

Université Badji Mokhtar - Annaba
Badji Mokhtar – Annaba UNIVERSITY



جامعة باجي مختار – عنابة

Faculté : de technologie

Département : Génie Mécanique

Domaine : Sciences et technologie

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Génie des Matériaux

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème:

Modélisation et simulation du comportement mécanique des composites à matrices thermoplastiques

Présenté par : MERADI Mohamed Reda

Encadrant : RAHMAOUI Zakaria

Grade : Pr

Université : Badji Mokhtar Annaba

Jury de Soutenance :

RAHMAOUI Zakaria	professeur	UBM Annaba	Encadrant
CHAOUI Kamel	professeur	UBM Annaba	Examinateur
HAMADACHE Hamid	professeur	UBM Annaba	Examinateur

Année Universitaire : 2024/2025

Remerciements

Ce travail a été effectué au sein de Département de génie mécanique de l'université Badji Mokhtar Annaba. Mes remerciements avant tout à **ALLAH**, qui m'a donné des parents qui ont cru en moi, m'ont fait confiance et ont été la lumière qui a éclairé mon chemin, et qui m'a donné la volonté et la patience pendant toutes ces années pour que je puisse atteindre mes objectifs **Elhamdoulilah**.

Je voudrais exprimer toute ma reconnaissance à **Monsieur RAHMAOUI**, Docteur à l'Université Badji Mokhtar, Annaba, pour son encadrement, ces conseils, sa disponibilité et son aide. Il reçoit ici l'expression de mon profond respect et de toute ma reconnaissance.

Monsieur BOUGOFFA, professeur à l'Université Badji Mokhtar, Annaba, est grandement remercié pour les nombreuses discussions qui ont contribué à la réussite de ce mémoire. Pour son aide inestimable, sa patience et son encouragement.

Je tiens à remercier également les membres du Jury. Plus particulièrement, **Monsieur HAMADACHE** et **Monsieur CHAOUI**, Professeur de l'université Badji Mokhtar, Annaba, d'avoir présidé ce Jury, je lui exprime mon profond respect et mes vifs remerciements

.Mes remerciements vont également : à l'ensemble de mes enseignants de l'université Badji Mokhtar, Annaba (département mécanique), et à leur staff administratif, en particulièrement **Monsieur HADIBI**.

Mes plus sincères remerciements sont réservés aux personnes les plus importantes de mon univers Ma Famille.

Dédicaces

A ABDELKRIM mon cher père et à mon adorable mère ;

A mes sœurs ;

A tous ceux qui ont besoin de ce modeste travail ;

En espérant être à la hauteur de leurs attentes.

Résumé

Ce travail modélise le comportement mécanique d'un composite thermoplastique PA12/fullerène à l'aide de la méthode des éléments finis sous Abaqus. Un volume élémentaire représentatif est simulé en traction. Les résultats montrent de bonnes performances mécaniques, confirmant le potentiel de ce matériau pour des applications industrielles.

Abstract

This work models the mechanical behavior of a PA12/fullerene thermoplastic composite using finite element analysis in Abaqus. A representative volume element is simulated under tensile loading. Results show good mechanical performance, highlighting the material's potential for industrial applications.

ملخص

يهدف هذا العمل إلى نمذجة السلوك الميكانيكي لمركب حراري من نوع PA12 مدعم بجزيئات كروية من C60 ، باستخدام طريقة العناصر المحدودة عبر برنامج Abaqus. تم محاكاة حجم تمثيلي للمادة تحت اختبار الشد، وأظهرت النتائج أداءً ميكانيكياً جيداً، مما يؤكد إمكانيات هذا المركب في التطبيقات الصناعية.

Listes des figures

FIGURE 1: MATERIAU COMPOSITE. (1)	10
FIGURE 2 : LES DIFFERENTS TYPES DE RENFORT DE BASE. (3).....	11
FIGURE 3: DIFFERENTES FORMES DE RENFORTS CONTINUS. (4).....	12
FIGURE 4: CLASSIFICATION DES MATRICES. (5).....	14
FIGURE 5: PRINCIPE DU MOULAGE AU CONTACT. (1).....	16
FIGURE 6: PRINCIPE DU MOULAGE PAR PROJECTION SIMULTANEE. (1)	17
FIGURE 7: PRINCIPE DE MOULAGE PAR INFUSION. (1)	18
FIGURE 8: PRINCIPE DU MOULAGE PAR INJECTION DE RESINE. (1).....	18
FIGURE 9: PRINCIPE DE MOULAGE PAR CENTRIFUGATION. (1)	19
FIGURE 10: REPARTITION DES POLYMERES UTILISES DANS LES VEHICULES : LES THERMOPLASTIQUES PP,PE, PES, PA SONT LES PLUS UTILISES. (10)	20
FIGURE 11: FIGURE REPRESENTATIVE DU COMPORTEMENT DU TRACTION. (11)	22
FIGURE 12: FIGURE ILLUSTRATIVE SUR LE COMPORTEMENT EN FLEXION ET EN CISAILLEMENT. (12).....	23
FIGURE 13: FIGURE ILLUSTRATIVE SUR RESISTANCE AUX CHOCS. (14)	24
FIGURE 14: SOLUTION BIDIMENSIONNELLE D'UNE EQUATION MAGNETOSTATIQUE OBTENUE PAR ELEMENTS FINIS (LES LIGNES DONNENT LA DIRECTION DU CHAMP ET LA COULEUR SON INTENSITE).....	26
<i>FIGURE 15: FIGURE PAR ABAQUS.....</i>	28
<i>FIGURE 16: FIGURE PAR ABAQUS.....</i>	28
FIGURE 17: GRANULES DE POLYAMIDE-12 (PA-12) SOUS FORME BRUTE. (20)	29
FIGURE 18: LES ALLOTROPIES DE CARBONE : A: GRAPHENE B: GRAPHITE C: NANOTUBE DE CARBONE D:FULLERENE.....	30
FIGURE 19: FIGURE REPRESENTATIVE DE VOLUME ELEMENTAIRE.	31
FIGURE 20: MODELISATION DU VOLUME ÉLEMENTAIRE REPRESENTATIF (VER) POUR MODELE 1.....	32
FIGURE 21: MODELISATION DU VOLUME ÉLEMENTAIRE REPRESENTATIF (VER) POUR MODELE 2.....	33
FIGURE 22: DEFINITION DES PROPRIETES MECANIQUES DU RENFORT (SPHERE FULLERENE). ..	34
FIGURE 23: DEFINITION DES PROPRIETES MECANIQUES DE MATRICE (PA12).....	34
FIGURE 24: CONDITIONS AUX LIMITES AU NIVEAU SURFACE XBACKROLLER. (FIXATION U1)..	35
FIGURE 25: CONDITIONS AUX LIMITES AU NIVEAU SURFACE ZBACKROLLER. (FIXATION U3)..	35
FIGURE 26: CONDITIONS AUX LIMITES AU NIVEAU SURFACE YBASE. (FIXATION U2)	36

FIGURE 27: CONDITIONS AUX LIMITES FORCE DE TRACTION AU NIVEAU POINT DE REFERENCE RP. ($U_1=3\mu\text{M}$).....	36
FIGURE 28: MAILLAGE DU MODELE ELEMENT FINI DE L'EPROUVETTE MATRICE ET RENFORTS (PA12/C60).....	37
FIGURE 29: TYPE DE MAILLAGE UTILISE.....	38
FIGURE 30:PRESENTATION DES CONTRAINTES POUR MODELE 1.....	40
FIGURE 31: PRESENTATION DES CONTRAINTES POUR MODELE 2.....	40
FIGURE 32: PRESENTATION DES CONTRAINTES POUR MATRICE.....	41
FIGURE 33: PRESENTATION DE DEFORMATION POUR MODELE 1.....	41
FIGURE 34: PRESENTATION DE DEFORMATION POUR MODELE 2.....	42
FIGURE 35: PRESENTATION DE DEFORMATION POUR MATRICE.....	42
FIGURE 36: PRESENTATION DE DEPLACEMENT POUR MODELE 1.....	43
FIGURE 37: PRESENTATION DE DEPLACEMENT POUR MODELE 2.....	43
FIGURE 38: PRESENTATION DE DEPLACEMENT POUR MATRICE.....	44

Liste des tableaux

TABEAU 1: COMPARAISON DES RESULTATS.....	44
--	----

Sommaire

REMERCIEMENTS.....	1
DEDICACES	2
RESUME	3
LISTES DES FIGURES	4
LISTE DES TABLEAUX.....	5
SOMMAIRE.....	6
INTRODUCTION GENERALE.....	8
CHAPITRE I : ÉTAT DE L’ART SUR LES COMPOSITES A MATRICE THERMOPLASTIQUE.....	9
1. MATERIAUX COMPOSITES.....	10
1.1. Définition.....	10
1.2. Composition	10
1.2.1. Le renfort.....	10
1.2.1.1. Classification de renfort.....	11
1.2.1.2. Les formes de fibres.....	11
1.2.1.2.1. Renfort en fibres discontinues :	11
1.2.1.2.2. Renfort continu :	12
1.2.2. Les charges et les additifs.....	12
1.2.2.1. Les charges	12
1.2.2.2. Les additifs :	13
1.2.3. La matrice.....	13
1.2.3.1. Classification des matrices	14

1.2.3.1.1. Les matrices thermodurcissables	15
1.2.3.1.2. Les matrices thermoplastiques.....	15
1.2.3.1.3. Les matrices métalliques	15
1.2.3.1.4. Matrices Céramiques :	15
1.3. Méthodes d'élaboration des composites.....	16
1.3.1. Moulage au contact	16
1.3.2. Moulage par projection simultanée :	16
1.3.3. Moulage sous vide.....	17
1.3.4. Moulage par projection de résine	18
1.3.5. Moulage par centrifugation	19
1.4. Comportement mécanique des matrices thermoplastiques.....	19
CHAPITRE II : METHODOLOGIE DE SIMULATION NUMERIQUE.....	25
2.1. Choix de la méthode : éléments finis (FEM).....	26
2.2. Présentation du logiciel utilisé : Abaqus	28
2.3. Définition du modèle.....	28
2.3.1. Le composite étudié.....	28
2.3.1.1. Propriétés de la matrice	29
2.3.1.2. Propriétés du renfort (Le fullerène)	29
2.3.1.3. Pourcentages volumiques	30
2.4. Paramètres de simulation	33
2.4.1. Propriétés des matériaux	33
2.4.2. Conditions aux limites et chargement	34
2.4.3. Module MESH	37
CHAPITRE III : RESULTATS ET ANALYSES.....	39
3.1. Résultats obtenus par simulation.....	40
3.2. Comparaison des résultats	44
CONCLUSION GENERALE	46
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	47

Introduction générale

Les matériaux composites occupent aujourd'hui une place stratégique dans des domaines variés tels que l'aéronautique, l'automobile, le génie civil ou encore le biomédical. Leur succès s'explique par la synergie qu'ils offrent entre légèreté, propriétés mécaniques élevées, adaptabilité et, dans certains cas, recyclabilité. Les composites à matrice thermoplastique, en particulier, présentent l'avantage d'une mise en forme aisée à chaud, d'une bonne résistance à la fatigue et d'un potentiel de recyclage accru par rapport aux matrices thermodurcissables. (1)

Cependant, la caractérisation expérimentale de leur comportement mécanique reste limitée par des coûts élevés, des délais importants et une difficulté à reproduire certaines conditions extrêmes. Face à ces limites, la simulation numérique, notamment via la méthode des éléments finis, s'impose comme une approche efficace et complémentaire pour prédire et optimiser les performances de ces matériaux complexes.

Ce mémoire vise à modéliser le comportement mécanique d'un composite thermoplastique à matrice de polyamide 12 (PA12), renforcé par des particules sphériques de fullerène C60. La démarche adoptée repose sur une approche multi-échelle, combinant une revue bibliographique approfondie, une modélisation théorique, une simulation numérique sous Abaqus, et une analyse des résultats obtenus. Ce travail s'articule en trois chapitres principaux : l'état de l'art sur les matériaux composites thermoplastiques, la méthodologie de simulation numérique, et enfin, les résultats issus des simulations et leur interprétation.

CHAPITRE I : État de l'art sur les composites à matrice thermoplastique

1. Matériaux composites

1.1. Définition

Un matériau composite est constitué de l'assemblage de deux matériaux de natures différentes, se complétant et permettant d'aboutir à un matériau dont l'ensemble des performances est supérieur à celui des composants pris séparément. (1)

1.2. Composition

En général les constituants principaux d'un matériau composite sont :

- ✚ La matrice
- ✚ Le renfort
- ✚ Les charges et les additifs

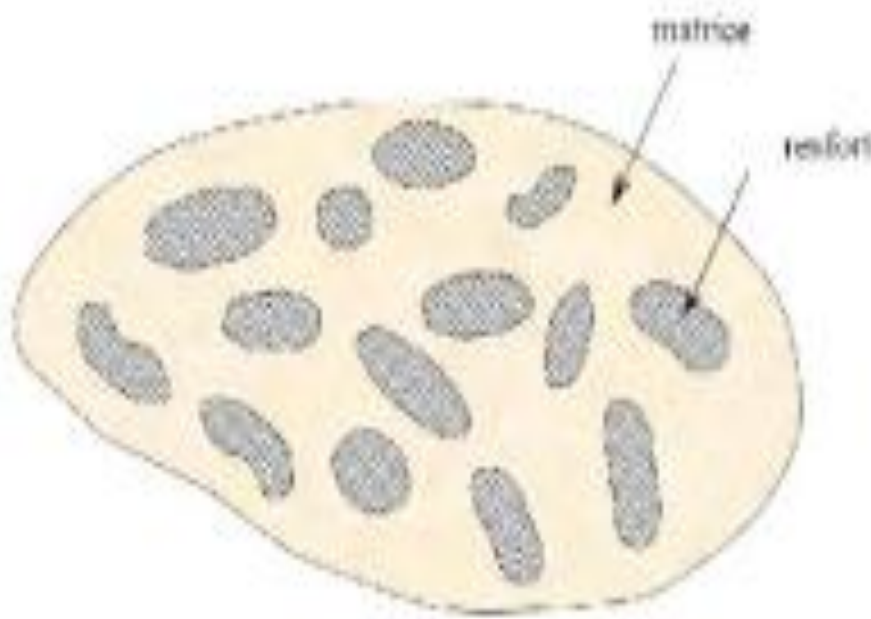


Figure 1: Matériau composite. (1)

1.2.1. Le renfort

C'est le principal porteur constitutif dans le composite (forme, volume). Il confère aux composites leurs caractéristiques mécaniques : rigidité, résistance à la rupture, dureté.

