

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Laboratoire de Génie Mécanique et Développement



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique



Département de Génie Mécanique

Mémoire de projet de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie Mécanique

Élaboration, caractérisation mécanique et simulation de matériaux
composites à renforts métalliques tricotés

Réalisé par :

YEMI Lelia

Présenté et soutenu publiquement le (17/07/2024)

Composition du jury :

Président	RECHAK Said	Professeur	ENP
Promoteurs	BELKACEMI Yacine	MCA	ENP
	KEBIR Hocine	MC-HDR	UTC
	HAMAIDI Mohammed Lamine	Doctorant	ENP
Examineur	AMOURA Nasreddine	MCA	U-Medea
Invité	GUERGUEB Brahim	MAA	ENP

ENP 2024

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Laboratoire de Génie Mécanique et Développement



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique



Département de Génie Mécanique

Mémoire de projet de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie Mécanique

Élaboration, caractérisation mécanique et simulation de matériaux
composites à renforts métalliques tricotés

Réalisé par :

YEMI Lelia

Présenté et soutenu publiquement le (17/07/2024)

Composition du jury :

Président	RECHAK Said	Professeur	ENP
Promoteurs	BELKACEMI Yacine	MCA	ENP
	KEBIR Hocine	MC-HDR	UTC
	HAMAIDI Mohammed Lamine	Doctorant	ENP
Examineur	AMOURA Nasreddine	MCA	U-Medea
Invité	GUERGUEB Brahim	MAA	ENP

ENP 2024

Département de Génie Mécanique/ ENP, 10 Rue des Frères OUDEK, El Harrach 16200 Alger Algérie.

Remerciements

Je tiens par ces quelques lignes à remercier les personnes qui m'ont aidée à réaliser ce Projet de Fin d'Etudes en commençant par mon encadrant et chef de département M.BELKACEMI Yacine qui a toujours été présent le long de ce projet, qui a veillé au bon déroulement de toutes les manipulations et à la réalisation dans les meilleures conditions de toutes les parties de ce projet. Je remercie également M.KEBIR Hocine pour le code de calcul ainsi que l'aide apportée dans la partie numérique. Je remercie aussi M.HAMAIDI Mohammed Lamine pour son aide lors de l'étude numérique.

Je tiens à adresser mes sincères remerciements à M.AMOURA Nasreddine, Maître de conférences à l'université de Médéa, pour avoir accepté de faire partie du jury en tant qu'examineur. Je suis particulièrement reconnaissante pour le temps qu'il a consacré à examiner et à évaluer mon travail.

Je tiens à présenter ma profonde gratitude aux enseignants du département qui nous ont guidé, formé et accompagné le long de ces trois dernières années, je remercie particulièrement M.RECHAK Said qui nous a honoré d'avoir accepté de présider notre jury, je remercie également M.GUERGUEB Brahim et M.BENBRAIKA Mohammed ainsi que M.LATRECHE Mohammed qui ont toujours été présents pour nous.

Je remercie pour finir le technicien du département M.DELHOUM SAMIR qui m'a énormément aidée tout au long de la réalisation expérimentale au département ainsi que l'atelier d'usinage de M.DJABALI Khelifa qui a été d'une grande efficacité.

Dédicaces

Je dédie ce travail à :

Mes très chers parents qui m'ont soutenue et toujours été à mes cotés pour que je parvienne où j'en suis actuellement et que je remercie pour tous ce qu'ils ont fait pour moi.

À mes frères et tous les membres de ma grande famille qui m'ont aidée et encouragée le long de cette période, je salue particulièrement ma grand-mère, mes tantes : Samou, Djazou et Tata Isma ainsi que Tonton Nabil.

À mes camarades de promo Génie mécanique qui m'ont beaucoup aidée durant ce projet et avec qui j'ai partagé de très bons moments.

À mes amies et amis qui m'ont encouragée jusqu'à l'aboutissement de ce travail que je remercie énormément tout spécialement Tata Zohra.

Pour finir je souhaite dédier ce travail à mon défunt grand-père BOUCHAMA Ali dont le départ nous touche toujours autant, les souvenirs des moments passés à tes cotés resteront pour toujours gravés dans ma mémoire en souhaitant qu'Allah t'accueille dans son vaste paradis

العمل الحالي جزء من مشروع نهائي، ويهدف إلى تطوير توصيف ومحاكاة الهياكل المعززة في شكل حياكة معدنية. تستخدم المواد المركبة اليوم في العديد من مجالات الصناعة. وهي تتكون من مصفوفة وتعزيزات يمكن أن يكون لها بنى مختلفة. تم إجراء حملة من اختبارات الشد والمحاكاة العددية. أولاً، تم تحديد سلوك المحبوكة السلوكية الجافة باختبارات الشد. تتعلق قطع الاختبار بالتكوينات المسطحة في اتجاه العمود والصف بالإضافة إلى الشكل المغمد. كما تم إجراء اختبارات توصيف تجريبية للعينات المسطحة من راتنج الإيبوكسي وحده والمركب مع التعزيز. بالنسبة للمحاكاة العددية، اخترنا برنامج Abaqus بناءً على عناصر محدودة. يتم التوليد التلقائي للهياكل المحبوكة بفضل برنامج KSP. يتم إجراء دراسة مقارنة بين النتائج العددية والتجريبية وتعطي نتائج مرضية.

الكلمات المفتاحية: تعزيزات مركبة محبوكة، محاكاة عددية، اختبار ميكانيكي، راتنج إيبوكسي

Abstract

This work is part of an End of Study Project, and aims to develop, characterize and simulate structures with reinforcements in the form of metallic knitting.

Composite materials are used in several areas of industry. They are composed of a matrix and a reinforcement which can have different architectures. A series of tensile tests and numerical simulation was carried out. The behavior of dry knitted fabrics with metallic thread was identified with tensile tests. The test pieces concern planar configurations in the warp and weft directions as well as cylindrical shape. Experimental characterization tests on flat specimens of the epoxy resin alone and of the composite with reinforcement were also carried out. For the numerical simulation, we opted for the Abaqus software based on finite elements. The automatic generation of knits is done using the KSP software.

A comparative study between the numerical and experimental results was carried out which yielded satisfying results.

Keywords :

Composite, knitted reinforcements, numerical simulation, mechanical tests, resin.

Résumé

Le présent travail entre dans le cadre d'un Projet de Fin d'Études, et a pour but d'élaborer de caractériser et de simuler des structures à renforts sous forme de tricot métallique.

Les matériaux composites sont utilisés aujourd'hui dans plusieurs domaines de l'industrie. Ils sont composés d'une matrice et d'un renfort qui peut avoir différentes architectures. Une campagne d'essais de traction et de simulation numérique a été faite. Dans un premier temps, le comportement des tricots secs à fil métallique a été identifié avec des essais de traction. Les éprouvettes concernent des configurations planes dans le sens colonne et rangée ainsi que de forme gaine. Des essais de caractérisation expérimentale d'éprouvette plate de la résine époxydique seule et du composite avec renfort ont été menés également. Pour la simulation numérique, nous avons opté sur le logiciel Abaqus basé sur les éléments finis. La génération automatique des tricots est faite grâce au logiciel KSP.

Une étude comparative entre les résultats numériques et expérimentaux est faite et donne des résultats satisfaisants.

Mots clés :

Composite, renforts tricot, simulation numérique, essais mécaniques, résine.

Table des matières

Table des figures

Liste des tableaux

Liste des symboles

Liste des acronymes

Introduction générale	13
1 Recherche bibliographique	14
1 Introduction	14
1.1 État de l'art	14
2 Matériaux composites	19
2.1 Constituants d'un matériau composite	19
2.2 Mise en forme	20
3 Matériaux en textile	20
4 Problématique	21
5 Utilisation du tricot dans l'industrie	21
6 Procédé de tricotage	22
7 Caractéristiques de la mèche	24
8 Modélisation de la maille du tricot	25
8.1 Modèle géométrique	25
8.2 Modèle mécanique	26
9 Modélisation du comportement du tricot	26
9.1 Modèle Analytique	26
9.2 Modèle numérique	27
10 Comportement des tricots en renfort	27
10.1 Paramètres qui influent sur le comportement des tricots	27
10.2 Comportement des composites à renfort tricoté lors de la traction	29
11 Essai de traction uniaxiale	29
12 Norme d'essai ASTM	30
13 Fibre du tricot utilisé : Fibre Métallique	32
14 Comportement de la résine	33
15 Conclusion	34
2 Étude Expérimentale	35
1 Présentation du tricot métallique utilisé	35
2 Préparation des éprouvettes	36

2.1	Préparation des éprouvettes de tricot seul	36
2.2	Préparation des éprouvettes de la résine seule	37
2.3	Préparation des éprouvettes en matériau composite : Tricot+ Résine de 25 mm de largeur	40
2.4	Préparation des éprouvettes en matériau composite : Tricot+ Résine de 55 mm de largeur	43
3	Caractérisation de la résine	46
4	Essais de traction uniaxiale	47
4.1	Dispositif expérimental	47
4.2	Mors utilisés	48
4.3	Dispositif de traction de tricot en gaine	50
5	Résultats expérimentaux	51
5.1	Essais de traction sur résine seule	51
5.2	Essais de traction sur Tricot seul	54
5.3	Essais de traction sur tricot + résine	56
5.4	Problème avec rangée tricot seul	62
5.5	Essais de traction sur les tricots sous forme de gaine	63
6	Conclusion	66
3	Étude Numérique	68
1	Présentation des outils numériques utilisés	68
1.1	KSP	68
1.2	Abaqus	69
2	Travail effectué	69
2.1	Étude sur le tricot seul	70
2.2	Étude sur la résine seule	75
2.3	Étude du composite dans la direction colonne	77
2.4	Étude du composite dans la direction rangée	81
3	Résultats et discussions	82
3.1	Résultat pour la simulation du tricot avec une taille de 5 mailles	82
3.2	Résultat pour la simulation du tricot seul de taille normalisée	82
3.3	Résultats pour la simulation de la résine seule	83
3.4	Résultat pour la simulation du composite dans la direction colonne	84
3.5	Résultat pour la simulation du composite dans la direction rangée	85
3.6	Comparaison des résultats obtenus pour la résine seule et avec renfort	86
4	Comparaison des résultats numériques aux résultats expérimentaux	86
5	Conclusion	87
	Conclusion générale et Perspectives	88
	Bibliographie	90

Table des figures

1.1	Schéma de la composition d'un matériau composite	19
1.2	Structures textiles utilisées : a-tricotées, b-tissées, c-non tissées, d-tressées.	21
1.3	Carte de circuit imprimé en tissu tricoté	22
1.4	Valeurs de pression d'interface simulées entre la gaine et la jambe	22
1.5	Les différents modèles de tricot : a- Tricot en trame (jersey simple), b- Tricot côte, c-Tricot chaîne, d,e- Maille simple, f- Interlock, g- Tricot plein, h- Cordon reine trois aiguilles, i- Peau de requin trois aiguille	23
1.6	Étapes de formation d'une maille	23
1.7	Modélisation géométrique d'une mèche fibreuse	24
1.8	Modèles géométriques proposés	25
1.9	Modèles mécaniques proposés.	26
1.10	Représentation de la CER et des forces appliquées	26
1.11	Différents types de maillages en éléments finis.	27
1.12	Élément hexaédrique	27
1.13	Courbe contrainte-déformation de composites à renfort tricoté de contexture côte en traction	28
1.14	Courbe Contrainte-Déformation d'un essai de traction d'un composite à renfort tricoté montrant les étapes d'endommagement	29
1.15	Dispositif des essais de traction uniaxiale	30
1.16	Fibres Métalliques en acier inoxydable	33
1.17	Courbes Contrainte-Déformation des différents modèles d'hyperélasticité	33
1.18	Courbe : Contrainte-Déformation correspondant au modèle d'Ogden d'ordre 2	34
2.1	Tricot en fibres métalliques	35
2.2	Taille de l'éprouvette textile selon la norme ISO 13934	36
2.3	Éprouvette tricot seul dans la direction rangée	36
2.4	Éprouvettes en gaine du tricot métallique pour une étude paramétrique avec plusieurs largeurs	37
2.5	Conception du moule de résine seule	37
2.6	Moule Résine Seule	38
2.7	Pâte de démoulage	39
2.8	Résultat du moulage	39
2.9	Taille des éprouvettes Résine Seule	39
2.10	Éprouvettes Résine Seule 25 mm	40
2.11	Pied à coulisse utilisé pour les mesures	40
2.12	Taille d'une éprouvette selon la norme ASTM D3039	40
2.13	Schéma du moule Résine + Tricot 25 mm	41
2.14	Éprouvette Résine+ Tricot 25mm direction Colonne	41

2.15	Conception moule 55mm	43
2.16	Moule utilisé 55mm	44
2.17	Éprouvette Résine+ tricot dans la direction rangée avec une largeur de 55mm	45
2.18	Éprouvette de résine seule de 55 mm de largeur	45
2.19	Dispositif de traction avec extensomètre	46
2.20	Courbe : Contrainte-Extension de l'essai de caractérisation de la résine	47
2.21	Machine de traction	48
2.22	Mors originaux de la machine	48
2.23	Proposition -1- : Mors sur mesure pour la machine de traction	49
2.24	Proposition -2- : Étau à mors mobiles	49
2.25	Étau à mors mobiles pour les essais de traction	50
2.26	Conception du dispositif de traction des tricots en forme de gaine	50
2.27	Dispositif de traction des tricots en forme de gaine	51
2.28	Machine de traction avec étau et mors montés	52
2.29	Courbe Force-Déplacement : Résine Seule	52
2.30	Courbes Force-Déplacement des essais sur la résine seule	53
2.31	Éprouvette de résine Seule après rupture	53
2.32	Aspects des éprouvettes de résine seule après test de traction	54
2.33	Courbe : Force-Déplacement pour la résine seule avec 55 mm de largeur	54
2.34	Allure des tricots après traction pour différentes largeurs : de 25 mm a 65 mm	55
2.35	Étude Paramétrique de l'évolution de la force maximale en fonction du nombre de mailles	55
2.36	Courbes Force-Déplacement résumant le comportements des différents tricots	56
2.37	Courbe Force-Déplacement pour composite : Tricot+Résine dans la direction colonne de 25mm de largeur	57
2.38	Courbe : Force-Déplacement pour composite résine + tricot de 25 mm de largeur dans la direction rangée	57
2.39	Courbes force-déplacement de la résine seule et renforcée	58
2.40	Éprouvette composite 25 mm après traction	59
2.41	Section de rupture de l'éprouvette composite de 25 mm	59
2.42	Courbe : Force-déplacement composite de 55 mm dans la direction colonne	59
2.43	Courbe : Force-déplacement pour composite de 55 mm dans la direction rangée	60
2.44	Courbes force-déplacement de la résine seule et renforcée avec 55 mm de largeur	60
2.45	Section de rupture du composite de 55 mm de largeur	61
2.46	Éprouvette composite de 55mm de largeur pendant la traction dans la direction colonne	62
2.47	Éprouvette rangée a l'état plan	63
2.48	Problème de fin de course	63
2.49	Montage du tricot de 45 mm de largeur sur le dispositif de gaine élaboré	64
2.50	Courbure générée par l'essai de traction sur tricot en gaine de 45 mm de largeur.	64
2.51	Élongation du tricot en gaine de 45 mm de largeur	65
2.52	Défilement du tricot en gaine de 45 mm de largeur	65
2.53	Courbes normalisées : Force-Déplacement des différentes tailles de tricots en gaine	66
3.1	Interface KSP	69
3.2	Paramètres des tricots sur KSP	70
3.3	a. Tricot généré b. vue sur les mailles obtenues	70
3.4	Tricot importé dans Abaqus	71

3.5	Propriétés de l'acier du tricot	71
3.6	Paramètres STEP	72
3.7	Paramètres de viscosité	72
3.8	Problème de démaillage dans le tricot	72
3.9	Création du contact entre les mailles	73
3.10	Couplage entre R_p et les mailles sur une longueur de 40 mm	73
3.11	Conditions limites pour l'essai sur le tricot seul	74
3.12	Itérations lors du calcul de l'essai sur le tricot seul	74
3.13	Schéma de modélisation équivalent	75
3.14	Allure du tricot après déformation	75
3.15	Variation du déplacement le long du tricot	76
3.16	Modèles de densité d'énergie de déformation	76
3.17	Propriétés de la résine sur Abaqus	77
3.18	Allure de la déformation de l'éprouvette de résine seule	77
3.19	Tricot 5 mailles dans la direction colonne depuis KSP	77
3.20	Création de la matrice sur Abaqus	78
3.21	Assemblage du tricot et de la résine	78
3.22	Paramètres du couplage pour l'essai Résine + Tricot	79
3.23	Création de l'immersion : Fonction Embedded Region	79
3.24	Création de l'immersion : Fonction Embedded Region	80
3.25	Maillage initial et raffiné de la matrice	80
3.26	Informations sur l'élément type utilisé	81
3.27	Allure de la déformation pour le matériau composite : tricot+ résine	81
3.28	Tricot dans la direction rangée généré par KSP	82
3.29	Déformée du composite Tricot + Résine dans la direction rangée	82
3.30	Courbe Force-Déplacement pour tricot 5 mailles	83
3.31	Courbe Force-Déplacement tricot 10 mailles	83
3.32	Courbe : Force- Déplacement de la simulation de la résine seule.	84
3.33	Courbe : Force-Déplacement du composite dans la direction Colonne	84
3.34	Courbe Force Déplacement pour Composite : Résine + Tricot direction Rangée	85
3.35	Courbe comparative Force Déplacement pour la résine seule et renforcée.	86
3.36	Fiche technique résine sikafloor-264 page 1	94
3.37	Fiche technique résine sikafloor-264 page 2	95

Liste des tableaux

1.1	Tableau récapitulatif des principaux travaux cités	18
1.2	Résumé des normes ASTM et ISO concernant les matériaux : textiles, composites et polymères	31
2.1	Caractéristiques du tricot	35
2.2	Composition de la résine Sikafflor-264	37
2.3	Dimensions géométriques des éprouvettes de résine seule	40
2.4	Dimensions géométriques des éprouvettes Résine + Tricot dans la direction Colonne de 25 mm de largeur	42
2.5	Dimensions géométriques des éprouvettes Résine + Tricot dans la direction Rangée de 25 mm de largeur	43
2.6	Dimensions géométriques des éprouvettes Résine + Tricot dans la direction Colonne de 55 mm de largeur	45
2.7	Dimensions géométriques des éprouvettes Résine seule de 55 mm de largeur	46
2.8	Résumé des résultats des tests de traction sur tricot seul	54
2.9	Étude Paramétrique du nombre de mailles	55
2.10	Résultats des essais de traction sur composite dans la direction colonne	56
2.11	Tableau résumant les essais sur les tricots en gaine	66
3.1	Tableau résumant les valeurs expérimentales et numériques à titre comparatif	87

Liste des symboles

E	Module de Young	GPa
E_f	Module de Young de la fibre	GPa
ν	Coefficient de Poisson	/
ρ	Masse volumique	$kg.m^{-3}$
ρ_f	Densité volumique de la fibre	$kg.m^{-3}$
ϵ	Déformation	%
σ	Contraintes	MPa
F	Force	N
e	Épaisseur	mm
L	Longueur	mm
l	Largeur	mm
ΔL	Élongation	mm
L_0	Distance entre les mors	mm
S	Surface	mm^2
S_m	Surface de la mèche	mm^2
S_f	Aire de la fibre	mm^2
u	Déplacement	m
d_m	Diamètre de la mèche	mm
I_{GZ}	Moment quadratique de la mèche	mm^4
D_l	Densité linéaire de la mèche	tex
V_{fm}	Fraction volumique de la mèche dans la matrice	%

Liste des acronymes

- AFNOR** : Association Française de Normalisation.
ASTM : American Standards of Technical Material
CEN : Comité Européen de Normalisation.
CER : Cellule Élémentaire Représentative.
KSP : Kebir Simulation Program.
ISO : International Organization for Standardization.
PVC : poly (chlorure de vinyle).
 R_p : Reference point.
VARTM : Vacuum Assisted Resin Transfer Molding.

Introduction générale

L'utilisation des matériaux composites dans l'industrie est en croissance continue surtout dans le domaine de l'aéronautique, l'automobile ainsi que le domaine médical en raison des propriétés qu'offrent ces matériaux notamment : la légèreté, la rigidité et sa durabilité. Ces matériaux sont composés d'une matrice et d'un renfort, ce dernier peut avoir différentes architectures à savoir : des fibres courtes, des renforts en nanomatériaux, des fibres longues, une architecture tissée, tressée ou encore tricotée[1].

