé de modélisation de l'essai de poids tombant

L'essai de poids tombant modélisé sur Abaqus simule l'impact d'un objet lourd sur une surface ou un matériau pour évaluer sa résistance au choc. La géométrie comprend un impacteur défini par sa forme, sa masse et sa hauteur de chute, ainsi que la cible. Les conditions initiales spécifient la hauteur de chute et la vitesse initiale de la masse. De plus, les bords de l'éprouvette sont encastrés pour simuler des conditions de support appropriées.

L'éprouvette est rectangulaire dans cet essai de dimension 150 mm x 100 mm et d'épaisseur variable de 3 à 4mm. L'impacteur doit être hémisphérique de diamètre 50,4 mm avec une masse de 14 kg

3.5.2. Module PART

Dans cette étape :

- Sélectionnez *3D* dans **Modeling Space** pour chaque pièce.
- Choisissez *Rigid* pour l'impacteur afin de le rendre non déformable et *Deformable* pour la surface d'impact pour permettre les déformations durant l'impact.

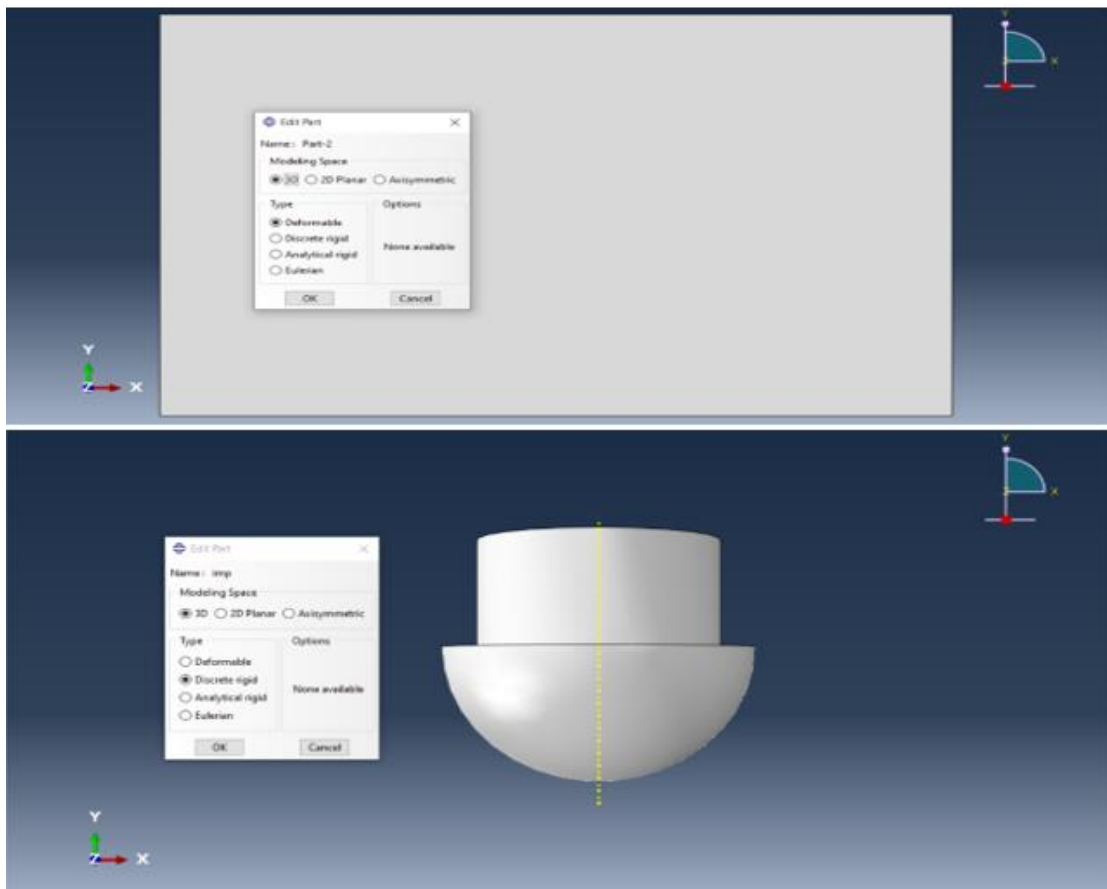


Figure 3.20 : Boîte de dialogue de création pour l'impacteur (option Rigid) et la surface d'impact (Deformable).

Les croquis 2D de chaque pièce, (**Figure 3.21**)(**Figure 3.22**), permettent de :

- Définir l'impacteur, modélisé comme un cylindre rigide de diamètre de 50 mm et hauteur de 45.5 mm.

- Définir la surface d'impact avec des dimensions adaptées pour recevoir l'impact. (100mmx150mm).

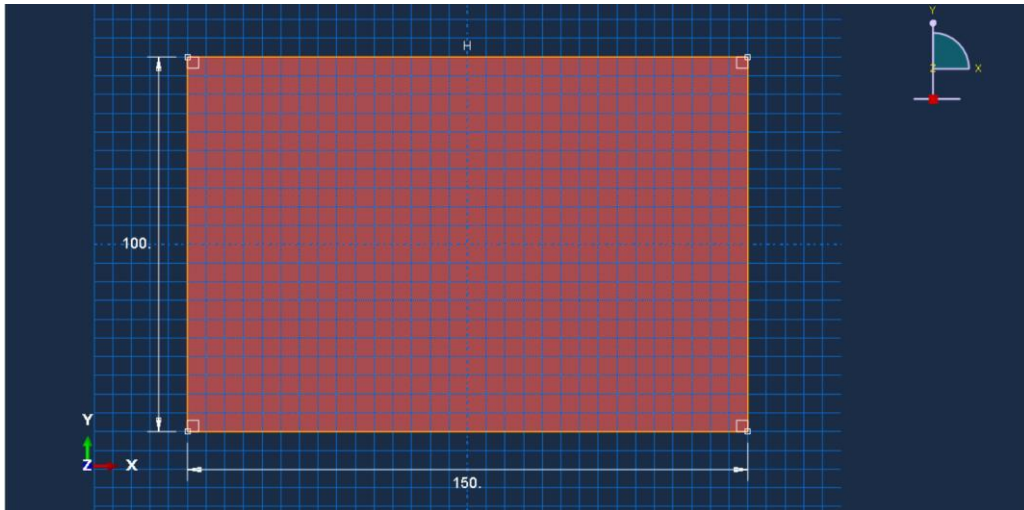


Figure 3.21: Croquis 2D de la surface d'impact déformable.