Les renforts peuvent être d'origine minérale (verre, bore, céramique...) ou organique (carbone ou aramide). Les plus employées sont les fibres de verre. Les fibres de carbone sont privilégiées. (2)

1.2.1.1. Classification de renfort

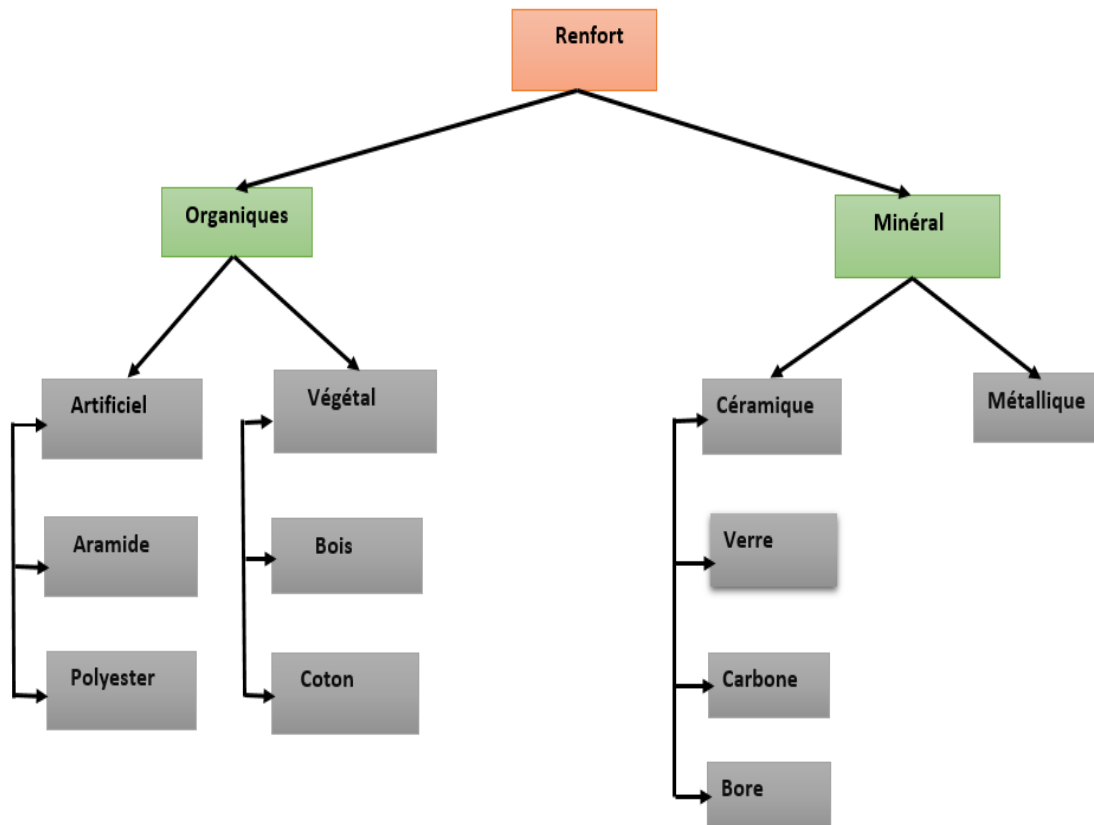


Figure 2 : Les différents types de renfort de base. (3)

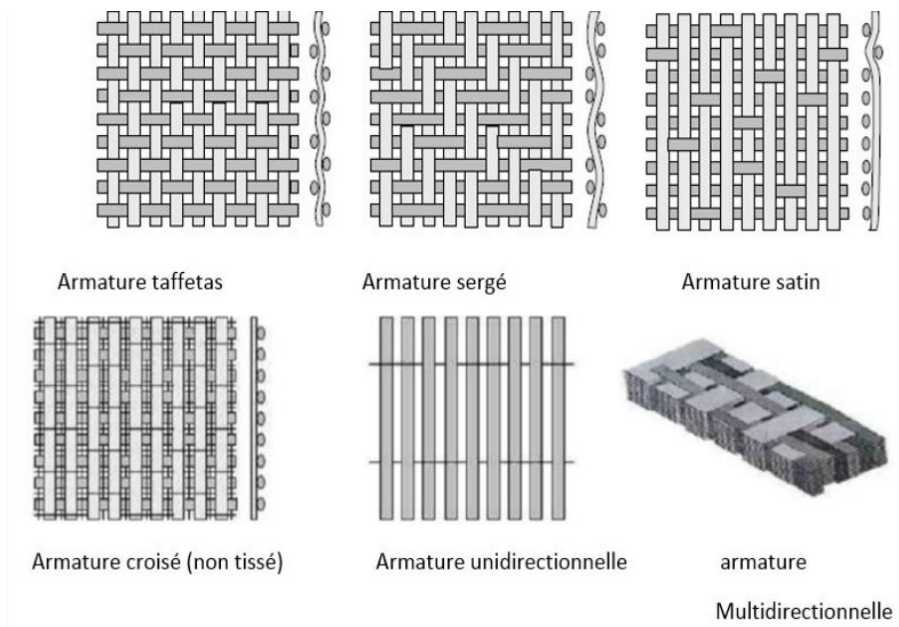
1.2.1.2. Les formes de fibres

1.2.1.2.1. Renfort en fibres discontinues

Des fibres courtes, ou particules (charges sous forme de microbilles, de fibres broyées, d'écaillés ou de poudre), permettent d'améliorer certaines propriétés de la matrice (résistance à l'usure, propriétés thermiques, poids). Celle-ci reste l'élément de base et on obtient alors un « polymère renforcé ».

1.2.1.2.2. Renfort continu

Sous forme de fibres longues qui sont généralement utilisées pour des composites HP. Cette forme fibreuse offre une résistance à la rupture et souvent un module d'élasticité beaucoup plus élevée que ceux du même matériau massif, avec une augmentation de la longueur de 10000 fois, ou bien



pour le même

volume, la surface est multipliée par 100 dans le cas des fibres de verre. (4)

Figure 3: Différentes formes de renforts continus. (4)

1.2.2. Les charges et les additifs

1.2.2.1. Les charges

✚ Charges renforçantes

L'objet de l'incorporation de charges renforçantes est d'améliorer les caractéristiques mécaniques de la résine. Ces charges peuvent être classées suivant leur forme géométrique en charges sphériques et Charges non sphériques.

Charges non renforçantes

Les charges non renforçantes ont pour rôle soit de diminuer le coût des résines en conservant les performances des résines, soit d'améliorer certaines propriétés des résines. (1)

Parmi ces classes on trouve :

- Charges de faible coût.
- Charges ignifugeantes.
- Charges conductrices et antistatiques

1.2.2.2. Les additifs :

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

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

1.2.3. La matrice

Le rôle de la matrice est principalement de lier les fibres, mais aussi, d'assurer une répartition spatiale est homogène du renfort. D'un point de vue mécanique, la matrice transmet et répartie les efforts extérieurs vers le renfort. D'un autre côté, elle apporte à la structure une tenue chimique et donner la forme désirée au produit. (4)

1.2.3.1. Classification des matrices

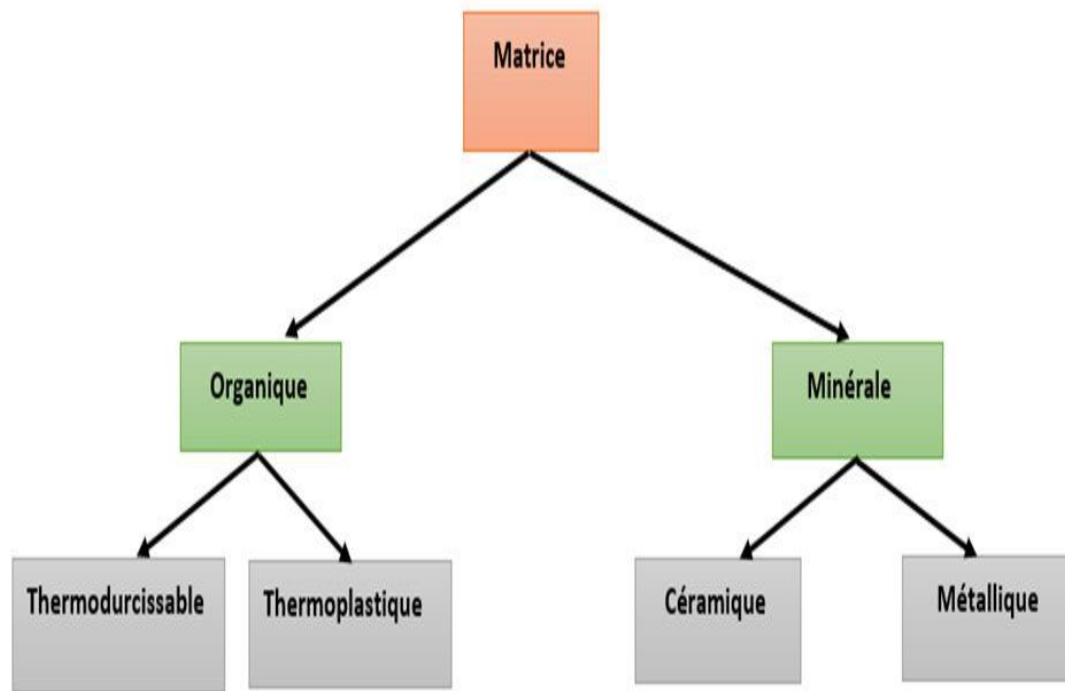


Figure 4: Classification des matrices. (5)

- **Les matrices organiques**

Les matrices en polymère de synthèse sont les plus couramment rencontrées dans les composites de grande diffusion. Associées à des fibres de verre, d'aramide ou de carbone, elles ont un faible module et une faible résistance à la traction, mais se prêtent facilement à l'imprégnation des renforts pour leur fabrication.

La structure des thermoplastiques (TP) se présente sous forme de chaînes linéaires, ils ont besoin d'être chauffés pour les mettre en forme. Le refroidissement par contre permet de les fixer (les chaînes se bloquent). Pour le cas des thermoplastiques (TP) l'opération est réversible. La structure des thermodurcissables (TD) possède la forme d'un réseau tridimensionnel, le durcir dans ce cas est définitive, la transformation est donc irréversible matrice. (5)

1.2.3.1.1. Les matrices thermodurcissables

Les résines thermodurcissables ont des propriétés mécaniques élevées. Ces résines ne peuvent être mises en forme qu'une seule fois. Elles sont en solution sous forme de polymère non réticulé en suspension dans des solvants. Les résines polyesters insaturées, les résines de condensation (phénoliques, aminoplastes, furaniques) et les résines époxy sont des résines Thermodurcissables. (6)

1.2.3.1.2. Les matrices thermoplastiques

Les résines thermoplastiques ont des propriétés mécaniques faibles. Ces résines sont dures et solides qui nécessitent une transformation à très haute température. Les polychlorures de vinyle (PVC), les polyéthylènes, polypropylène, polystyrène, polycarbonate polyamide sont quelques exemples de ces résines thermoplastiques. De même que pour les résines thermodurcissables, les matériaux les plus performants ont des caractéristiques mécaniques élevées et une masse volumique faible. (7)

1.2.3.1.3. Les matrices métalliques

L'imprégnation de renforts par un alliage liquide étant une opération techniquement délicate, en pratique seuls les alliages d'aluminium sont utilisés dans ce type de technique, associés à des fibres ou particules de graphite ou de céramiques. Ils sont faciles à mettre en œuvre car leur température de fusion est relativement basse.

Le compromis obtenu entre la ténacité de la matrice métallique et la rigidité des renforts donne au composite des caractéristiques mécaniques intéressantes par rapport à l'alliage seul, surtout au-dessus de 200 °C.