Parmi ces structures, les renforts tricotés sont les moins utilisés en industrie en raison des faibles propriétés mécaniques qu'ils possèdent à l'état plan, cependant, ils possèdent une grande capacité de déformabilité qui les rend très intéressants pour les pièces à géométrie complexe en raison de leur forte drapabilité, cette propriété permet d'éviter l'assemblage des pièces qui se fait généralement lorsqu'on utilise un renfort tissé ou à fibre courte ce qui devrait réduire les zones à risque. En plus de cette propriété, les structures tricotées sont facilement produites à l'échelle industrielle en utilisant des métiers à tisser plans ou cylindriques ce qui représente un gain de temps de production[2].

Plusieurs travaux ont été fait dans le sens d'étudier le comportement de ces structures, d'évaluer leurs propriétés et chercher à les modéliser afin de pouvoir par la suite les améliorer de sorte à élargir leur utilisation dans le monde industriel[3, 4].

Les structures tricotées disposent d'un grand potentiel exploitable en raison des nombreuses propriétés que ces structures possèdent telles que : La capacité de déformation, la drapabilité, la rapidité de production,... Cependant, ces structures offrent des propriétés mécaniques inférieures comparées à celles des autres structures textiles. Nous allons donc nous intéresser à l'étude de ces structures afin de mieux comprendre leur comportement. Ce travail est une contribution pour exploiter les performances des tricots à fil métallique.

Le présent travail se compose de trois chapitres : Le premier chapitre représente une recherche bibliographique concernant les structures tricotées, leur modélisation et leur comportement. Une présentation des tests de traction ainsi que les normes en relation avec ces matériaux a été faite par la suite, Les principaux travaux de recherches ayant le même thème sont présentés également.

Dans le deuxième chapitre, une explication des essais expérimentaux est faite : usinage, moulage, élaboration des éprouvettes, essais de traction,... ainsi qu'une présentation et analyse des résultats obtenus. Les tricots seront d'abord étudiés à l'état plan puis en gaine (forme cylindrique) puis en renfort dans une matrice en résine.

Le troisième chapitre représente une étude numérique qui reprend tous les essais expérimentaux. Pour cela un code de calcul KSP est utilisé pour générer automatiquement les tricots qui seront importés dans un logiciel de simulation : Abaqus pour comparer les résultats par la suite aux résultats expérimentaux.

Chapitre 1

Recherche bibliographique

1 Introduction

Ce chapitre est composé de deux parties : Une première partie qui représente une vue globale des principaux travaux réalisés étudiant les matériaux renforcés par des renforts sous forme de tricotés. La plupart de ces travaux représentent des thèses qui ont pour but d'optimiser les structures tricotées en vue de leurs propriétés mécaniques inférieures comparées aux autres structures : tissées, tressées,... . Deux aspects d'études ont été fait à cet effet : une étude "théorique" basée sur la théorie de l'élasticité, une étude "numérique" en utilisant des logiciels de simulation, des techniques numériques, des méthodes itératives,... . Et une étude expérimentale au moyen d'un dispositif de traction uniaxiale et biaxiale afin de mesurer les propriétés mécaniques obtenues. À la fin, une comparaison des résultats obtenus à partir des deux études est faite afin de valider le modèle obtenu.

La deuxième partie consiste en une recherche bibliographique sur les structures tricotées, leur comportement à l'état sec et en renfort ainsi que leur modélisation. Une présentation du dispositif de traction sera faite ainsi que les différentes normes en relation avec notre étude seront exposées.

1.1 État de l'art

Cette section présente un état de l'art des principaux travaux en relation avec le thème étudié.

Comportement des matériaux composites à renforts tricotés élaborés par injection de résine

Cette thèse de doctorat réalisée à l'Université de Toulouse en avril 2011 par **Laura BALEA** [5], a pour but d'étudier le comportement des tricotés secs et avec injection de résine. Les matériaux choisis pour les tricotés sont : Le Basalte, la fibre de verre et la fibre de Carbone. Le travail est composé d'une première partie qui rapporte les essais et résultats expérimentaux tandis que la deuxième partie représente une modélisation de l'étude faite.

Pour ce qui est des tricotés secs, les architectures étudiées sont : Cotes 1x1, Jersey, et Jersey avec mèches insérées dans la rangée. Ces structures sont soumises à des tests de traction uniaxiale et les résultats sont les suivant :

1. Le comportement est non linéaire, surtout à 45° et 90°.

2. La structure Cotes est plus rigide que le Jersey pour les cas inclinés à 45° et 90°.
3. Les fibres de carbone ont une meilleure résistance à la rupture que les fibres de basalte.
4. Les mèches insérées augmentent la rigidité et la résistance du Jersey.

Par la suite, une injection de résine est faite sur les tricots secs, et voici les résultats après les tests de traction :

1. Le comportement est similaire aux tissus secs, mais avec une meilleure raideur et résistance.
2. La direction de sollicitation a une influence importante sur le comportement.
3. Les zones riches en fibres sont plus résistantes que les zones pauvres en fibres.
4. Les mèches insérées améliorent les propriétés mécaniques du composite.

Pour la deuxième partie, deux modélisations ont été choisies : Un **Modèle semi-analytique du comportement du jersey sec** basé sur la théorie de l'élasticité qui fournit un modèle géométrique de la maille pour tout état de déformation et un **Modèle d'estimation des propriétés élastiques du composite** basé sur le principe d'homogénéisation qui utilise l'orientation des fibres calculée par le modèle du Jersey.

Les résultats de cette modélisation sont les suivants :

1. Le modèle prédit le comportement du composite avec une bonne précision.
2. Le modèle permet de prendre en compte les mèches insérées et la pré-tension du tissu.

En conclusion, le comportement des composites renforcés par des tissus tricotés est influencé par : l'architecture du tissu, la nature de la fibre et la direction de sollicitation. Les mèches insérées dans le jersey peuvent améliorer les propriétés mécaniques du composite. On peut voir aussi que le modèle développé permet de prédire le comportement du composite et d'optimiser l'architecture du tissu pour des applications spécifiques.

Caractérisation et contribution à la modélisation du comportement mécanique des structures tricotées

Cette thèse réalisée en septembre 2023 à l'Université Cadi Ayyad de Marrakech par **Youssef Cherradi**[3] a pour but le développement d'un modèle Éléments Finis précis et efficace capable de prédire le comportement mécanique des tricots sous différentes conditions de chargement. Ce travail est divisé en cinq chapitres. Le premier chapitre présente une introduction générale aux tissus tricotés et à la FEA (Analyse par Éléments Finis). Il passe également en revue la littérature existante sur la modélisation des tissus tricotés, par la suite, l'auteur décrit les méthodes expérimentales utilisées pour caractériser les propriétés mécaniques des tissus tricotés, telles que la traction, la compression et le cisaillement. Le troisième chapitre, présente le développement d'un modèle EF (Éléments Finis) pour les tissus tricotés, ce modèle est basé sur une formulation hyperélastique et prend en compte les propriétés non linéaires et anisotropes du tissu des logiciels de simulation ont été choisis comme outil pour cette étude numérique. Dans le chapitre qui suit il est question de passer à la validation du modèle EF en comparant ses prédictions aux résultats des essais expérimentaux. Le dernier chapitre présente les applications du modèle EF qui est utilisé pour prédire le comportement mécanique des tricots sous différentes conditions de chargement, telles que la compression statique et dynamique. En conclusion le modèle présenté dans ce travail représente un très bon outil pour étudier le comportement des tricots.

Modélisation et simulation du comportement mécanique des tricots trame pour applications techniques

Le travail réalisé par **Mario de Araujo, Raul Fanguero & Hong Hu** en 2003 et complété en 2004 a pour but d'étudier les propriétés mécaniques des tissus weft-knitted et leur potentiel pour des applications techniques [6, 7]. Il est à noter que les travaux cités représentent une très bonne référence qui a été utilisée dans tous les autres travaux présentés.

Dans l'étude expérimentale, différentes structures de tricot weft-knitted (Jersey, 1x1 Jersey, polaire, sandwich) ont été fabriquées en fibre de verre. Des fils non-tricotés ont été introduits dans la structure du tissu pour améliorer la rigidité et contrôler l'anisotropie du tissu. Les tissus tricotés ont été pré-tendus avant l'application de la résine pour minimiser l'extension initiale. Les propriétés de traction des tissus et de leurs composites ont été évaluées dans différentes directions. et les résultats sont les suivants :

1. L'introduction de fils non-tricotés a augmenté la charge de rupture mais diminué l'allongement à la rupture des tissus weft-knitted.
2. La pré-tension des tissus a amélioré leur rigidité et réduit leur déformation non linéaire initiale.
3. Le matériau composite le plus performant était un tissu Jersey double couche pré-tendu testé dans la direction des lisières.

En conclusion, cette thèse a démontré que les propriétés mécaniques des tissus weft-knitted peuvent être améliorées pour les applications techniques en modifiant leur structure et en utilisant des techniques de pré-tensionnement. Le tissu jersey double couche pré-tendu est une structure prometteuse pour le renforcement de composites.

Modélisation numérique du comportement mécanique de tissus tricotés en trame biaxiaux sur différents échelles de longueur

La thèse réalisée par **Minh Quang Pham, Oliver Döbrich, Wolfgang Trümper, Thomas Gereke & Chokri Cherif** en Novembre 2019 porte sur la simulation numérique du procédé de formage des tissus weft-knitted biaxiaux, utilisés dans la fabrication de composites. L'objectif est de développer des modèles précis et efficaces pour prédire le comportement du tissu pendant le formage et d'améliorer ainsi la qualité des produits finis[8].

Le travail commence par une revue approfondie des modèles existants pour la simulation du formage des textiles a été effectuée. Deux types de modèles ont été identifiés : les modèles à l'échelle macroscopique et les modèles à l'échelle mésoscopique. Par la suite, on passe au développement de modèles : Le modèle à l'échelle macroscopique considère le tissu comme un continuum, tandis que le modèle à l'échelle mésoscopique représente la structure du tissu en tenant compte des fils individuels. La suite de l'étude consiste en la validation des modèles : Les modèles ont été validés par comparaison avec des résultats expérimentaux. Des essais de traction, de flexion et de compression ont été réalisés sur des tissus weft-knitted biaxiaux. Pour finir, des simulations du procédé de formage ont été faites : Les modèles ont été utilisés pour simuler le formage d'un dôme à partir d'un tissu weft-knitted biaxial et voir l'influence de différents paramètres sur le comportement du tissu pendant le formage a été étudiée.

Comme résultats on voit que les deux modèles ont été validés avec succès par comparaison avec des résultats expérimentaux. Le modèle à l'échelle mésoscopique a permis de prédire plus précisément le comportement du tissu pendant le formage que le modèle à l'échelle macroscopique. L'influence de différents paramètres sur le comportement du tissu pendant le formage a été étudiée, notamment le type de matériau, la structure du tissu et les conditions de formage.

Composites à renfort tricoté : Relations entre contexture, nature du renfort et propriétés mécaniques du composite infusé

Ce travail réalisé à l'Université de Toulouse par **Laura Balea**, **Gilles Dusserre**, **Gérard Bernhart** en Juin 2011 a pour but d'étudier l'influence de la contexture du tricot (nombre de fils flottés) et de la nature des fibres sur les propriétés mécaniques des composites à renfort tricoté fabriqués par VARTM qui est un procédé utilisé pour infuser des pièces de très grande dimension, à un taux de 4 pièces par moule par quart de travail. Les moules sont peu coûteux et possèdent une durée de vie pouvant atteindre 1 000 pièces, selon la géométrie[4].

La méthodologie de cette recherche est selon les étapes suivantes :

1. La fabrication de plaques composites avec des renforts en jersey et jersey chargé (1, 2 et 3 fils flottés) en fibres de verre E, basalte et carbone.
2. Caractérisation des composites par des essais de traction dans différentes directions (0° , 45° et 90°).
3. Observation des champs de déformation par stéréo-corrélation d'images numériques.
4. Analyse des modes de rupture.

Les résultats obtenus sont les suivants :

1. Le comportement mécanique est anisotrope, avec des propriétés plus faibles dans la direction rangée (90°) pour le jersey.
2. L'insertion de fils flottés dans la direction rangée améliore les propriétés dans cette direction mais affaiblit la direction colonne (0°).
3. Un renfort avec 2 fils flottés permet d'obtenir un matériau quasi-isotrope.
4. Un renfort avec 3 fils flottés maximise les propriétés dans la direction rangée.
5. Les fibres de verre et de basalte ont des performances similaires, tandis que le carbone est légèrement supérieur mais plus sensible aux dommages lors du tricotage.
6. La contrainte à rupture est supérieure à 100 MPa dans la plupart des cas et peut atteindre 200 MPa dans la direction rangée pour le renfort avec 3 fils flottés.

En conclusion, on trouve que les composites à renfort tricoté offrent une grande flexibilité de conception et de fabrication, avec des propriétés mécaniques adaptables aux besoins spécifiques. Ils constituent une alternative intéressante aux composites structuraux pour des applications où la drapabilité, la perméabilité et la production réactive sont importantes.

Tableau récapitulatif

Le tableau 1.1 récapitule les principaux travaux cités dans cette partie

TABLE 1.1 – Tableau récapitulatif des principaux travaux cités

Titre	Auteur	Date & Établissement	Approche de l'étude	Résultats
Comportement des matériaux composites à renforts tricotés élaborés par injection de résine	Laura BA-LEA	Avril 2011 Université de Toulouse FRANCE	Analytique, Expérimentale	Le comportement des composites renforcés avec des tissus tricotés est influencé par l'architecture du tissu, la nature de la fibre et la direction des contraintes. Des meches insérés dans le jersey peuvent améliorer les propriétés mécaniques du composite. Nous pouvons également constater que le modèle développé permet de prédire le comportement du composite et d'optimiser l'architecture du tissu pour des applications spécifiques.
Caractérisation et contribution à la modélisation du comportement mécanique des structures tricotées	Youcef CHER-RADI	Septembre 2023 Université Cadi Ayyad MA-ROC	Numérique, Expérimentale	Le modèle présenté dans ce travail représente un excellent outil pour étudier le comportement des tissus tricotés.
Modelling and simulation of the mechanical behaviour of weft-knitted fabrics for technical applications	Mario de Araujo, Hong HU Raul Fanguero	Septembre 2003	Analytique, Numerique & Expérimentale	Les propriétés mécaniques des tissus tricotés à la chaîne peuvent être améliorées pour des applications techniques en modifiant leur structure et en utilisant des techniques de pré-tension. Un tissu jersey à double couches pré-tendus est une structure prometteuse pour renforcer les composites.
Numerical Modelling of the Mechanical Behaviour of Biaxial Weft-Knitted Fabrics on Different Length Scales	Minh Quang Pham, Oliver Döbrich	Novembre 2019	Numerique	Deux modèles ont été validés avec succès par comparaison avec des résultats expérimentaux. Le modèle à l'échelle mésoscopique a permis de prédire plus précisément le comportement du tissu pendant la mise en forme par rapport au modèle à l'échelle macroscopique. L'influence de différents paramètres sur le comportement du tissu pendant la mise en forme a été étudiée, y compris le type de matériau, la structure du tissu et les conditions de mise en forme.

Dans le cadre de notre étude sur l'élaboration d'un matériau à renforts tricotés, nous allons présenter dans le prochain chapitre le comportement des tricots ainsi que les principaux matériaux utilisés dans leur élaboration pour l'industrie.

2 Matériaux composites

Un matériau composite est un mélange hétérogène d'au moins deux composants, non miscibles l'un dans l'autre mais ayant une capacité d'interpénétration et d'adhésion très élevée, et dont les propriétés mécaniques se complètent. Ce matériau possède de meilleures propriétés que les composants séparés ne possèdent pas.

Un matériau composite se compose comme suit :

matrice + renfort + charge et/ou additif (optionnellement).

La figure 1.1 représente un schéma de la composition d'un matériau composite.

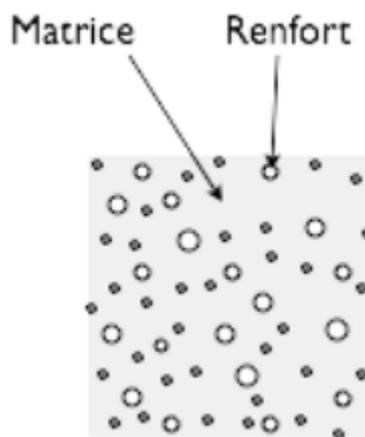


FIGURE 1.1 – Schéma de la composition d'un matériau composite

2.1 Constituants d'un matériau composite

Les composants d'un matériau composite sont exposés dans les rubriques ci-après.

Renfort

Le renfort est la partie "immergée" d'un matériau composite, c'est l'armature reprenant l'essentiel des efforts mécaniques lors d'une sollicitation donnée. Les renforts peuvent être classés selon :

1. **Leur composition** : métal, verre, polymère,... .
2. **Leur forme** :
 - Continue** : Fibres longues(1 - 50 mm), textiles.
 - Discontinue** : Fibres courtes (0,1 - 1 mm), Particules.
 - Charges renforçantes** : gravier, sable, billes de verre,... .
3. **Leur disposition** : mat (nappe de fibres en vrac non tissées) ou tissé.

Matrice

La matrice englobe le renfort, elle a donc pour but principal de lui transmettre les efforts mécaniques ainsi que de le protéger vis-à-vis des diverses conditions environnementales. Elle permet en outre de donner la forme voulue au produit réalisé grâce à sa malléabilité.

Il existe aujourd'hui un grand nombre de matériaux composites que l'on classe généralement en trois familles en fonction de la nature de la matrice :

1. Les composites à matrice organique (CMO) qui sont, de nos jours, les plus utilisés à l'échelle industrielle.
2. Les composites à matrice céramique (CMC) réservés aux applications de très haute technicité et travaillant à haute température comme le spatial, le nucléaire et le militaire, ainsi que le freinage (freins céramique).
3. Les composites à matrice métallique (CMM) sont généralement réservés à quelques applications spécialisées.

2.2 Mise en forme

Pour la mise en forme des matériaux composites, divers procédés sont disponibles, qu'ils soient manuels ou mécanisés.

Parmi les procédés manuels, nous citons :

1. La projection simultanée pour le moulage.
2. Le drapage de matériaux pré-imprégnés.
3. La technique d'infusion.

Pour ce qui est des procédés mécanisés, nous pouvons citer :

1. L'injection de thermoplastiques et de thermodurcissables renforcés.
2. La pultrusion, comparable à l'extrusion pour les composites.
3. Le moulage par centrifugation.

3 Matériaux en textile

Les matériaux textiles gagnent en popularité dans l'industrie grâce à l'évolution des procédés de fabrication. En effet, on peut désormais créer des pièces composites 3D de haute performance, équivalentes aux pièces métalliques. Les structures textiles les plus courantes dans l'industrie incluent les tricots, les tissés, les non-tissés et les tressés. Pour les structures tressées, tricotées et tissées, les fibres sont d'abord transformées en fils, tandis que les structures non tissées utilisent directement les fibres.[3].

Les différentes structures textiles sont représentées dans la figure 1.2 .

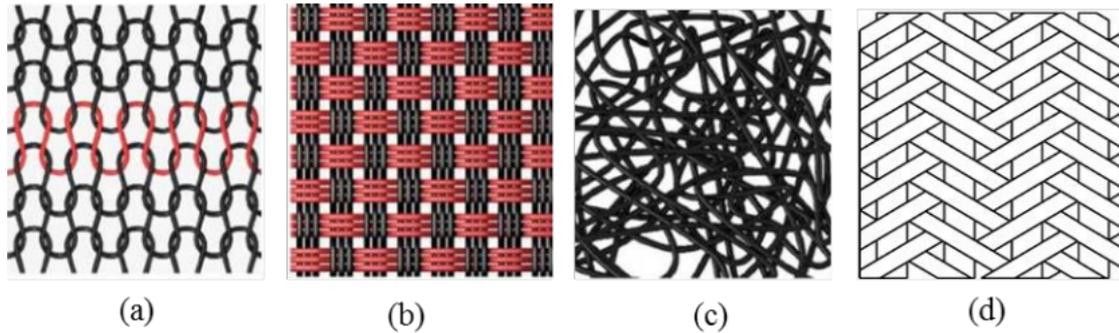


FIGURE 1.2 – Structures textiles utilisées : a-tricotées, b-tissées, c-non tissées, d-tressées [9]

Les structures tressées sont formées en entrelaçant trois fils ou plus pour obtenir des produits longs et étroits [10].