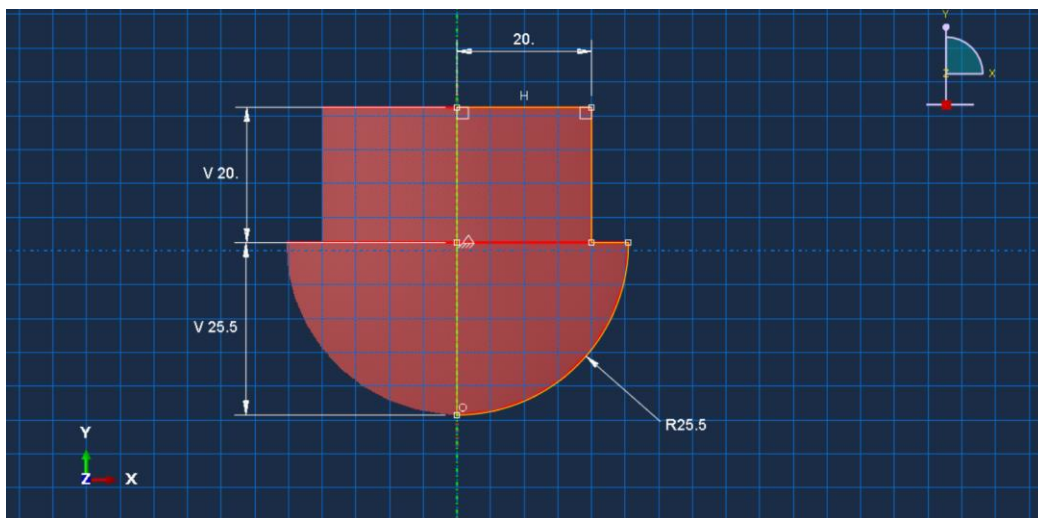


Figure 3.22 : Croquis 2D de l'impacteur rigide.

3.5.3. Le module ASSEMBLY

La masse tombante (impacteur) et la surface d'impact sont positionnées dans la configuration de l'essai de simulation.

1. **Positionnement** : La masse tombante est placée juste au-dessus de la surface d'impact, prête pour l'application de la charge.

2. **Alignement** : Les composants sont alignés pour garantir que l'impact se produit au centre de la surface d'impact.

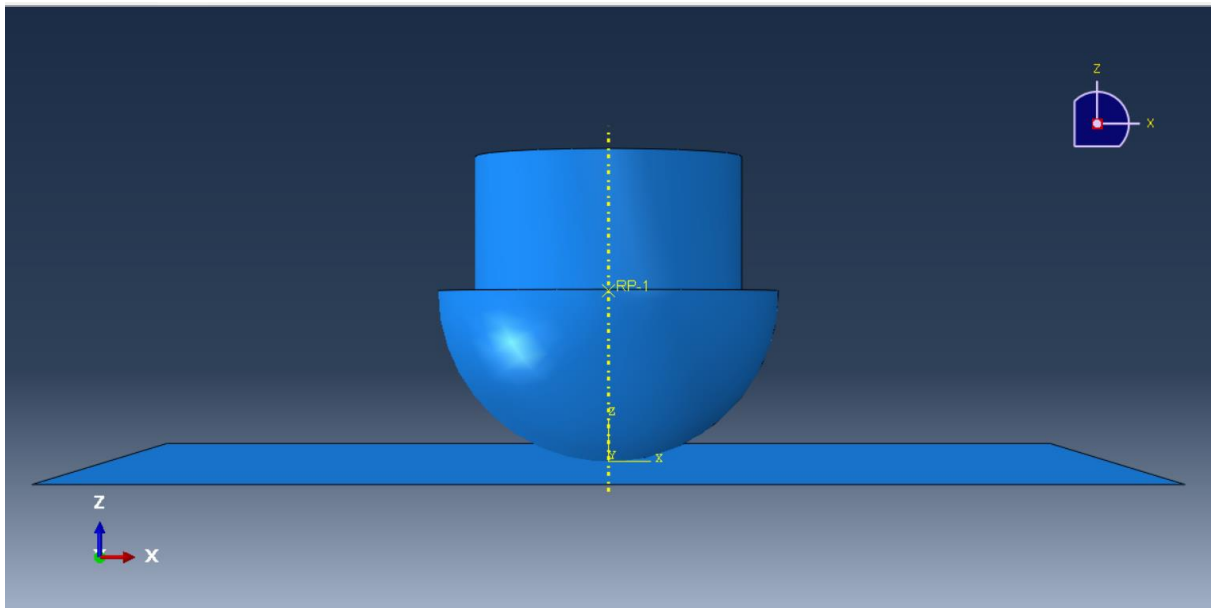


Figure 3.23 : Disposition de l'impacteur et de la surface dans l'assemblage, montrant la configuration avant l'impact.

3.5.4. Le module LOAD

Les charges et conditions aux limites sont appliquées pour simuler l'impact de la masse tombante sur la surface déformable. [22,23]

- Appliquez une charge à la masse tombante pour simuler l'effet de gravité.
- Fixez les bords de la surface d'impact pour qu'ils restent immobiles, créant ainsi un support adéquat lors de l'impact.