Leur coût de mise en œuvre élever réserve les composites à matrice métallique aux applications aéronautiques et spatiales. (8)

1.2.3.1.4. Matrices Céramiques

Des composites à matrices céramiques peuvent être obtenus par imprégnation de préformés de fibres (métaux, verres, aramides, carbone, céramique) soit par des suspensions

liquides, ensuite frittées en température sous haute pression, soit par des gaz réactifs permettant un dépôt entre les fibres (notamment pour les composites carbone-carbone). (10)

1.3. Méthodes d'élaboration des composites

1.3.1. Moulage au contact

- **Principe**

Procédé manuel pour la réalisation de pièces à partir de résines thermodurcissables, à température ambiante et sans pression. Les renforts sont déposés sur le moule et imprégnés de résine liquide, accélérée et catalysée. Après durcissement de la résine, la pièce est démoulée et détournée. (11)

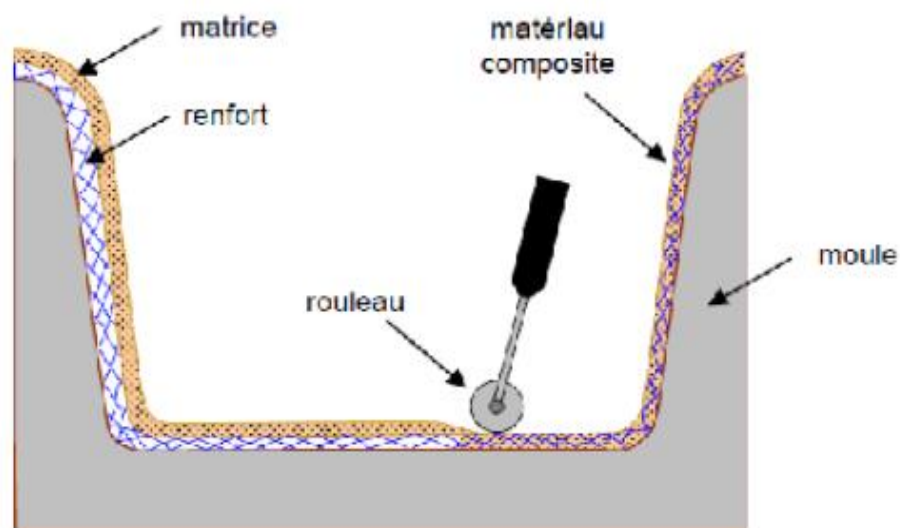


Figure 5: Principe du moulage au contact. (1)

1.3.2. Moulage par projection simultanée :

- **Principe**

Procédé manuel ou robotisé permettant la réalisation de pièces à partir de résines thermodurcissables à température ambiante et sans pression. (8) Les matières premières sont mises en œuvre à l'aide d'une machine dite "de projection" comprenant :

- ❖ Un dispositif de coupe - projection du renfort (fibre)
- ❖ Un ou deux pistolets projetant simultanément la résine

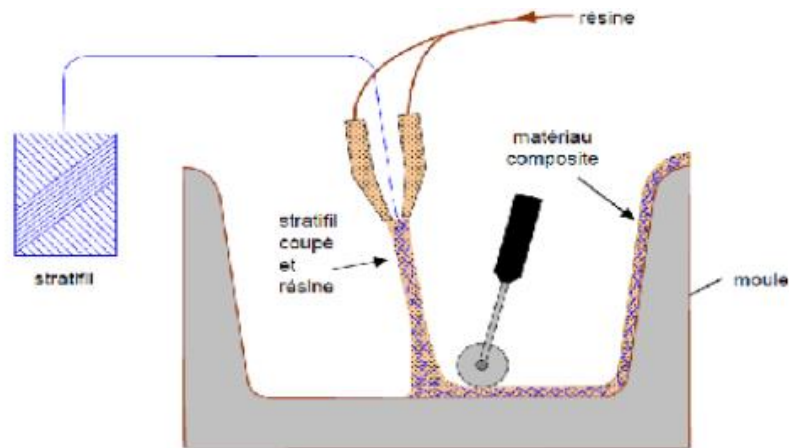


Figure 6: Principe du moulage par projection simultanée. (1)

1.3.3. Moulage sous vide

- **Principe**

Le moulage sous vide s'effectue entre moule et contre-moule rigide, semi-rigide ou souple suivant la technologie de mise en œuvre. Le renfort (mat, tissu, préforme) est placé à l'intérieur du moule ; la résine catalysée est versée sur le renfort. On utilise la pression qui s'exerce sur le moule lors de la mise sous vide pour répartir la résine et imprégner le renfort. La résine peut également être injectée par l'aspiration consécutive au vide. (4)

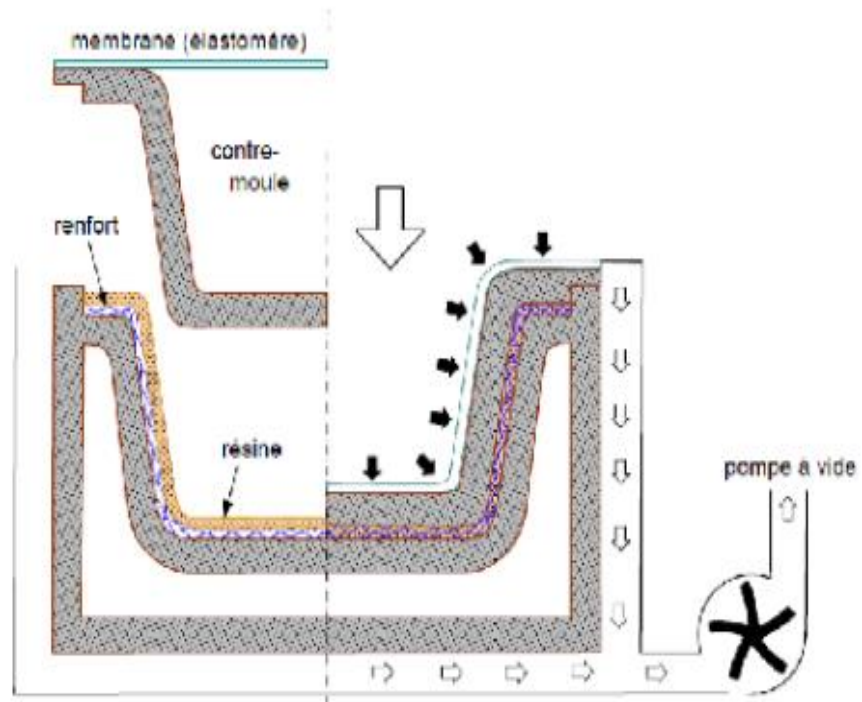


Figure 7: Principe de moulage par infusion. (1)

1.3.4. Moulage par projection de résine

- Principe

Le moulage par injection de résine RTM (Résine Transfert Molding). Une nappe de fibre (tissus, mats) est déposée dans un moule fermé étanche et la résine est injectée à basse.

(4)

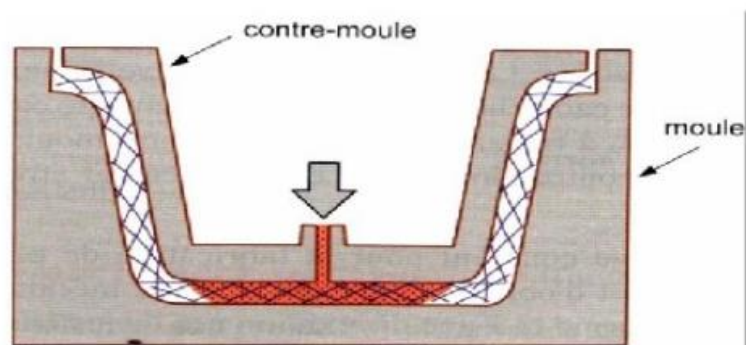


Figure 8: Principe du moulage par injection de résine. (1)

1.3.5. Moulage par centrifugation

- **Principe**

Procédé de moulage limité aux enveloppes cylindriques. Le renfort (fibres longues coupées) et la résine sont déposés dans un moule cylindrique chauffé tournant à grande vitesse. (4)

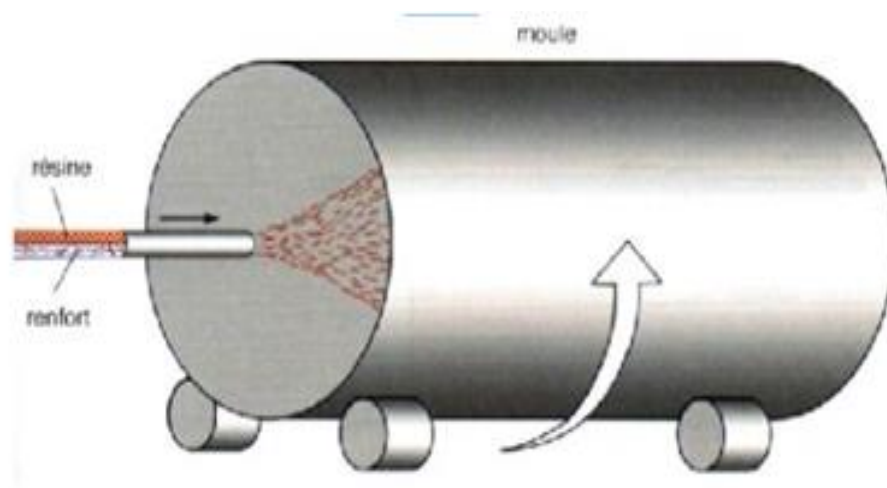


Figure 9: Principe de moulage par centrifugation. (1)

1.4. Comportement mécanique des matrices thermoplastiques

Les thermoplastiques sont constitués de macromolécules de taille limitée, linéaire ou ramifiée. Il existe environ 40 familles de thermoplastiques classées selon leurs structures chimiques. (10)

L'avantage des thermoplastiques est de pouvoir les ramollir par chauffage et durcir par refroidissement, ils peuvent être mis en forme par injection, extrusion ou formage par moule à l'état ramolli. Ce processus est réversible, il peut être répéter un grand nombre de fois sans modification de la structure moléculaire et des propriétés des polymères.

Le choix d'un thermoplastique pour une utilisation donnée dépend étroitement de deux facteurs, la température de transition vitreuse et le prix.

Les thermoplastiques les plus couramment utilisés sont :

- Les polyesters saturés thermoplastiques (PET)
- Le polyéthylène (PE)
- Les polyamides (PA)
- Les polyacétals (polyoxyméthylène)
- Les polycarbonates (PC)
- Les polyéthers éther cétone (PEEK)
- Les polysulfures (PS)
- Les polypropylènes (PP)

L'utilisation des polymères ne cesse de croître notamment dans les équipements automobiles ; les plus utilisés étant les thermoplastiques comme illustré sur la figure .

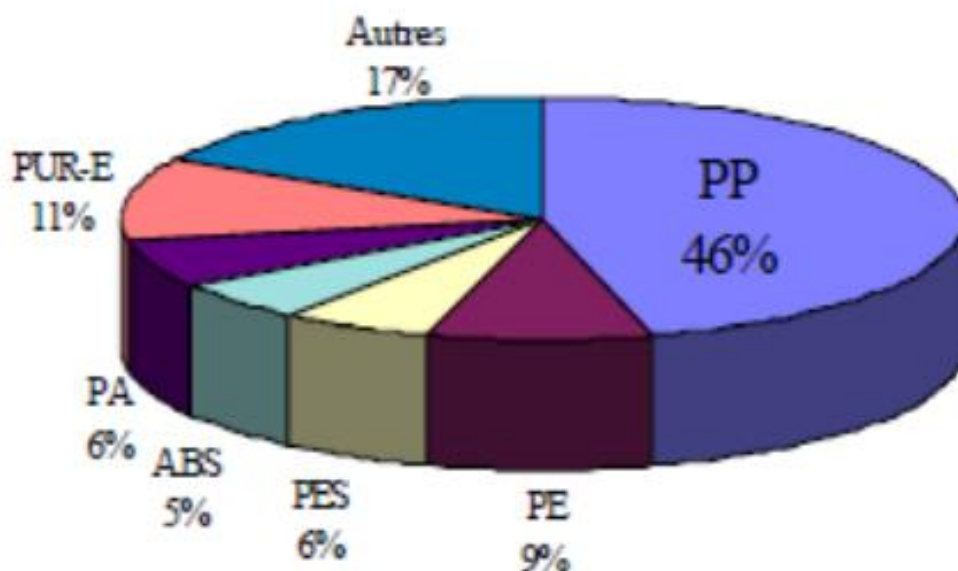


Figure 10: Répartition des polymères utilisés dans les véhicules : les thermoplastiques PP, PE, PES, PA sont les plus utilisés. (10)

Le comportement mécanique des matériaux composites à matrice thermoplastique dépend fortement de la nature des constituants (matrice et renfort), de l'architecture du composite (orientation des fibres, tissage, empilement) ainsi que des conditions de fabrication. Ces matériaux présentent une forte anisotropie : leurs propriétés mécaniques varient selon la direction de sollicitation. Les fibres assurent la rigidité et la résistance dans la direction de leur alignement, tandis que la matrice thermoplastique, plus ductile que les matrices thermodurcissables, assure la cohésion, la redistribution des charges, et contribue à la ténacité, notamment en cas de sollicitation hors-fibre ou sous impact. Les composites thermoplastiques offrent également une meilleure résistance aux chocs et à la fatigue grâce à leur capacité à se déformer plastiquement, et leur comportement viscoélastique à chaud permet une bonne aptitude au formage. Cependant, leur comportement au cisaillement interlaminaire ou transversal reste limité en raison de la faible contribution des fibres dans ces directions. La modélisation du comportement global de ces matériaux nécessite souvent une approche multi-échelle, combinant les lois de comportement des constituants et des méthodes d'homogénéisation.