Les textiles tricotés sont réalisés à la façon des tricots. On utilise un fil pour construire des mailles dont les boucles s'entrelacent pour former le tricot . La structure tricotée la plus répandue est le jersey.

Les structures tissées sont construites par l'entrecroisement de fils parallèles selon des motifs réguliers

4 Problématique

Les structures tricotées disposent d'un grand potentiel exploitable en raison des nombreuses propriétés que ces structures possèdent telles que : la capacité de déformation, la drapabilité, la rapidité de production,... Cependant, ces structures offrent des propriétés mécaniques inférieures à celle que possèdent les autres structures textiles. Nous allons donc nous intéresser à l'étude de ces structures tricotées afin de mieux comprendre leur comportement.

5 Utilisation du tricot dans l'industrie

Les structures tricotées sont peu utilisées comme renfort dans les matériaux composites du fait de différents inconvénients : faible taux de fibres, orientation complexe des fibres, modules de Young, de cisaillement et force de rupture plus faibles que pour un renfort tissé. Cependant ces matériaux sont en pleines évolutions ce qui les rend immergeants en industrie.

Parmi les domaines d'applications de ces matériaux, on trouve :

1. **Aviation** : Ailes, sièges, fuselage,...
2. **Électronique** : " Circuit imprimé en tissu" en utilisant la "Technologie de tricotage informatisée" en combinant des matériaux métalliques fibreux conducteurs et des tissus. Le circuit imprimé en tissu contient des circuits 3D résistants à la flexion, à l'étirement et au lavage.
3. **Construction (Habitat)** : Ces matériaux sont largement utilisés pour les applications d'isolation acoustique et d'absorption acoustique [11] en raison de leur structure poreuse. Ces matériaux sont utilisés comme absorbeurs de bruit, diffuseurs de son, écrans antibruit et réflecteurs de son.
4. **Dans l'industrie mécanique** : Les matériaux tricotés sont largement utilisés dans l'industrie mécanique pour améliorer la performance, la durabilité et la sécurité des



FIGURE 1.3 – Carte de circuit imprimé en tissu tricoté

équipements, ils sont utilisés en :

- Renforcement de pièces mécaniques.
- Filtration.
- Isolation thermique.
- Protection contre l'abrasion.
- Absorption des chocs.

5. **Dans le domaine médical :** Les structures textiles sont largement utilisées dans le domaine médical en raison de leur capacité à épouser les formes complexes, ils sont généralement utilisés sur les muscles et les veines musculaires afin de réduire le volume veineux contenu dans la jambe/mollet [12, 13]. Une modélisation sur Abaqus est représentée dans la figure 1.4.

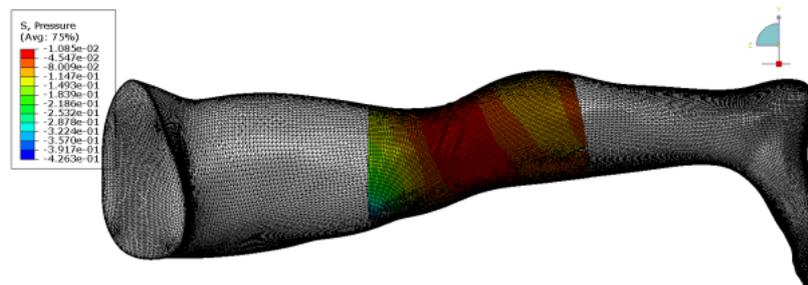


FIGURE 1.4 – Valeurs de pression d'interface simulées entre la gaine et la jambe [3].

Afin que ces matériaux soient efficaces et que leur utilisation soit de plus en plus répandue dans le milieu industriel, ils doivent posséder les caractéristiques suivantes :

1. Haute résistance à la traction, à la flexion et à l'expansion.
2. Avoir une bonne capacité d'absorption.
3. La fermeté et la longue durée.
4. Résistant aux produits chimiques et aux odeurs.
5. Capacité de résistance à la chaleur et à de hautes pressions.

6 Procédé de tricotage

Les structures tricotées sont adaptées à la production à l'échelle industrielle en raison de leur facilité de mise en forme. Ces structures sont également très convoitées pour la production de pièces complexes en raison de la capacité de déformation extrêmement élevée. Les tricots sont obtenus par entrelacement du fil sur lui-même pour former une chaîne de mailles

reliées entre elles. Il existe principalement deux types de tricotés selon le procédé de mise en oeuvre : Le tricotage **en trame** (mailles cueillies), qui est caractérisé par la formation de mailles où un seul fil issu d'une bobine forme des boucles (mailles) cueillies par les mailles de la rangée inférieure et le tricotage **chaîne** (mailles jetées) qui est effectué en entrelaçant chaque fil dans les colonnes des mailles adjacentes au cours de ce processus.

La figure 1.5 représente les différents modèles de tricotés existants.

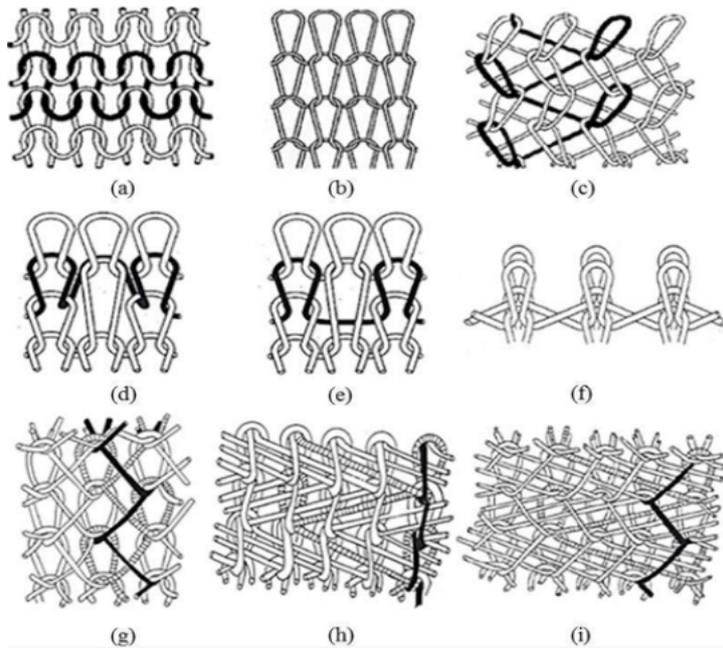


FIGURE 1.5 – Les différents modèles de tricot : a- Tricot en trame (jersey simple), b- Tricot côte, c-Tricot chaîne, d,e- Maille simple, f- Interlock, g- Tricot plein, h- Cordon reine trois aiguilles, i- Peau de requin trois aiguille [3]

Chacune des deux structures a des avantages et des inconvénients, nous pouvons citer pour les structures en trame qu'elles sont moins stables et donc s'étirent et se déforment plus facilement. Pour ce qui est des avantages des tricotés chaîne ceci relève de la vitesse du taux de production puisque les fils sont tricotés simultanément, ils sont tous incorporés dans la maille en même temps, ce qui permet de produire des tricotés à grande vitesse[3].

Le procédé de tricotage se résume en trois étapes successives : l'ascension, l'alimentation et l'abattage

La figure 1.6 résume les étapes de formations d'une maille. Lors du processus tricotage, trois

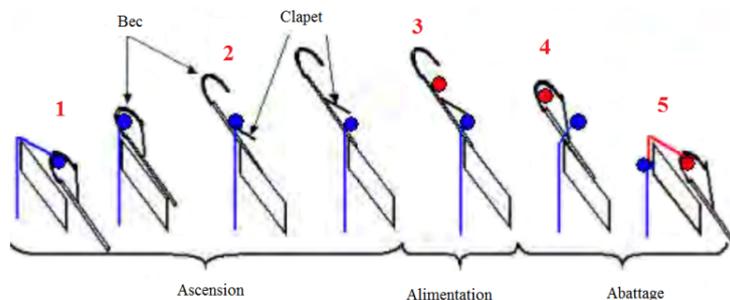


FIGURE 1.6 – Étapes de formation d'une maille

contraintes doivent être respectées.[3, 14]

1. Les mailles actives (non bloquées) doivent être maintenues de manière à ne pas se démailler.
2. De nouvelles mailles doivent passer à travers le tricot, d'habitude à travers les mailles actives.
3. A la fin ces mailles doivent être relâchées, après avoir été bloquées.

7 Caractéristiques de la mèche

Une mèche est un ensemble de fibres regroupées, pour la plupart des modélisations, nous considérons que la section d'une mèche ainsi que la section de la fibre sont circulaire, les caractéristiques de la mèche sont divisées en : caractéristiques géométriques et caractéristiques mécaniques.

La figure 1.7 représente une modélisation géométrique d'une mèche fibreuse

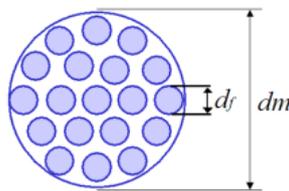


FIGURE 1.7 – Modélisation géométrique d'une mèche fibreuse

Pour ce qui est des caractéristiques géométriques, nous avons :

1. La densité linéique.
2. La section de la mèche.

Ces deux caractéristiques dépendent de plusieurs paramètres tels que : La longueur du fil, le nombre de fibres et bien sûr le diamètre de la mèche, c'est pour cela que plusieurs auteurs se sont intéressés au calcul de ce dernier paramètre. Le diamètre de la mèche est calculé à partir de la formule suivante :

$$d_m = \sqrt{\frac{4 \cdot D_l \cdot 10^{-3}}{\pi \cdot \rho_f \cdot V_{fm}}} \quad (1.1)$$

Tel que :

d_m : Diamètre de la mèche.

V_{fm} : Coefficient de présence de fibres dans la mèche.

D_l : Densité linéaire de la mèche.

ρ_f : Densité volumique de la fibre.

Les caractéristiques mécaniques d'une mèche sont : sa *raideur en traction* et sa *rigidité en flexion*. Pour le calcul de la raideur en traction, nous utilisons la formule suivante :

$$Raideur = E_f \cdot S_f \quad (1.2)$$

La surface de la fibre est définie de la manière suivante :

$$S_f = N_f \cdot \frac{\pi \cdot d_f^2}{4} \quad (1.3)$$

tel que :

N_f : Nombre de fibres dans la mèche.

d_f : Diamètre de la fibre.

E_f : Module de Young de la fibre.

Pour le calcul de la rigidité en flexion, on utilise la formule suivante :

$$E_{flexion} = E_f \cdot I_{GZ}$$

tel que :

I_{GZ} : Moment quadratique de la mèche.

E_f : Module de Young de la fibre.

8 Modélisation de la maille du tricot

La maille représente l'entité élémentaire qui constitue un tricot, elle représente donc l'objet d'intérêt de plusieurs chercheurs afin de la modéliser pour pouvoir par la suite étudier le comportement des structures tricotées. Nous allons, dans les paragraphes qui suivent, exposer les deux modèles : géométrique et mécanique proposé pour la modélisation de la maille.

8.1 Modèle géométrique

Le modèle géométrique est obtenu mathématiquement en utilisant les paramètres géométriques de la mailles en la modélisant par une géométrie idéaliste.

Les travaux de recherches de *Alenka Pavko-Cuden, Ales Hladnik, and Franci Sluga*, de *C.D Rudd, M.J Owen, and V Middleton* ainsi que de *P Tan, L Tong, and G.P Steven* sont résumés dans la figure 1.8.

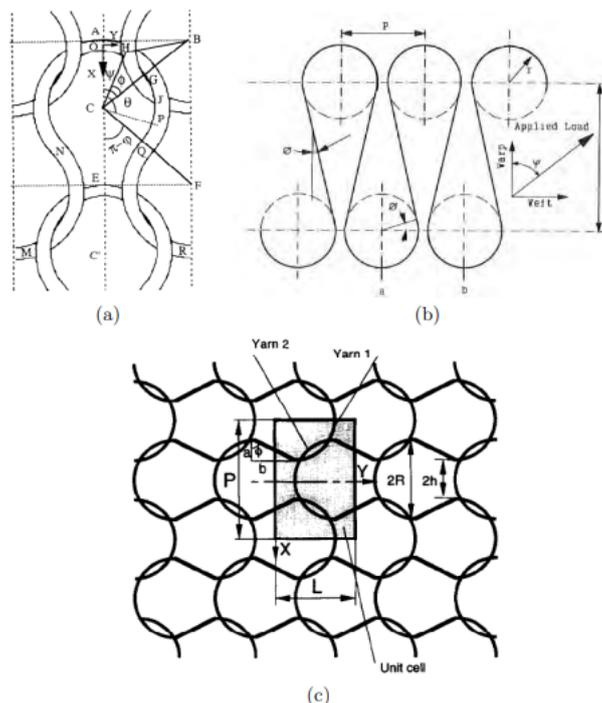


FIGURE 1.8 – Modèles géométriques proposés par : a.[15], b. [16], c.[17]

8.2 Modèle mécanique

Le modèle mécanique quant à lui se fait en appliquant la premier loi de Newton à la maille en équilibre. Ceci consiste en la prise en compte des forces et moments appliqués à la maille, il est aussi important de prendre en considérations les efforts de rections que produisent les mèches entremêlées les une contre les autres dans les zones de contact.

Nous pouvons citer les modèles mécaniques proposés par *Bueno* [18] et *Konopasek* [19] qui seront présentés dans la figure 1.9.

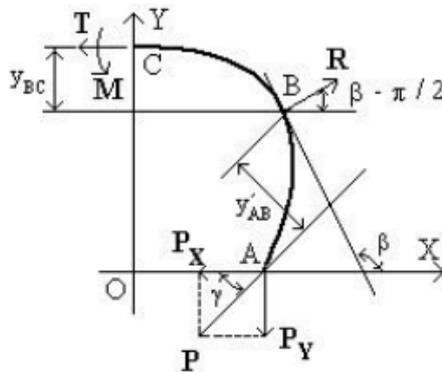


FIGURE 1.9 – Modèles mécaniques proposés.

9 Modélisation du comportement du tricot

Il existe deux approches pour modéliser le comportement d'une structure tricotée : l'approche analytique et l'approche numérique. Les paragraphes suivant expliquent brièvement ces différentes approches.

9.1 Modèle Analytique

Le modèle analytique est obtenu à partir de la modélisation géométrique de la maille, une proposition faite par *Araujo* consiste en la représentation de la CER (Cellule Élémentaire Représentative) qui représente un quart de maille, sur la quelle tous les effort externes et internes sont pris en considération.

Cette représentation est présentée dans la figure 1.10.

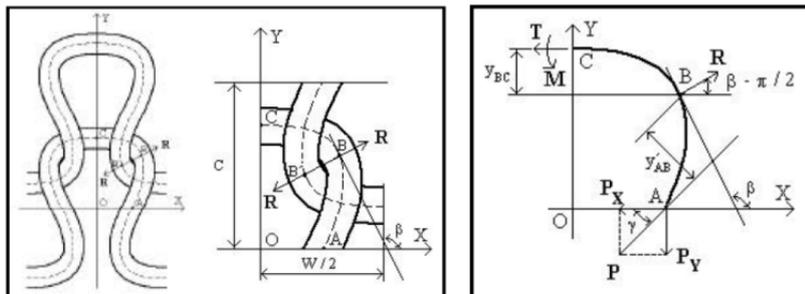


FIGURE 1.10 – Modèle proposé par [7] : représentation de la CER et des forces appliquées

9.2 Modèle numérique

Plusieurs modèles numériques ont été proposés pour modéliser le comportement des structures tricotées, nous pouvons citer les modèles suivant :

Le modèle proposé par *Araujo* consiste en un modèle en éléments finis dans lequel la maille est représentée par une structure treillis hexagonale en 2D, ce modèle permet de simuler le comportement du tricot dans le plan.

Un deuxième modèle proposé par *Hagege* consiste en la modélisation de la maille en 3D en structures : hexaédriques ou tétraédriques [20, 21].

Les différents types de maillages sont représentées dans la figure 1.11.

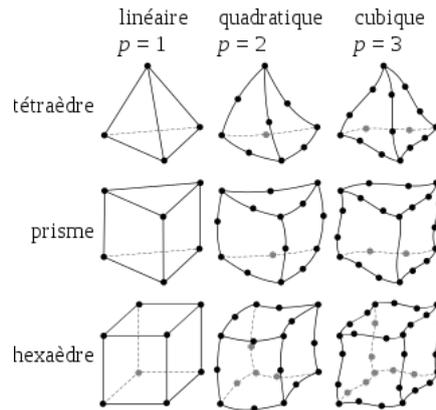


FIGURE 1.11 – Différents types de maillages en éléments finis.

Pour ce qui est de notre cas, et en raison de la géométrie de nos éprouvettes, nous avons choisi un élément de maillage hexaédrique comme présentée dans la figure 1.12.

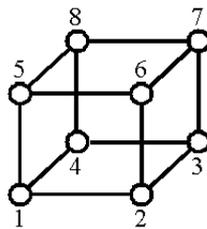


FIGURE 1.12 – Élément hexaédrique

10 Comportement des tricots en renfort

Les paramètres influençant sur le comportement des tricots à l'état sec ou en renfort sont présentées dans les paragraphes suivants.

10.1 Paramètres qui influent sur le comportement des tricots

Le comportement des matériaux composites à renfort tricoté a été étudié surtout en traction dans plusieurs références notamment par Laura BALEA dans son travail *Composites à renfort tricoté : Relations entre contexture, nature du renfort et propriétés mécaniques du composite infusé*. [4], il s'est avéré que les propriétés de ce type de renfort sont très limitées à l'état plan en raison de l'anisotropie du matériau, il est à noter également que lors d'essais dans différentes

directions, on remarque de meilleurs résultats dans la direction colonne (correspondant à la direction 0°) que la direction rangée, la figure 1.13 représente une comparaison des résultats après traction dans les deux directions citées auparavant.

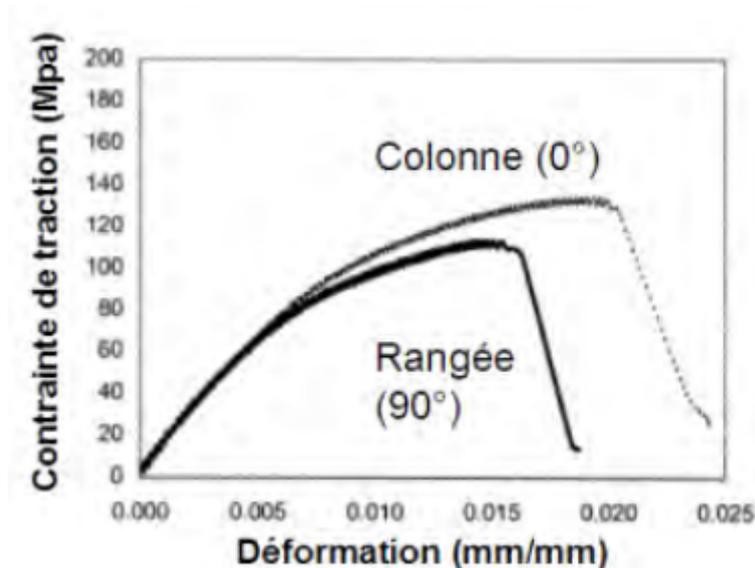


FIGURE 1.13 – Courbe contrainte-déformation de composites à renfort tricoté de contexture côte en traction [5]

Il est à noter également que la contexture du tricot a aussi une influence sur le comportement de ce dernier, on distingue principalement les tricots : Côte et Jersey selon le procédé de tricotage utilisé, les résultats de plusieurs recherches ont montré que le tricot Jersey a des propriétés mécaniques supérieures au tricot Côte, ceci est le cas dans le travail effectué par *Khondker, Herszberg, et Leong* qui a pour but de comparer le comportement des tricots à contextures : Côte, Milano et Jersey [22]

Un troisième paramètre influe aussi sur le comportement des tricots à savoir : les propriétés géométriques de la mailles du tricot en lui même, ceci est directement lié aux dimensions de la maille : longueur du fil, densité de la maille,... . Il s'est avéré qu'on a pour un même taux de fibres, une diminution de limite à la rupture sans effet sur le module de Young dans le cas d'une diminution de longueur de fil et augmentation de densité de maille, en effet, on remarque que l'initiation à la rupture se fait dans les zones de croisement de mailles adjacentes, l'augmentation de densité de mailles va augmenter les zones de fissuration ce qui va diminuer la résistance à la rupture.