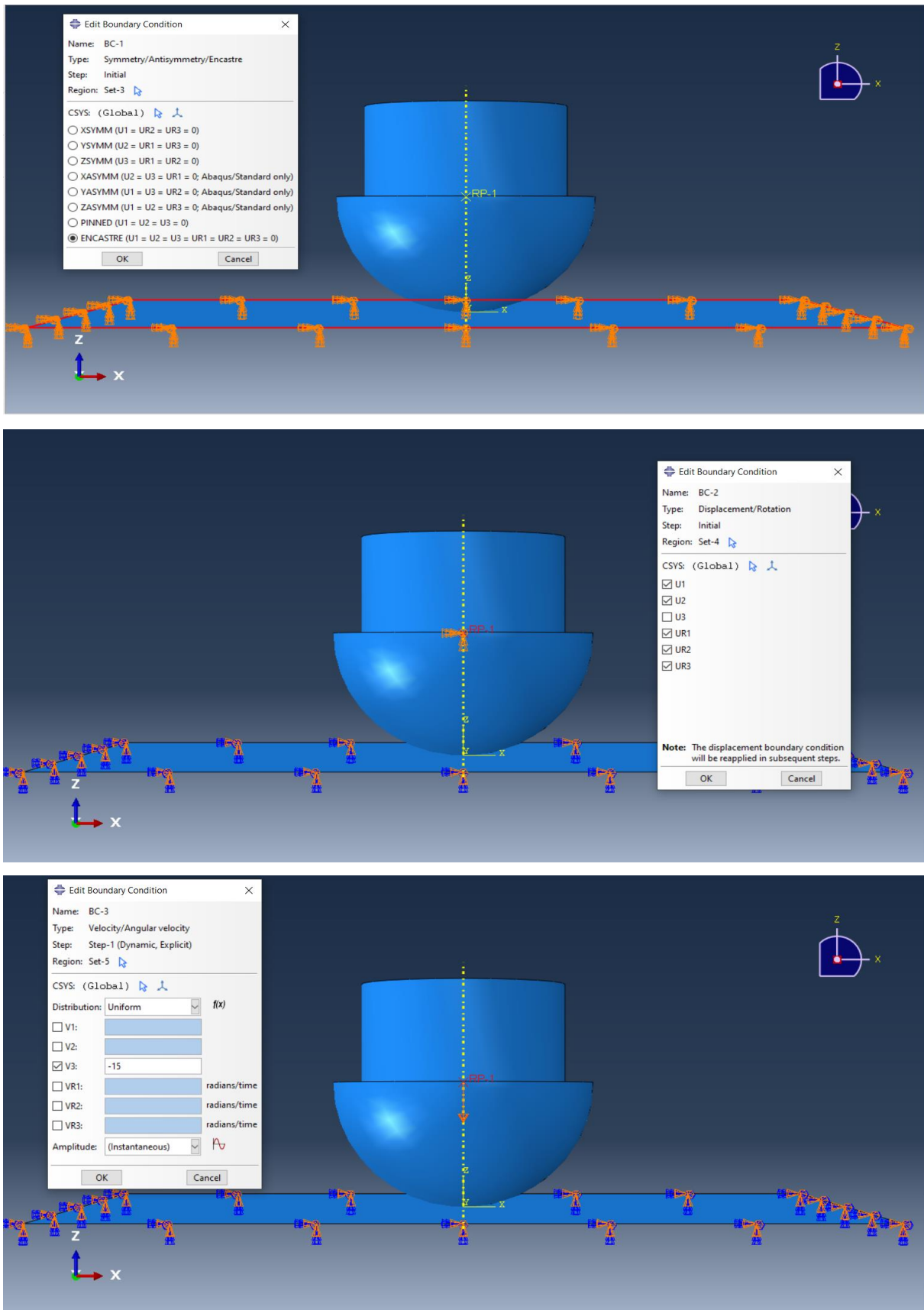


Figure 3.24 : Illustration des charges et des conditions aux limites appliquées sur la masse tombante et la surface.

3.5.5. Module MESH

Le module **MESH** permet de créer un maillage adapté pour chaque pièce.

- Utilisez un maillage dense dans la zone de contact de la surface d'impact pour améliorer la précision.
- Pour l'impacteur rigide, un maillage plus grossier est suffisant étant donné qu'il ne subit pas de déformation.

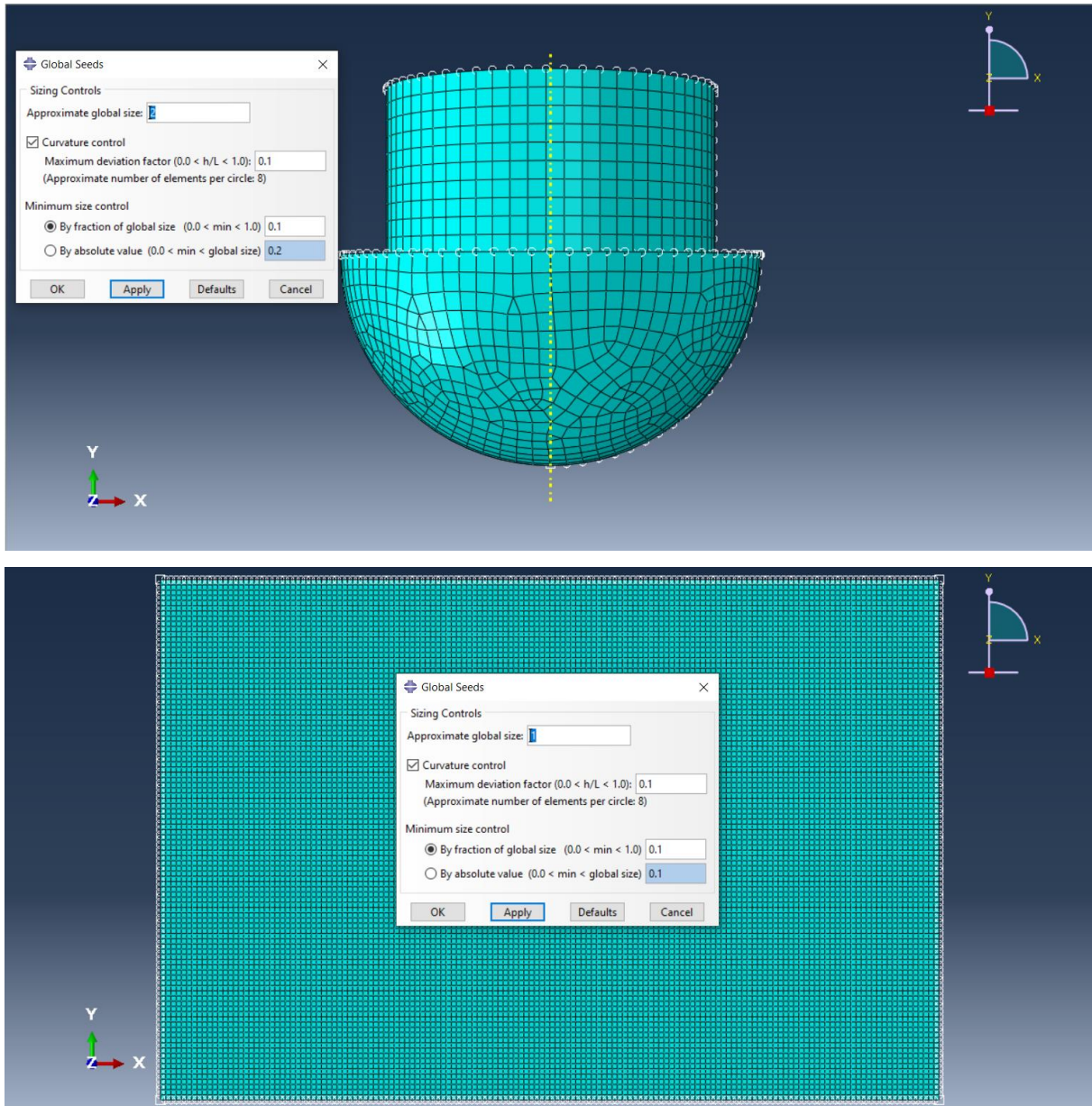


Figure 3.25 : Maillage sur l'éprouvette et l'impacteur dans le module MESH.

