



Faculty of Sciences and Technology
Department of Mechanical Engineering

كلية العلوم والتكنولوجيا
قسم المهندسة الميكانيكية

N° d'ordre : M...../GM/2022

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE MASTER ACADEMIQUE

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Construction Mécanique

Thème

DETERMINATION DES PROPRIETES MECANIQUES DES COMPOSITES 3D

Présenté par :

❖ DELMI LAKHDAR

❖ SAFI MOHAMED

Soutenu le 13/07/2022 devant le jury composé de :

Président **Dr.Khiat Sidi Med amine** Université de Mostaganem UMAB

Examineur **Dr.Benaissa Mohamed** Université de Mostaganem UMAB

Encadreur **Pr. Zenasni Ramdane** Université de Mostaganem UMAB

Année Universitaire : 2021 / 2022

Remerciements

*En premier nous remercions Dieu qui nous a donné la volonté pour
réussir ce travail ;*

*Nous tenons à remercier nos chers parents qui nous ont soutenu durant
toute la période de nos études ;*

Nous remercions infiniment notre encadreur :

***RAMDANE ZENASNI** Professeur à l'université de Mostaganem pour
tous ce qu'il nous a donné ;*

Nous adressons nos remerciements à :

*Monsieur le président du jury le Docteur **KHIAT SIDI MED AMINE** Et
monsieur l'examineur le Docteur **BENAISSA MOHAMED** D'avoir
accepté d'examiner notre travail ;*

*Nous tenons à remercier tous nos enseignants pour leurs
encouragements, leurs efforts et leurs aides afin que nous puissions
atteindre ce que nous sommes aujourd'hui ;*

*Nous tenons à remercier tous nos amis qui nous ont aidés pour terminer
ce travail.*

Dédicaces

*A cœur vaillant rien d'impossible A conscience tranquille tout
est accessible*

*A mes très chers parents, pour exprimer ce qu'ils méritent
pour tous les sacrifices qu'ils n'avaient cessés de faire je
dédie ce modeste travail.*

A mes très chers frères, et à la famille

*A tous ceux qui ont contribué de loin ou de près à mon
instruction,*

*A tous les étudiants de la promo Construction Mécanique
2022.*

Résumé

Les propriétés mécaniques jouent un rôle important quant au design des structures en composites. Désormais, les préformes composite en textile tridimensionnelle trouvent une large gamme d'utilisation dans le secteur de l'automobile et de l'aéronautique à cause de la disposition des fibres selon les deux directions. La détermination de ces propriétés exige des protocoles d'essai mécaniques compliqués et coûteux. Cependant, il existe une autre alternative qui consiste à la détermination de ces propriétés au moyen des modèles de la micromécanique, cela diminue le nombre des essais au laboratoire. Quatre matériaux composites de matrice époxyde renforcée par des fibres en textile tridimensionnelle de différentes préforme ont fait l'objet de cette étude, il s'agit du 3D WEAVE (W:6, H:2), 3D WEAVE (W:6, H:3) a une seule couche, 3D WEAVE (W:6, H:3) a deux couche, et le composites 3D WEAVE (W: 8, H: 4). Les Quatre préformes ont été modélisées par le logiciel TEXTGEN puis exporter au code Abaqus (code éléments finis). Les propriétés mécaniques effectives ont été calculées par le plugin EasyPBC couplé à Abaqus.

Mots-clés : matériau composites, renfort, matrice, tridimensionnel

Abstract

Mechanical properties play an important role in the design of composite structures. Now, three-dimensional textile composite preforms find a wide range of uses in the automotive and aeronautical sectors because of the arrangement of the fibers in both directions. The determination of these properties requires complicated and expensive mechanical test protocols. However, there is another alternative which consists in the determination of these properties by means of micromechanical models; this reduces the number of tests in the laboratory. Four composite materials of epoxy matrix reinforced with three-dimensional textile fibers of different preforms were the subject of this study; it is 3D WEAVE (W:6, H:2), 3D WEAVE (W:6, H:3) has single layer, 3D WEAVE (W:6, H:3) has two layers, and the composite 3D WEAVE (W: 8, H:4). The four preforms were modeled by the TEXGEN software, then exported to the Abaqus code (finite element code). The effective mechanical properties were then calculated by the EasyPBC plugin coupled with Abaqus.

Key words: composite material, reinforcement, matrix, three-dimensional

ملخص

تلعب الخصائص الميكانيكية دورًا مهمًا في تصميم الهياكل المركبة. الآن ، تجد الأشكال المركبة للنسيج ثلاثي الأبعاد نطاقًا واسعًا من الاستخدامات في قطاعي السيارات والطيران بسبب ترتيب الألياف في كلا الاتجاهين. يتطلب تحديد هذه الخصائص بروتوكولات اختبار ميكانيكية معقدة ومكلفة. ومع ذلك ، هناك بديل آخر يتمثل في تحديد هذه الخصائص عن طريق النماذج الميكرو ميكانيكية ، وهذا يقلل من عدد الاختبارات العملية. كانت أربع مواد مركبة من مادة إيبوكسي معززة بألياف في نسيج ثلاثي الأبعاد من أشكال مختلفة موضوع هذه الدراسة

3D WEAVE (W: 6 ، H: 2) ، 3D WEAVE (W: 6 ، H: 3) ، 3D WEAVE لها طبقة واحدة ، و 3D WEAVE (W: 8 ، H: 4) لها طبقتان ، و 3D WEAVE (W: 6 ، H: 3)

تم تصميم النماذج الأربعة بواسطة برنامج TEXTGENE تم تصديرها إلى كود Abaqus

تم حساب الخواص الميكانيكية الفعالة بواسطة البرنامج المساعد EsysPbc

الكلمات المفتاحية : الهياكل المركبة ، مادة التقوية ، المادة الأساس ، ثلاثية الأبعاد

Sommaire

Introduction générale.....	09
Chapitre I : GENERALITES SUR LES MATERIAUX COMPOSITES.....	10
I.1 Introduction.....	10
I.2 Matériaux composites.....	10
I.3.1 avantage des matériaux composites.....	11
I.3.2 inconvénient des matériaux composites.....	11
I.4 constituant d'un matériau composite	12
I.4.1 la matrice.....	12
I.4.2 architecture des renforts.....	13
I.4.3 charges renforçantes.....	14
I.4.3 charges non renforçantes.....	14
I.4.4 les aditifs.....	14
I.5 Les plis unidirectionnel.....	15
I.6 Les composite textiles.....	16
I.6.1 Les renforts textiles 3D.....	17
I.7 Les renforts tissés 3D.....	18
I.7.1 tresses et préformes.....	18
I.7.2 tissus.....	20
Chapitre II : GENERALITES SUR LES MATERIAUX COMPOSITES.....	21
II Conception des préformes.....	22
II .1 Matériaux étudiés.....	22
II.2.1 Exemple 1	23
II.2.2 Exemple 2	24
II.2.3 Exemple 3	25
II.2.4 Exemple 4	26
II.3 Comparaison des résultats obtenus.....	27
Conclusion Générale	28

Liste des figures:

Figure (I.1) : Constituants d'un matériau composite	10
Figure (I.2) : Types de matériau composite	11
Figure (I.3) : Représentation d'un pli unidirectionnel	15
Figure (I.4) : Fibre unidirectionnel	15
Figure (I.5) : Structure d'un composite tissé : mèches, fibres et matrice	17
Figure (I.6) : Classification des principales structures textiles 3D	18
Figure (I.7) : Tissage cylindro conique.....	19
Figure (I.8) : Tissage cylindro conique.....	19
Figure (I.9) : Tissu tridirectionnel.....	20
Figure (II.1): 3D weave (W : 6 , H:2)	23
Figure (II.2) : Maillage 3D weave (W :6 ,H :2)	23
Figure (II.3) : 3D weave (W :6 , H:3)	25
Figure (II.4) : 3D weave (W :6 , H:3) trois binder et deux couches	26
Figure (II.5) : 3D weave (W :8 , H:4)	27
Figure (II.6) : Graphe de comparaison de E11 des quatre cas étudiés.....	28
Figure (II.7) : Graphe de comparaison de E22 des quatre cas étudiés.....	29
Figure (II.8) : Graphe de comparaison de E33 des quatre cas étudiés.....	29
Figure (II.9) : Graphe de comparaison de G12 des quatre cas étudiés	30
Figure (II.10) : Graphe de comparaison de G13 des quatre cas étudiés	30
Figure (II.11) : Graphe de comparaison de G23 des quatre cas étudiés	31