- **Le comportement à la traction** des matériaux composites à matrice thermoplastique est fortement anisotrope et dépend principalement de l'orientation, du type et du taux de fibres de renfort. Dans la direction longitudinale (parallèle aux fibres), la résistance et la rigidité sont généralement très élevées grâce à la contribution mécanique des fibres, qui supportent l'essentiel de la charge. La matrice thermoplastique, plus ductile que les matrices thermodurcissables, joue un rôle crucial dans le transfert de contraintes entre les fibres et dans la limitation de la propagation des fissures. En traction transversale (perpendiculaire aux fibres), les performances sont bien moindres, car la charge est principalement supportée par la matrice seule, ce qui peut entraîner une rupture fragile ou une décohésion fibre-matrice. Le comportement global peut être linéaire jusqu'à la rupture ou présenter une non-linéarité modérée due à la plasticité de la matrice et aux micro-endommagements progressifs. (11)

Tensile Behavior of Thermoplastic Matrix Composites

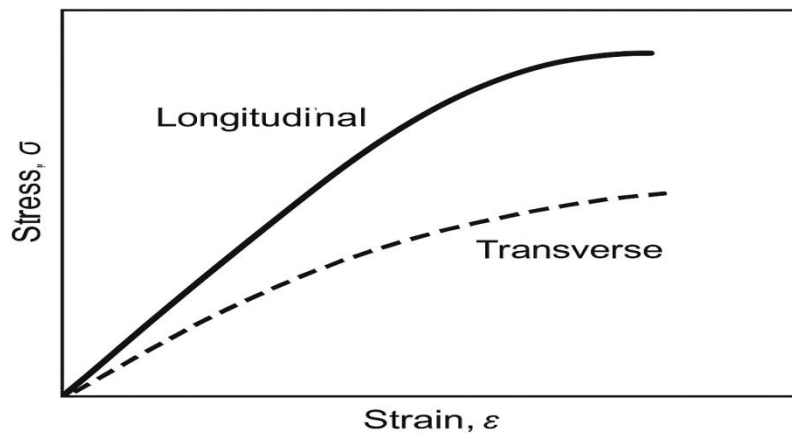


Figure 11: Figure représentative du comportement du traction. (11)

- **Le comportement en flexion et en cisaillement** des matériaux composites à matrice thermoplastique dépend étroitement de la configuration des couches, de la nature des fibres et de la qualité de l'interface fibre/matrice. En flexion, les zones de compression et de traction agissent simultanément, sollicitant à la fois les fibres (en traction) et la matrice (en compression), ce qui peut entraîner des phénomènes de flambement local, de fissuration matricielle ou de délaminage. Les composites à matrice thermoplastique, grâce à leur bonne ductilité, présentent souvent une meilleure résistance à l'endommagement progressif que ceux à matrice thermodurcissable. En cisaillement, la matrice joue un rôle majeur dans la transmission des efforts entre les fibres ; cependant, les propriétés mécaniques sont généralement plus faibles dans cette sollicitation, surtout dans le plan interlaminaire, où le risque de délaminage est important. Le comportement en cisaillement est souvent non linéaire, avec apparition d'endommagements diffus dès les faibles niveaux de sollicitation. Une bonne adhésion fibre/matrice ainsi qu'un empilement optimisé permettent d'améliorer la résistance globale à ces sollicitations complexes. (12)

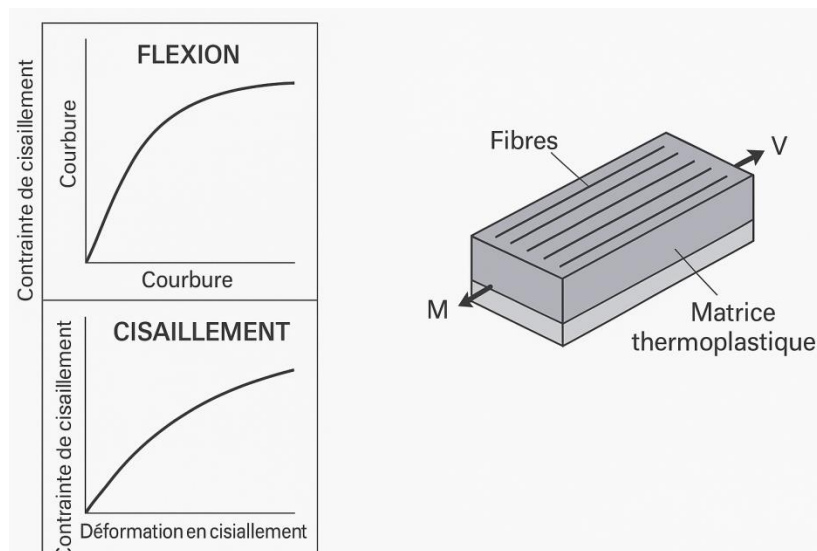


Figure 12: Figure illustrative sur le comportement en flexion et en cisaillement. (12)

• **La tenue à la fatigue** des matériaux composites à matrice thermoplastique constitue un avantage significatif par rapport aux composites à matrice thermodurcissable, notamment grâce à la ductilité et à la ténacité accrues de la matrice thermoplastique. Sous sollicitations cycliques, ces composites présentent une meilleure capacité à dissiper l'énergie, limitant ainsi l'amorçage et la propagation des fissures. Les fibres assurent le maintien des performances mécaniques sur le long terme, tandis que la matrice thermoplastique contribue à retarder les phénomènes de décohésion fibre/matrice et de délaminage. Toutefois, la tenue à la fatigue dépend fortement de l'orientation des couches, du taux de fibres, de la qualité de l'interface et des conditions d'environnement (température, humidité). Les endommagements progressifs, tels que la microfissuration de la matrice, la rupture de fibres ou la délamination interlaminaire, apparaissent de manière cumulative, réduisant progressivement la rigidité et la résistance. Des traitements de surface, un bon contrôle de la fabrication et une architecture de renfort optimisée peuvent significativement améliorer la durabilité en fatigue. **(13)**

- Les matériaux composites à matrice thermoplastique présentent une excellente **résistance aux chocs**, ce qui constitue l'un de leurs principaux avantages par rapport aux composites à matrice thermodurcissable. Cette performance est principalement due à la nature ductile et tenace de la matrice thermoplastique, qui permet d'absorber et de dissiper efficacement l'énergie d'impact. Lors d'un choc, la matrice peut se déformer plastiquement sans se fissurer immédiatement, ce qui limite l'amorçage et la propagation des dommages tels que la délamination, la fissuration de la matrice ou la rupture des fibres. Cette capacité d'absorption est particulièrement recherchée dans les domaines de l'automobile, de l'aéronautique ou du sport, où les structures doivent résister à des sollicitations dynamiques. De plus, les composites thermoplastiques peuvent retrouver une partie de leur forme après impact grâce à leur comportement viscoélastique. Toutefois, la résistance aux chocs dépend fortement de facteurs tels que l'orientation des fibres, la qualité de l'interface fibre/matrice, l'épaisseur du composite et les conditions environnementales. (14)

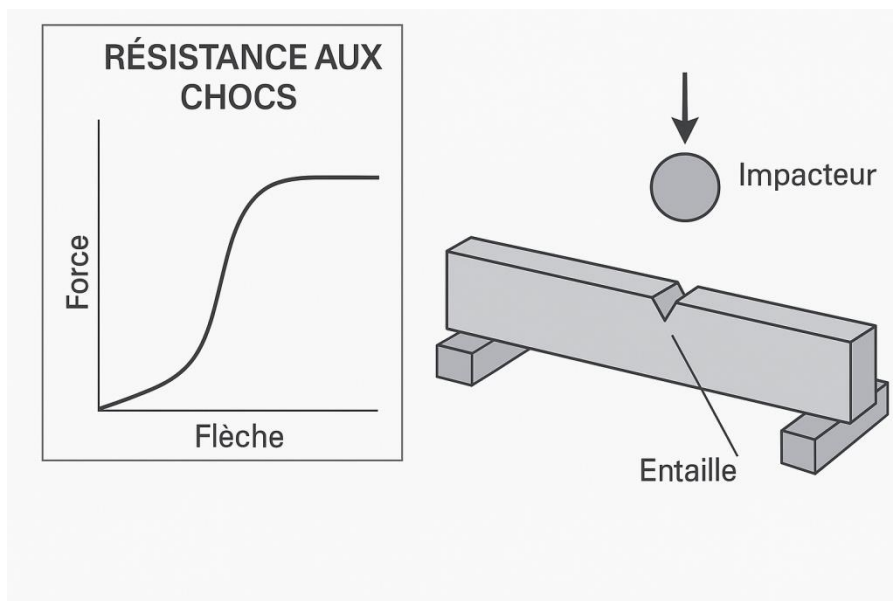


Figure 13: Figure illustrative sur résistance aux chocs. (14)

CHAPITRE II : Méthodologie de simulation numérique

2.1. Choix de la méthode : éléments finis (FEM)

En analyse numérique, la méthode des éléments finis est utilisée pour résoudre numériquement des équations aux dérivées partielles. Celles-ci peuvent par exemple représenter analytiquement le comportement dynamique de certains systèmes physiques (mécaniques, thermodynamiques, acoustiques, etc.). **(15)**

Concrètement, cela permet par exemple de calculer numériquement le comportement d'objets même très complexes, à condition qu'ils soient continus et décrits par une équation aux dérivées partielles linéaire : mouvement d'une corde secouée par l'un de ses bouts, comportement d'un fluide arrivant à grande vitesse sur un obstacle, déformation d'une structure métallique, etc.

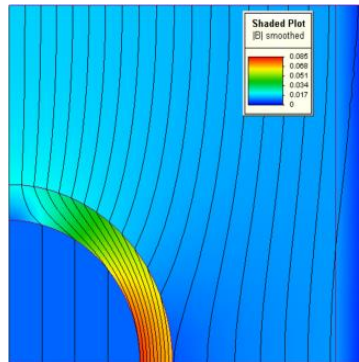


Figure 14: Solution bidimensionnelle d'une équation magnéto-statique obtenue par éléments finis (les lignes donnent la direction du champ et la couleur son intensité)

La méthode des éléments finis fait partie des outils de mathématiques appliquées. Il s'agit de mettre en place, à l'aide des principes hérités de la formulation variationnelle ou formulation faible, un algorithme discret mathématique permettant de rechercher une solution approchée d'une équation aux dérivées partielles (ou EDP) sur un domaine compact avec conditions aux bords et/ou dans l'intérieur du compact. On parle couramment de conditions de type Dirichlet (valeurs aux bords) ou Neumann (gradients aux bords) ou de Robin (relation gradient/valeurs sur le bord). **(16)**

Il s'agit donc avant tout de la résolution approchée d'un problème, où, grâce à la formulation variationnelle, les solutions du problème vérifient des conditions d'existence plus faibles que celles des solutions du problème de départ et où une discrétisation permet de trouver une solution approchée. Comme de nombreuses autres méthodes numériques, outre l'algorithme de résolution en soi, se posent les questions de qualité de la discrétisation :

- Existence de solutions,
- Unicité de la solution,
- Stabilité,
- Convergence,
- Et bien sûr : mesure d'erreur entre une solution discrète et une solution unique du problème initial.

• Domaines d'application

Calcul de structures, étude des contacts, électricité, électromagnétisme, hydraulique, aérodynamique, finance, ingénierie biomédicale, ...

• Principe

Le milieu continu est simplifié en le divisant en un nombre fini d'éléments, chacun étant représenté par un ensemble limité de paramètres caractérisant son comportement. L'ensemble du problème global est ensuite résolu en assemblant ces éléments selon des lois qui régissent les structures discrètes, permettant ainsi de simuler le comportement du système dans son ensemble. (17)

• Les difficultés

L'application de la méthode des éléments finis présente certaines difficultés, tant sur le plan théorique que pratique. D'un point de vue théorique, l'un des principaux défis réside dans la formulation adéquate des éléments, afin qu'ils puissent représenter fidèlement le comportement du milieu étudié. Sur le plan pratique, plusieurs aspects doivent être maîtrisés : la discrétisation du milieu continu, c'est-à-dire le maillage, qui influence directement la précision de la simulation, ainsi que la qualité des résultats obtenus, notamment en ce qui concerne la convergence de la méthode. Une bonne maîtrise de ces éléments est essentielle pour garantir la fiabilité des simulations numériques. (18)

2.2. Présentation du logiciel utilisé : Abaqus

ABAQUS : la Solution Complète pour l'Ingénierie Mécanique

ABAQUS est un logiciel d'analyse par éléments finis (FEA) robuste, conçu pour réaliser des simulations d'ingénierie avancées de problèmes complexes.

Il offre une vaste bibliothèque d'éléments et de modèles matériaux, permettant de modéliser diverses géométries et de simuler des contraintes et des déformations dans différents matériaux (métaux, polymères, béton, le verre, céramique,...).

ABAQUS permet également de simuler le transfert thermique, la diffusion de masse, l'acoustique, la piézoélectricité et l'électrochimie, de manière indépendante ou couplée. Sa modularité et sa flexibilité permettent de modéliser des combinaisons variées d'éléments, de matériaux et de séquences de chargement, offrant ainsi une grande liberté dans la création et la simulation de modèles. (19)

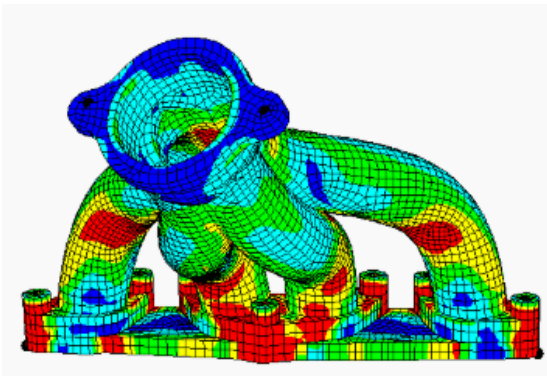


Figure 15: Figure par abaqus

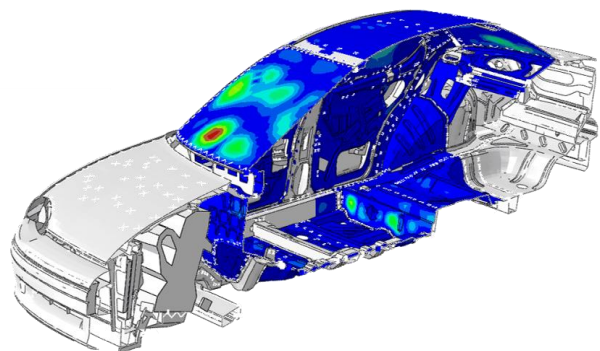


Figure 16: Figure par abaqus

2.3. Définition du modèle

2.3.1. Le composite étudié

Dans le cadre de cette étude, le matériau composite étudié est composé d'une matrice thermoplastique en polyamide-12, renforcée par une charge sphérique de fullerène.