3.5.6. Module VISUALISATION

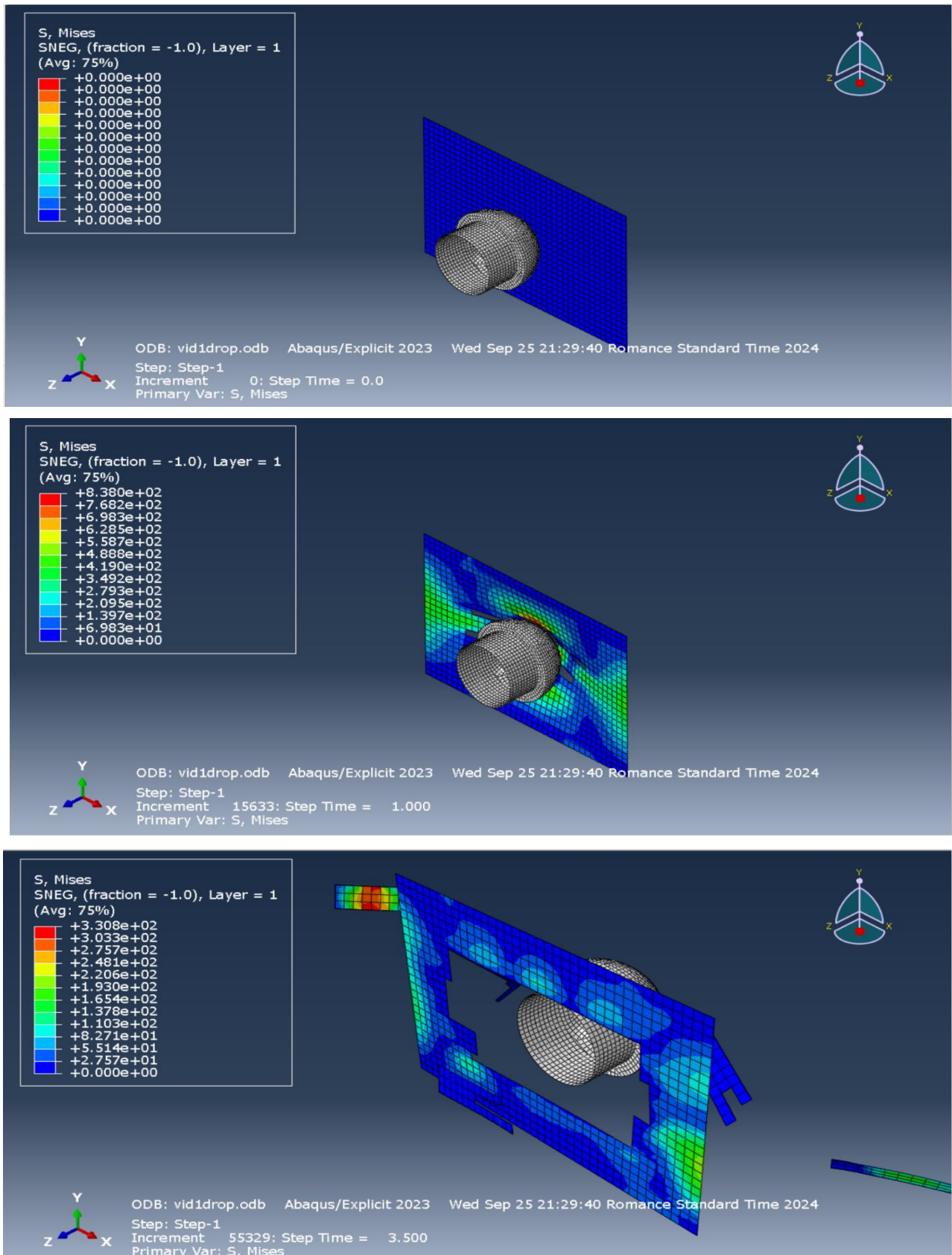


Figure 3.26 : Visualisation du choc subit par l'éprouvette en perspective.