La liste des tableaux

Tableau (II.1) : Propriétés mécaniques de la matrice époxyde.....	22
Tableau (II.2) : Propriétés mécaniques de la fibre de verre.....	23
Tableau (II.3) : Propriétés mécaniques 3D weave (w :6, h :2)	24
Tableau (II.3) : Propriétés mécaniques 3D weave (w :6, h :3) une seule couche.....	25
Tableau (II.3) : Propriétés mécaniques 3D weave (w :6, h :3) a deux couche	26
Tableau (II.3) : Propriétés mécaniques 3d weave (w :8, h :4)	27

La liste des Organigramme

Organigramme (I.1) : Organigramme des différentes matrices.....	13
Organigramme (I.2) : Organigramme des différents renforts.....	14
Organigramme (I.3) : Les types de composites textiles.....	15

Introduction Générale

Les matériaux composites sont largement employés dans diverses applications industrielles telles que l'automobile, l'aéronautique, construction civile.[1] Ces matériaux ont de bonnes propriétés mécaniques comparées aux matériaux conventionnelles à cause de leur poids léger, non corrosives, de bonne tenue à la fatigue. Les composites en textiles ont une bonne résistance à cause de la disposition des fibres selon les trois directions. La conception d'une construction en matériaux composites nécessite la connaissance des diverses propriétés mécaniques pour avoir une sécurité des utilisateurs et une bonne résistance aux divers chargements mécaniques et thermiques. La théorie de la micromécanique est utilisée pour la détermination des propriétés effectives des composites.[2] Plusieurs modèles micromécaniques ont été développées par les chercheurs pour le calcul des propriétés.

Le mémoire a pour but le calcul des propriétés mécaniques effectives des matériaux composites à matrice organique l'époxy renforcée par des fibres en verre tridimensionnelles sous forme de textiles.

Le mémoire est divisé en deux chapitres comme suit :

-Le premier chapitre relate une recherche bibliographique sur les matériaux composites en générale les composites en textiles tridimensionnels.

-Le deuxième est orienté à la modélisation numérique des quatre cas et discussions des résultats obtenus.

-Conclusion générale et recommandations

-Références bibliographiques

I.1 Introduction :

L'utilisation des matériaux composites étant en perpétuelle augmentation, ils occupent une place de plus en plus importante dans la réalisation des structures à hautes performances (aérospatiale, aéronautique, automobile, biomécanique). Les matériaux composites à hautes performances mécaniques possèdent des propriétés mécaniques spécifiques (propriétés rapportées à la masse volumique) élevées. Ces matériaux, de nature anisotrope, sont réalisés soit sous forme de matériaux sandwichs, soit sous forme de matériaux stratifiés. Les composites stratifiés proposent un excellent rapport masse/résistance/rigidité et permettent de répondre efficacement aux sollicitations soumises aux différentes pièces structurales grâce à la possibilité de diriger les renforts fibreux dans la direction des sollicitations [1].

I.2 Matériaux composites :

Un matériau composite est, par définition, tout alliage ou matière première comportant un renfort sous forme filamentaire. Il 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 Figure I.1. Contrairement aux matières premières classiques dont on connaît à l'avance les caractéristiques mécaniques, celles des composites ne sont réellement connues qu'après fabrication, car on réalise, en même temps, le matériau et le produit [2].

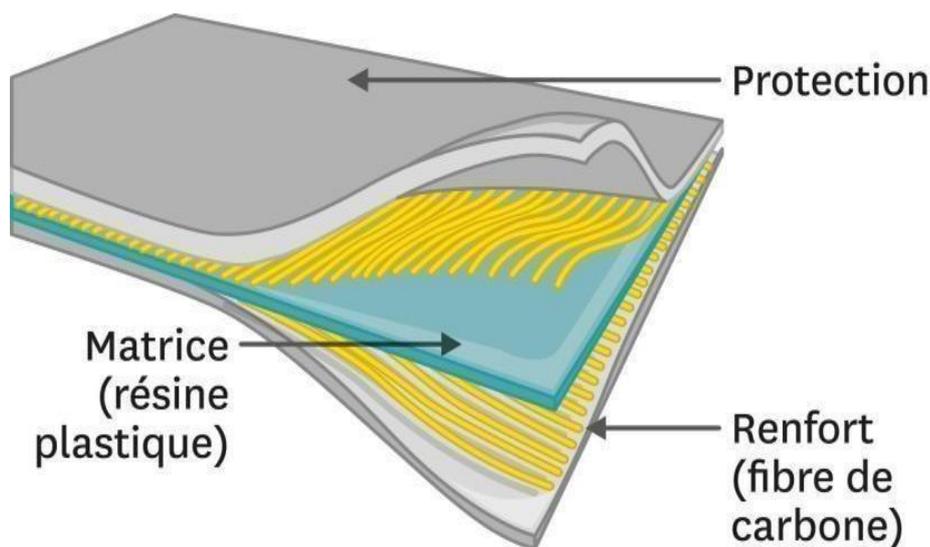


Figure (I.1): Constituant d'un matériau composite [2].

Les composites sont des matériaux à la carte grâce à leurs avantages [3] :

1.3.1 Avantage des matériaux composites :

Gain de masse (légèreté).

Mise en forme de pièces complexes (principe du moulage) et réduction du nombre d'interfaces (boulonnage, rivetage et soudure sur structures métalliques).

Très bonne résistance à la fatigue et de la corrosion.

Insensibles aux produits chimiques "mécaniques" comme les graisses, huiles, liquides hydrauliques, peintures, solvants, pétrole.

1.3.2 Inconvénients des matériaux composites :

Vieillessement 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.

Emission 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.

Il existe plusieurs types de matériau composite, ont les représentants dans la figure I.2 :

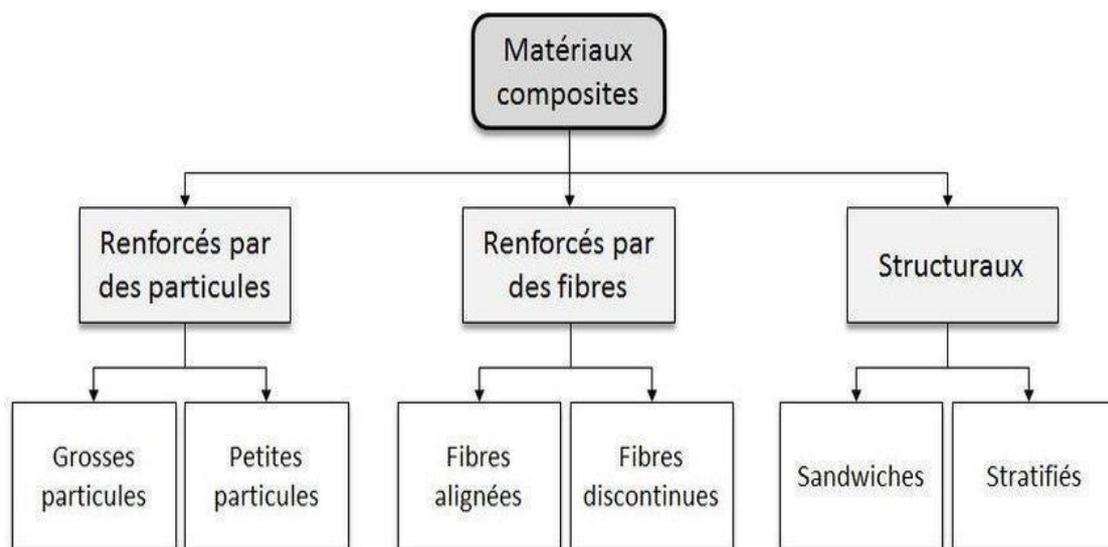


Figure (I.2): types de matériau composite [3]

Les propriétés mécaniques des composites renforcés de fibres de verre dépendent

principalement des caractéristiques des fibres, de leur orientation, de leur forme, de leur rapport volumétrique par rapport à la matrice, de la qualité de l'interface fibre résine ainsi que du procédé de fabrication.