Pour ce qui est de la prétention des matériaux , on remarque que cette dernière influe également sur les propriétés mécaniques du composite de la manière suivante :

1. Pour un composite à renfort tricoté dans la direction Colonne : on remarque que la prétention augmente les propriétés mécaniques du matériau dans les deux directions de traction à 0° (importante augmentation) et 90° (légère augmentation).
2. Pour un composite à renfort tricoté dans la direction Rangée : on remarque que la prétention augmente les propriétés mécaniques du matériau dans la direction rangée cependant ceci diminue les propriétés dans la direction colonne.

Nous pouvons donc déduire que les principaux paramètres qui influent sur le comportement

des tricots sont : la géométrie du tricot, la contexture le taux de fibre, le déroulement de l'essai,...

10.2 Comportement des composites à renfort tricoté lors de la traction

Lors d'un essai de traction, on remarque que l'endommagement des matériaux à renfort tricoté se produit en quatre étapes représentées dans la figure 1.14.

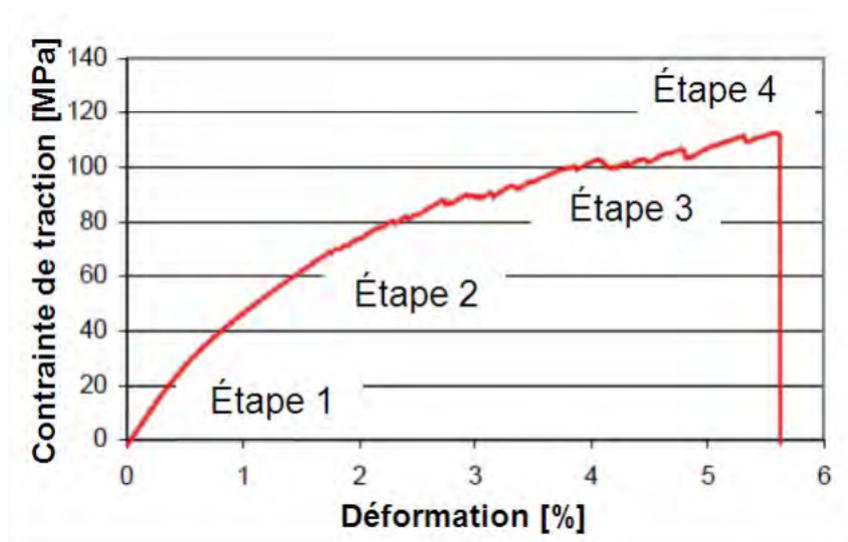


FIGURE 1.14 – Courbe Contrainte-Déformation d'un essai de traction d'un composite à renfort tricoté montrant les étapes d'endommagement [5]

On voit bien que la première étape représente un comportement linéaire, cette propriété sera perdue lors de la deuxième étape qui est l'apparition de micro-fissures dues à la différence en terme de rigidité entre la matrice et le renfort. Pour ce qui est de l'étape trois, on voit que la courbe contient des oscillations qui se traduisent par la propagation des fissures dans le matériau jusqu'à la rupture représentée dans l'étape quatre du graphe. On remarque également que le plan de rupture est généralement orthogonal à la direction de la sollicitation [2].

11 Essai de traction uniaxiale

Un essai de traction est une expérience de physique qui permet de mesurer les propriétés suivantes :

1. Le module de Young, E , ou module d'élasticité longitudinale, exprimé en mégapascals (MPa) ou en gigapascals (GPa).
2. La limite d'élasticité R_e (lorsqu'elle existe), qui sert à caractériser un domaine conventionnel de réversibilité.
3. La résistance à la traction R_m , qui définit la limite à la rupture.
4. L'allongement à la rupture $A\%$, qui mesure la capacité d'un matériau à s'allonger sous charge avant sa rupture.

5. Le coefficient de Poisson ν , qui correspond à la proportion entre la déformation transversale (diminution de section) et la déformation longitudinale (allongement relatif) de la pièce dans le domaine élastique.

L'essai est pratiqué sur machine de traction, l'éprouvette est placée dans les mors adéquats, puis on applique une précharge (pré-tension) pour éviter l'existence de jeu. Cela étant fait, on applique un déplacement à vitesse constante (La vitesse peut être exprimée en mm/min) transmis à la traverse mobile par un système de vis sans fin ou un piston hydraulique, un capteur de force est placée pour mesurer la charge le long de l'essai, l'essai s'arrête à la rupture. Le dispositif de traction est représenté dans la figure 1.15.

**<https://fr.wikipedia.org/wiki/Essai-de-traction>

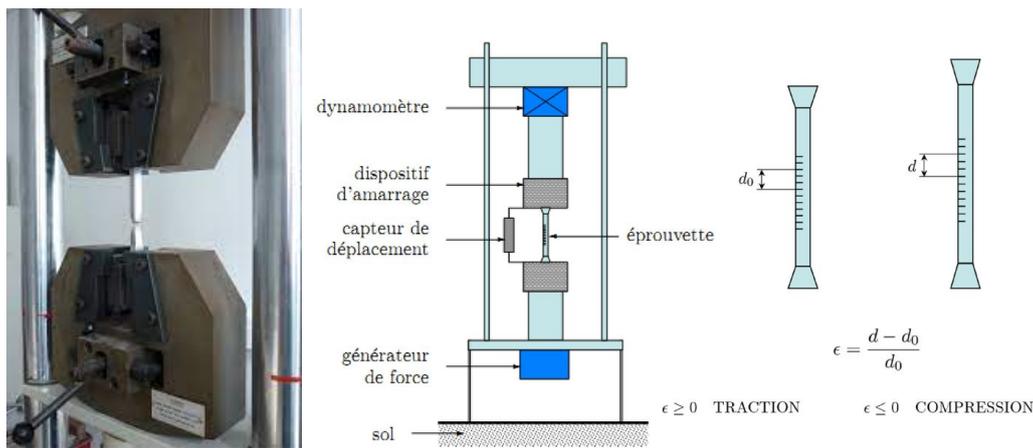


FIGURE 1.15 – Dispositif des essais de traction uniaxiale

12 Norme d'essai ASTM

ASTM International (American Standards of Technical Material) est un organisme de normalisation qui élabore des normes techniques concernant les matériaux, les produits, les systèmes et les services.

Dans notre étude on s'intéresse à des matériaux **composites** : à renforts sous forme de **tricot**s et à matrice en **résine**

En raison d'absence de normes pour les tricots, on se calera sur les normes concernant les textiles en général, on combinera ces normes avec celles des polymères et des matériaux composites afin d'avoir des résultats significatifs, le tableau 1.2 résume les principales normes en relation avec nos essais, leurs domaines d'utilisation et les tailles des éprouvettes utilisées.

**Les informations citées dans le tableau 1.2 proviennent du site officiel des normes ASTM et ISO :

<https://www.astm.org/>
<https://www.iso.org/fr/home.html>

TABLE 1.2 – Résumé des normes ASTM et ISO concernant les matériaux : textiles, composites et polymères

Norme	Utilisation	Taille des éprouvettes
ASTM D5034	Cette méthode d'essai couvre les procédures d'essai d'adhérence pour déterminer la résistance à la rupture et l'allongement de la plupart des tissus textiles. Elle est applicable aux tissus tissés, non tissés et filtrés. Cette méthode d'essai n'est pas recommandée pour les tissus en fibre de verre, ou pour les tricots et autres tissus textiles qui ont une élasticité élevée (supérieure à 11%).	Méthode A : Longueur : 150mm Largeur : 100mm Méthode B : Longueur : 200mm Largeur : 100mm
ASTM D3039	Utilisée pour mesurer la force nécessaire pour briser un échantillon composite polymère et la mesure dans laquelle l'échantillon s'étire ou s'allonge jusqu'à ce point de rupture.	Longueur : 250 mm Largeur : 25 mm Des languettes facultatives peuvent être collées aux extrémités de l'échantillon pour éviter tout dommage par préhension.
ASTM D751	Cet essai détermine la résistance à la rupture du tissu enduit (Caoutchouc) soit par la méthode de test de préhension (procédure A), soit par la méthode de test de bande coupée (procédure B).	Dans un tissu enduit : Procédure A : Largeur : 100mm Longueur : 150mm Procédure B : Largeur : 25mm Longueur : 150mm
ASTM D1638	Utilisée en ingénierie des coutures pour déterminer la résistance des coutures cousues dans les tissus tissés en appliquant une force perpendiculaire aux coutures cousues jusqu'à ce que la rupture se produise.	Éprouvette utilisée pour la rupture du tissu : 150mm X 100mm Éprouvette utilisée pour la rupture de couture : 200mm X 100mm
NF EN ISO 4606	Cette norme concerne les essais de traction uni axiale sur des tissus en fibre de verre (avec les extrémités enduites). Pas applicable aux tissus revêtus de caoutchouc ou plastique	TYPE I : Longueur : 350mm Longueur de référence : 200mm+- 2mm Largeur : 50mm TYPE II : Longueur : 250mm Longueur de référence : 100mm+- 1mm Largeur : 25mm
ISO 13934	spécifie une méthode pour la détermination de la force maximale et de l'allongement à la force maximale des étoffes textiles par l'essai sur bande.	Largeur : 50 mm ± 0,5 mm (sans les franges) Longueur d'essai : 200 mm
ASTM D412	La norme définit les procédures utilisées pour évaluer les propriétés de traction du caoutchouc thermodurcissable vulcanisé et des élastomères thermoplastiques.	Les éprouvettes utilisées ont généralement une forme d'haltère

ISO 1421	Cette norme décrit deux méthodes pour la détermination de la résistance à la traction des tissus recouverts de caoutchouc ou de plastique : Méthode 1 : la méthode d'essai sur bandelette, qui est une méthode de détermination de la résistance à la traction et de l'allongement à casser. Méthode 2 : la méthode d'essai au grippage, qui est une méthode de détermination de la résistance à la traction uniquement	Méthode 1 : Longueur : 200mm Largeur :50mm Méthode 2 : Longueur : 150mm Largeur :100mm
ASTM D638	Cette norme est utilisée pour déterminer les propriétés de traction des plastiques renforcés et non renforcés. Elle est réalisée en appliquant une force de traction sur une éprouvette et en mesurant cette propriétés du matériau sous contrainte. L'essai est effectué sur une machine de test de traction à un taux de traction allant de 1 à 500 mm/min jusqu'à la rupture de l'éprouvette.	Les éprouvettes plates sont généralement moulées, découpées ou usinées selon une forme d'os ou d'haltère de façon à ce que la rupture se produisent au centre de l'éprouvette et dans les zones de serrage.
ASTM D2136	Cette méthode d'essai évalue la capacité des tissus enduits à résister à une courbure prescrite à une basse température établie. Les tissus enduits de matériaux polymères sont utilisés dans de nombreuses applications nécessitant une flexion à basse température.	25 mm de larguer 100 mm de longueur
ASTM D3786	Cette méthode d'essai est généralement applicable à une grande variété de produits textiles, elle décrit la mesure de la résistance des tissus textiles à l'éclatement à l'aide d'un système hydraulique ou testeur d'éclatement de membrane pneumatique.	125 mm circle or square

13 Fibre du tricot utilisé : Fibre Métallique

La fibre utilisée pour cette étude est une fibre métallique, ce choix revient au aux qu'offre ce matériau en terme de résistance à la traction, la fibre métallique a également un meilleur indice de fragilité à froid et une plus faible ténacité et ductilité. Cette fibre est utilisée en renfort puisqu'elle augment la résistance aux chocs thermiques et la résistance mécanique ce qui réduit la création de fissures[23].

L'entreprise Azaros propose ds fibres métalliques représentées dans la figure 1.16

Les fibres métalliques en acier inoxydable Melt Extract (ME) sont fabriquées en différents alliages, longueurs et diamètres. Parmi les plus courants figurent les alliages ME304, ME310, ME330 et ME446.



FIGURE 1.16 – Fibres Métalliques en acier inoxydable

14 Comportement de la résine

La résine époxy a pour propriété de se durcir en présence de durcisseur sous l'effet de la chaleur, le matériau obtenu est fortement déformable son comportement mécanique est donc modélisé par, contrairement aux matériaux élastiques, par un modèle hyperélastique[24, 25]. L'hyperélasticité est un formalisme mathématique dans lequel on affirme l'existence d'une densité d'énergie de déformation, cette entité sera dérivée par rapport aux différents champs de déformation pour obtenir la contrainte correspondante à la direction choisie.

Cette densité d'énergie de déformation est notée W et peut être calculée selon le modèle proposée, nous pouvons présenter les modèles d'hyperélasticité dans la figure 1.17.

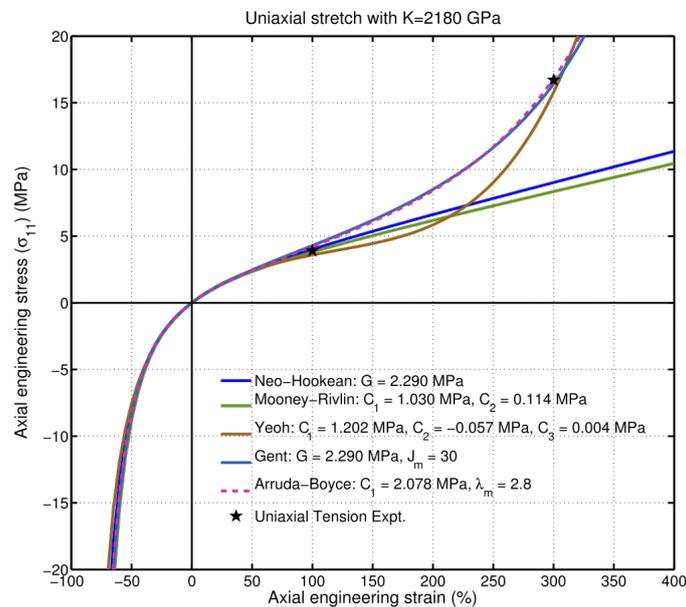


FIGURE 1.17 – Courbes Contrainte-Déformation des différents modèles d'hyperélasticité

Nous allons à présent présenter le modèle qui nous intéresse, à savoir : Le modèle d'Ogden, dont la courbe de : contrainte- déformation est représentée dans la figure 1.18

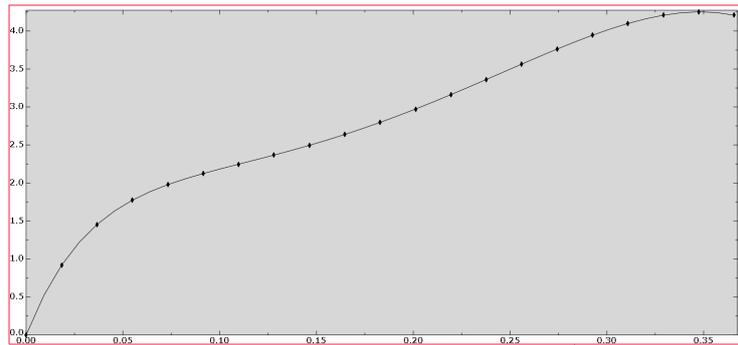


FIGURE 1.18 – Courbe : Contrainte-Déformation correspondant au modèle d'Ogden d'ordre 2

Le modèle d'Ogden est donné comme suit :

$$W(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) = \sum_{i=1}^N \frac{\mu_i}{\alpha_i} (\lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i} - 3) \quad (1.4)$$

Tel que :

α_i et μ_i sont les paramètres du modèles qui n'ont pas de signification physique.

15 Conclusion

Les structures tricotées sont des structures à comportement complexe ayant fait l'objet de plusieurs recherches dans le but est d'être modélisées, étudiées et par la suite être optimisées. Dans le chapitre qui suit, sera présentée l'étude expérimentale sur les tricots secs et en renfort dans une matrice en résine époxydique.

Chapitre 2

Étude Expérimentale

Le présent chapitre consiste en une étude expérimentale sur les structures tricotées dans le but d'étudier leur comportement à l'état sec et en renfort dans une matrice en résine époxydique, la caractérisation se fera par des essais de traction uniaxiale, le dispositif utilisé et toute la procédure suivie seront présentés dans les sections suivantes.

1 Présentation du tricot métallique utilisé

Le tricot disponible au laboratoire du département (figure 2.1) est présenté sous forme de gaine, les informations concernant les caractéristiques du tricot sont résumées dans le tableau 2.1.

TABLE 2.1 – Caractéristiques du tricot

Forme	Cylindrique
Matière	Inox
Contexture	Jersey
Diamètre de la gaine	100 mm
Longueur	300 mm
Épaisseur	1,1 mm
Nombre de fils	3
Diamètre du fil	0.25 mm
Longueur de la maille	6,7 mm
Largeur de la maille	5,5 mm



FIGURE 2.1 – Tricot en fibres métalliques

2 Préparation des éprouvettes

Les essais expérimentaux sur les tricots se feront sur plusieurs éprouvettes allant du tricot seul au tricot en renfort dans une matrice en résine, il sera donc important de faire des essais également sur cette même résine afin de la caractériser.

Nous allons préparer des éprouvettes de tricot seul dans les deux directions : colonne et rangée afin d'étudier l'isotropie du matériau, par la suite une étude paramétrique sera faite sur différentes tailles de tricot, ensuite on présentera l'étude sur la résine seule après moulage, pour finir, on fera des essais sur les tricots en renfort dans la matrice dans les deux directions : colonne et rangée et avec des largeurs d'éprouvettes différentes.

2.1 Préparation des éprouvettes de tricot seul

Dans cette section, nous allons présenter les normes choisies pour notre étude (Ces normes ont déjà été présentées en détail dans le chapitre précédent) .

Étant donné qu'il n'y a pas de normes dédiées aux éprouvettes en matériaux tricotés, on se calera sur celles des textiles afin d'avoir des résultats acceptables. La norme utilisée pour les essais de traction uniaxiale est : **ISO 13934**, dont la taille imposée pour les éprouvettes est représentée dans la figure 2.2.



FIGURE 2.2 – Taille de l'éprouvette textile selon la norme ISO 13934

La figure 2.3 représente une image d'une éprouvette de tricot seul, cette éprouvette a été préparée en découpant à l'aide d'une pince coupante le tricot cylindrique de la figure 2.1.



FIGURE 2.3 – Éprouvette tricot seul dans la direction rangée

D'autres éprouvettes ont été élaborées pour faire une étude paramétrique sur l'influence du nombre de mailles sur la réaction du tricot, ces tailles varient de 25mm à 65 mm avec un pas de 10 mm.

Nous décidons également de faire une étude sur les tricots en gaine puisque ces derniers ont été élaborés pour être utilisés sous forme cylindrique, nous proposons de faire la même étude paramétrique, avec des largeurs de 25mm à 65mm, pour les tricots en gaine, ces tricots sont représentés dans la figure 2.4.



FIGURE 2.4 – Éprouvettes en gaine du tricot métallique pour une étude paramétrique avec plusieurs largeurs

2.2 Préparation des éprouvettes de la résine seule

La résine choisie est : **Résine Sikafloor-264** dont la fiche technique est jointe en annexe. Nous commençons par élaborer notre moule composé d'une partie inférieure : tôle en acier, et une partie supérieure : plaque en bois de profondeur de 6mm, on procéda au pansage afin d'enlever toute trace de rouille, poussière,....

Par la suite, une pâte de démoulage (figure 2.7) est appliquée sur toute la surface utile du moule afin de faciliter le démoulage.

La résine **Sikafloor-264** est une résine époxydique constituée de deux composants, ces derniers ainsi que leurs proportions sont représentées dans le tableau 2.2.

TABLE 2.2 – Composition de la résine Sikafloor-264

Composant	Nom	Couleur	% dans le mélange	Masse volumique (kg/l)
A	Résine	Blanche	79%	1,6
B	Durcisseur	Transparente	21%	1
A+B	Résine + Durcisseur	Blanche	100%	1,4

Calcul de la proportion des composants de résine correspondant

La conception du moule est représentée dans la figure 2.5.