2.3.1.1. Propriétés de la matrice

La matrice polyamide-12: est obtenu par polymérisation d'un aminoacide, le laurylactame qui est dérivé de la transformation du pétrole brut. Sa masse volumique ρ est de 1,1 g/cm³ et sa température de fusion T_f de 183°C. son module d'young est d'environ 1500 MPa.

On utilise fréquemment ce thermoplastique comme matrice dans divers types de composites, tels que le PA/graphene, le PA/argile. Il est fréquemment employé comme matrice pour les nanocomposites chargés d'argile, du fait de deux atouts qu'il offre par rapport aux autres polyamides : une faible capacité d'absorption d'eau en conditions d'humidité et une température de fusion suffisamment faible pour limiter la dégradation des phases de ce polymère.



Figure 17: Granulés de polyamide-12 (PA-12) sous forme brute. (20)

2.3.1.2. Propriétés du renfort (Le fullerène)

Est une forme allotropique du carbone comme le graphite, le Graphene, le diamant ou les nanotubes de carbones.

Il a une forme sphérique constitué de pentagone et d'hexagones. Le plus célèbre est le C₆₀ (60 atomes de carbone). Son module d'Young est très élevé : de 0,7 à 1 TPa. Sa masse volumique est estimée à 1,67 g/cm³.

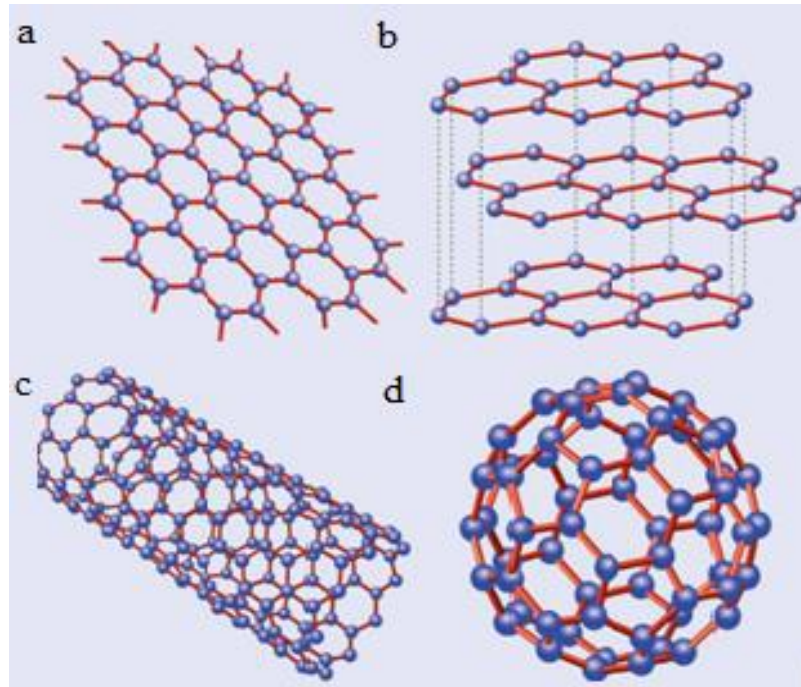


Figure 18: Les allotropies de carbone : a: Graphène b: Graphite c: nanotube de carbone d:fullerène

2.3.1.3. Pourcentages volumiques

- **Le volume élémentaire représentatif (VER)**

Le VER est une petite partie d'un matériau hétérogène (tel qu'un composite) qui reflète précisément les caractéristiques mécaniques globales de ce matériau. Il est utilisé dans des études multi-échelles, en particulier en homogénéisation.

L'objectif de l'utilisation du VER est d'étudier le comportement local du matériau pour en déduire les propriétés effectives.

Dans notre cas nous avons considéré un VER sous forme cubique (1 μm X 1 μm X 1 μm) comme montré dans la figure 19.

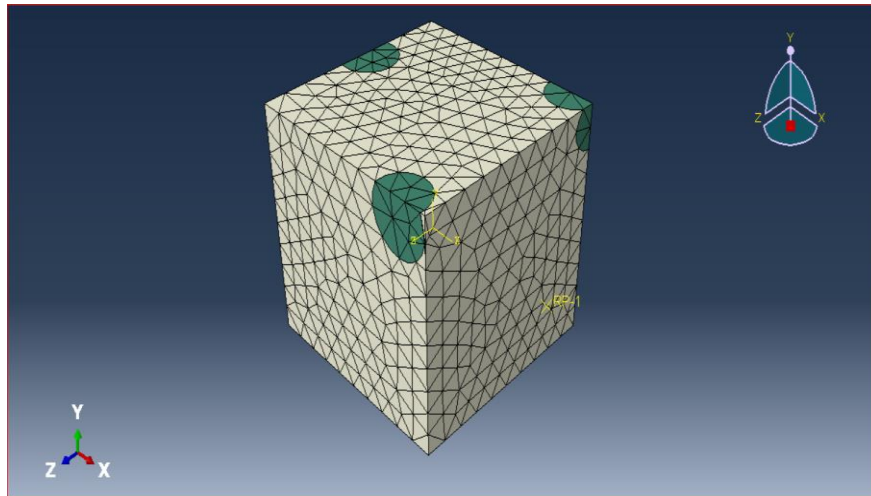


Figure 19: Figure représentative de volume élémentaire.

- **Le nombre de particule dans le VER**

Le nombre de particules sphériques de fullerène présentes dans le Volume Élémentaire Représentatif (VER) peut être déterminé à partir de la fraction volumique V_f selon la relation suivante :

$$V_f = \frac{4N\pi D^3}{24 \times L \times W \times H}$$

Où :

- N : est le nombre de particules,
- D : est le diamètre d'une particule sphérique de charge,
- L, W, et H : représentent respectivement la longueur, la largeur et la hauteur du VER.

Cette expression résulte du rapport entre le volume total des particules sphériques et le volume global du VER. (21)

- En considérant une fraction volumique $V_f = 0,1$ (soit 10 %) et un diamètre moyen de particule $D = 0,3 \mu\text{m}$, le nombre de particules peut être déterminé à l'aide de la formule inversée (21) :

$$N = \frac{24 \times L \times W \times H \times V_f}{4 \times \pi \times D^3}$$

$$N = \frac{24 \times 1 \times 0,1}{4 \times 3,14 \times 0,3^3}$$

$$N \cong 7$$

Afin de modéliser le VER dans Abaqus, il est nécessaire d'estimer le nombre de particules sphériques à inclure en fonction de la fraction volumique (Figure 19) .

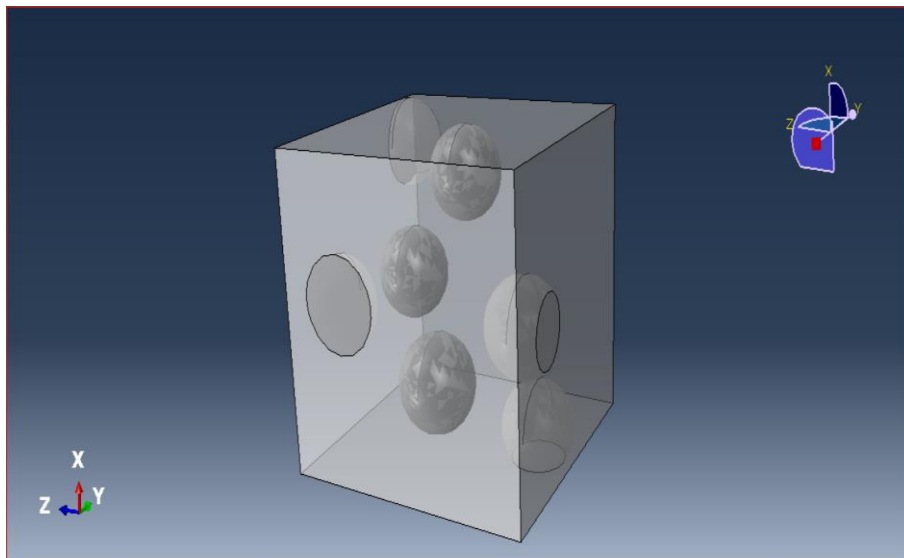


Figure 20: Modélisation du Volume Élémentaire Représentatif (VER) pour modèle 2.

- Pour $V_f=0,2$ (soit 20 %) :

$$N = \frac{24 \times 1 \times 0,2}{4 \times 3,14 \times 0,3^3}$$

$$N \cong 14$$

La figure 21 illustre le modèle géométrique du Volume Élémentaire Représentatif (VER) tel qu'il a été défini dans Abaqus pour la simulation.

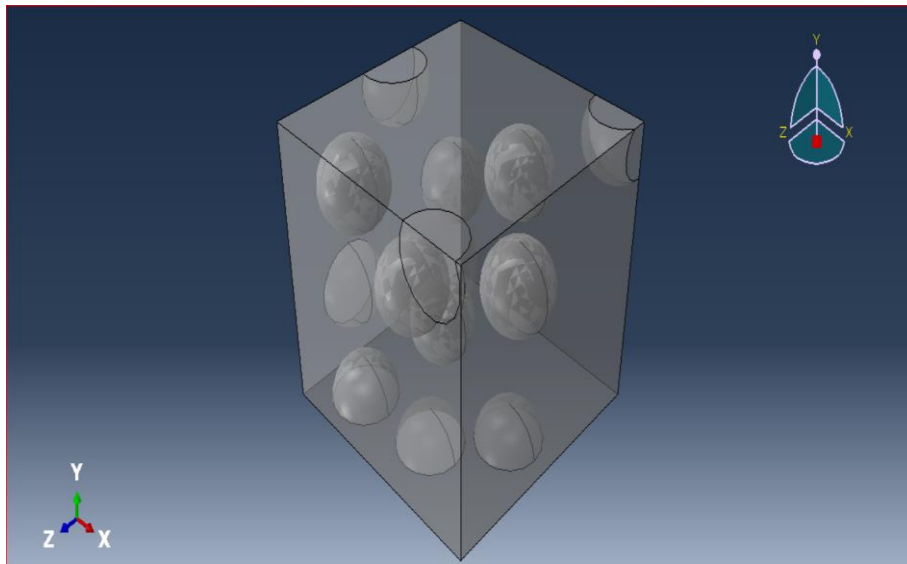


Figure 21: Modélisation du Volume Élémentaire Représentatif (VER) pour modèle 2.

2.4. Paramètres de simulation

2.4.1. Propriétés des matériaux

Dans ce module, nous avons défini les caractéristiques mécaniques de l'éprouvette de matériau composé (Pa12/Fullerène) (**Figure 22 et 23**) :

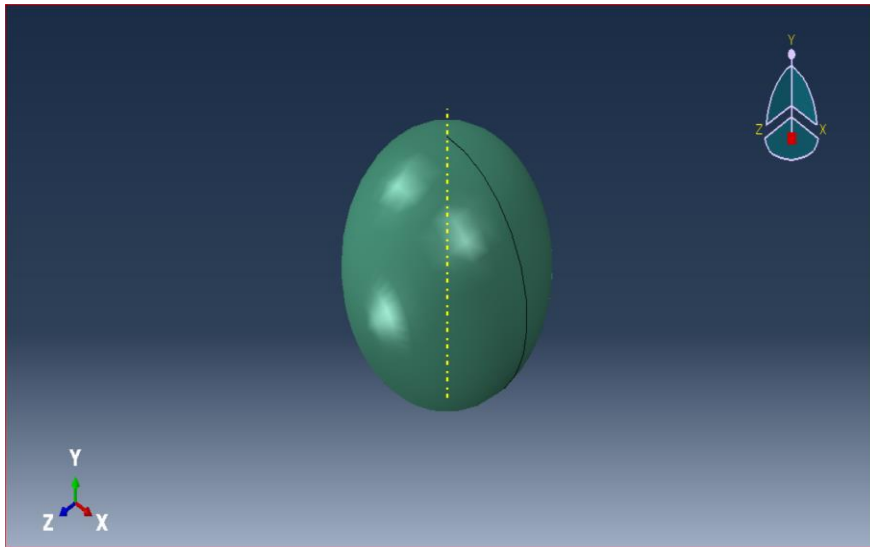


Figure 22: Définition des propriétés mécaniques du renfort (Sphère fullerène).

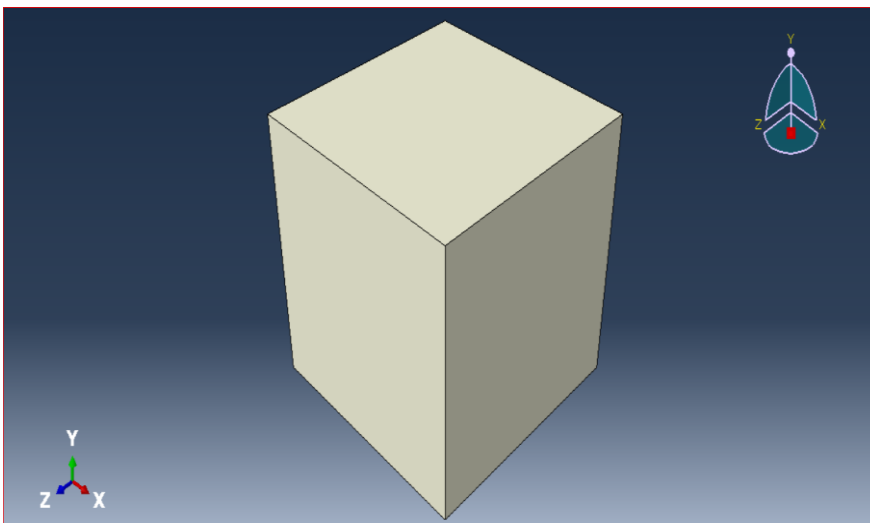


Figure 23: Définition des propriétés mécaniques de matrice (Pa12).