I.4 Constituent d'un matériau composite

Les constituants principaux d'un matériau composite sont en général :

I.4.1 La matrice : elle est composée d'une résine thermoplastique ou thermodurcissable, elle donne la forme au produit réalisé, lie les renforts et les protège contre les agressions extérieures.

I.4.2 Le renfort : c'est une sorte de squelette qui assure la tenue mécanique comme la résistance à la traction et la rigidité. Il est de nature filamentaire mais pourrait être de nature particulière.

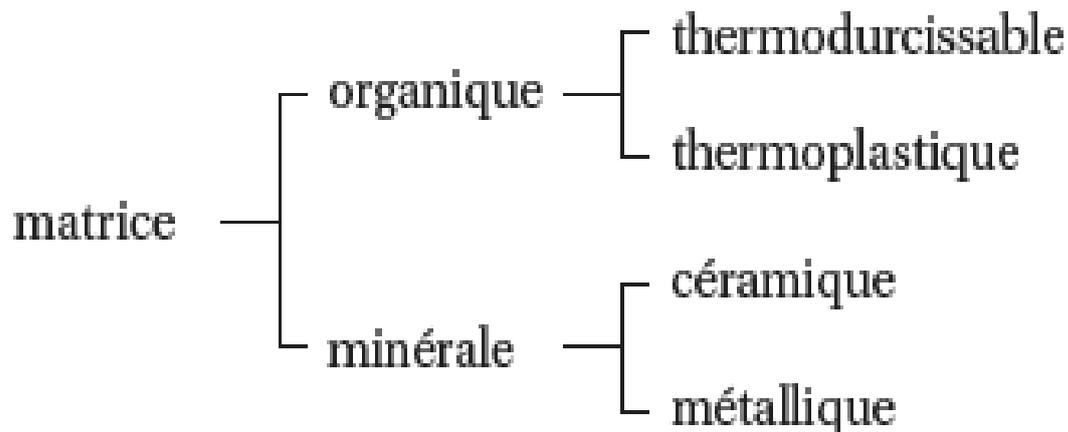
-Les charges : ce sont des ajouts appropriés qui servent à diminuer les coûts, elles confèrent aux matériaux des propriétés particulières ou complémentaires.

-L'interface : elle assure la compatibilité renfort-matrice, transfère les efforts de la matrice au renfort et doit être adaptée aux propriétés visées à l'aide d'un ensimage.

-Les additifs : ils peuvent être soit catalyseurs, soit accélérateurs de polymérisation, soit colorant ou encore agents de décollage.

-L'ensimage : désigne les traitements de surface appliqués aux fibres de renfort en sortie de tissage (ensimage textile) et sur les filières (ensimage plastique) [4].

Dans l'industrie on trouve deux types de résines : les thermodurcissables (TD) et les thermoplastiques (TP). Actuellement, les résines TD restent les plus employées [2]. Cependant, grâce aux progrès de la recherche sur les résines TP, leur part dans la production mondiale de composites est en constante augmentation. Elle est passée de 30% à 37% en volume entre 2002 et 2007. Des études récentes montrent que cette tendance perdure pour la période 2009-2014 [3].



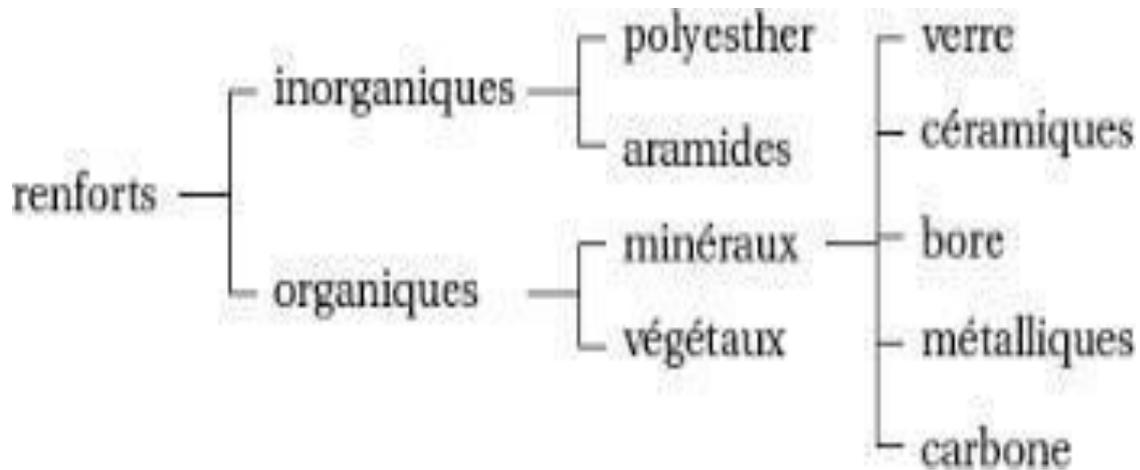
Organigramme (I.1): organigramme différents matrice [3]

I.4.3 Architecture des renforts :

Dans une structure composite, ce sont les sollicitations mécaniques qui définissent la nature, l'orientation et l'architecture du renfort. Dans le cas de matériaux réalisés avec des fibres longues, on utilise fréquemment des tissus (satin, sergé, taffetas) ou des stratifiés obtenus à partir de plis unidirectionnels (UD) (figure. I.3). Pour un renfort tissé, la période spatiale représente le plus petit intervalle pour qu'un motif se reproduise suivant les directions de chaîne ou de trame (figures I.4 et I.5) [5].

Généralement, les mèches de base, ou torons, constituant les armatures sont fabriquées à partir de plusieurs centaines de filaments enrobés dans de la matrice. Les torons sont caractérisés par leurs:

- Diamètre (2 à 4 mm)
- Torsion : nombre de tours par mètre
- Nombre de filament
- Ténacité : valeur de la rupture en traction
- Titre : exprimé en tex (g/Km) correspondant à la masse de 1000m de fil [5].



Organigramme (I.2): organigramme des différents renforts [5]

I.4.4 Charges renforçantes :

L'objectif de l'incorporation des charges renforçantes est d'améliorer les caractéristiques mécaniques de la résine. Ces charges peuvent être classées suivant leur forme géométriques en :

- Charges sphériques
- Charges non sphériques.

I.4.5 Charges non renforçantes :

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

I.4.6 Les additifs :

Les additifs sont ajoutés en faible quantité (quelques % et moins) et intervient comme :

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

I.5 Les plis unidirectionnels :

Ce qu'on appelle plis correspond à une nappe de torons parallèles, assemblés et maintenus entre eux par des fils de trame légers et cousus perpendiculairement.

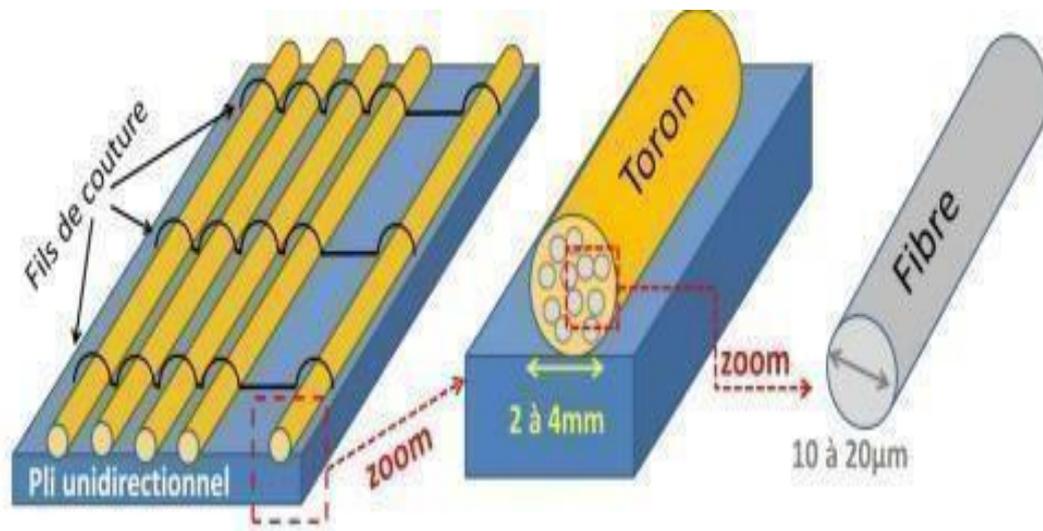


Figure (I.3): Représentation d'un pli unidirectionnel : en zoom un toron et une fibre [6]