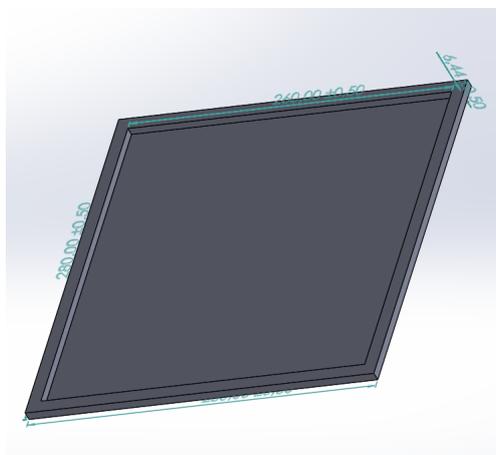


FIGURE 2.5 – Conception du moule de résine seule

Le moule obtenu est représenté dans la figure 2.6.



FIGURE 2.6 – Moule Résine Seule

Le calcul du volume en cm^3 se fait comme suit.

$$V_{moule} = L * l * e \quad (2.1)$$

A.N :

$$V = 26 * 26 * 6,44$$

On trouve :

$$V_{moule} = 435,344cm^3$$

Cette valeur est ensuite transformée en masse a l'aide de la masse volumique du mélange : Résine-Durcisseur :

$$\rho_{mélange} = \frac{m_{mélange}}{V_{mélange}} \quad (2.2)$$

Donc :

$$m_{mélange} = \rho_{mélange} * V_{mélange} \quad (2.3)$$

A.N :

$$m_{mélange} = 1,4 * 435,344$$

On trouve :

$$m_{mélange} = 609,5g$$

Cette masse représente la masse totale du mélange : Résine + Durcisseur, il est donc important de connaître la masse de chaque composant en utilisant les rapports dans le mélange fournis dans la fiche technique :

$$m_{mélange} \longrightarrow 100\%$$

$$m_{ComposantA} \longrightarrow 79\%$$

$$m_{ComposantB} \longrightarrow 21\%$$

On trouve :

$$m_{ComposantA} = 481,5g$$

Ainsi que :

$$m_{ComposantB} = 128g$$

Après avoir fait les pesées, et mélangé jusqu'à l'obtention d'un mélange bien homogène, le mélange est versé dans le moule, ce dernier est déposé dans un lieu sec et aéré pendant plus 48h le temps que la résine sèche totalement.



FIGURE 2.7 – Pâte de démoulage

La résine obtenue après démoulage est présentée dans la figure 2.8



FIGURE 2.8 – Résultat du moulage

Pour ce qui est de la taille des éprouvettes, on se base sur la taille représentée dans la figure 2.9.

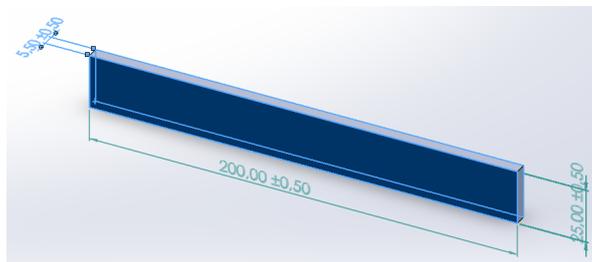


FIGURE 2.9 – Taille des éprouvettes Résine Seule

Après découpe des éprouvettes (figure 2.10) avec une scie à ruban.



FIGURE 2.10 – Éprouvettes Résine Seule 25 mm

Les dimensions des éprouvettes obtenues sont mesurées à l'aide d'un pied à coulisse numérique et résumées dans le tableau 2.3.

Le pied à coulisse utilisé a une précision au centième et est représentée dans la figure 2.11.



FIGURE 2.11 – Pied à coulisse utilisé pour les mesures

TABLE 2.3 – Dimensions géométriques des éprouvettes de résine seule

Éprouvette n°	L (mm)	l (mm)	e (mm)
1	200,15	25,3	5,56
2	199,87	25,66	5,8
3	200,54	24,79	5,54
4	200,65	25,36	5,67

2.3 Préparation des éprouvettes en matériau composite : Tricot + Résine de 25 mm de largeur

Nous avons d'abord travaillé avec des éprouvettes selon la norme **ASTM D3039** qui donne la taille des éprouvettes en matériaux composites, la taille des éprouvettes est représentée dans la figure 2.12.

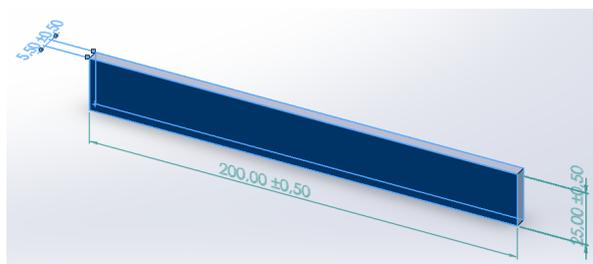


FIGURE 2.12 – Taille d'une éprouvette selon la norme ASTM D3039

Nous allons procéder par moulage puis insertion du tricot après avoir rempli la moitié du moule de résine avec la même proportion donnée précédemment, nous ferons ce procédé une

première fois pour les tricots dans la direction colonne et le ferons à nouveau pour les tricots dans la direction rangée.

Élaboration du moule

Le moule est composé d'une partie inférieure : tôle en acier et d'une partie supérieure : Plaque en bois de profondeur de 6mm, la même pâte de démoulage est appliquée sur les surfaces utiles du moule, une première couche de résine est versée, puis le tricot est placé dessus après 1h de séchage afin d'avoir une bonne adhésion sans que le tricot ne se noie dans la résine, par la suite une deuxième couche de résine est versée sur le tricot, 4 éprouvettes sont élaborées avec des tricots dans la direction **colonne** et 4 autres dans la direction **rangée** afin d'étudier l'anisotropie du matériaux, par la suite les moules sont laissés dans un endroit sec et aéré pendant plus de 48h le temps que la résine sèche.

La figure 2.13 représente la conception du moule utilisé pour obtenir des éprouvettes de 25 mm de larguer.

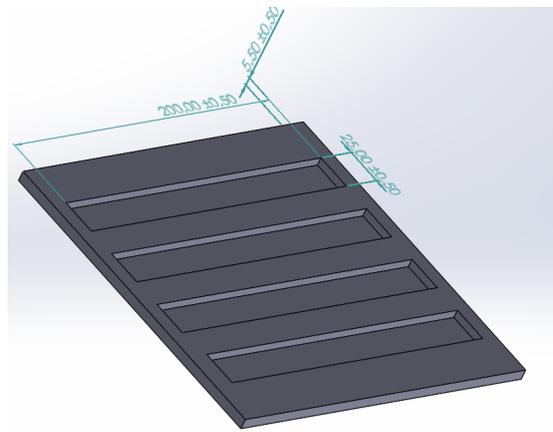


FIGURE 2.13 – Schéma du moule Résine + Tricot 25 mm

Les éprouvettes obtenues sont représentées dans la figure 2.14.



FIGURE 2.14 – Éprouvette Résine+ Tricot 25mm direction Colonne

Calcul de la proportion de résine

On utilise la même résine Sikafloor-264, on procède comme pour le moulage de la résine seule. Le volume est calculé en multipliant les trois dimensions du moule :

$$V_{\text{épreuve}} = L * l * e \quad (2.4)$$

A.N :

$$V_{\text{épreuve}} = 200 * 25 * 6,4$$

On trouve :

$$V_{\text{épreuve}} = 32000 \text{ mm}^3$$

En cm^3 on trouve :

$$V_{\text{épreuve}} = 32 \text{ cm}^3$$

Ce volume est transformé en masse en utilisant la masse volumique :

$$\rho = \frac{m_{\text{épreuve}}}{V_{\text{épreuve}}} \quad (2.5)$$

Donc :

$$m_{\text{épreuve}} = \rho_{\text{épreuve}} * V_{\text{épreuve}} \quad (2.6)$$

A.N :

$$m_{\text{épreuve}} = 1,4 * 32$$

$$m_{\text{épreuve}} = 44,8 \text{ g}$$

Soit :

$$m_{\text{épreuve}} = 45 \text{ g}$$

Cette masse est composée du mélange : résine et durcisseur comme suit :

$$m_{\text{mélange}} \longrightarrow 100\%$$

$$m_{\text{Composant A}} \longrightarrow 79\%$$

$$m_{\text{Composant B}} \longrightarrow 21\%$$

On trouve :

$$m_{\text{Composant A}} = 35,4 \text{ g}$$

Ainsi que :

$$m_{\text{Composant B}} = 9,4 \text{ g}$$

Le moulage se fait en deux parties afin de disposer le tricot entre deux couche de résine et obtenir une bonne adhésion.

Les dimensions de chaque éprouvette sont mesurées à l'aide d'un pied à coulisse numérique. Le tableau 2.4 résume les dimensions des éprouvettes Composite : Tricot + Résine dans la direction Colonne.

TABLE 2.4 – Dimensions géométriques des éprouvettes Résine + Tricot dans la direction Colonne de 25 mm de largeur

Éprouvette n°	L (mm)	l (mm)	e (mm)
1	199,78	25,9	6,38
2	201,65	25,66	6,13
3	200,36	25,55	6,54
4	199,65	24,78	6,82

On refait le même travail pour obtenir des éprouvettes composite : Tricot + Résine dans la direction rangée, les dimensions de ces dernières sont résumées dans le tableau 2.5.

TABLE 2.5 – Dimensions géométriques des éprouvettes Résine + Tricot dans la direction Rangée de 25 mm de largeur

Éprouvette n°	L(mm)	l (mm)	e(mm)
1	201,19	24,93	6,15
2	198,73	25,67	6,52
3	200,78	24,43	5,98
4	201,32	25,14	6,12

Nous avons remarqué que cette taille d'éprouvette posait problème pour être confectionnée : en effet la découpe du tricot en rangée avec cette petite largeur le rendait très difficile à manipuler, et pouvait, en raison du nombre de maille réduit (5 mailles) donner des résultats pas très exploitables, c'est pour cela que nous avons décidé de faire un nouveau moulage avec une largeur de 55 mm pour y introduire des tricots avec une taille qui correspond à celle de la norme des textiles.

2.4 Préparation des éprouvettes en matériau composite : Tricot + Résine de 55 mm de largeur

La conception du moule pour des éprouvettes d'une largeur de 55mm est représentée dans la figure 2.15 .

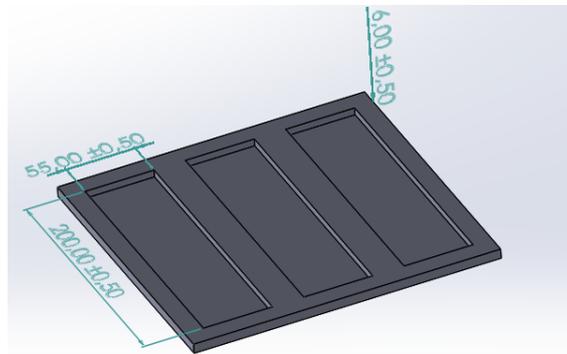


FIGURE 2.15 – Conception moule 55mm

Le moule est composé d'une première tôle métallique au-dessus de laquelle sera fixé un cadre métallique ainsi que des baguettes métalliques à l'aide de serre-joints, la figure 2.16 présente le moule utilisé.



FIGURE 2.16 – Moule utilisé 55mm

Calcul des proportion de résine pour chaque éprouvette

Le volume est calculé en multipliant les trois dimensions du moule :

$$V_{\text{eprouvette}} = L * l * e \quad (2.7)$$

A.N :

$$V_{\text{eprouvette}} = 200 * 55 * 6,4$$

On trouve :

$$V_{\text{eprouvette}} = 70400 \text{mm}^3$$

En cm^3 on trouve :

$$V_{\text{eprouvette}} = 70,4 \text{cm}^3$$

Ce volume est transformé en masse en utilisant la masse volumique :

$$\rho = \frac{m_{\text{eprouvette}}}{V_{\text{eprouvette}}} \quad (2.8)$$

Donc :

$$m_{\text{eprouvette}} = \rho_{\text{eprouvette}} * V_{\text{eprouvette}} \quad (2.9)$$

A.N :

$$m_{\text{eprouvette}} = 1,4 * 70,4$$

$$m_{\text{eprouvette}} = 98,56 \text{g}$$

Cette masse est composée du mélange : résine et durcisseur comme suit :

$$m_{\text{mélange}} \rightarrow 100\%$$

$$m_{\text{ComposantA}} \rightarrow 79\%$$

$$m_{\text{ComposantB}} \rightarrow 21\%$$

On trouve :

$$m_{\text{ComposantA}} = 77,86 \text{g}$$

$$m_{\text{ComposantB}} = 20,70 \text{g}$$

Ainsi que :

$$m_{ComposantB} = 20.7g$$

$$m_{ComposantB} = 21g$$

On refait notre moulage de la même manière, c'est-à-dire, on moule la moitié de la quantité de la résine, par la suite on dépose les tricots après 1h de séchage afin d'obtenir une bonne adhésion et éviter que le tricot se noie, par la suite on ajoute la d quantité de résine restante et on laisse nos éprouvettes sécher dans un endroit sec et aéré pendant plus 48h.

Nous obtenons 3 éprouvettes : composite tricot+ résine dans la direction Colonne et 3 éprouvettes : composite tricot+ résine dans la direction Rangée.

La figure 2.17représente les éprouvettes obtenues.



FIGURE 2.17 – Éprouvette Résine+ tricot dans la direction rangée avec une largeur de 55mm

Les dimensions des éprouvettes obtenues dans la directions colonne sont résumées dans le tableau 2.6.

TABLE 2.6 – Dimensions géométriques des éprouvettes Résine + Tricot dans la direction Colonne de 55 mm de largeur

Éprouvette n°	L(mm)	l (mm)	e(mm)
1	198,54	54,36	6,75
2	203,29	56,03	5,82
3	200,14	55,14	6,42

Il est donc nécessaire d'élaborer de nouvelles éprouvettes de résine seule ayant une largeur de 55mm afin d'évaluer ce renforcement. Pour cela, on utilise la plaque restante après découpe des premières éprouvettes de résine seule de 25 mm de largeur ce qui nous permettra d'obtenir deux éprouvettes de la taille voulue.

La figure 2.18 présente une éprouvette de résine seule de 55 mm de largeur.

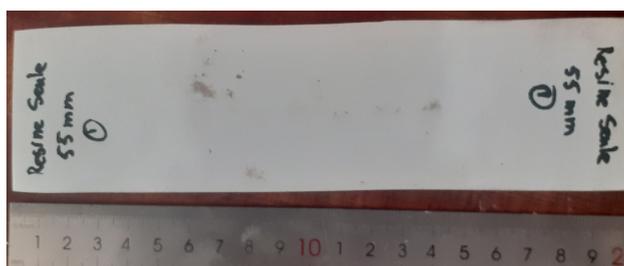


FIGURE 2.18 – Éprouvette de résine seule de 55 mm de largeur

Les dimensions des éprouvettes de résine seule obtenues sont résumées dans le tableau 2.7

TABLE 2.7 – Dimensions géométriques des éprouvettes Résine seule de 55 mm de largeur

Éprouvette n°	L(mm)	l (mm)	e(mm)
1	197,78	55,12	5,43
2	202,34	55,98	5,23
3	200,17	54,12	5,18

3 Caractérisation de la résine

En se basant sur des travaux de caractérisation de résines [26], on procède selon les étapes expliquées dans les paragraphes suivants.

Essai de traction avec Extensomètre

Un extensomètre est un outil de mesure de déformation lors d'un essai de traction. Pour ce qui est disponible au laboratoire du département, l'extensomètre est utilisé pour des essais à faible déformation, on fera cet essai pour caractériser notre résine.

La figure 2.19 représente le dispositif utilisé pour caractériser notre résine.



FIGURE 2.19 – Dispositif de traction avec extensomètre

Calcul du module de Young

Afin de calculer le Module de Young, on utilise la formule suivante :

$$\sigma = E.\epsilon \quad (2.10)$$

Le graphe obtenu durant ce test est représenté dans la figure 2.20.

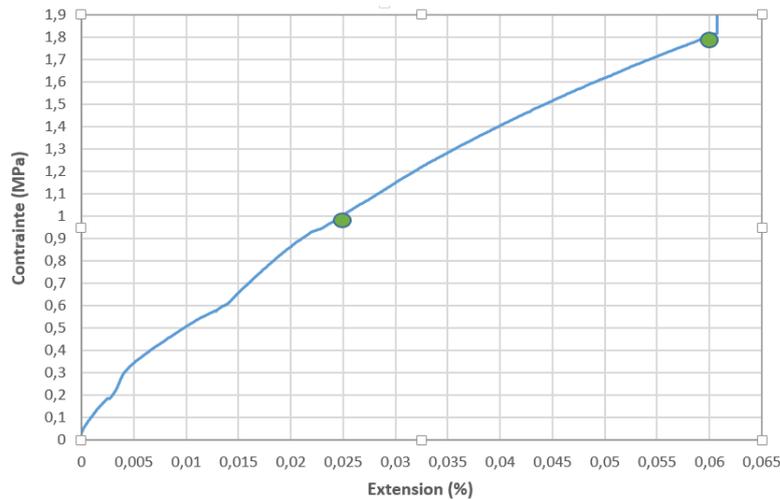


FIGURE 2.20 – Courbe : Contrainte-Extension de l'essai de caractérisation de la résine

A partir de la courbe obtenue et de la loi de Hooke : Contrainte-Déformation, on peut calculer le module de Young dans le domaine linéaire de la courbe en calculant sa pente, on aura :

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon} \quad (2.11)$$

On calcule entre les deux points choisis :

$$E = \frac{1.8065 - 1}{0.06012 - 0.0248}$$

On convertit les unités pour avoir en GPa et on trouve :

$$E = 2,28 \text{ GPa}$$

Ce résultat est acceptable puisque le domaine dans lequel se situe le module de Young pour les résines époxydiques est entre 1 et 5 GPa.

4 Essais de traction uniaxiale

La caractérisation de notre matériau composite à renfort sous forme de tricot ainsi que des tricots seuls se fera par des essais de traction uniaxiale, le dispositif utilisé sera présenté dans le paragraphe suivant.

4.1 Dispositif expérimental

La figure 2.21 représente la machine de traction du département.



FIGURE 2.21 – Machine de traction

Les informations concernant la machine de traction sont les suivantes :

Machine	Unitest
Capacité maximale	100 kN
Course utile	800 mm

4.2 Mors utilisés

Étant donné que la taille des mors plats de la machine permettent une largeur maximale de 40 mm, ce qui ne concorde pas avec les tailles des éprouvettes normalisées, nous avons décidé de concevoir de nouveaux mors qui concordent avec les tailles voulues, pour cela deux propositions ont été faites, la figure 2.22 représente une conception en reverse engineering des mors de la machine.

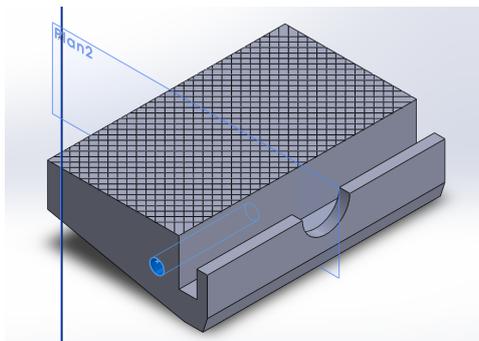


FIGURE 2.22 – Mors originaux de la machine

La première solution proposée est une conception de mors ayant le même design que les mors originaux afin de pouvoir les adapter à la machine, les mors auront un prolongement qui permettra d'avoir une largeur plus grande (80 mm) tout en gardant la symétrie. La conception du mors proposé est représentée dans la figure 2.23.