2.4.2. Conditions aux limites et chargement

Les conditions aux limites ont été définies de manière à reproduire de la meilleure façon les conditions réelles de l'essai (Figure 24 et 25, 26, 27) :

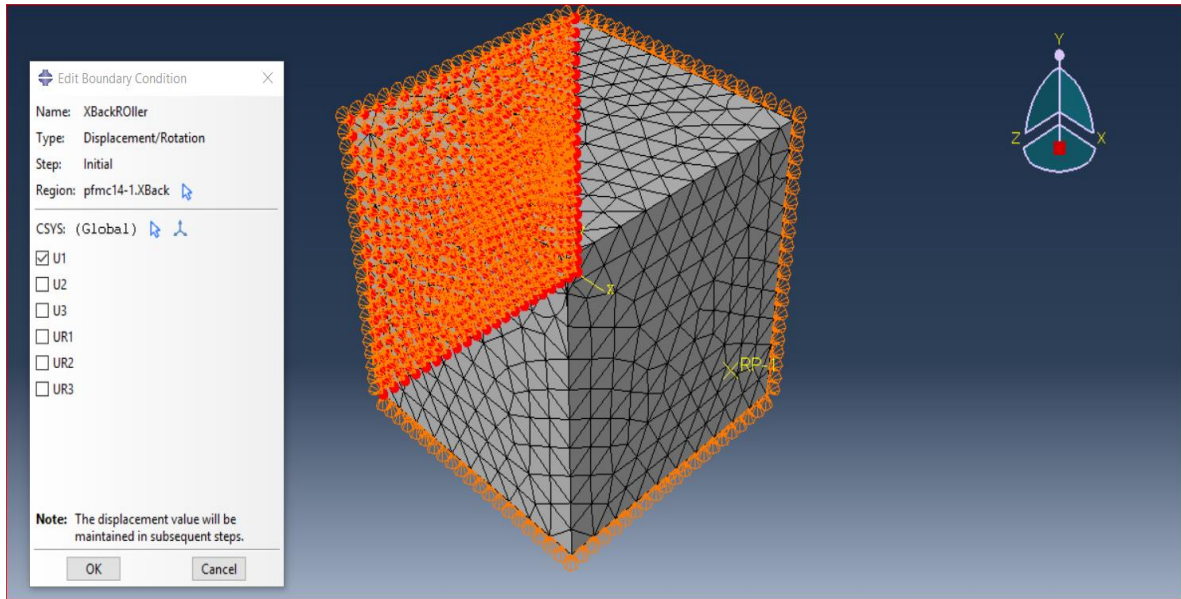


Figure 24: Conditions aux limites au niveau surface XbackRoller. (Fixation U1)

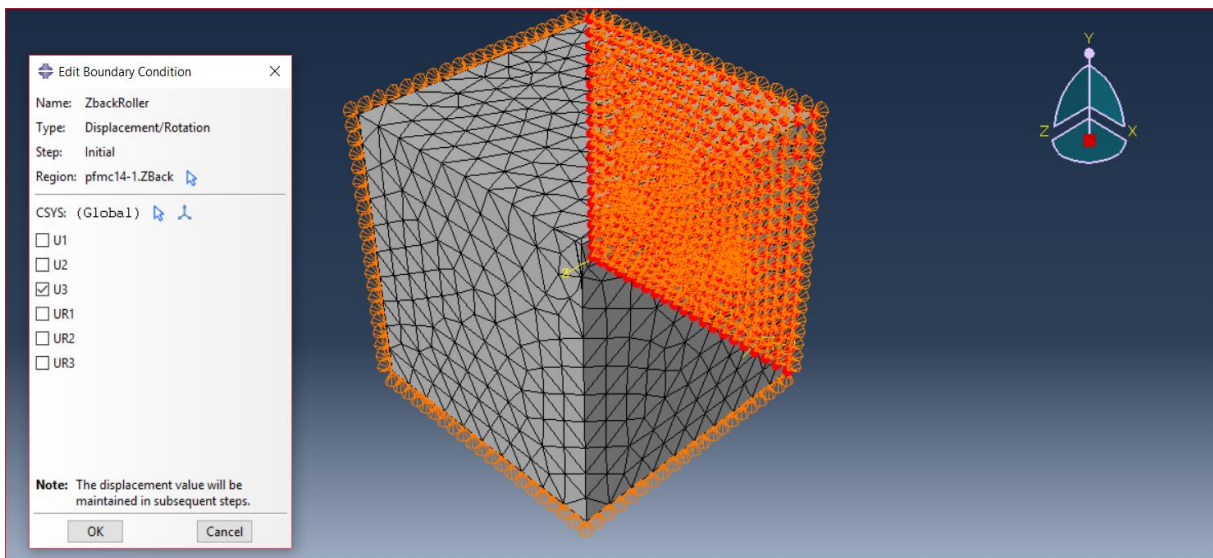


Figure 25: Conditions aux limites au niveau surface ZbackRoller. (Fixation U3)

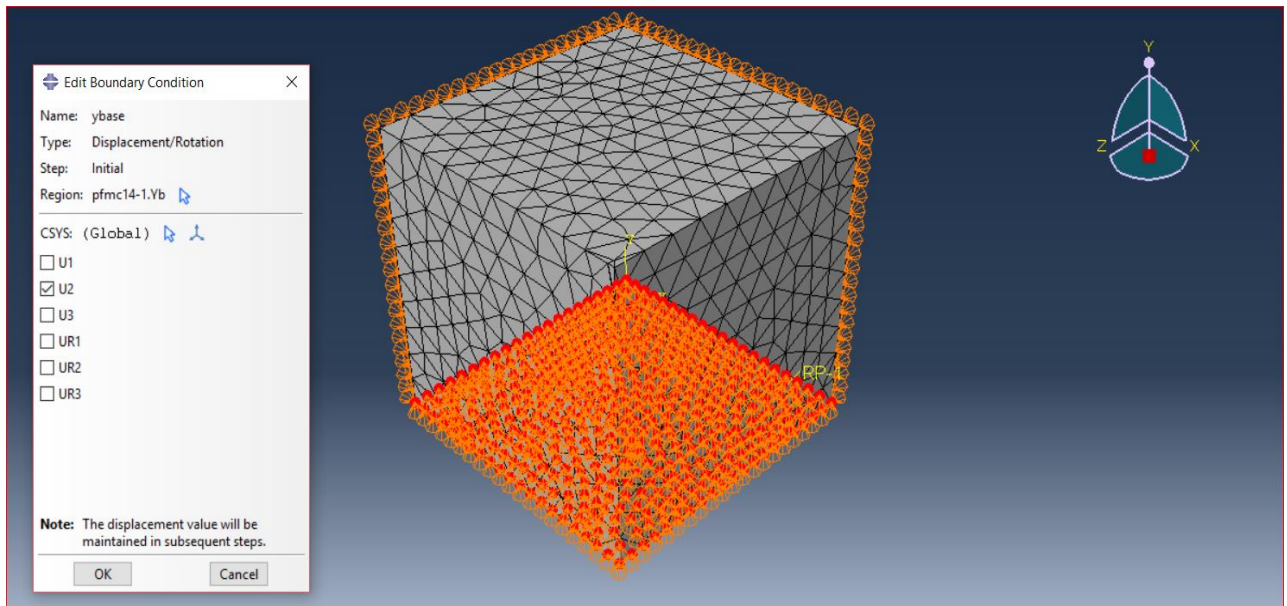


Figure 26: Conditions aux limites au niveau surface ybase. (Fixation U2)

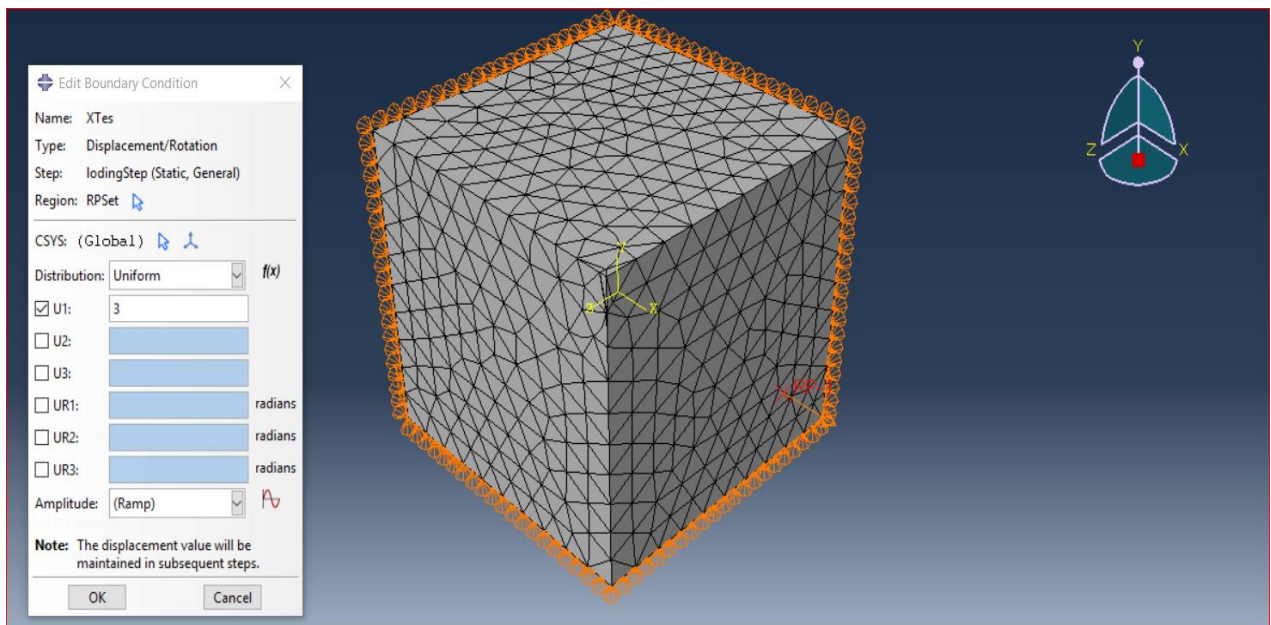


Figure 27: Conditions aux limites force de traction au niveau point de référence RP. ($U1=3\mu\text{m}$).

2.4.3. Module MESH

Ce module contient tous les outils pour réaliser une discrétisation de system

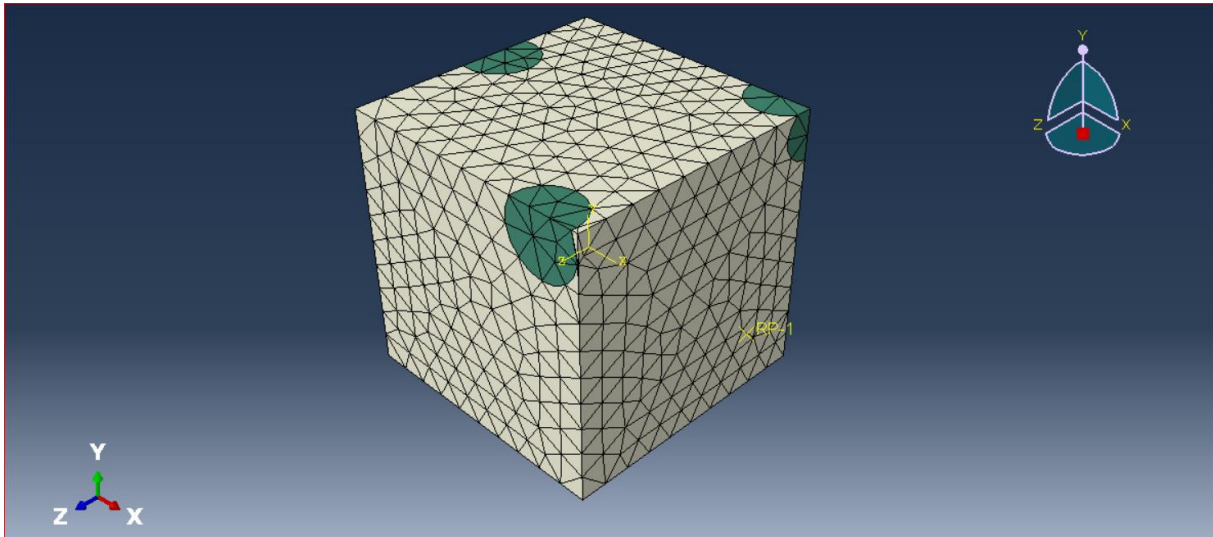


Figure 28: Maillage du modèle élément fini de l'éprouvette matrice et renforts (Pa12/C60).

Dans le cadre de la simulation numérique d'un essai de traction sur un matériau composite constitué d'une matrice en PA12 (forme cubique) et de renforts sphériques en C60, le choix d'un maillage tétraédrique s'avère particulièrement pertinent. En effet, la complexité géométrique induite par la présence d'inclusions sphériques rend difficile l'utilisation de maillages structurés de type hexaédrique. Les éléments tétraédriques, notamment les éléments quadratiques (C3D10), offrent une meilleure flexibilité pour épouser les interfaces complexes entre la matrice et les particules de renfort, sans nécessiter de partitionnements excessifs. Ce type de maillage comme présentée dans la figure 28 permet également d'assurer une bonne qualité des éléments, tout en maintenant un compromis acceptable entre la précision des résultats et le coût computationnel.

De plus, il contribue à une meilleure modélisation du transfert de contraintes à l'interface matrice-renfort, ce qui est essentiel pour prédire de manière réaliste le comportement mécanique global du composite sous sollicitation.