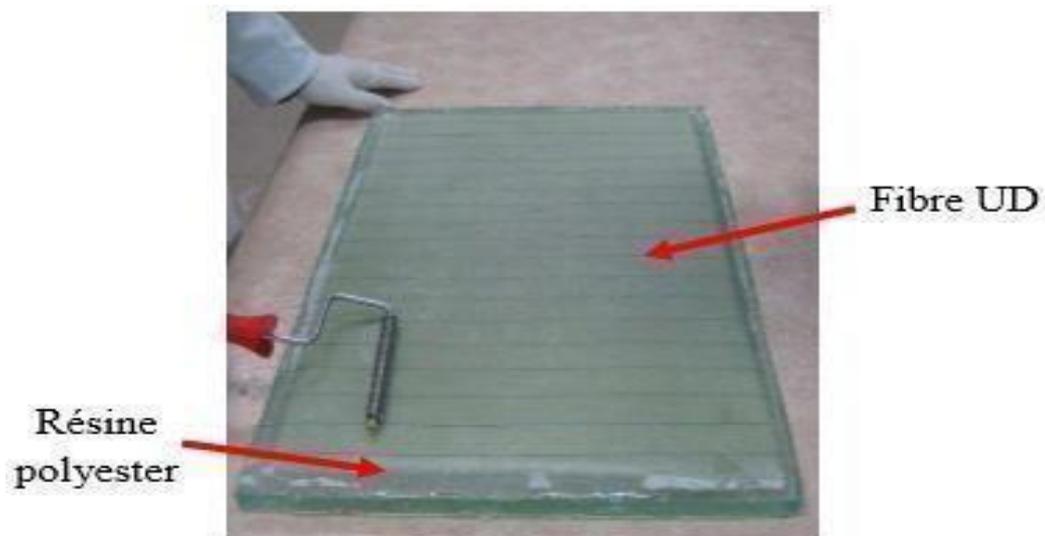


Figure (I.4) : Fibre unidirectionnel [6]

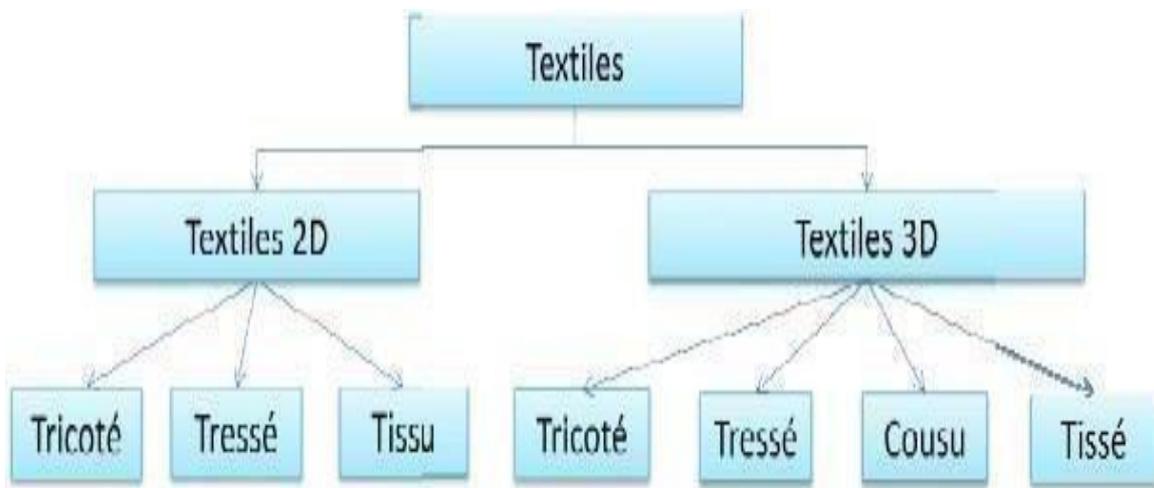
I.6 Les composites textiles :

Les composites à renforts textiles sont une sous-classe de matériaux composites où le

renforcement est un matériau textile constitué d'un réseau de fibres naturelles ou artificielles, généralement disposés en mèches ou fils. Ils sont largement utilisés dans l'industrie aéronautique en raison de leur grande rigidité et résistance au rapport de poids. La réduction du poids, tout en répondant aux exigences structurelles, est d'une importance capitale afin de minimiser la consommation de carburant dans les avions. La nécessité de réduire la consommation de carburant pose deux problèmes: la réduction des coûts d'exploitation et l'impact environnemental. Ce n'est qu'un exemple d'utilisation de matériaux composites à renforts textiles dans l'industrie mais, peut-être plus important. Les composites à renforts textiles ont donc été utilisés comme matériaux structurels depuis plusieurs décennies et ont connu une forte augmentation rapide de leur utilisation au cours des 15 dernières années [7].

Dans le cadre de cette étude, nous nous concentrons sur les généralités portant sur les composites à renfort textile, et sur les intérêts du tissage tridimensionnel comparativement au tissage bidimensionnel.

Très schématiquement, les composites textiles peuvent être classés grâce à l'arborescence suivante [7] :



Organigramme (I.3): Les types des composites textiles [7]

Il y a deux types de préformes de composite textile : les bidimensionnelles et les tridimensionnelles. Pour les composites textiles bidimensionnels, les mèches sont

continué, entremêlées, orientées au moins

Dans deux directions. De plus, elles sont également étendues dans le plan. Cette préforme à une épaisseur très petite par rapport aux dimensions du plan. Les principales préformes textiles bidimensionnelles sont : les tricotés, les tressés et les tissés.

Les préformes tridimensionnelles assurent le transfert d'effort dans les trois directions de l'espace. Les principales préformes textile à trois dimensions sont : les tricotés, les tressés, les cousus et les tissés. A chaque type de tissage correspond une machine de tissage et une technique de tissage particulière.

De nombreux types des composites à renforts textiles ont apportés de réels progrès techniques. Les résultats présentés dans cette thèse porteront sur les composites tissés 2D ainsi que sur les tissés 3D. Différents types de structures peuvent être réalisées à l'aide de composites tissés (tissus). Dans ces structures tissées, les mèches (ou torons) sont alignées ou tressées, une mèche pouvant contenir des centaines ou des milliers de fibres. Ces mèches sont ensuite tissées selon des motifs plus ou moins compliqués. Une fois la mise en forme terminée, les matrices sont présentes à deux niveaux : au sein des mèches (entre les fibres) et au sein du composite tissé (entre les mèches). (Figure II.2) [7]

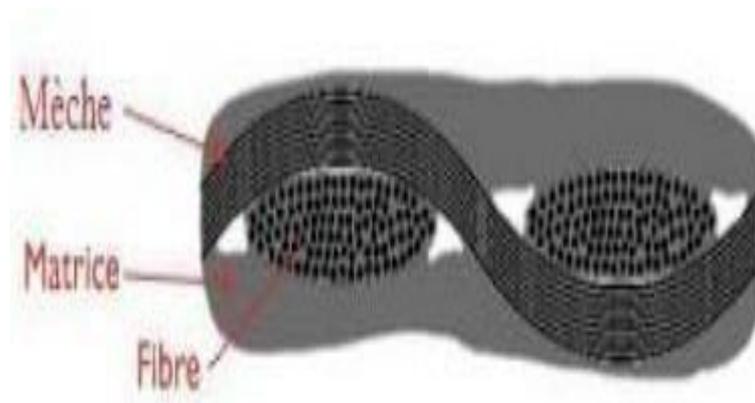


Figure (I.5) : Structure d'un composite tissé : mèches, fibres et matrice [7]

I.6.1 Les renforts textiles 3D:

Dans les composites, on retrouve en premier lieu les technologies de tissage et de tressage et dans une moindre mesure les tricots (Figure II-3). Les tricots sont obtenus en réalisant des boucles (mailles) à partir d'un fil, qui passent l'une dans l'autre. Par

cette structure spécifique de boucles, ces architectures disposent d'une très grande déformabilité et peuvent par conséquent être utilisées pour réaliser des formes complexes

, mais leur rigidité n'est alors pas très importante. Les tresses se réalisent grâce à l'entrelacement de plusieurs fils. Elles peuvent être élaborées dans un plan telle la tresse (ou natte) à trois fils utilisée de manière commune pour les coiffures, ou de manière à former une structure tubulaire autour d'un mandrin ou d'une âme comme dans le cas de l'élaboration de cordages. Les structures tissées sont les plus répandues et les plus utilisées dans le domaine des composites. L'ensemble des fils étant contenu dans le plan, ces structures présentent d'intéressantes propriétés mécaniques lorsqu'elles sont soumises à des efforts de traction. [8].