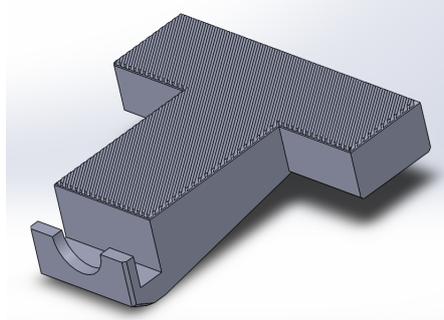


FIGURE 2.23 – Proposition -1- : Mors sur mesure pour la machine de traction

Le problème avec cette solution revient au fait qu'en plus d'être difficile à usiner directement au département, elle ne nous donne qu'une petite marge d'épaisseur d'éprouvettes allant de 0 à 7 mm, ce qui nous arrange pour les essais sur tricots seuls mais pas pour les tricots avec matrice ni pour d'éventuels autres essais, nous avons donc eu recours à une deuxième solution qui consiste en un étau qui sera fixé sur les mors cylindriques de la machine et qui contiendra deux mors mobiles afin de garantir la symétrie, cette solution se verra être très technique lors des essais afin de synchroniser la translation des mors en assurant la symétrie du mouvement. La figure 2.24, représente la conception de l'étau proposée

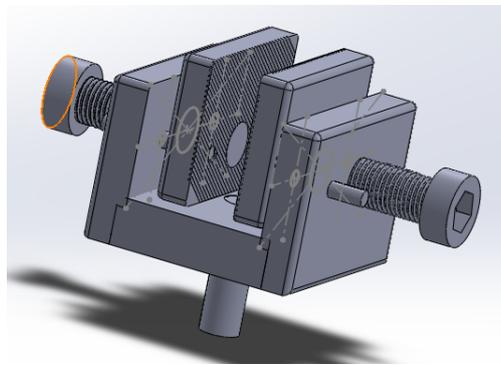


FIGURE 2.24 – Proposition -2- : Étau à mors mobiles

Réalisation de l'étau proposé

La réalisation se fait en première partie au département où le choix des barres en acier de construction a été faite, par la suite a eu lieu : La découpe et le surfacage sur la fraiseuse conventionnelle de l'atelier du département (figure 3.24), le passage du "brut" aux cotations voulues a pris énormément de temps (8 jours). Par la suite, les pièces ont dû être finalisées dans un atelier mécanique à l'extérieur afin d'avoir une bonne précision lors des perçages, striage des mors pour une bonne adhésion et soudage.

L'étau obtenu est représenté dans la figure 2.25.

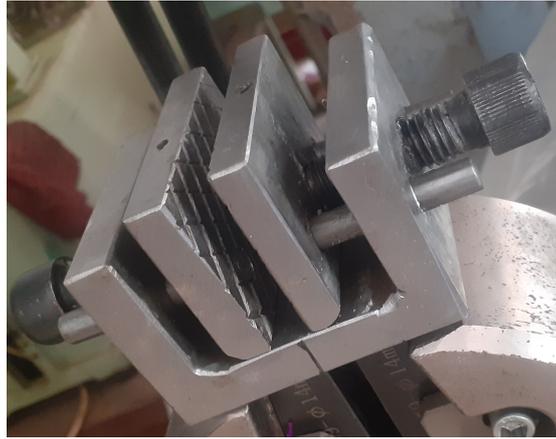


FIGURE 2.25 – Étau à mors mobiles pour les essais de traction

4.3 Dispositif de traction de tricot en gaine

Pour ce qui est des essais de traction sur les tricots cylindriques, un nouveau dispositif a été conçu et réalisé afin d'avoir une bonne prise, la conception du dispositif est présentée dans la figure 2.26

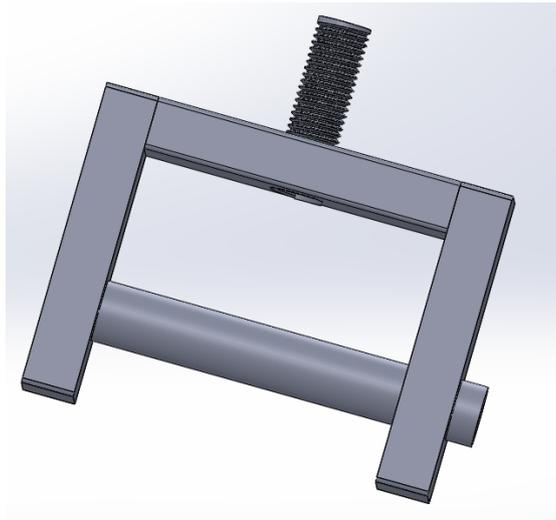


FIGURE 2.26 – Conception du dispositif de traction des tricots en forme de gaine

Réalisation du dispositif proposé

La réalisation se fait au département, on commence par choisir les barres adéquates et les surfacer sur la fraiseuse conventionnelle du département, par la suite les barres cylindriques sont découpées à la taille convenue. Après avoir obtenu toute les tailles voulues, on passe au perçage puis au soudage afin d'assembler notre pièce finale.

La figure 2.27 représente le dispositif obtenu.



FIGURE 2.27 – Dispositif de traction des tricots en forme de gaine

5 Résultats expérimentaux

Les résultats obtenus suite aux différents essais sont présentés dans les sections suivantes.

5.1 Essais de traction sur résine seule

On serre fermement les éprouvettes au milieu des mors de l'étau élaboré, et on prépare l'interface numérique, on choisi un capteur de 5 kN qu'on place au dessus de l'étau supérieur, on fait un léger **pré-serrage** et on lance la traction a une vitesse de **50 mm/min** (cette valeur est choisie en raison du matériau utilisé qui est un polymère), la figure 2.28 montre le dispositif expérimental.

Résultats des essais sur éprouvette de résine seule de 25mm de largeur

La figure 2.29 représente le graphe directement obtenu à partir de l'interface de la machine de traction après sauvegarde sous format .bmp.

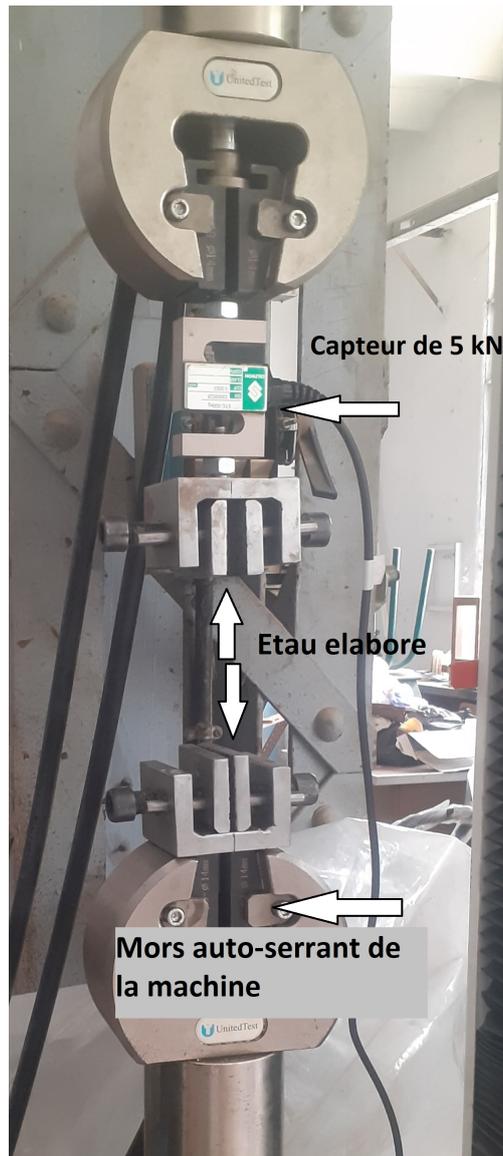


FIGURE 2.28 – Machine de traction avec étau et mors montés

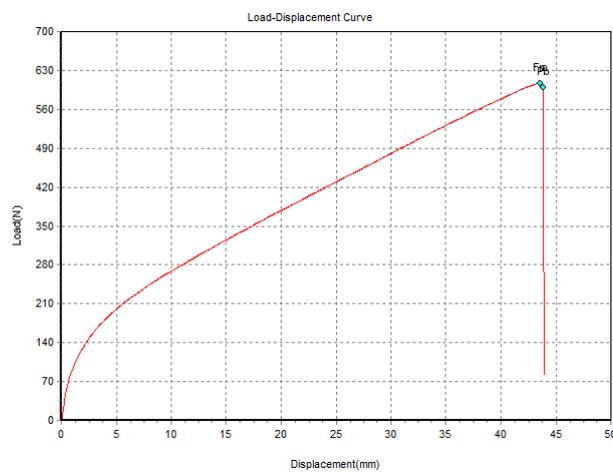


FIGURE 2.29 – Courbe Force-Déplacement : Résine Seule

On refait la même procédure avec nos quatre éprouvettes de résine seule, les résultats après traitement sont résumés dans le graphe de la figure 2.30 .

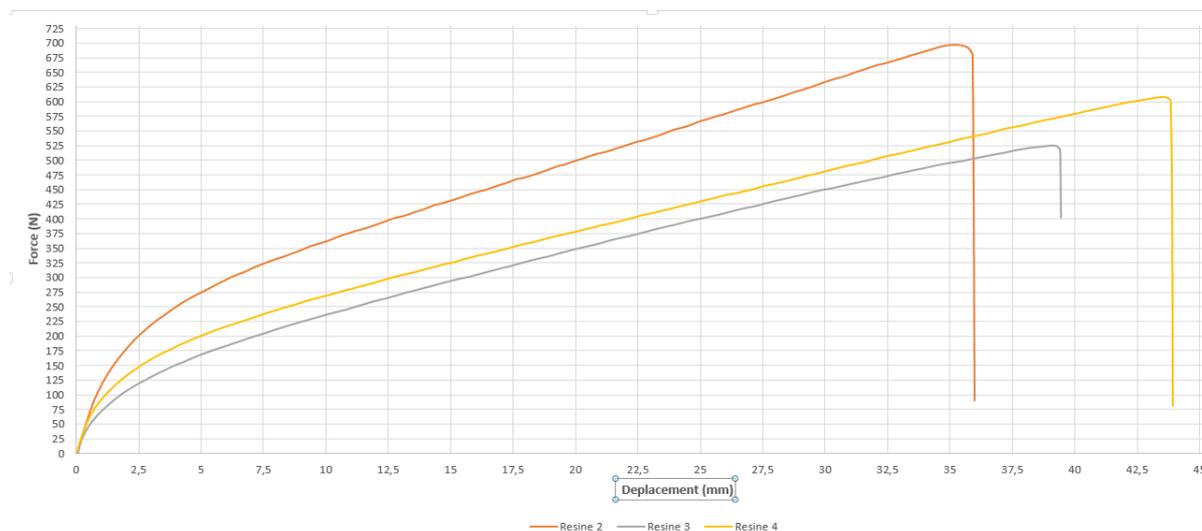


FIGURE 2.30 – Courbes Force-Déplacement des essais sur la résine seule

L'éprouvette après rupture est représentée dans la figure 2.31.



FIGURE 2.31 – Éprouvette de résine Seule après rupture

Les résultats de la figure 2.30, doivent bien évidemment être traités, pour ce qui est de l'essai que nous allons valider, il s'agira de celui de la résine 4 qui donne de bons résultats qui se situent entre ceux des deux autres.

Résultats des essais sur éprouvette de 55 mm de largeur

De la même manière on refait ce travail avec les éprouvettes de 55 mm de largeur, la figure 2.32 montre l'aspect de l'éprouvette soumise au test de traction. Nous pouvons exposer la courbe : Force-Déplacement pour l'essai sur la résine seule pour une éprouvette de 55 mm de largeur dans la figure 2.33.

Nous pouvons voir que la courbe force-déplacement pour la résine seule avec 55 mm de largeur a une allure similaire à celle obtenue pour l'essai de la résine de 25 mm de largeur avec des valeur beaucoup plus élevées, on note une valeur de la force maximale de 1380,6 N qui représente une augmentation de 130% par rapport à la valeur obtenue pour une éprouvette de 25 mm de largeur.

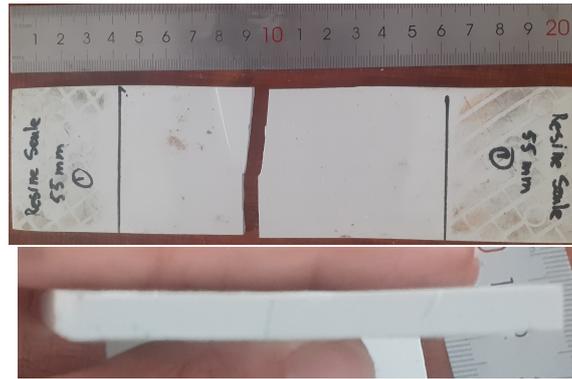


FIGURE 2.32 – Aspects des éprouvettes de résine seule après test de traction

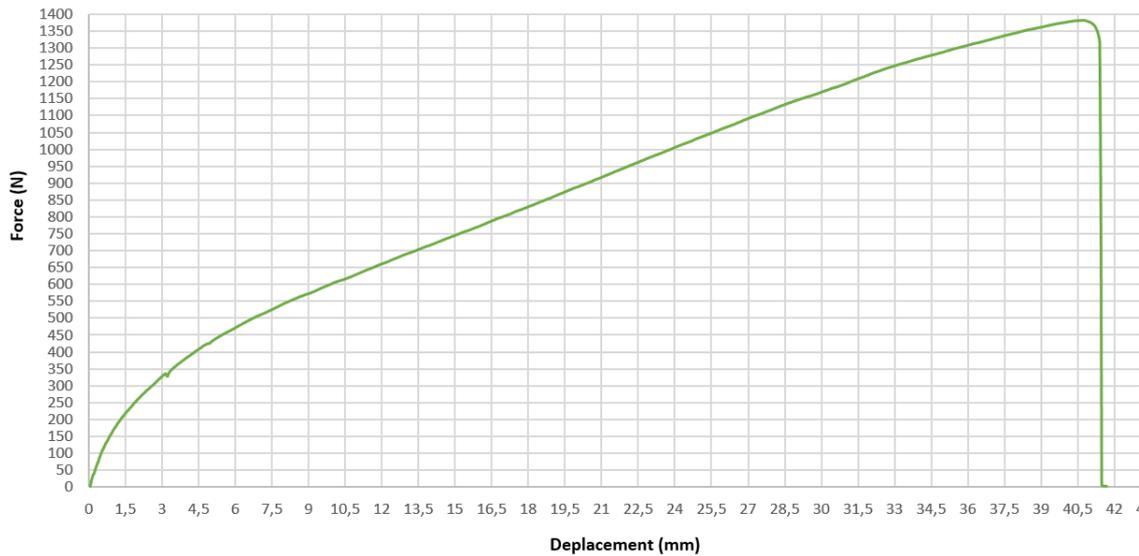


FIGURE 2.33 – Courbe : Force-Déplacement pour la résine seule avec 55 mm de largeur

5.2 Essais de traction sur Tricot seul

Nous avons fait une étude sur le comportement des tricots en variant le nombre de mailles, ceci implique pratiquement la variation de la largeur des tricots allant de 25 mm à 65mm avec un pas de 10 mm tout en gardant une longueur constante de 200 mm.

On fixe les tricots sur les mors de l'étau sur une longueur de 40 mm par étau ce qui nous laisse une longueur efficace de 120 mm pour chaque éprouvette. De la même manière que pour les essais sur résine seule, nous fixons les éprouvettes et appliquons une vitesse constante de **50mm/min**, on fait 2 essais pour chaque largeur et on obtient les résultats du tableau 2.8.

TABLE 2.8 – Résumé des résultats des tests de traction sur tricot seul

N°de mailles	5			7		8		10		12	
Largeur (mm)	25			35		45		55		65	
Essai	1	2	3	1	2	1	2	1	2	1	2
L_0 (mm)	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120
L_f (mm)	125	140	162	141	192	157	137	131	137	150	175
ϵ (%)	103	117	135	117	160	131	115	110	135	127	145
F_{Max} (N)	229	146	296	287	354	550	750	836	996	901	1019

Les résultats des essais après traitement sont représentés dans le tableau 2.9.

TABLE 2.9 – Étude Paramétrique du nombre de mailles

Nombre de mailles	5	7	8	10	12
Largeur (mm)	25	35	45	55	65
F_{Max} (MPa)	229	354	550	836	1019
F_{max}/ N	45,8	50,57	68,75	83,6	84,91

Les éprouvettes après traction sont présentées dans la figure 2.34.



FIGURE 2.34 – Allure des tricots après traction pour différentes largeurs : de 25 mm à 65 mm

La courbe résumant ces valeurs est représentée dans la figure 2.35.

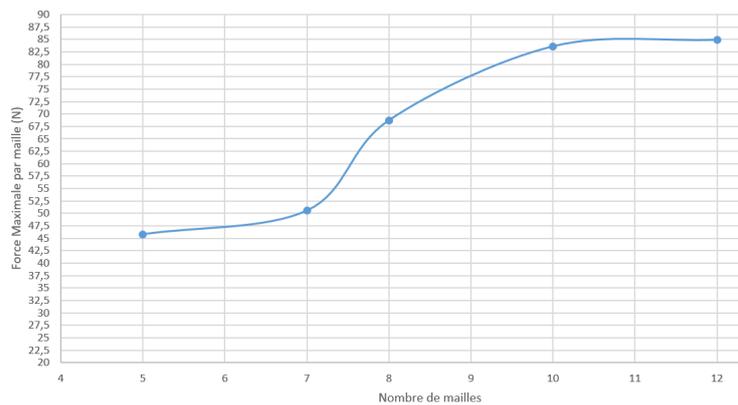


FIGURE 2.35 – Étude Paramétrique de l'évolution de la force maximale en fonction du nombre de mailles

La courbe augmente progressivement jusqu'à stabilisation à partir d'une largeur de 55 mm, ce résultat est très intéressant puisque cette taille coïncide avec celle suggérée par la norme des textile (ISO 13934) ce qui nous permet de la valider et de choisir cette taille de 55 mm de largeur comme référence pour les essais sur tricots.

Afin d’avoir une idée sur la loi de comportement des tricots, il serait judicieux de tracer dans un même graphe, les courbes Force-Déplacement de tous les tricots étudiés. La figure 2.36 représente ce graphe.

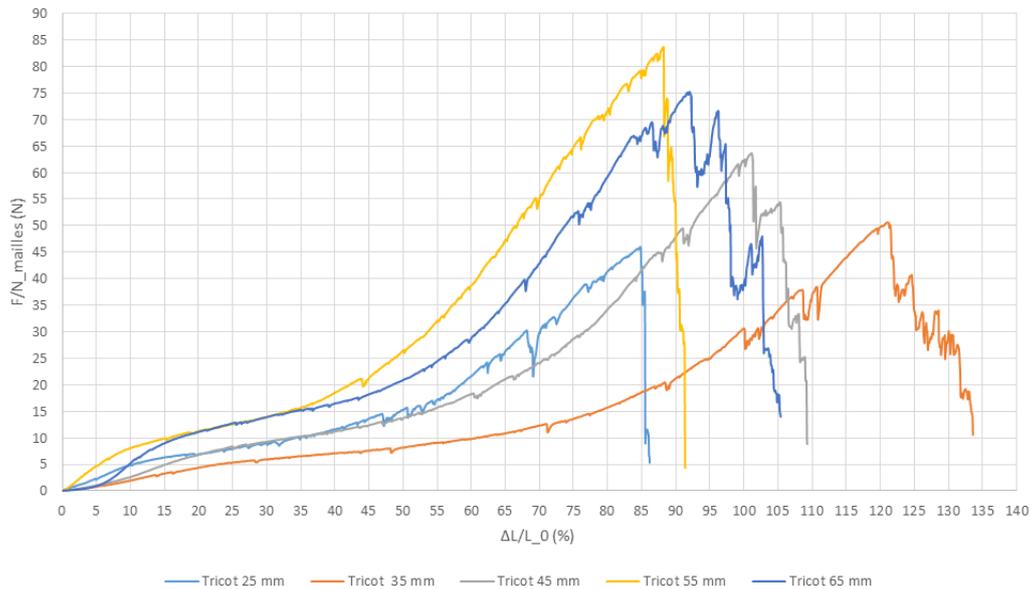


FIGURE 2.36 – Courbes Force-Déplacement résumant le comportements des différents tricots

On remarque que le comportement est similaire pour tous les tricots surtout pour de faibles charges, par la suite, on remarque une augmentation de charge relative pour chaque tricot qui va mener au fur et à mesure qu’on augmente la largeur du tricot à une stabilisation, ceci se voit clairement pour les deux largeurs : 55 mm et 65 mm (10 et 12 mailles respectivement) où les deux courbes sont quasiment identiques au début de l’essai. Nous pouvons aussi relever que les structures tricotées ont une grande capacité d’allongement ce qui est considérée comme atout pour certaines applications spécifiques.

5.3 Essais de traction sur tricot + résine

Après démoulage des éprouvettes, on les serre sur une profondeur de de 40 mm à l’intérieur des mors puis on fait un pré-serrage suivi d’une traction de 50 mm/min jusqu’à la rupture. Les essais se feront dans les deux directions : Colonne + Rangée avec deux tailles de largeur d’éprouvettes : 25 mm et 55 mm.

Essais de traction dans la direction colonne avec une largeur de 25 mm

Nous allons répéter la même procédure sur trois éprouvettes et on obtient les résultats du tableau 2.10.