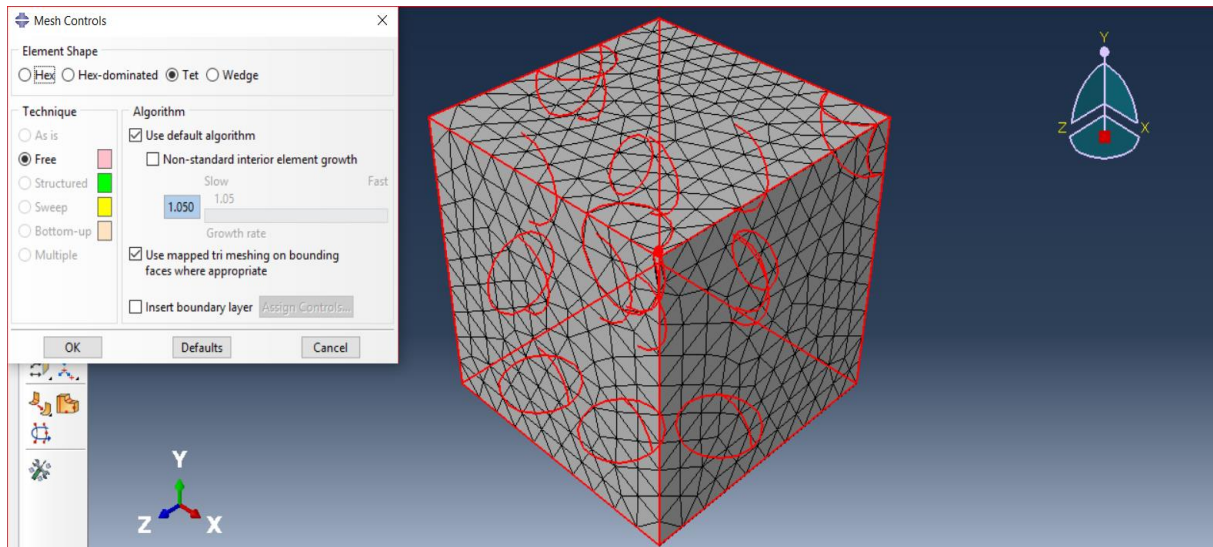


Figure 29: Type de maillage utilisé.

CHAPITRE III : Résultats et analyses

3.1. Résultats obtenus par simulation

Le but principal de la simulation de cet essai de traction est d'étudier le comportement en traction des éprouvettes étudiées.

- **Contrainte**

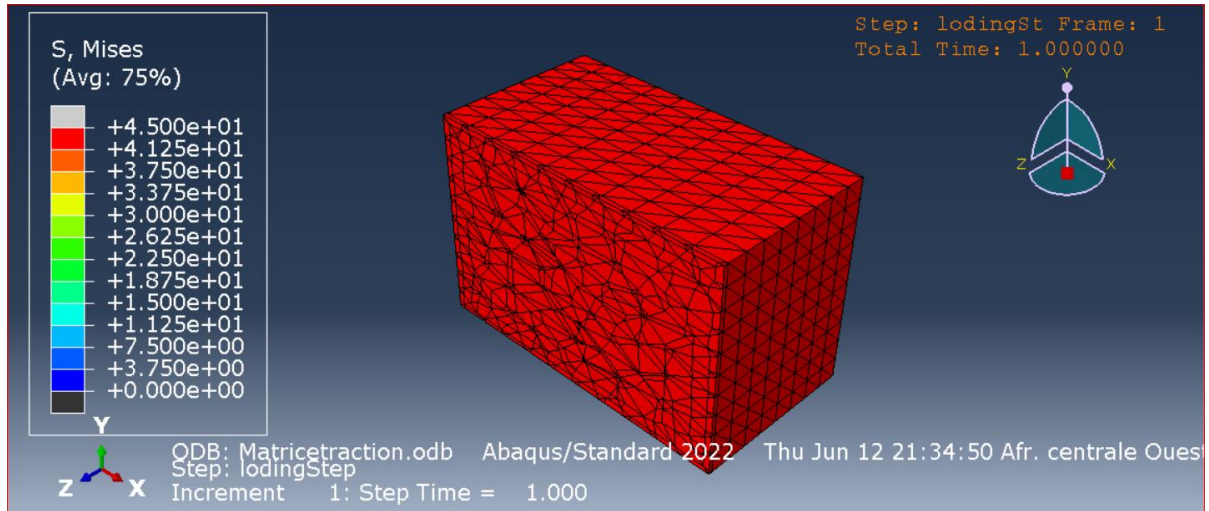


Figure 30:Présentation des contraintes pour modèle 1.

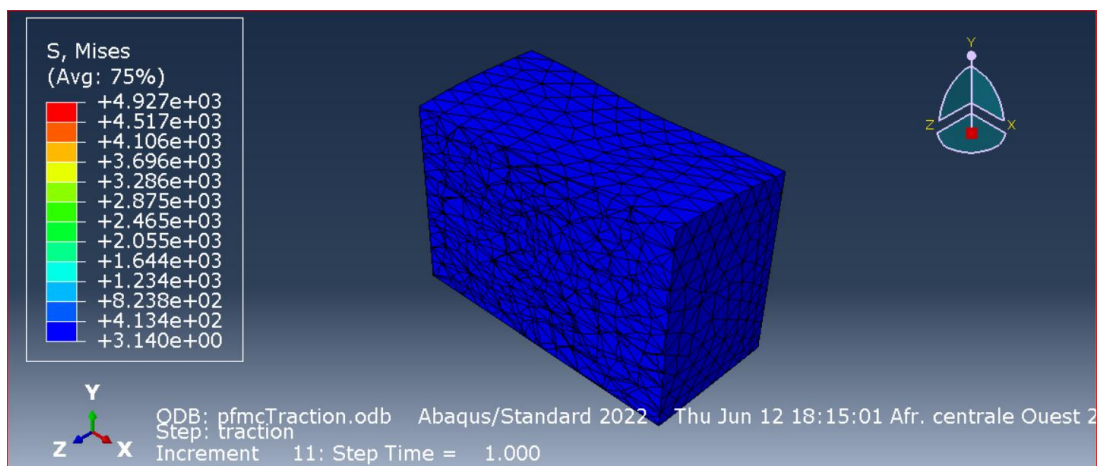


Figure 31: Présentation des contraintes pour modèle 2.

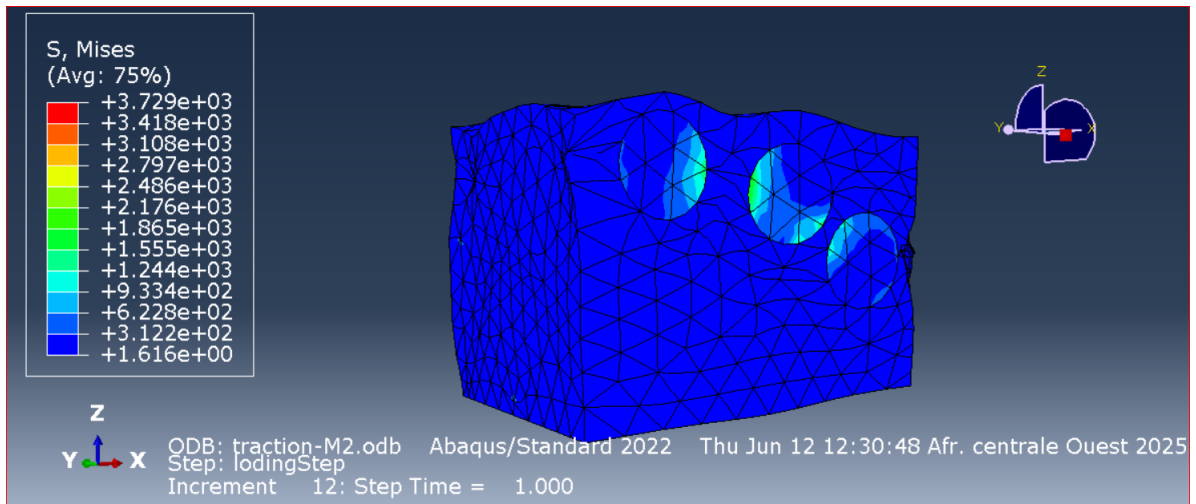


Figure 32: Présentation des contraintes pour modèle 3.

- Dans les mêmes conditions on a noté d'après les 3 figures (30,31,32) que les contraintes maximales ($S1=4,5 \times 10^1$, $S2= 4,927 \times 10^3$, $S3= 3,729 \times 10^3$)

• Déformation

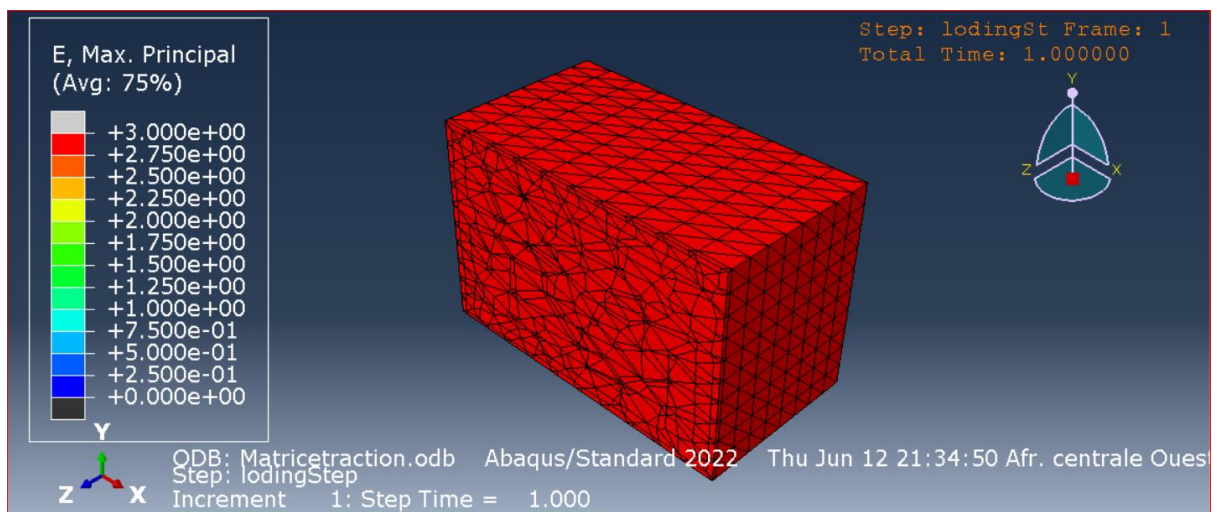


Figure 33: Présentation de déformation pour modèle 1.

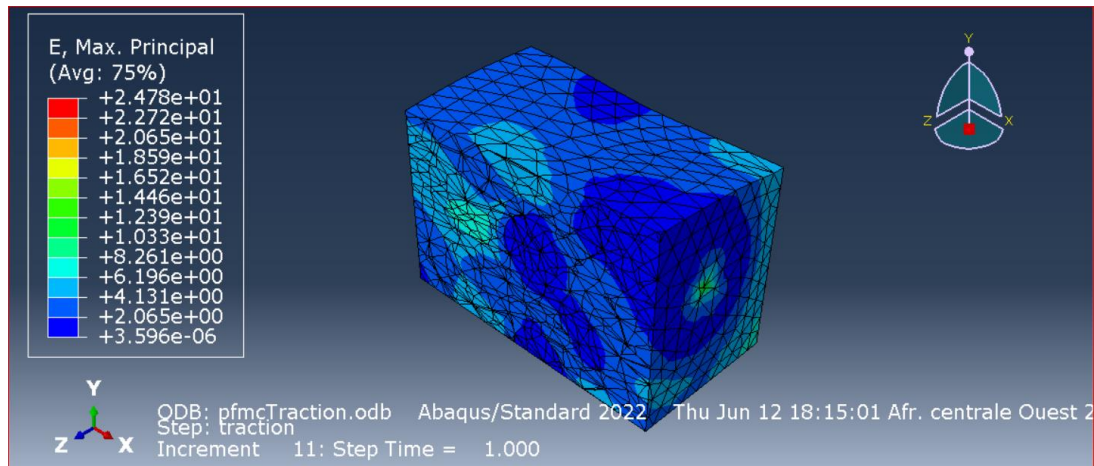


Figure 34: Présentation de déformation pour modèle 2.

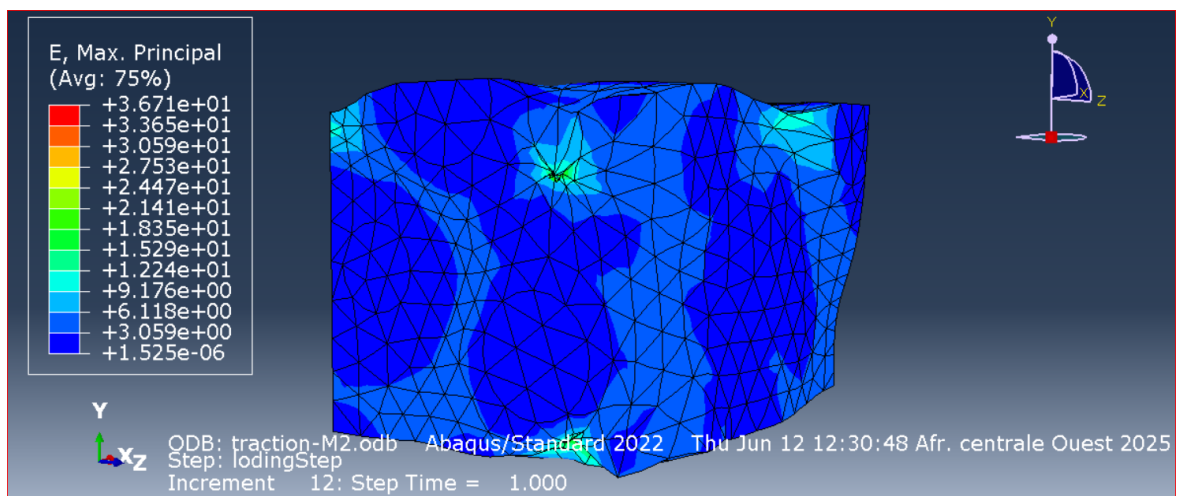


Figure 35: Présentation de déformation pour modèle 3.