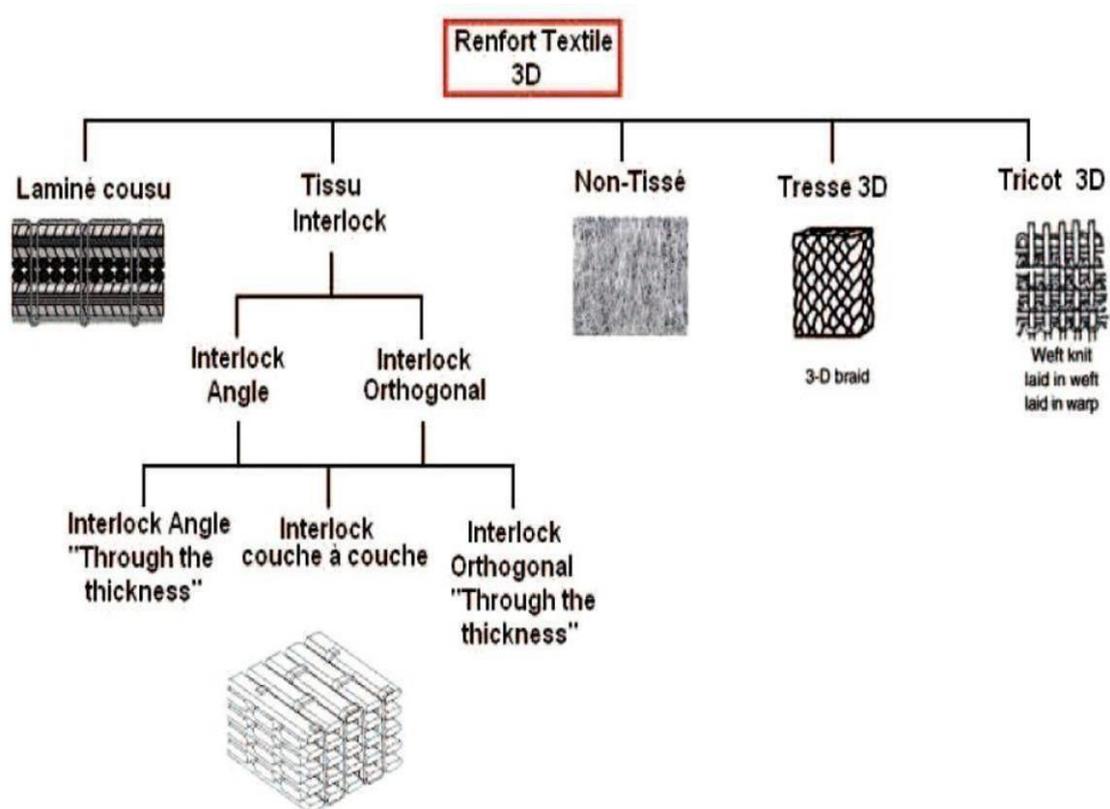


Figure (I.6) : Classification des principales structures textiles 3D [8]

I.7 Les renforts tissés 3D :

I.7.1 Tresses et préformes :

Tissage cylindrique ou conique avec des entrecroisements réguliers des fils qui a la particularité d'être modulable en diamètre. Les fils s'entrecroisent en hélice.

Le diamètre de la tresse est lié au pas de l'hélice, par conséquent à l'angle que font les fils entre eux. Ce tissage nous permet des fibres de révolution très résistantes ayant un diamètre variable le long de l'axe. [9].

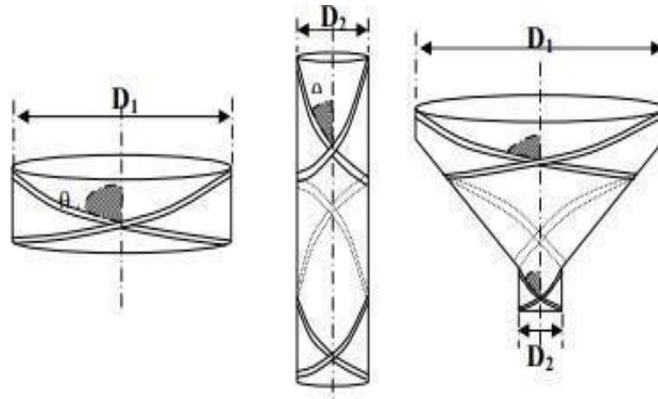


Figure (I.7) : Tissage cylindro-conique [9].

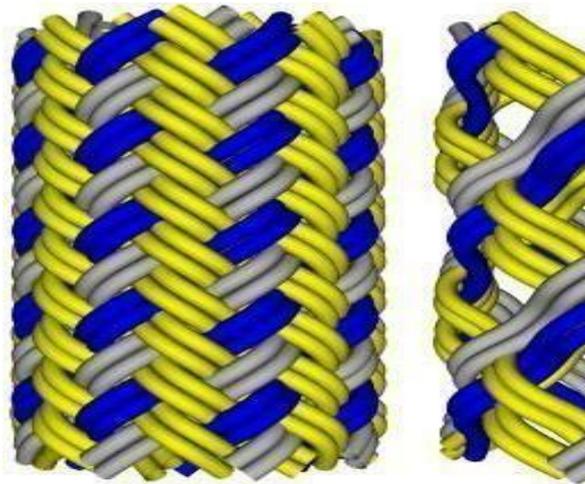
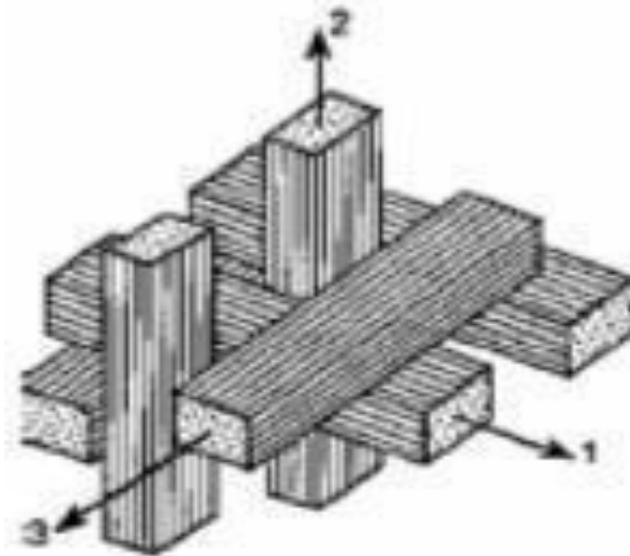


Figure (I.8) : Tissage cylindro-conique TexMind [10].

I.7.2 Tissus :

Les fibres sont tissées dans plusieurs directions. Ceci permet d'obtenir un tissu très dense et épais mais par conséquent peu souple, il est utilisé par exemple pour la réalisation de tuyère. Des tissages 3D sont montrés respectivement par la figure [11].



Figure(I.9) : Tissu tri directionnel [12]

CHAPITRE II

RESULTATS ET DISCUSSION

Chapitre II

Résultats et discussions

II.1 Conception des préformes

Les préformes en composites sont conçues par le code TEXTGEN [15]. TexGen est un logiciel « open source » dont le but est de modéliser de manière précise le volume élémentaire d'un renfort. Un certain nombre d'outils d'aide à la modélisation sont présents dans l'interface de contrôle.