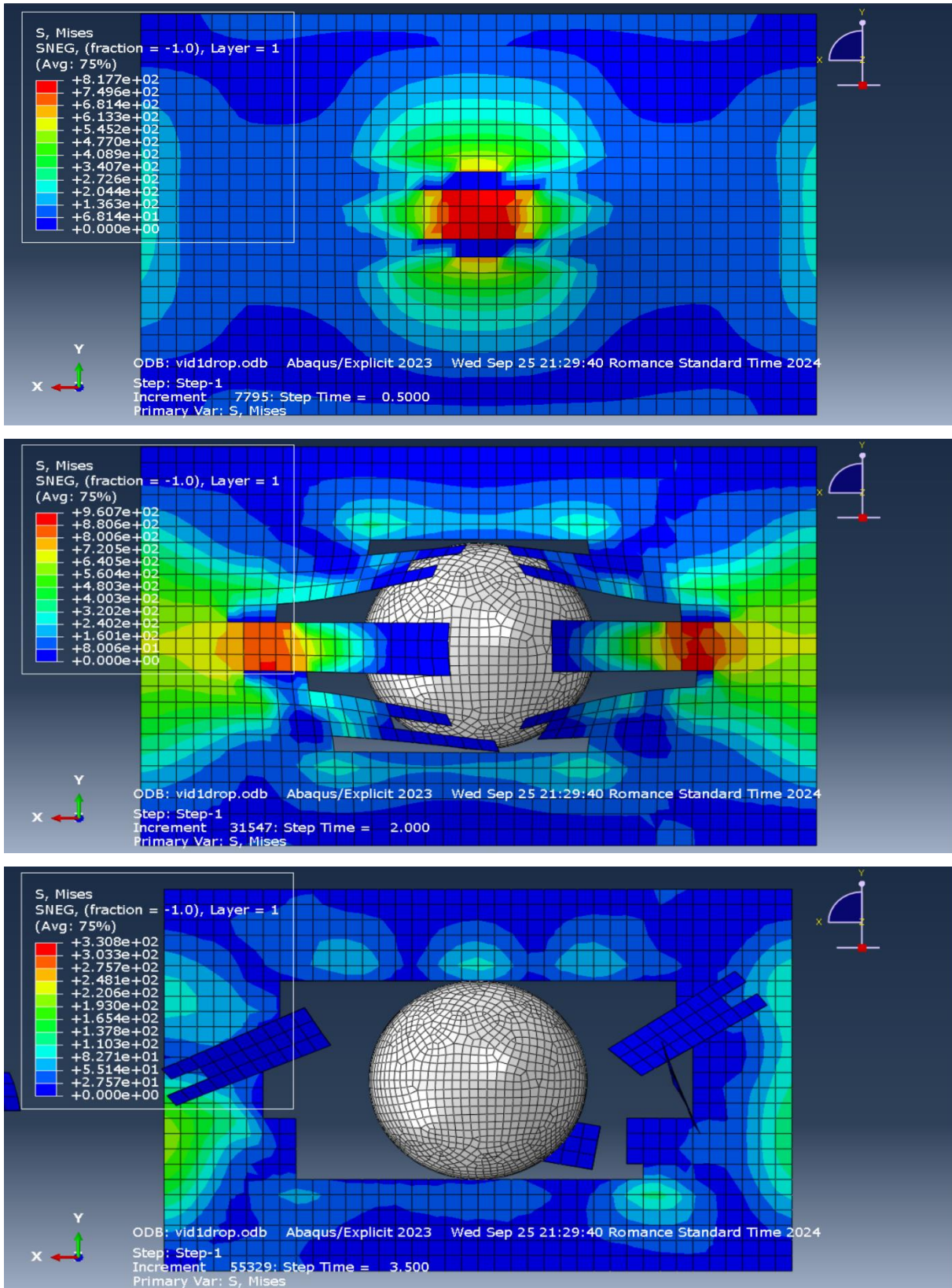


Figure 3.27 : Visualisation du choc subit par l'éprouvette en vue de face.

3.5.7. Résultats d'essai de masse tombante

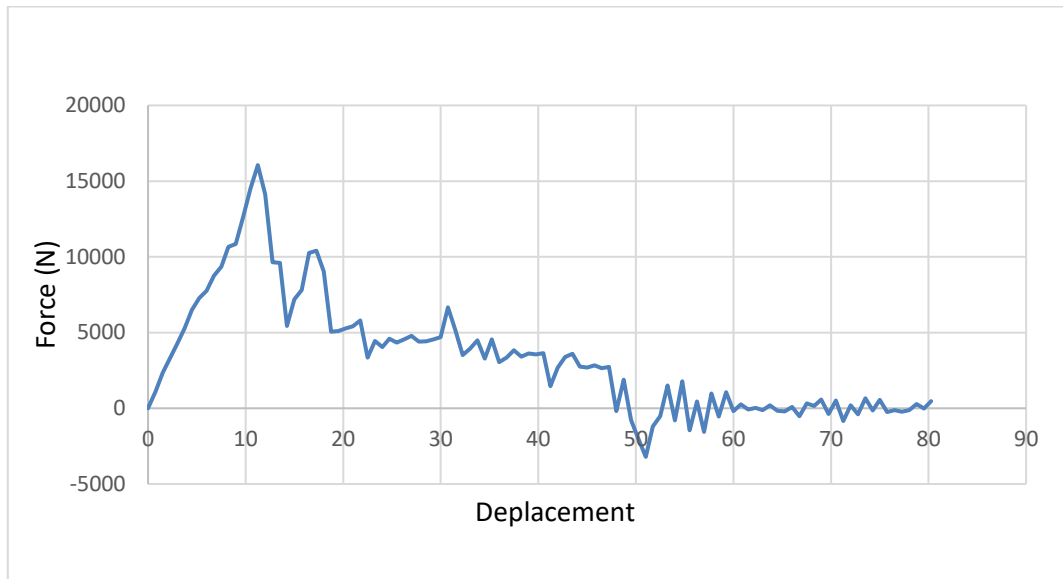


Figure 3.28 : Evolution force – déplacement.

Le graphique montre un essai de masse tombante où la force appliquée augmente. Cette phase de montée indique que le matériau résiste progressivement à la charge. Cependant, après avoir atteint ce point, une chute de la force à zéro est observée, suggérant que le matériau a atteint sa limite de résistance, provoquant une rupture soudaine et complète sous l'effet de l'impact.

3.6. Conclusion

En conclusion, les différents graphiques analysés révèlent un comportement classique des matériaux soumis à des essais mécaniques, incluant la traction, la flexion et l'impact par masse tombante. Dans chaque cas, le matériau suit d'abord une phase élastique, où la force et le déplacement augmentent de manière proportionnelle, indiquant que le système réagit de façon stable à la contrainte appliquée. À mesure que la charge augmente, des fluctuations apparaissent, suggérant des signes de faiblesse ou de microdéchirures internes. Ces fluctuations précèdent souvent une défaillance soudaine, marquée par une chute brutale de la force à zéro, indiquant une rupture complète du matériau. Ce comportement montre que les matériaux testés atteignent un point de rupture après avoir supporté une charge maximale, révélant ainsi leur limite de résistance. Ces essais de traction, flexion, et d'impact par masse tombante permettent d'évaluer les propriétés mécaniques des matériaux et de mieux anticiper leurs points de défaillance dans des applications pratiques.

Conclusion générale

Cette étude approfondie sur le comportement des matériaux stratifiés sous chargement dynamique a mis en lumière les caractéristiques distinctes des composites, notamment leur résistance et leur capacité à absorber l'énergie sous contraintes mécaniques. En examinant les réponses des stratifiés à travers des essais de traction, de flexion trois points et d'impact, les résultats obtenus montrent une progression proportionnelle de la force et du déplacement jusqu'à atteindre une limite de résistance. À cette phase, des fluctuations indiquent des fragilités structurelles, suivies d'une rupture subite du matériau. Ces phénomènes, observés également dans les essais d'impact, soulignent une absorption énergétique élevée et des mécanismes de fissuration avancés avant la rupture finale.

Les analyses théoriques et les simulations sur Abaqus ont validé les modèles prédictifs de comportement, en tenant compte de l'hétérogénéité et de l'anisotropie des matériaux. Les mécanismes de propagation de fissures et les modes de défaillance identifiés dans cette étude fournissent des perspectives essentielles pour l'utilisation sécurisée des composites stratifiés en ingénierie. Ce travail souligne ainsi l'importance de l'alliance entre la théorie, la simulation numérique et l'expérimentation dans la compréhension et l'optimisation des performances des composites sous sollicitations variées.