- Dans les mêmes d'après les 3 figures (33,34,35) que les déformations maximales ($E1= 3$, $E2=$ conditions ont a noté $2,478 \times 10^1$, $E3= 3,671 \times 10^1$)

- Déplacement

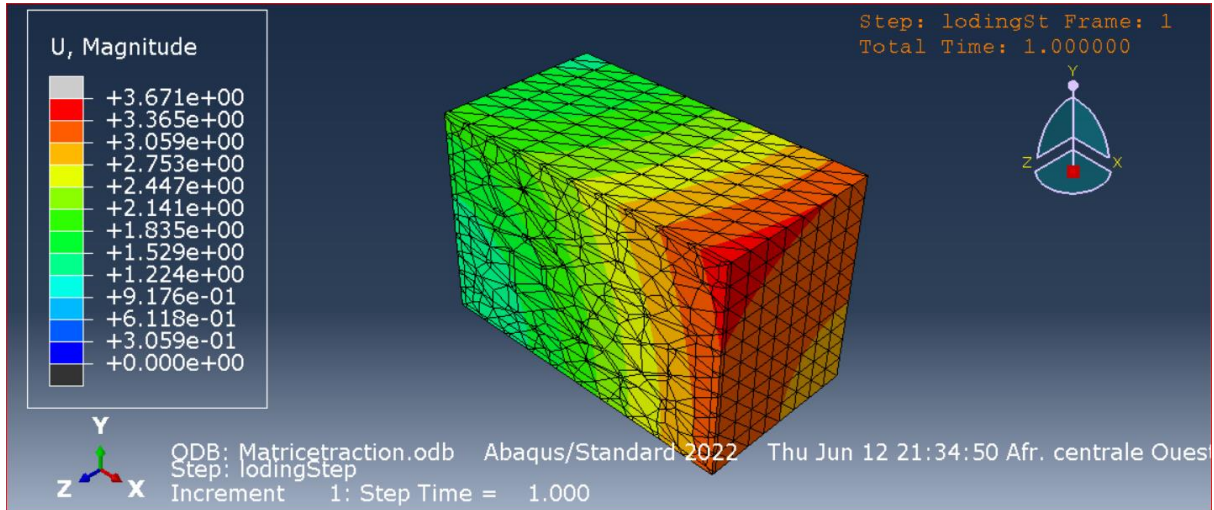


Figure 36: Présentation de déplacement pour modèle 1.

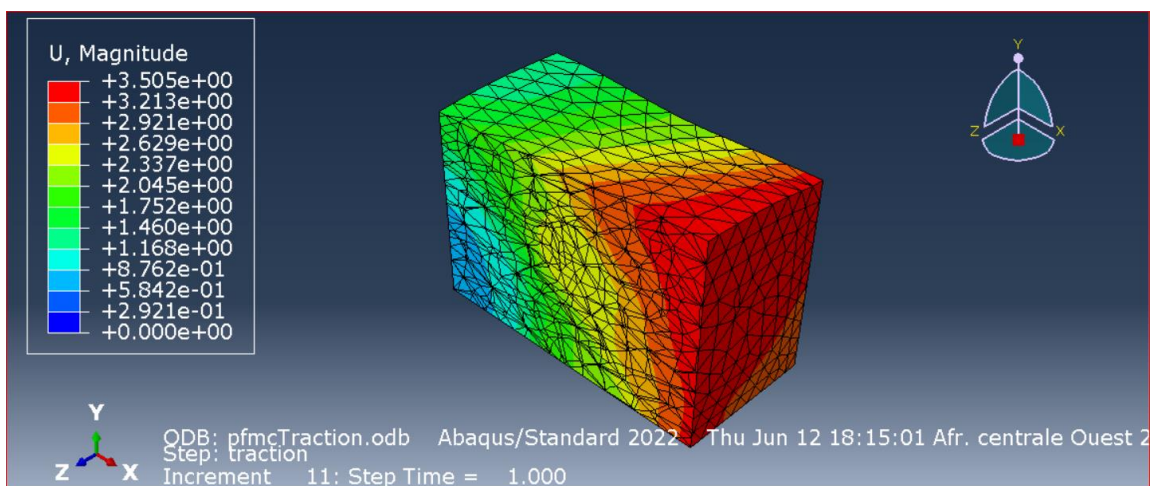


Figure 37: Présentation de déplacement pour modèle 2.

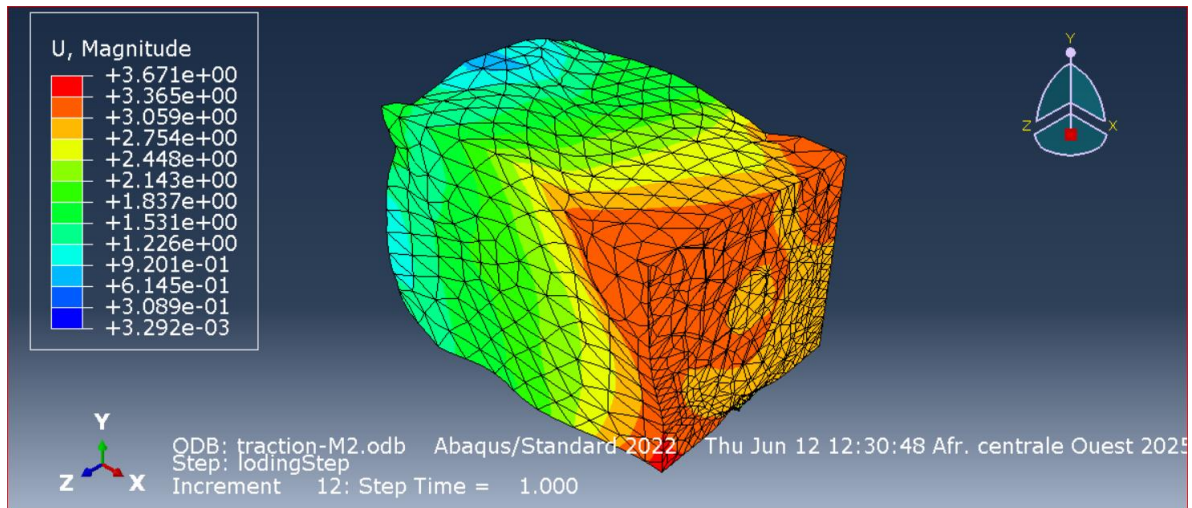


Figure 38: Présentation de déplacement pour modèle 3.

- Dans les mêmes conditions ont a noté d'après les 3 figures (36,37,38) que les déplacements maximales ($U_1= 3,671$, $U_2= 3,505$, $U_3= 3,671$)

3.2. Comparaison des résultats

Tableau 1: Comparaison des résultats.

	Modèle 1 ($V_f = 0\%$)	Modèle 2 ($V_f = 10\%$)	Modèle 3 ($V_f = 20\%$)
Contrainte S	$4,5 \times 10^1$	$4,927 \times 10^3$	$3,729 \times 10^3$
Déformation E	3	$2,478 \times 10^1$	$3,671 \times 10^1$
Déplacement U	3,671	3,505	3,671

L'analyse par éléments finis menée sur le composite PA12 renforcé par des inclusions sphériques de fullerène C60 a permis de mettre en évidence l'impact significatif de la fraction volumique de renfort sur le comportement mécanique du matériau. L'introduction progressive de particules rigides dans la matrice polymère conduit à une amélioration notable des performances mécaniques.

L'ajout de (10 %) de fullerène entraîne une forte augmentation de la contrainte maximale, atteignant 4927 MPa, ainsi qu'un allongement considérable du matériau (24,78 %). Toutefois, à (20 %), bien que la déformation maximale continue de croître (36,71 %), une légère baisse de la résistance 3729 MPa est observée.

Ce phénomène peut s'expliquer par une possible agglomération des particules ou une saturation du renforcement, réduisant l'efficacité du transfert de charge.

Par ailleurs, le déplacement total reste relativement stable autour de 3,6 μm pour l'ensemble des configurations, indiquant que l'augmentation de la rigidité du composite ne compromet pas sa ductilité globale.

Ces résultats montrent que l'optimisation de la fraction volumique en fullerène C60 est essentielle pour tirer pleinement parti de ses propriétés mécaniques sans dégrader le comportement global du composite.

En conclusion, le renforcement du PA12 par des particules de C60 permet d'améliorer simultanément la résistance et la déformabilité du matériau, offrant ainsi un bon compromis entre rigidité et ductilité pour des applications mécaniques avancées.

Conclusion générale

Ce travail de mémoire a porté sur l'étude et la modélisation du comportement mécanique d'un composite thermoplastique à base de polyamide 12 (PA12), renforcé par des particules sphériques de fullerène C60.

Une première phase bibliographique a permis de comprendre les propriétés fondamentales des composites à matrice thermoplastique, ainsi que les effets des nano-renforts sur leurs performances mécaniques.

Par la suite, une méthodologie de simulation numérique a été développée à l'aide du logiciel Abaqus, reposant sur la modélisation d'un volume élémentaire représentatif (VER) contenant différents pourcentages volumiques de fullerène : (0 %), (10 %) et (20 %).

Les résultats ont mis en évidence une amélioration significative de la résistance à la traction avec l'ajout du renfort : la contrainte maximale passe de 45 MPa pour le PA12 pur à 4927 MPa pour 10 % de C60, puis à 3729 MPa pour 20 %. La déformation maximale évolue quant à elle de 3 % à 24,78 %, puis à 36,71 %.

Le déplacement total mesuré reste stable autour de 3,6 micromètres, indiquant que l'ajout de particules rigides n'affecte pas de manière significative la capacité globale de déformation du composite.

Ces résultats confirment le rôle efficace du fullerène en tant qu'agent de renforcement, permettant d'améliorer les propriétés mécaniques tout en conservant une bonne ductilité.

Ce mémoire démontre ainsi l'intérêt des outils de simulation numérique pour la prédiction et l'optimisation du comportement des matériaux composites, et ouvre des perspectives pour l'étude de leur tenue en fatigue, leur vieillissement ou leur comportement sous sollicitations multiaxiales

Références bibliographiques

- (1) Jean Marie. Berthelot, Matériaux composites « comportement mécanique et analyse des Structures », édition TEC et DOC, 1999.
- (2) A. BOUDENNE, « Etude expérimentale et théorique des propriétés »
- (3) A. AL-Maghribi, « Comportement des matériaux composites à fibres courtes : applications à l'impact basse vitesse », thèse de doctorat, l'université Paul Sabatier, 2008
- (4) CARMA « Glossaire des matériaux composites » - carma –Actualisation octobre 2006.
- (5) Laurent gormet, « Généralités sur les matériaux composites », ECN, Centre Nantes, 2008.
- (6) Charewicz A. et Daniel I.M., « Damage Mechanisms and accumulation in graphite epoxy Laminates ». Composite Materials fatigue and fracture », ASTM STP 907, pp. 274-297, 1986.
- (7) Abdelmadjid Si Salem, « Développement d'une poutre en béton-composite : analyse expérimentale et modélisation » Thèse de Doctorat, Université Mouloud Mammeri de Tizi- Ouzou, 2016.
- (8) Michel Dupeux, « Aide-mémoire science des matériaux », Dunod, Paris, 2004.
- (9) Doan TTL, Gao SL, Mäder E. Jute/polypropylene composites: I. Effect of matrix modification. Composites Science and Technology 2006; 66:952–63.
- (10) G. Maeder, De la difficulté d'introduire des polymères et composites dans l'industrie automobile, 2003.
- (11) Gay, D., Hoa, S. V., & Tsai, S. W. (2003). Composite Materials: Design and Applications. CRC Press.
- (12) Mallick, P. K. (2007). Thermoplastic Composites: Properties, Processing, and Applications. CRC Press.

- (13) Talreja, R., & Singh, C. V. (2012). *Damage and Failure of Composite Materials*. Cambridge University Press.
- (14) Cantwell, W. J., & Morton, J. (1991). The impact resistance of composite materials — a review. *Composites*, 22(5), 347–362.
- (15) M. Vedrines, Contribution à l'étude des propriétés mécaniques des structures en polymère injecté : application aux propriétés élastiques locales et à la modélisation viscoélastique, Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 2003.
- (16) C. Oudet, *Polymères : structure et propriétés*, Masson, 1994, pp. 124-129.
- (17) K. Van de Velde, P. Kiekens, Thermoplastic polymers: overview of several properties and their consequences in flax fibre reinforced composites, *Polymer Testing*, 2001 (20) , pp. 885–893.
- (18) S. Bouzouita, Optimisation des interfaces fibre-matrice de composites à renfort naturel, Ecole Centrale de Lyon; Ecole Nationale d'Ingénieurs de Monastir, French. <NNT: 2011ECDL0052>.<tel-00769959>, 2011.
- (19) <https://dps-fr.com/logiciels-dassault-systemes/abaqus>
- (20) Tuntun Plastic. (2024). PA12 (polyamide-12) [Fiche produit]. Dongguan Shengwen New Materials Co., Ltd. Consulté en avril 2025 sur le site de Tuntun Plastic: image de granulés translucides de PA-12
- (21) Tchobanoglous, G., Burton, F. L., & Stensel, H. D. (2003). *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*. 4th edition, McGraw-Hill.