II.2 Matériaux étudiés

Quatre matériaux composites de différentes préformes ont fait l'objet de l'étude. Ces préformes ont été modélisées par le code Texgen [15], puis exportées au code Abaqus. Les propriétés mécaniques effectives ont été calculées par le code EasyPBC [14] relié au logiciel commercial éléments finis Abaqus [13] sous forme de plugin en langage Python. Les quatre préformes sont formés d'une seule couche en textile tridimensionnelle. Quatre matériaux composites de matrice époxyde renforcée par des fibres de verre en forme de textiles tridimensionnelle ont été étudiés. Les propriétés mécaniques des constituants des composites (fibre + matrice) sont montrées sur les tableaux (II.1) et (II.2).

Matrice époxyde	
Module de Young E_m (MPa)	3400
Coefficient de Poisson ν_m	0.3
Dilatation thermique	6.5e-006

Tableau (II.1): Propriétés mécaniques de la matrice époxyde

Fibre de verre	
E11 (MPa)	126900
E22=E33 (MPa)	16490
v12	0.26
v13	0.26
v23	0.44
G12 (MPa)	3720
G13 (MPa)	3720
G23 (MPa)	3220
α_1	-2e-07
α_2, α_3	3e-06
module de Young de la matrice (MPa)	4510
rapport de poisson de la matrice	0.38
Matrice α	6.5e-06

Tableau (II.2) : Propriétés mécaniques de la fibre de verre

Exemple 1: 3D WEAVE (W:6, H:2) : 2 Binders et une seule couche

La préforme montrée sur la figure (II.1) est composée de deux binders par rapport à l'axe Z, et de 3 bandes de fibres par rapport à l'axe Y. La figure (II.2), présente le maillage 3D de la préforme.

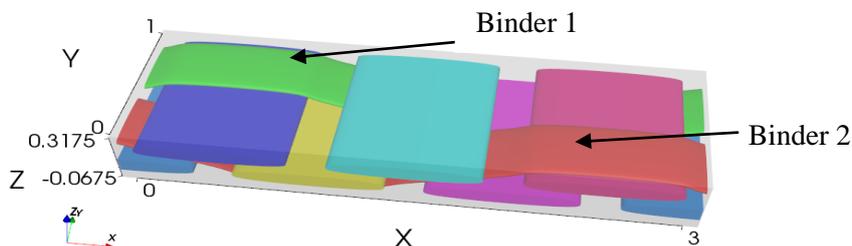


Figure (II.1): 3D WEAVE (W: 6, H: 2) [15].

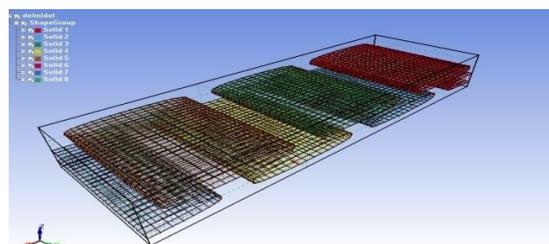


Figure (II.2) : Maillage 3D WEAVE (W:6, H:2)

Les propriétés mécaniques effectives de la préforme calculées par le code EasyPBC sont montrées sur le tableau (II.3).

Propriétés	Valeurs
E11(GPa)	13.1582918138
E22(GPa)	81.7689160638
E33(GPa)	8.02369464733
G12(GPa)	2.95276311264
G13(GPa)	2.46341627358
G23(GPa)	2.49605262846
V12	0.0290787184265
V13	0.519176681013
V21	0.18070242915
V23	0.46168566547
V31	0.316584791269
V32	0.0453035824826

Tableau (II.3) : Propriétés mécaniques 3D WEAVE (W:6, H:2)

D'après le tableau (II.3), on note que le module de Young E11 est de 13.156 GPa par rapport à la direction 1. On remarque que le module d'élasticité E22 de valeur 81.766 GPa est supérieur aux deux autres (E11 et E33) à cause de la présence de renforts. Les modules de cisaillement G13 et G23 ont des valeurs plus au moins égales (2.46 GPa et 2.49 GPa).

Exemple 2: 3D WEAVE (W:6, H:3): 3 Binders et une seule couche

La préforme montrée sur la figure (II.3) est composée de trois binders par rapport à l'axe Z, et de 3 bandes de fibres par rapport à l'axe Y. La figure (II.4), présente le maillage 3D de la préforme.

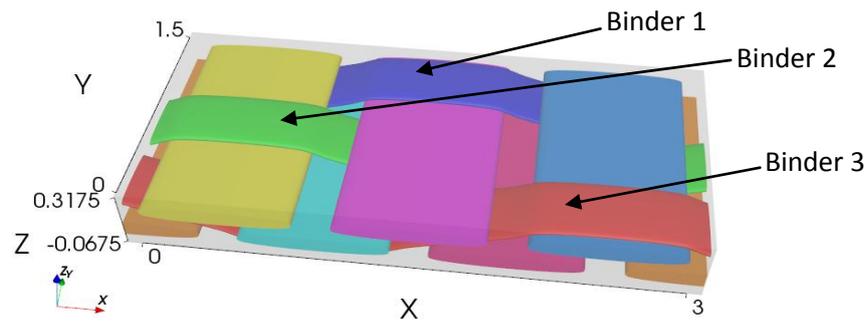


Figure (II.3): 3D WEAVE (W: 6, H: 3) [15].

Les propriétés mécaniques effectives de la préforme calculées par le code EasyPBC sont montrées sr le tableau (II.4).

Propriétés	Valeurs
E11(GPa)	17.4688372202
E22(GPa)	70.1267297999
E33(GPa)	8.11494627556
G12(GPa)	2.93867765402
G13(GPa)	2.56441122707
G23(GPa)	2.38541233856
V12	0.0305328858968
V13	0.57672372436
V21	0.122570918349
V23	0.47875114271
V31	0.267910336455
V32	0.0554002728313

Tableau (II.4) : Propriétés mécaniques 3D WEAVE (W:6, H:3) a une seule couche

Dans ce cas on a utilisé une seule couche avec 3 binders étroitement entrelacés. Et on remarque que la valeur de module de Young de cette composites a augmenté par rapport à la composites 3D WAVE (W:6, H:3) Et cette augmentation à cause de la augmentation du nombre de binders. C'est le contraire de ce qui s'est passé avec la valeur de module d'élasticité E22

Exemple 3 : 3D WEAVE (W:6, H:3) on utilise trois Binders et deux couches :

La préforme montrée sur la figure (II.5) est composée de trois binders par rapport à l'axe Z, et de 6 bandes de fibres par rapport à l'axe Y

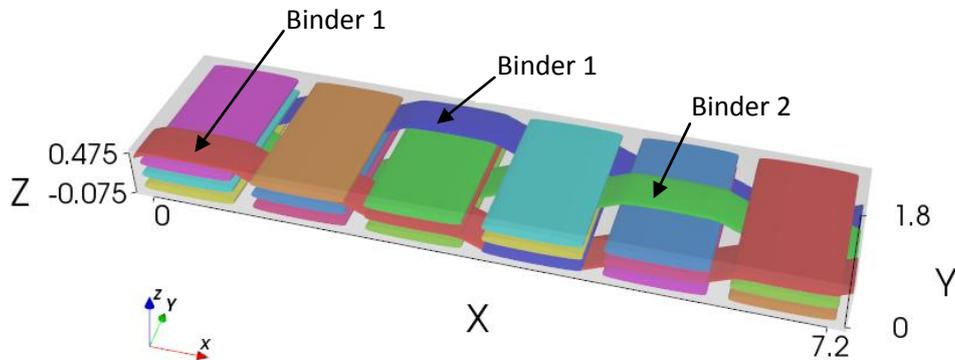


Figure (II.4): 3D WEAVE (W: 6, H: 3) 3 binder et deux couches [15].

Les propriétés mécaniques effectives de la préforme calculées par le code EasyPBC sont montrées sr le tableau (II.5).

Propriétés	valeurs
E11(GPa)	17.0700667938
E22(GPa)	70.0994497305
E33(GPa)	8.08710741333
G12(GPa)	2.93072093017
G13(GPa)	2.55464295177
G23(GPa)	2.37771980807
V12	0.0307591851525
V13	0.574850214806
V21	0.162314793122
V23	0.477271893483
V31	0.272340817998
V32	0.0550610478967

Tableau (II.5) : Propriétés mécaniques 3D WEAVE (W:6, H:3) a 2 couches

Dans ce cas nous avons modifié le nombre de couche, on obtient presque les mêmes valeurs que le composite 3D WEAVE (W:6, H:3) a une seule couche.