Références bibliographiques

- [1] Pierre JACQUINET, Utilisation des matériaux composites. Edition HERMES, Paris 1991.
- [2] Bathias, C. and C. Wolff, Matériaux composites. 2ème édition ed. 2005: Dunod.
- [3] B. Meghlaoui, M. Ould Ouali and S. Hocine. Effect of chemical treatment of Alfa natural fibers on the mechanical properties of polyethylene matrix composites. U.P.B. Sci. Bull., Series B (ISSN 1454-2331), Vol. 81(2), pp. 115-122, 2019. https://www.scientificbulletin.upb.ro/rev_docs_arhiva/rez660_633231.pdf
- [4] Béatrice LARGE -TOUMI Etude du comportement en fatigue de composite carbone époxyde : rôle de l'interface, Thèse de doctorat école centrale de LYON (1994).
- [5] Avignon, M., et al., Fabrication et usinage des matériaux composites à base de fibres de carbone—Éléments pour l'évaluation des risques sanitaires des travailleurs en France. Saisine n 2008, 2010.
- [6] L'industrie française des matériaux composites, Etude stratégique réalisée par pour le compte de la DiGITIP / SIM. Louis Berreur, Bertrand de Maillard Rév. 2 du 13 mai 2002 Stanislas Nösperger 17 décembre 2001.
- [7] Chretien, G., Organic Matrix Composites (Materiaux Composites a Matrice Organique). Technique et Documentation, 11, rue Lavoisier, F 75384 Paris, Cedex 08, France, 1986. 508, 1986.
- [8] Reyne, M., Technologie des composites Edition HERMES. 1990, Paris.
- [9] Berthelot, J.-M., Mécanique des matériaux et structures composites. Institut Supérieur des Matériaux et Mécaniques Avancés, 2010, 2013. 176
- [10] Callister, W.D., Science et génie des matériaux. 5ème édition ed. 2001: Modulo.
- [11] Gay, D., Matériaux composites. 4ème édition Hermès, revue et augmentée, pp21, p472. 1997, Paris.
- [12] Gornet, L., Généralités sur les matériaux composites. 2008.
- [13] Carma, M., Glossaire des matériaux composites. Centre d'Animation Régional en Matériaux Avances National Press, USA, 2006.
- [14] Dessarthe, A., H. Guyot, and M. Carayol, Techniques de fabrication de pièces mécaniques en plastique ou composite: guide. 1994: Centre technique des industries mécaniques.
- [15] Berbain, F and A. Chevalier, Mise en œuvre des composites. Techniques de l'ingénieur, traité Plastiques et Composites, A 3, 2007. 720.
- [16] Rouby, D., Comportement des composites à fibres longues et matrice flexible et tenace. Micromécanique des composites, 1999.

- [17] babay, A., et al., Selecting the optimal neural network architecture for predicting cotton yarn hairiness. *Journal of the Textile Institute*, 2005. 96(3): p. 185-192.
- [18] Alastair, F. Johnson and Josef Simon, Modeling fabric Reinforced Composites under Impact loads, in *EUROMECH 400:IMPACT AND DAMAGE TOLERANCE OF COMPOSITE materials and stuctures*. Imperial college of science technology & medicine, london ,1999.
- [19] Mr KACIMI, B., Contribution à l'etude du comportement aux chocs des composites à matrice organique, 2024.
- [20] M. Ould Ouali. Approche micromécanique de la rupture ductile dans les procédés de mise en forme des matériaux. Prise en compte de l'effet de forme des cavités. Thèse de doctorat de l'université de Reims Champagne-Ardenne. 20 avril 2007.
- [21] M. Ould Ouali. Relevance of incorporating cavity shape change in modelling the ductile failure of metals. *Mathematical Problems in Engineering*. Vol. (2018), Article ID 6454790, 9 pages, 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/6454790>
- [22] M. Zerouki, M. Ould Ouali and L. Benabou. Metallurgical phase transformation and behaviour of steels under impact loading. *Metallurgical and Materials Transactions A* (Springer), Vol. 51, pp. 252–262, 2020. <https://doi.org/10.1007/s11661-019-05527-z>
- [23] L. Benabou, T.A. Nguyen-Van, Q.B. Tao, V.N. Le, M. Ould Ouali and H. Nguyen-Xuan. Methodology for DIC-based evaluation of the fracture behaviour of solder materials under monotonic and creep loadings. *Engineering Fracture Mechanics* (Elsevier). Vol. 239, 2020, 107285. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2020.107285>

Annexe

Introduction

Abaqus, élaboré par Dassault Systèmes, est une suite exhaustive de logiciels d'ingénierie avancés. Dans ce chapitre on va avoir une forme de présentation dédiée sur ces différentes caractéristiques et fonctionnalités toute en passant par les différents domaines d'applications. Pour finir une conclusion générale sur les différents points.

Généralités sur le logiciel Abaqus

Ce logiciel basé sur la méthode des éléments finis, est capable de résoudre une large gamme de problèmes, allant des analyses simples et linéaires aux simulations complexes et non linéaires les plus exigeantes. Dotée d'une vaste bibliothèque d'éléments, Abaqus offre la possibilité de modéliser pratiquement toutes les formes géométriques imaginables. De plus, elle propose une gamme étendue de modèles de matériaux permettant de simuler avec précision le comportement de nombreux matériaux couramment utilisés en ingénierie, tels que les métaux, les polymères, les composites, les élastomères, le béton armé, les matériaux géotechniques, et bien d'autres encore.

Conçue comme un outil polyvalent de modélisation et d'analyse en ingénierie, Abaqus dépasse largement le domaine des problèmes structurels classiques, comme les contraintes et les déplacements. Elle est également capable de modéliser des phénomènes complexes tels que le transfert de chaleur, la diffusion de masse, la gestion thermique des composants électriques, l'acoustique, la mécanique des sols avec des analyses de contraintes-fluides dans les pores couplées, ainsi que l'analyse piézoélectrique.

Abaqus offre une variété de fonctionnalités notamment. Les systèmes comportant plusieurs composants sont modélisés en associant la géométrie de chaque composant aux modèles de matériaux appropriés et en définissant les interactions entre eux. Dans le cadre d'une analyse non linéaire, Abaqus sélectionne automatiquement des incréments de charge appropriés et des tolérances de convergence, les ajustant continuellement au cours de l'analyse pour garantir l'obtention d'une solution précise de manière efficace.