TABLE 2.10 – Résultats des essais de traction sur composite dans la direction colonne

Éprouvette	L_0 (mm)	ΔL (mm)	F_{Max} (N)
1	120	48,9	464
2	120	56,54	835
3	120	48,45	804

La figure 2.37 représente la courbe force-déplacement pour cet essai.

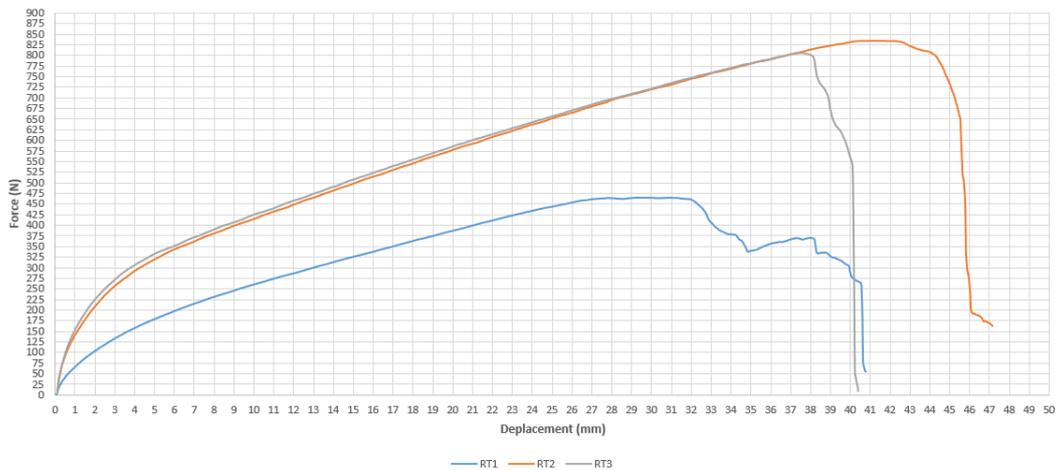


FIGURE 2.37 – Courbe Force-Déplacement pour composite : Tricot+Résine dans la direction colonne de 25mm de largeur

Nous pouvons voir que les trois courbes ont la même allure semblable à la courbe générée pour des matériaux hyperélastiques et donc de la courbe de notre résine seule, nous pouvons également noter que les valeurs de la force sont plus élevées en raison du renforcement.

Essais de traction dans la direction rangée avec une largeur de 25 mm

De la même manière nous obtenons le graphe de la figure 2.38 pour la direction rangée, nous n'avons pas eu obtenir des valeurs acceptables pour cette direction ce qui est dû à la mauvaise mise en forme du composite en raison de la difficulté de manipulation des tricots dans la direction rangée.

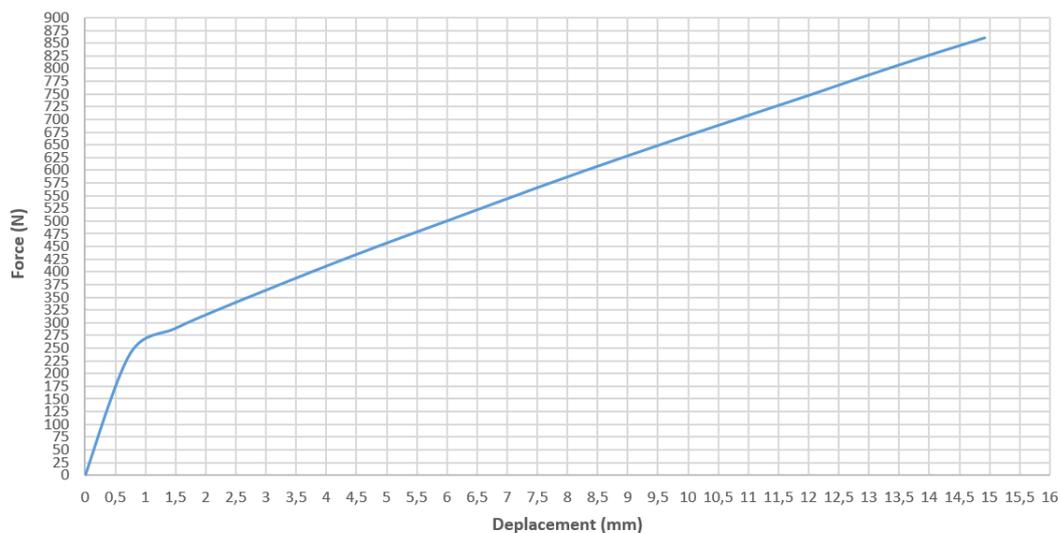


FIGURE 2.38 – Courbe : Force-Déplacement pour composite résine + tricot de 25 mm de largeur dans la direction rangée

On remarque que l'allure de la courbe ressemble à celle de la résine seule avec des valeurs supérieures, ceci est dû au renforcement que rapporte les tricots.

Évaluation du renforcement pour une largeur de 25 mm

Nous pouvons désormais évaluer le renforcement de la résine selon la direction étudiée. La figure 2.39 représente les courbes force-déplacement de la résine seule et renforcée dans le même graphe.

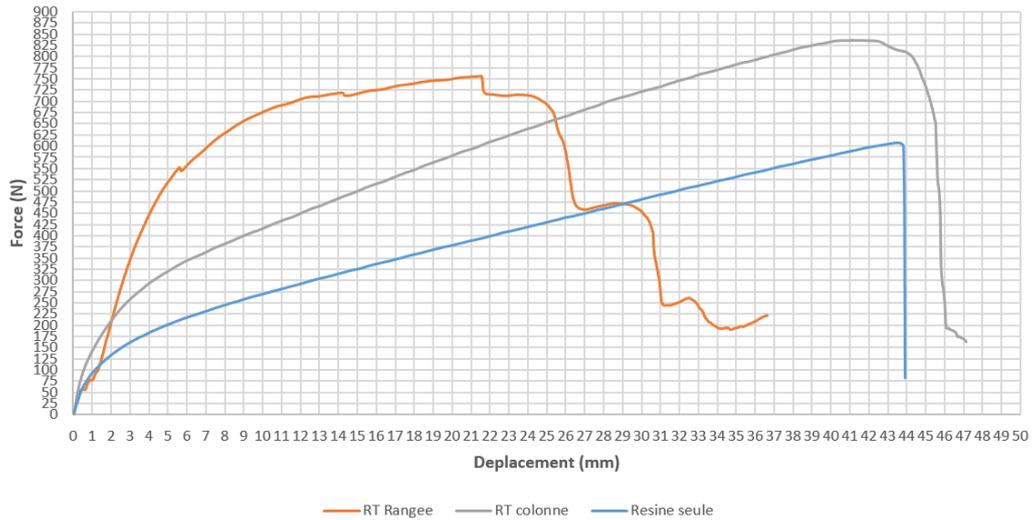


FIGURE 2.39 – Courbes force-déplacement de la résine seule et renforcée

Nous pouvons clairement, qu'en terme d'efforts, le renforcement a bien eu lieu dans les deux directions.

Dans la direction colonne, nous avons :

$$\text{Taux de renforcement} = \frac{F_{RT \text{ colonne}} - F_{resine \text{ seule}}}{F_{resine \text{ seule}}} \quad (2.12)$$

A.N :

$$\text{Taux de renforcement} = \frac{834 - 600}{600}$$

On trouve :

$$\text{Taux de renforcement} = 39\%$$

Dans la direction rangée, nous avons :

$$\text{Taux de renforcement} = \frac{F_{RT \text{ rangee}} - F_{resine \text{ seule}}}{F_{resine \text{ seule}}} \quad (2.13)$$

A.N :

$$\text{Taux de renforcement} = \frac{756 - 600}{600}$$

On trouve :

$$\text{Taux de renforcement} = 26\%$$

La figure 2.40 représente une éprouvette en composite après l'essai de traction. La section de rupture est présentée dans la figure 2.41.



FIGURE 2.40 – Éprouvette composite 25 mm après traction

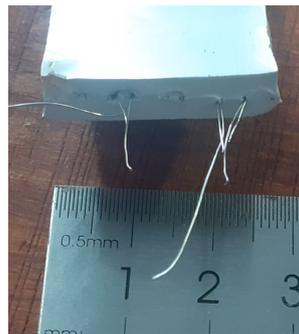


FIGURE 2.41 – Section de rupture de l'éprouvette composite de 25 mm

À partir des résultats obtenus, nous voyons clairement que le renforcement dans la direction colonne est supérieur à celui obtenu dans la direction rangée.

Essais de traction dans la direction colonne avec une largeur de 55 mm

Nous avons par la suite décidé de faire la même démarche pour des éprouvettes de 55 mm de largeur. Les résultats dans la direction colonne sont représentées dans la figure 2.42.

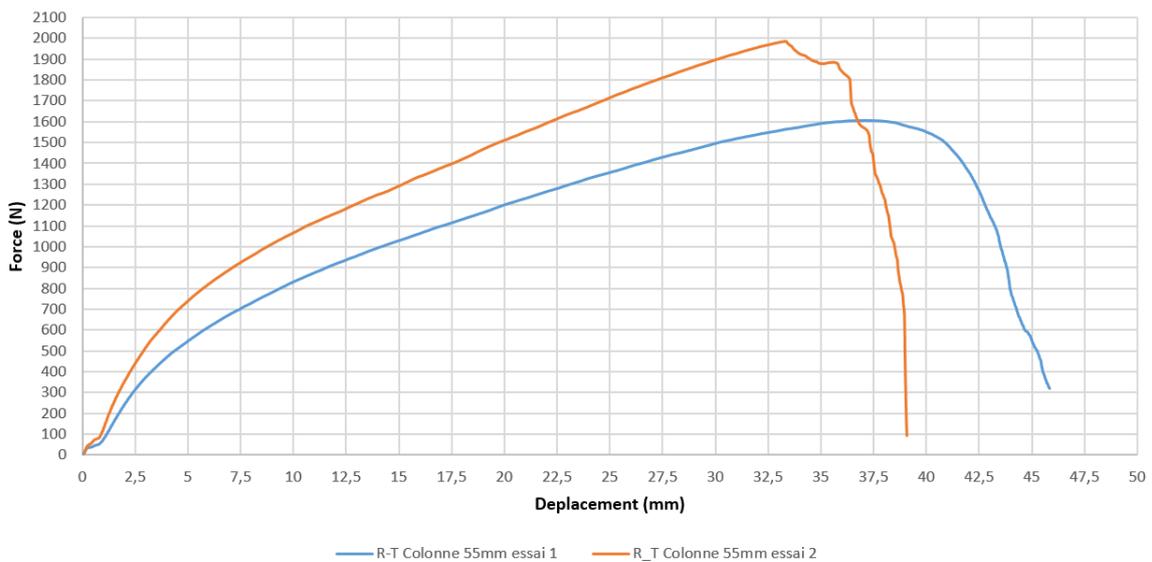


FIGURE 2.42 – Courbe : Force-déplacement composite de 55 mm dans la direction colonne

Essais de traction dans la direction rangée avec une largeur de 55 mm

De la même manière, nous avons fait les mêmes tests dans la direction rangée, l'essai validé est représenté dans la figure 2.43

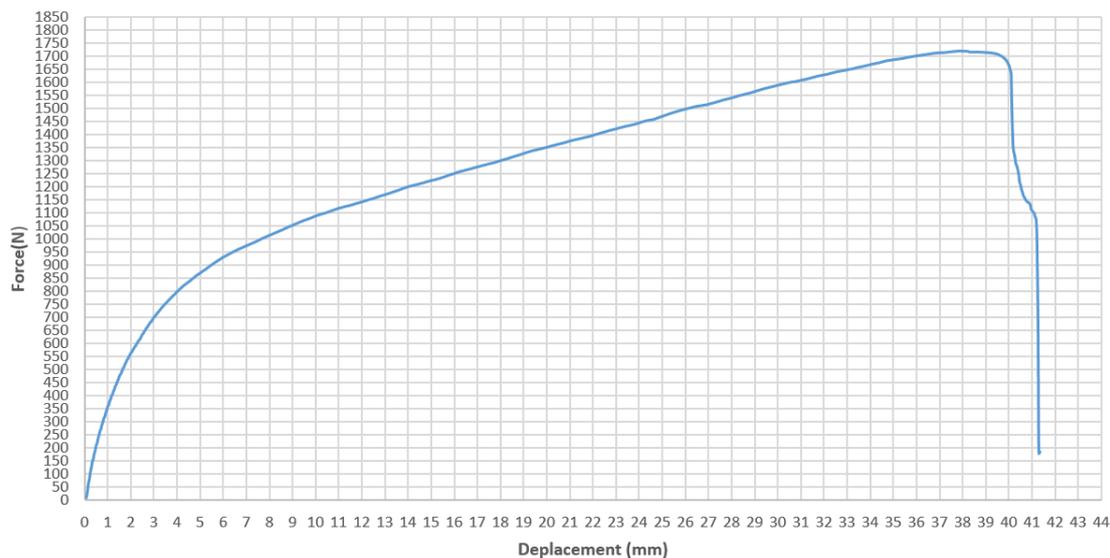


FIGURE 2.43 – Courbe : Force-déplacement pour composite de 55 mm dans la direction rangée

Évaluation du renforcement pour une largeur de 55 mm

Nous pouvons désormais évaluer le renforcement de la résine selon la direction étudiée. La figure 2.44 représente les courbes force-déplacement de la résine seule et renforcée dans le même graphe.

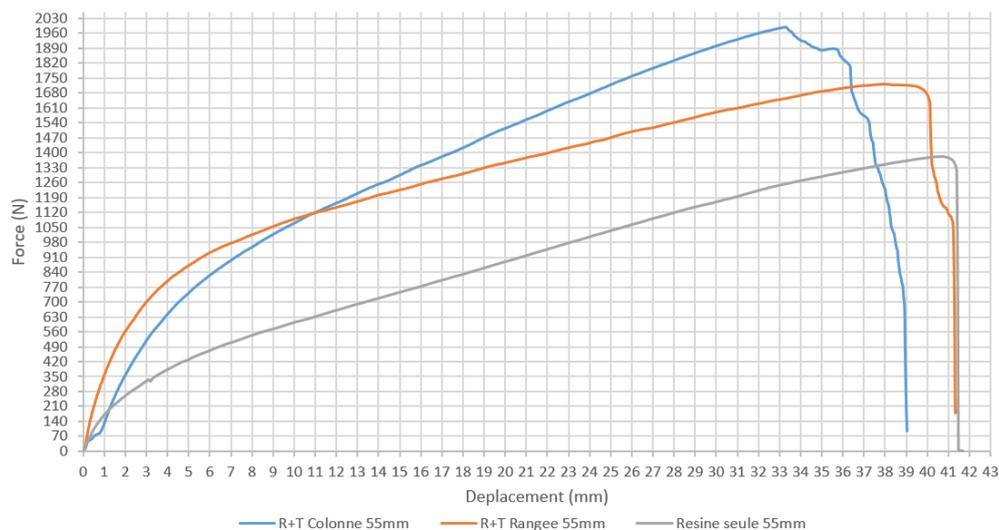


FIGURE 2.44 – Courbes force-déplacement de la résine seule et renforcée avec 55 mm de largeur

Nous pouvons clairement, qu'en terme d'efforts, le renforcement a bien eu lieu dans les deux directions.

Dans la direction colonne, nous avons :

$$\text{Taux de renforcement} = \frac{F_{RT \text{ colonne}} - F_{\text{resine seule}}}{F_{\text{resine seule}}} \quad (2.14)$$

A.N :

$$\text{Taux de renforcement} = \frac{1978 - 1380}{1380}$$

On trouve :

$$\text{Taux de renforcement} = 43,3\%$$

Dans la direction rangée, nous avons :

$$\text{Taux de renforcement} = \frac{F_{RT \text{ rangee}} - F_{\text{resine seule}}}{F_{\text{resine seule}}} \quad (2.15)$$

A.N :

$$\text{Taux de renforcement} = \frac{1719 - 1380}{1380}$$

On trouve :

$$\text{Taux de renforcement} = 24,5\%$$

La figure 2.45 montre la section de rupture du matériau composite de 55 mm de largeur.

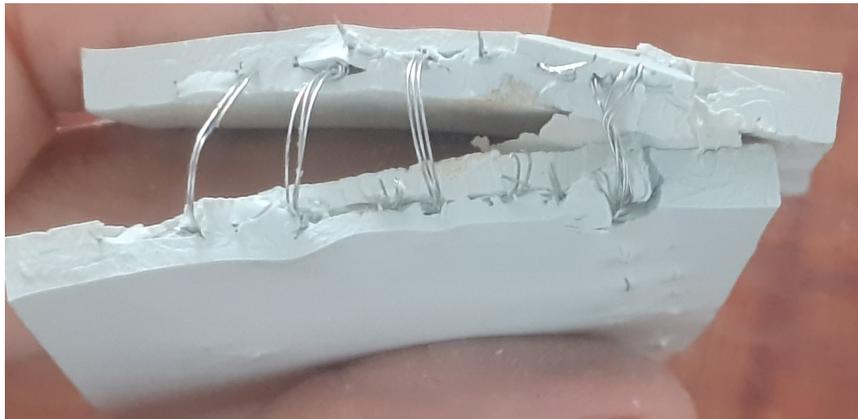


FIGURE 2.45 – Section de rupture du composite de 55 mm de largeur

L'image de la figure 2.46 a été prise pendant l'essai de traction sur une éprouvette composite de 55 mm de largeur.



FIGURE 2.46 – Éprouvette composite de 55mm de largeur pendant la traction dans la direction colonne

De la même manière, nous constatons que le renforcement dans la direction colonne est supérieur à celui obtenu dans la direction rangée.

5.4 Problème avec rangée tricot seul

Nous avons par la suite tenter de faire les essais sur des éprouvettes de tricots seuls dans la direction rangée, ceci n'a malheureusement pas été possible en raison de la haute capacité d'élongation que possède ce matériau dans cette direction ainsi que la course insuffisante que possède notre machine de traction surtout après avoir ajouter le capteur de force et les deux étaux. Cette élongation se justifie par le fait que les mailles se défilent dans la direction rangée qui coïncide avec la direction de l'effort impose.

La figure 2.47 représente une image de l'éprouvette dans la direction rangée.

Le problème de course insuffisante est exposée dans la figure 2.48.



FIGURE 2.47 – Éprouvette rangée a l'état plan



FIGURE 2.48 – Problème de fin de course

5.5 Essais de traction sur les tricots sous forme de gaine

Étant donné que l'usage des structures tricotées est généralement dédié aux formes cylindriques (Gaines), on se donne comme nouvel objectif de les étudier sous cette forme.

Après avoir fini la fabrication du dispositif pour ces essais au département, on place notre éprouvette sur les cylindres du dispositif et procédons à l'essai de traction avec une vitesse de 50 mm/min.

La figure 2.49 montre l'arrangement du tricot sur le dispositif élaboré.



FIGURE 2.49 – Montage du tricot de 45 mm de largeur sur le dispositif de gaine élaboré

De la même manière que pour les éprouvettes plate, nous lançons l'essai de traction à vitesse constante pour différentes largeurs de tricots de 25 mm à 65 mm avec un pas de 10 mm , il est à noter que la longueur de ces éprouvettes est la même pour toutes les largeurs et est égale à 100 mm, nous remarquons que les tricots se courbent symétriquement, cette courbure est représentée dans la figure 2.50.



FIGURE 2.50 – Courbure générée par l'essai de traction sur tricot en gaine de 45 mm de largeur.

Au fur et à mesure que l'essai avance, le tricot continue à s'allonger dans le sens de l'effort appliqué comme le montre la figure 2.51.



FIGURE 2.51 – Élongation du tricot en gaine de 45 mm de largeur

Nous pouvons remarquer que le tricot en rangée se défile, d'où l'importante déformation observée ce défilement mène à l'obtention de plusieurs fibres démêlées comme nous pouvons le voir sur la figure 2.52.



FIGURE 2.52 – Défilement du tricot en gaine de 45 mm de largeur

Les résultats obtenus après traction de tricot de différentes largeurs sont résumés dans le graphe de la figure 2.53 ce qui nous permet d'avoir l'allure du comportement des tricots en gaine dans la direction rangée. Ces courbes sont en grandeurs normalisées de manière à pouvoir faire une comparaison significative.