Example 4: 3D WEAVE (W: 8, H: 4)

La préforme montrée sur la figure (II.1) est composée de deux binders par rapport à l'axe Z, et de 3 bandes de fibres par rapport à l'axe Y et une bandes par rapport a l'axe x.

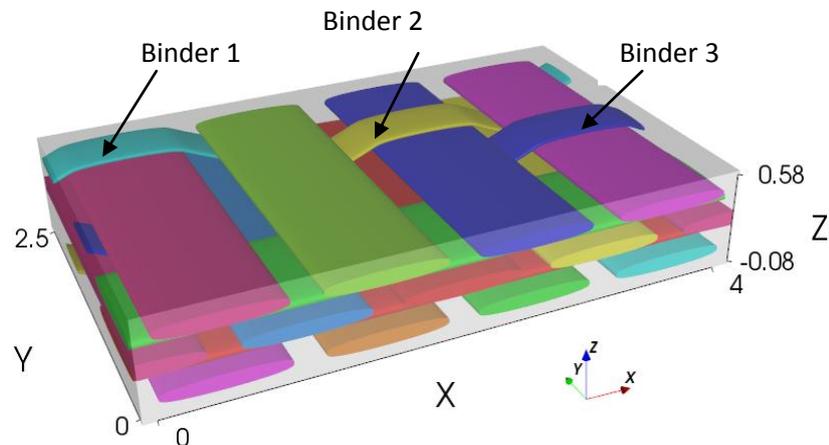


Figure (II.5): 3D WEAVE (W: 6, H: 4) [15].

Les propriétés mécaniques effectives de la préforme calculées par le code EasyPBC sont montrées sr le tableau (II.6).

Propriétés	Valeurs
E11(GPa)	28.1544832125
E22(GPa)	65.3844808608
E33(GPa)	8.76060501333
G12(GPa)	2.85157900757
G13(GPa)	2.44946457161
G23(GPa)	2.46683905353
V12	0.036800091404
V13	0.525374324092
V21	0.0854625819555
V23	0.500710306642
V31	0.163476510008
V32	0.0670881693937

Tableau (II.6) : Propriétés mécaniques 3D WEAVE (W:8, H:4)

Dans ce cas du composite le 3D WEAVE (W:8, H:4) avec 4 binders, on remarque que la valeur de module d'élasticité E22 est supérieure par rapport aux deux autres E11 et E33.

Comparaison des résultats obtenus

La figure (II.6) présente la comparaison de la valeur du module de Young E11 pour les quatre exemples considérés. On remarque que le composite 3D WEAVE (W:8, H:4) présente une valeur supérieure de l'ordre de 28.154 GPa par rapport aux trois autres, cela est dû essentiellement au mode de distribution des fibres selon les deux directions perpendiculaires. Le composite 3D WEAVE (W:6, H:2), fourni la plus faible valeur de E11 de l'ordre de 13.158 GPa.

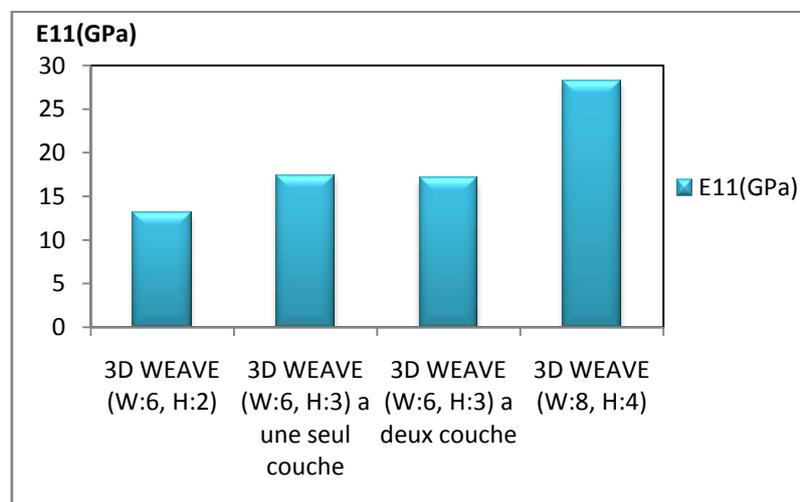


Figure (II.6): Graphe comparatif de E11 des quatre cas

La figure (II.7) présente la comparaison des résultats du module d'élasticité E22 pour les quatre exemples considérés. On remarque que le composite 3D WEAVE (W:6, H:2) présente une valeur supérieure de l'ordre de 82 GPa par rapport aux trois autres, cela est dû essentiellement au mode de distribution des fibres selon les deux directions perpendiculaires. Le composite 3D WEAVE (W:8, H:4), fourni la plus fiable valeur de E22 de l'ordre de 70 GPa, de même pour la préforme W :6,H :3.

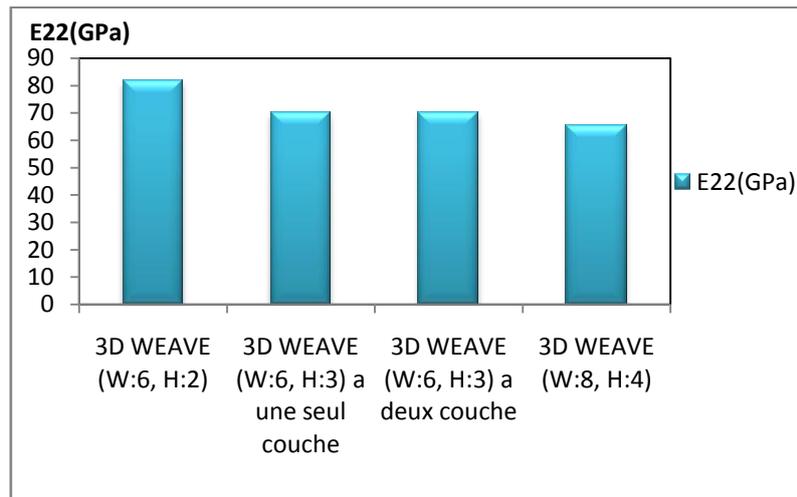


Figure (II.7): Graphe de comparaison de E22 des quatre cas étudiés

Dans le cas du module E33 (direction 3), d'après la figure (II.8), les valeurs obtenues sont pratiquement plus basses par rapport aux deux autres modules du faite du non disposition des fibres selon la troisième direction. On remarque que le composite 3D WEAVE (W:8, H:4) fournienne valeur supérieure de l'ordre de 8.760 GPa.

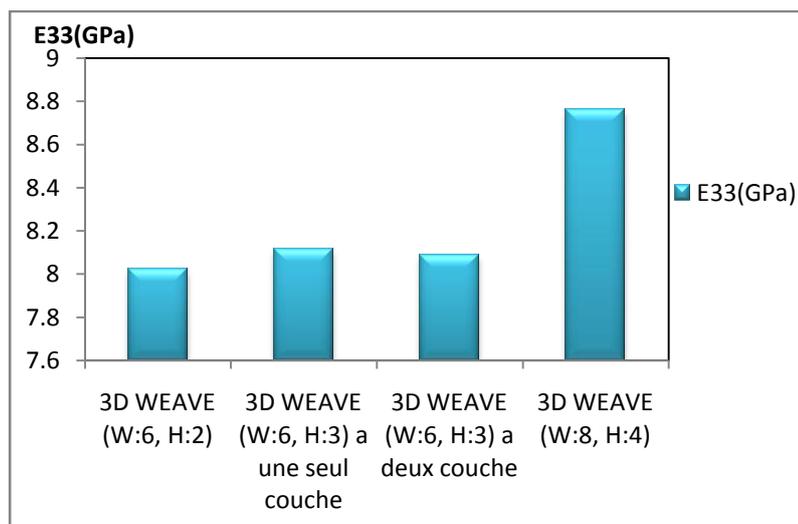


Figure (II.8): Graphe de comparaison de E33 des quatre cas étudiés

Selon le figure (II.9), on remarque que les valeurs des quatre composites sont très proches les unes des autres