Fonctionnalités

1. Analyse linéaire et non linéaire :

- Abaqus permet de modéliser et de résoudre des problèmes d'analyse linéaire, où les relations entre les charges et les déformations sont considérées comme linéaires. Cela inclut les analyses statiques, où les charges sont constantes, ainsi que les analyses dynamiques qui prennent en compte les effets de la masse et de l'inertie.

- De plus, Abaqus offre la possibilité de modéliser des phénomènes non linéaires, tels que les grandes déformations, les comportements matériels non linéaires, les contacts, les grands déplacements, les contacts avec frottement, etc. Ces analyses sont souvent nécessaires pour obtenir des simulations plus réalistes et précises des structures et des matériaux.

2. Éléments finis variés :

- il propose une large gamme d'éléments finis pour modéliser diverses géométries et comportements matériels. Cette gamme comprend des éléments 1D (poutres, barres), des éléments 2D (coques, membranes), des éléments 3D (solides, tétraèdres, hexaèdres), ainsi que des éléments spécifiques pour modéliser les contacts, les joints, les interfaces, etc.

- Les ingénieurs peuvent sélectionner les éléments les plus adaptés à leur application pour obtenir des résultats précis et efficaces.

3. Matériaux avancés :

- Ce logiciel propose une variété de modèles de comportement des matériaux pour représenter différents types de matériaux et de comportements physiques. Ces modèles incluent des modèles linéaires (élastiques), non linéaires (hyperélastiques, viscoélastiques, plastiques), ainsi que des modèles spécifiques pour les matériaux composites, les matériaux thermo-sensibles, etc.

- Les ingénieurs peuvent choisir le modèle le mieux adapté au matériau qu'ils simulent pour capturer avec précision son comportement dans différentes conditions de chargement.

4. Interaction fluide-structure :

- Abaqus permet la modélisation des interactions fluides-structures, où les déformations des structures et les écoulements de fluides sont couplés. Cela inclut la simulation

des vibrations induites par le fluide, les déformations des structures sous charges fluides, l'analyse des forces hydrodynamiques, etc.

- Ces simulations sont utilisées dans de nombreux domaines, tels que l'aérospatiale, l'automobile, la construction navale, pour évaluer les performances des structures immergées ou exposées à des fluides.

5. Charges thermiques :

- il prend en charge la modélisation des phénomènes thermiques tels que la conduction de chaleur à travers les matériaux, la convection thermique avec l'écoulement de fluides, le rayonnement thermique entre surfaces, etc.

- Ces analyses thermiques sont souvent couplées à des analyses mécaniques pour étudier les effets thermomécaniques dans les structures soumises à des gradients de température.

6. Couplages multiphysiques :

- Ce logiciel permet la modélisation des phénomènes multiphysiques où plusieurs phénomènes physiques sont couplés, tels que les couplages thermomécaniques, thermo-hydrauliques, électrothermiques, acoustiques-structurels, etc.

- Ces simulations permettent de modéliser des systèmes complexes où les interactions entre différents phénomènes physiques sont significatives.

7. Optimisation de conception :

- Abaqus offre des outils avancés d'optimisation de conception permettant d'automatiser le processus d'optimisation pour améliorer les performances des produits et des structures.

- Ces outils permettent aux ingénieurs d'explorer efficacement l'espace de conception pour trouver des solutions optimales répondant à des critères prédéfinis, tels que la réduction du poids, l'optimisation de la rigidité, la minimisation des contraintes, etc.

8. Simulation de procédés de fabrication :

- il permet la simulation des procédés de fabrication tels que le formage, le moulage, le soudage, l'usinage, etc., afin d'optimiser les procédés et de prédire les déformations et les contraintes induites.

- Ces simulations permettent aux ingénieurs de concevoir des processus de fabrication efficaces et fiables tout en minimisant les coûts et les temps de développement.

9. Analyse de la durée de vie :

- Ce logiciel permet la prédiction de la durée de vie des composants et des structures en utilisant des modèles de fatigue, de rupture, de fluage, etc.

- Ces analyses sont essentielles pour évaluer la sécurité et la fiabilité des produits dans des conditions de fonctionnement réelles et pour estimer leur durée de vie sous des charges variables.

10. Post-traitement avancé :

- Le logiciel offre une gamme complète d'outils de post-traitement pour visualiser, analyser et interpréter les résultats de simulation, y compris la génération de graphiques, de contours, de courbes de réponse, d'animations, etc.

- Ces outils permettent aux ingénieurs de communiquer efficacement les résultats de simulation, de prendre des décisions éclairées et d'optimiser les performances des produits et des systèmes.

Fonctionnement

1. Le fonctionnement d'Abaqus s'articule autour de plusieurs étapes essentielles qui permettent aux ingénieurs d'effectuer des simulations précises et détaillées. Voici un aperçu détaillé de ces étapes :

2. Modélisation du système : Tout commence par la création d'un modèle numérique du système à étudier. Les ingénieurs utilisent l'interface Abaqus/CAE pour définir la géométrie du système, choisir les matériaux appropriés, ainsi que

spécifier les conditions aux limites et les charges appliquées. Cette phase initiale revêt une importance cruciale car elle établit les bases de la simulation et permet de représenter fidèlement le comportement du système réel.

3. **Maillage** : Une fois la géométrie du système définie, Abaqus procède à la division de cette géométrie en une multitude d'éléments finis, créant ainsi un maillage. Ce maillage discrétise le système en éléments plus petits, permettant ainsi de résoudre les équations de comportement de manière efficace. Le processus de maillage vise à obtenir une représentation précise de la géométrie du système tout en minimisant les erreurs numériques potentielles.
4. **Définition des matériaux et des propriétés** : Les ingénieurs définissent les propriétés des matériaux utilisés dans le modèle, telles que la rigidité, la densité, la conductivité thermique, etc. Abaqus offre une bibliothèque de matériaux prédéfinis mais permet également la définition de matériaux personnalisés pour mieux correspondre aux caractéristiques spécifiques du système étudié. Cette étape garantit une représentation précise du comportement des matériaux dans la simulation.
5. **Application des conditions aux limites et des charges** : Les conditions aux limites, telles que les fixations et les forces appliquées, ainsi que les charges externes, sont définies pour reproduire les conditions réelles du système. Cette étape permet de simuler de manière réaliste les interactions entre le système étudié et son environnement, ce qui est essentiel pour obtenir des résultats précis et significatifs.
6. **Résolution du système** : Abaqus utilise des méthodes numériques avancées pour résoudre les équations du modèle. Pour les problèmes linéaires, des techniques d'itération sont utilisées pour obtenir une solution convergente, tandis que pour les problèmes non linéaires, des méthodes itératives plus complexes sont

employées. Cette phase de résolution est cruciale pour obtenir des résultats fiables et précis qui reflètent le comportement réel du système.