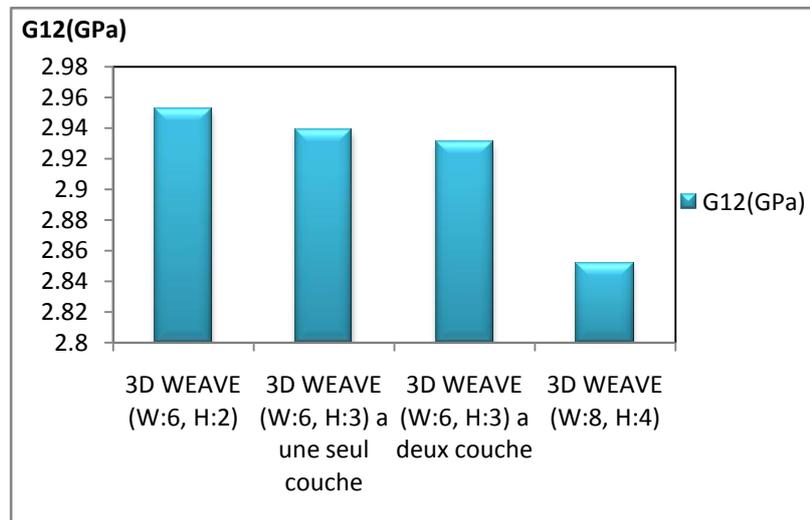


Figure (II.9): Graphe de comparaison de G12 des quatre cas étudiés

Le Figure (II.10) présente la comparaison de la valeur de G13 , on remarque que les valeurs de 3D WEAVE (W: 6, H: 3) a une seule couche et à deux couches sont supérieures aux deux autres composites le 3D WEAVE (W: 6, H: 2) et le 3D WEAVE (W: 8, H: 4), et cette supputation est dû à la présence des binders.

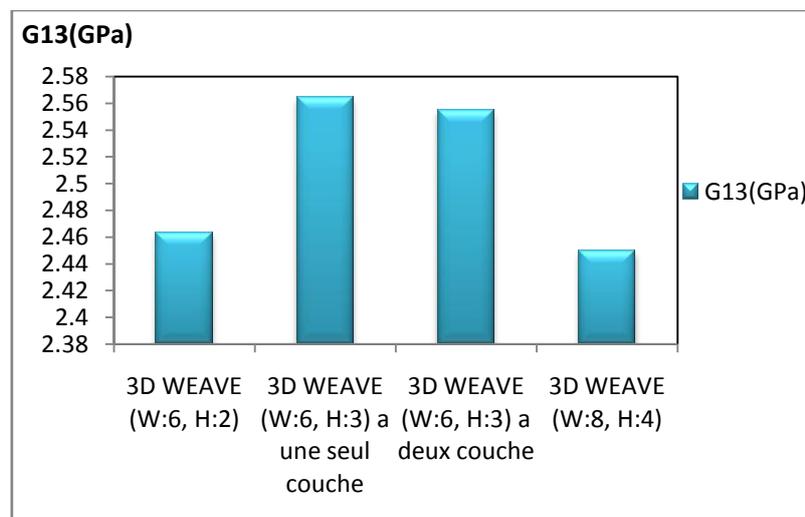


Figure (II.10): Graphe de comparaison de G13 des quatre cas étudiés

La figure (II.11), montre la comparaison de la valeur de G_{23} . On remarque que le 3D(W :6,H :2) présente une valeur de 2.5GPa, par contrer les préformes W :6,H :3 (une couche) et le W :6,H :3 (deux couches) ont les mêmes valeurs de l'ordre de 2.38GPa.

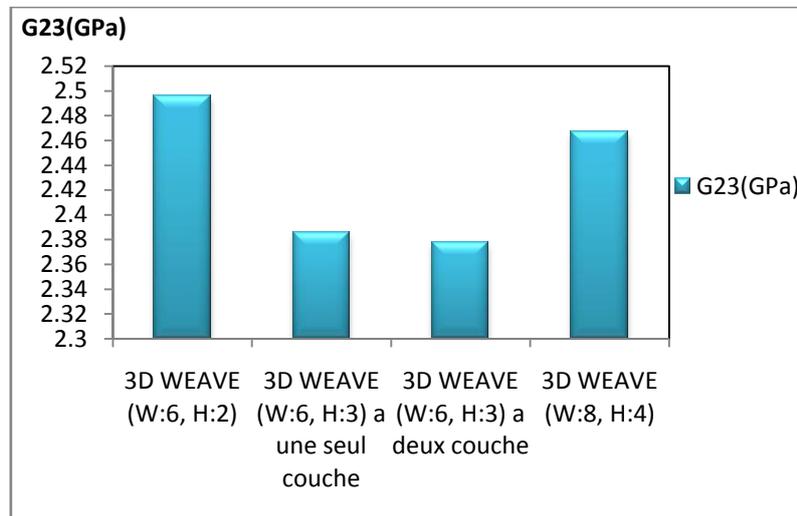


Figure (II.11): Graphe de comparaison de G_{23} des quatre cas étudiés

CONCLUSION GENERALE

Ce mémoire de fin d'étude a pour objectif la détermination des propriétés mécaniques de Quatre matériaux composites de matrice époxyde renforcée par des fibres de verre sous forme de textile tridimensionnel. Quatre types de tissages sont considérés, il s'agit du 3D WEAVE (W:6, H:2), 3D WEAVE (W:6, H:3) a une seule couche, 3D WEAVE (W:6, H:3) a deux couche et le 3D WEAVE (W:8, H:4).

Les caractéristiques mécaniques de ces matériaux ont été évaluées par la théorie de la micromécanique. La conception des préformes a été réalisée par le code TEXTGEN, puis exporté au code d'éléments finis Abaqus pour la génération de maillage. Une fois terminer cette opération, le code EasyPBC relié à Abaqus calcul les caractéristiques mécaniques en prenant en compte la cellule élémentaire de forme carrée contenant des fibres de section circulaire.

Références bibliographiques

- [1] HAMMAL.L et BOURBIA.N ; thèse ingénieur Étude du comportement mécanique d'un stratifié, université de mouloud Mammeri deTiziOuzou. Promotion 2009.
- [2] MOUAS Mohamed Reda., Etude expérimentale d'un matériau composite stratifié à fibres de kevlar en flexion trois points. Mémoire de Master en génie mécanique avancée. Université de Annaba, 2016, pp6
- [3] Mr BAYARASSOU Mokhtar ; Magister en génie mécanique Développement d'un logiciel de calcul d'homogénéisation des plaques stratifiés composites, université de Batna. 2008.
- [4] Seyni Abdoulay. 11 Décembre 2008. Thèse de Doctorat. Propriétés physicochimiques et d'usage de matériaux composites à charge dégradable produit par Cobroyage. L'institut National Polytechnique de Toulouse.
- [5] Henshaw, J. M, "Recycling and disposal of polymer-matrix composites," ASM International, pp. 1006–1012., 2001.
- [6] "Résines thermoplastiques Elium® pour composites." [Online]. Available: <http://www.arkema.fr/fr/produits/product-finder/range/ResinesElium/?back=true>. [Accessed: 20-Apr-2015].
- [7] C. HA MINH, "Comportement mécanique des matériaux tissés soumis à un impact balistique : approches expérimentale, numérique et analytique," 2011.
- [8] B. Provost, "Etude et réalisation d'une solution composite à renfort tissé interlock pour la protection balistique de véhicule," thèse, Université de Valenciennes, 2013.
- [9] G. Hivet, "Modélisation mésoscopique pour le comportement bi-axial et la mise en forme des renforts de composites tissés," Thèse de doctorat LMSP, Orléans : Université d'Orléans, 2003, 146 p.
- [10] "Métier à tisser, http://hanen-jedda.franceserv.com/chapter4/ch4_p1.htm, s. d."
- [11] "WiseTex." [en ligne]. Disponible sur: <http://www.mtm.kuleuven.be/Onderzoek/Composites/software/wisetex>. [Consulté le 12-Sep-2013].
- [12] Zeronian SH. "The mechanical properties of cotton fibers". Journal of Applied

Polymer Science, 47, 445-461, 1991.

[13] <https://en.freedownloadmanager.org/Windows-PC/Abaqus.html>

[14] <https://www.researchgate.net/project/ABAQUS-Plugin-Tool-for-Periodic-RVE-Homogenisation-EasyPBC>

[15] <https://sourceforge.net/projects/texgen/>