7. Post-traitement : Une fois la simulation terminée, les résultats sont analysés à l'aide d'outils de post-traitement intégrés à Abaqus. Les ingénieurs peuvent visualiser les déformations, les contraintes, les déplacements, etc., sous forme de graphiques, de contours ou d'animations pour mieux comprendre le comportement du système. Cette étape permet une évaluation approfondie des performances du système et une identification des zones critiques nécessitant une attention particulière.

Domaines d'application d'Abaqus

Les domaines d'application d'Abaqus sont vastes et englobent de nombreux aspects de l'ingénierie. Voici quelques exemples des principaux domaines dans lesquels Abaqus trouve une utilisation significative :

1. Mécanique des structures : Abaqus est largement adopté pour simuler le comportement des structures sous diverses charges, qu'elles soient statiques, dynamiques, thermiques ou sismiques. Cette application inclut l'analyse des contraintes, des déformations, des déplacements, des vibrations, ainsi que la prédiction de la durée de vie des composants. Il est utilisé dans des domaines allant de l'aviation à la construction, en passant par l'automobile et les infrastructures.

2. Dynamique des fluides : Dans ce domaine, Abaqus est utilisé pour modéliser le comportement des fluides et des structures immergées. Il permet de simuler les écoulements d'air autour des avions, les écoulements de fluides dans les tuyaux, ainsi que les interactions fluide-structure dans les systèmes hydrauliques. Ces simulations sont essentielles pour concevoir des systèmes efficaces et fiables dans des secteurs tels que l'aérospatiale, l'énergie et l'industrie maritime.

3. Thermique : Abaqus est également un outil précieux pour modéliser les phénomènes thermiques tels que la conduction, la convection et le rayonnement thermique. Il permet la simulation de la distribution de la température dans les composants électroniques, les processus de soudage, ainsi que les transferts de chaleur dans les systèmes de refroidissement. Ces simulations sont cruciales pour garantir des performances optimales et une fiabilité à long terme dans diverses applications industrielles.

4. Électromagnétisme : Dans ce domaine, Abaqus est utilisé pour simuler le comportement électromagnétique des systèmes, tels que les dispositifs électroniques, les antennes, ainsi que les systèmes de transmission d'énergie. Il permet de prédire les champs électromagnétiques, les pertes d'énergie, ainsi que les interactions entre les champs électromagnétiques et les structures mécaniques. Ces simulations sont utilisées dans des domaines variés, de l'électronique de pointe à la télécommunication, en passant par les transports et l'énergie.

5. Biomécanique : Abaqus est également un outil puissant pour modéliser le comportement mécanique des tissus biologiques, des implants médicaux et des dispositifs médicaux. Il est largement utilisé pour l'analyse du stress et de la déformation dans les os, les ligaments, les prothèses, ainsi que pour la conception et l'optimisation des implants orthopédiques et des dispositifs de fixation. Ces simulations sont cruciales pour améliorer les traitements médicaux et pour développer des solutions de santé innovantes.

6. Fabrication et procédés : Abaqus est également utilisé pour simuler les processus de fabrication tels que le formage, le moulage, le soudage, l'usinage, etc. Ces simulations permettent d'optimiser les procédés de fabrication, de prédire les déformations et les contraintes induites par ces procédés, ainsi que d'assurer la qualité et la fiabilité des produits finis. Ces applications sont essentielles dans des secteurs tels que l'industrie manufacturière, l'aérospatiale et l'automobile, où des procédés de fabrication efficaces et fiables sont indispensables pour rester compétitif sur le marché mondial.

Conclusion

Abaqus transcende le simple statut d'outil de simulation pour devenir un partenaire inestimable des ingénieurs, leur permettant de relever les défis les plus complexes de l'ingénierie contemporaine et de réaliser des progrès significatifs dans leurs projets de conception et de développement.

Grâce à ces fonctionnalités avancées, il se positionne comme un outil puissant et polyvalent pour la simulation d'ingénierie, utilisé dans de nombreux secteurs industriels pour concevoir, optimiser et valider une large gamme de produits et de systèmes.

Abaqus fait aussi l'objet de mises à jour régulières, intégrant de nouvelles fonctionnalités et améliorations afin de répondre aux évolutions constantes des besoins de l'industrie. Les utilisateurs bénéficient également d'un support technique de qualité ainsi que de ressources de formation pour exploiter au mieux le potentiel du logiciel.

Résumé

Ce mémoire porte sur l'étude du comportement mécanique des matériaux composites stratifiés soumis à des charges dynamiques. À travers des essais de flexion trois points, de traction et d'impact, ainsi que des simulations numériques sur Abaqus, cette recherche vise à comprendre les mécanismes de réponse de ces matériaux, notamment leur capacité à résister aux contraintes et à absorber l'énergie avant la rupture. Les résultats obtenus mettent en évidence la forte résistance des composites et leur aptitude à dissiper l'énergie, bien qu'ils présentent des fragilités face aux charges extrêmes, menant à des phénomènes de fissuration et de délaminage. Les simulations ont permis de confirmer et d'affiner les modèles théoriques, offrant des pistes d'amélioration pour les applications industrielles. Ce travail démontre l'importance des composites dans les secteurs nécessitant des matériaux légers et robustes, tout en soulignant la nécessité d'optimisations pour renforcer leur durabilité sous contraintes dynamiques.

Mots clés : stratifiés, Abaqus, chargement dynamique, matériaux composites, propriétés mécaniques.

Abstract

This thesis focuses on the study of the mechanical behavior of laminated composite materials under dynamic loads. Through three-point bending, tensile, and impact tests, along with numerical simulations on Abaqus, this research aims to understand the response mechanisms of these materials, particularly their capacity to withstand stress and absorb energy prior to failure. The findings highlight the strong resistance of composites and their ability to dissipate energy, although they exhibit weaknesses under extreme loads, leading to phenomena such as cracking and delamination. The simulations have helped confirm and refine theoretical models, offering pathways for improvement in industrial applications. This work demonstrates the importance of composites in sectors that require lightweight and robust materials, while also underscoring the need for optimizations to enhance their durability under dynamic constraints.

Keywords: laminates, Abaqus, dynamic loading, composite materials, mechanical properties.