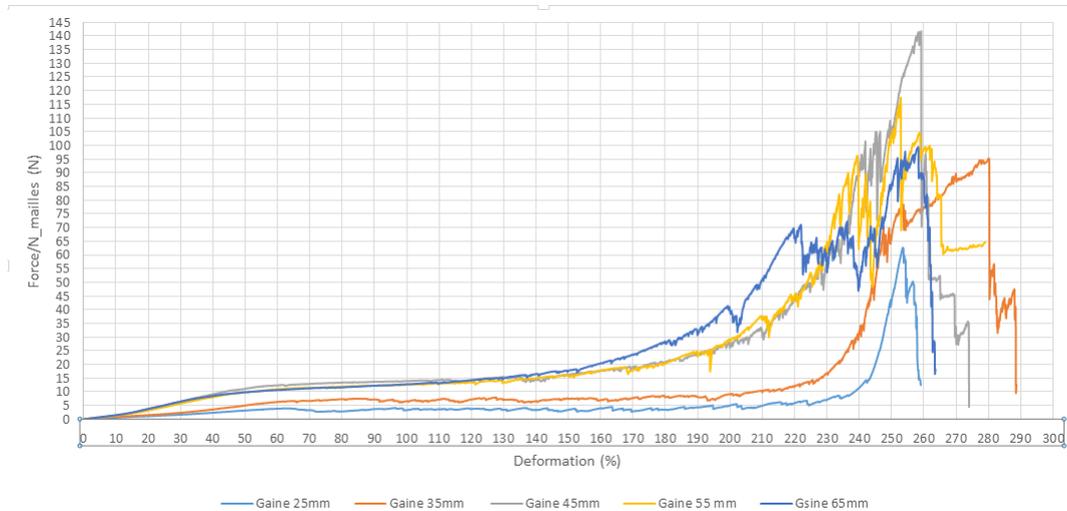


FIGURE 2.53 – Courbes normalisées : Force-Déplacement des différentes tailles de tricots en gaine

Les valeurs du graphes de la figure 2.53 peuvent être résumées dans le tableau 2.11.

TABLE 2.11 – Tableau résumant les essais sur les tricots en gaine

Largeur (mm)	25	35	45	55	65
N de mailles	5	7	8	10	12
$Force_{maximale}$ (N)	309	666,75	1127,20	1166,85	1181
$Deplacement_{maximal}$ (mm)	253	280	259	252,77	257,7
$Force/Nombre_{mailles}$	61,8	95,25	140,9	116,7	98,33

Nous pouvons déduire à partir du graphe de la figure 3.41 que les tricot en gaine ont une très haute capacité d'élongation qui va jusqu'à plus de 250%, nous pouvons également noter que l'effort reste faible ($< 20 \text{ N}/N_{mailles}$) durant une longue élongation (près de 150 % , puis il augmente rapidement jusqu'à atteindre des valeurs $> 90 \text{ N}/N_{mailles}$, ceci s'explique par un comportement composé de deux phases :

1. Une première phase dans laquelle le tricot s'allonge facilement sans effort dans la direction rangée, ceci s'explique par un resserrement des mailles.
2. Une deuxième phase dans laquelle le tricot se défile jusqu'à avoir des fils , dans cette phase le tricot fait intervenir la rigidité des fils le composant pour réagir à l'effort imposé.

6 Conclusion

Ce chapitre a repris une explication du procédé expérimental réalisé ainsi que l'essentiel des résultats obtenus. Nous pouvons conclure que les structures tricotées disposent d'un grand potentiel d'élongation, que leur résistivité sous la forme gaine est supérieure comparée à l'état plan. Pour ce qui est de ces structures en renforts nous pouvons voir que le taux de renforcement

est supérieur dans la direction colonne pour deux éprouvettes de la même taille. Nous pouvons également noter qu'en augmentant la taille de nos éprouvettes, l'effort augmente également. Une dernière conclusion peut se faire concernant la taille du tricot, nous avons remarquée qu'une largeur de 55 mm (qui correspond à 10 mailles pour notre tricot) représente une valeur de stabilisation d'effort que ce soit pour les tricot plan ou en gaine.

Chapitre 3

Étude Numérique

Nous présentons dans ce chapitre l'étude numérique réalisée pour modéliser le comportement d'un matériau avec renfort sous forme de tricot, cette étude se fait principalement avec le logiciel Abaqus CAE, le tricot est généré par le code de calcul KSP développée par le Dr. Kebir qui permet d'obtenir des tricots avec les dimensions souhaitées.

1 Présentation des outils numériques utilisés

Pour cette étude numérique deux outils seront utilisés : Le code de calcul KSP pour la génération des tricots ainsi que le logiciel Abaqus pour simuler les essais de traction sur ces matériaux.

1.1 KSP

KSP(Kebir Simultion Program) est un code de calcul qui permet de générer des tricots en introduisant les dimensions de ces derniers, par la suite un maillage en éléments poutres est généré selon le nombre d'éléments souhaité, cet outil numérique est essentiellement utilisé dans les travaux de recherches comme cela a été fait dans la thèse de Youcef Cherradi [3].

KSP a une interface simple (Figure 3.1) qui facilite son utilisation. On commence par appuyer sur :

Wizard >> GenerationTricot

Il suffit d'introduire les dimensions du tricot (longueur, largeur, nombre de fils, diamètre, nombre de mailles en colonne et en rangée,...) et il s'affichera à l'écran, par la suite, il suffit d'enregistrer le tricot obtenu sous format **.inp** qui sera exporté vers le logiciel de simulation Abaqus.

La figure 3.1 représente l'interface de Ksp.

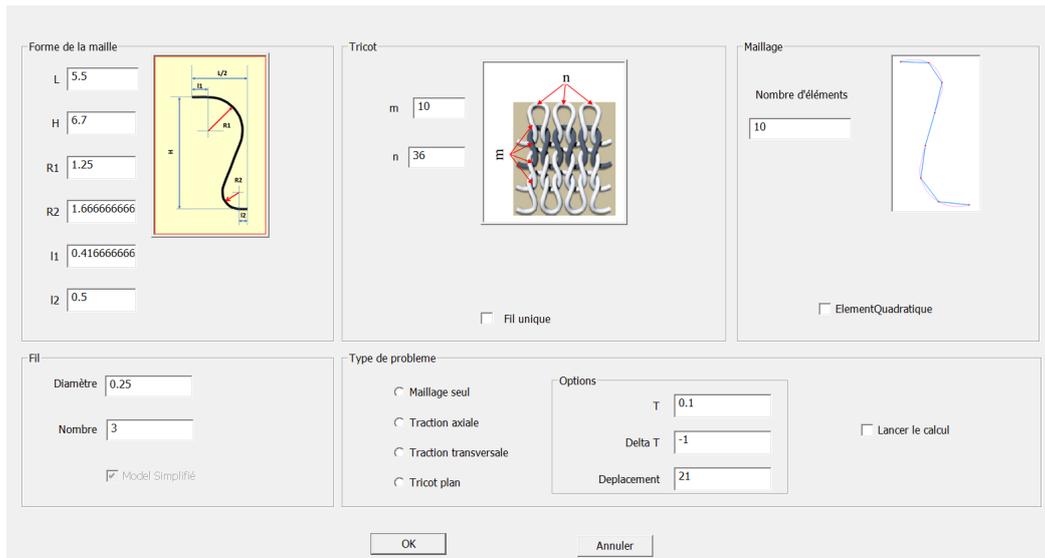


FIGURE 3.1 – Interface KSP

1.2 Abaqus

ABAQUS est un progiciel développé par ABAQUS, Inc (Dassault Systèmes), il utilise les éléments finis pour ses calculs. Il se compose de trois produits : ABAQUS/Standard, ABAQUS/Explicit et ABAQUS/CAE.

1. ABAQUS/CAE représente l'interface de visualisation et de modélisation.
2. ABAQUS/Standard a recours à un schéma traditionnel d'intégration implicite qui est utilisé dans les calculs généralistes.
3. Le solveur ABAQUS/Explicit est utilisé pour résoudre des problèmes dynamiques ou quasi statiques non linéaires.

ABAQUS est très largement utilisé dans les industries automobile et aéronautique en raison de ses capacités d'analyse avancées et de son excellente ergonomie. Il est à également important de noter qu'il offre une vaste gamme de modèles de matériau car il a été conçu pour étudier les comportements non-linéaires dans divers domaines [27, 28, 29].

2 Travail effectué

L'étude numérique a été réalisée en deux parties : la première partie consiste à faire une étude sur le tricot sec (Sans matrice) afin d'étudier son comportement lors de la traction et analyser ses propriétés mécaniques. L'étude du tricot comme renfort dans une matrice en résine (La même résine utilisée dans la partie expérimentale) afin de comparer les résultats avec les essais expérimentaux.

La première période consistera en une prise en main du logiciel et de ses différentes rubriques : Conception, Définition de matériaux, Assemblage, Chargement, Maillage,... Pour cela, des outils tels que des manuels de TPs [30], des formations en ligne ont été utilisés.

2.1 Étude sur le tricot seul

Nous commençons notre étude par une simulation du comportement du le tricot seul (sans matrice) sous une traction uniaxiale.

Génération des tricots

Nous commençons par introduire les dimensions du tricot utilisé dans l'étude expérimentale dans KSP, ces paramètres sont représentés dans la figure 3.2.

FIGURE 3.2 – Paramètres des tricots sur KSP

Les tricots obtenus sont présentés dans la figure 3.3.

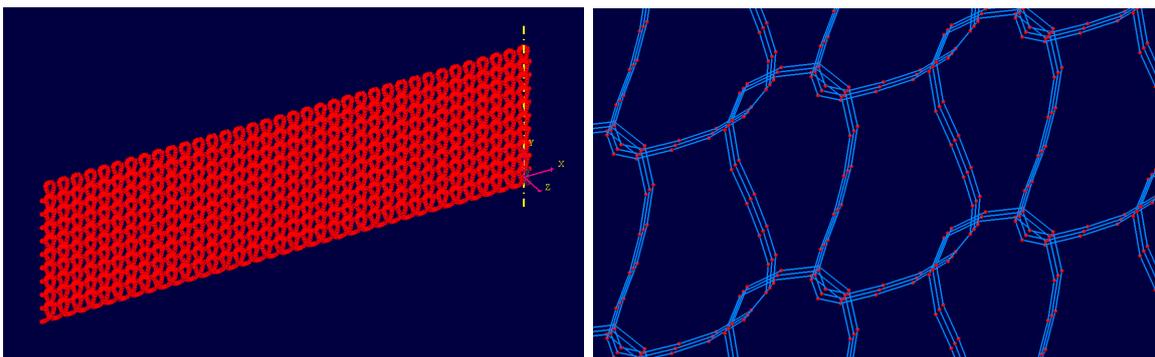


FIGURE 3.3 – a. Tricot généré b. vue sur les mailles obtenues

L'importation du tricot dans Abaqus

Après avoir enregistré le tricot sous forme **.inp**, nous lançons Abaqus et choisissons le dossier (Directory) de travail, on peut par la suite importer le modèle du tricot directement dans Abaqus.

La figure 3.4 représente le tricot de taille normalisée selon la norme **ISO 13934** importé sur Abaqus dans la rubrique PART, un point de référence R_p a également été créé comme représentée dans cette même figure.

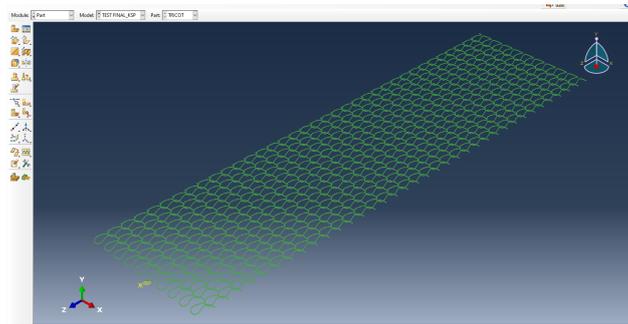


FIGURE 3.4 – Tricot importé dans Abaqus

Insertion des propriétés des matériaux

La seconde rubrique est intitulée "Property" dans laquelle nous pourrions insérer les propriétés des matériaux utilisés, pour ce qui est de l'acier du tricots, les propriétés sont directement importées depuis KSP, ces propriétés sont résumées dans la fenêtre présentée dans la figure 3.5.

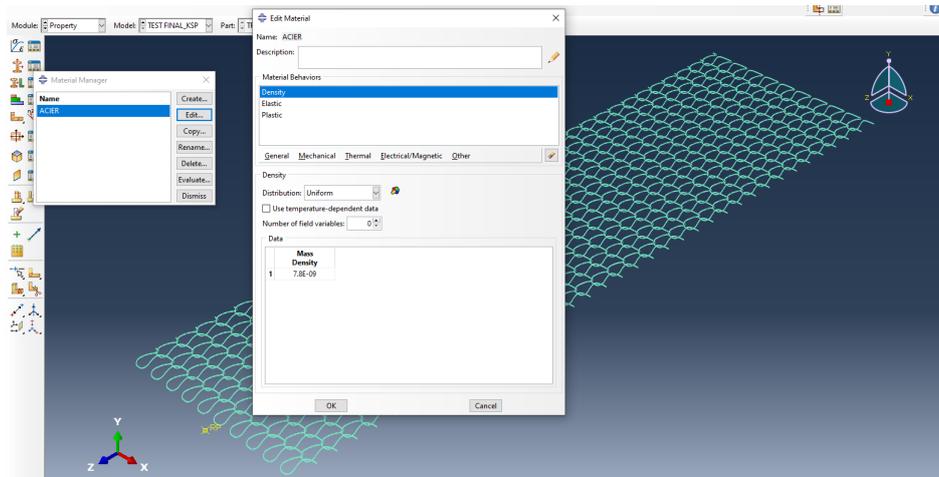


FIGURE 3.5 – Propriétés de l'acier du tricot

Choix du schéma de calcul

La rubrique suivante est le choix du schéma de calcul : STEP, pour pouvoir faire cette simulation on choisit un schéma *Dynamique Explicite*. La figure 3.6 représente les paramètres de la rubrique STEP.

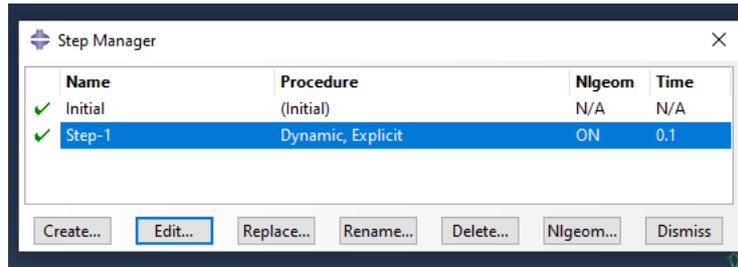


FIGURE 3.6 – Paramètres STEP

Les paramètres de viscosité sont insérés comme le montre la figure 3.7.

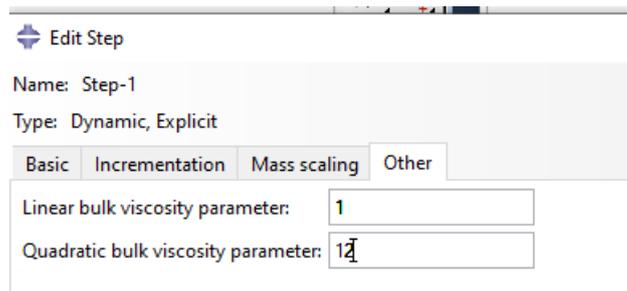


FIGURE 3.7 – Paramètres de viscosité

Les paramètres par défaut sont de 1 pour la viscosité linéaire et de 1.2 pour la viscosité quadratique, nous avons changé ces paramètres afin de réduire le temps de calcul en raison du manque de temps.

Création des interactions

La prochaine étape consiste en la création d'interactions, le premier problème rencontré dans cette étude numérique est le démaillage du tricot, en effet, après avoir importé le tricot dans Abaqus, et dès que l'essai de traction était lancé, on remarquait que les mailles n'étaient pas liées ce qui causait un démaillage pour l'étude du tricot seul et des problèmes de distorsion pour le tricot en renfort. Pour y remédier, nous devons créer un contact entre les mailles en imposant un facteur de friction, ce coefficient représente la résistance entre les deux mèches entrelacées.

La figure 3.8 expose le problème de démaillage rencontré.

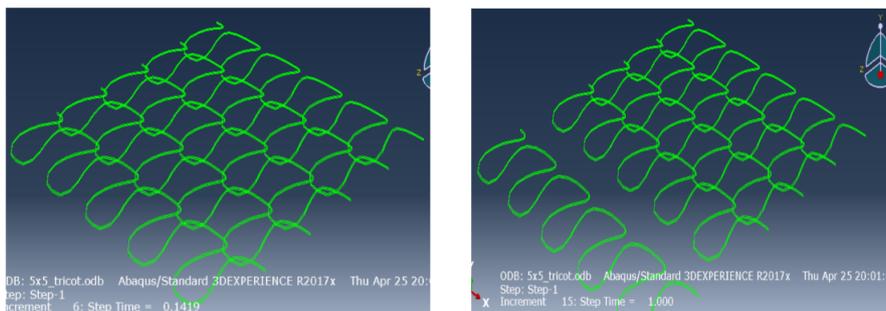


FIGURE 3.8 – Problème de démaillage dans le tricot

Les paramètres de contact sont présentées dans la figure 3.9.

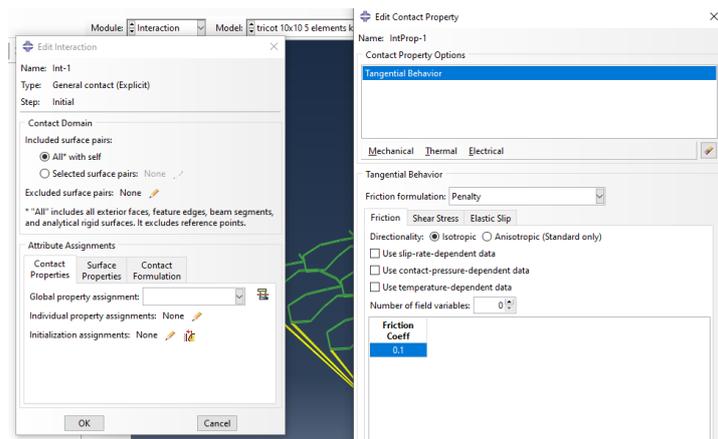


FIGURE 3.9 – Création du contact entre les mailles

La deuxième interaction qui sera créée est un *Couplage* entre le point de référence créée auparavant et quelques rangées de tricots qui s’étendent sur une longueur de 40 mm, nous choisissons de faire cela afin de mieux se rapprocher des conditions expérimentales puisque lors de nos essais au laboratoire de traction, notre éprouvette de tricot a été fixée dans les mors de l’étai élaboré sur une longueur de 40 mm.

La figure 3.10 présente les paramètres de Couplage.

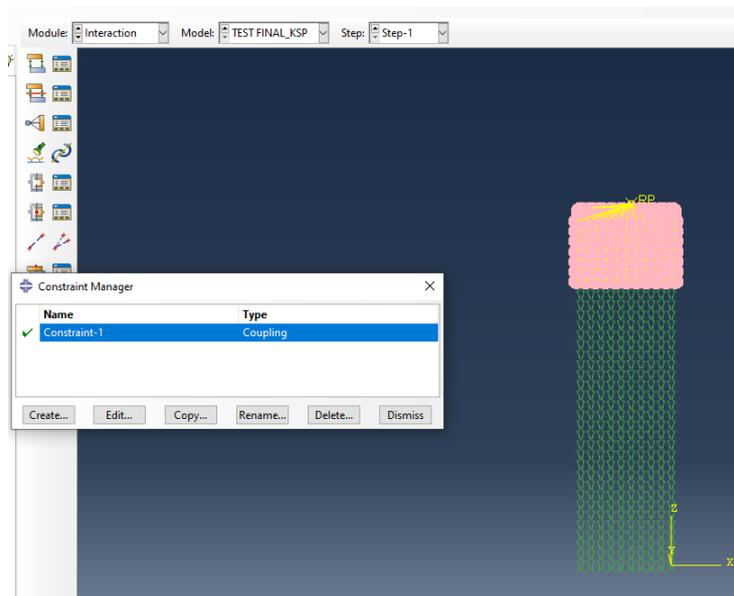


FIGURE 3.10 – Couplage entre R_p et les mailles sur une longueur de 40 mm

Conditions aux limites

La rubrique qui suit est la définition des conditions aux limites, on modélise les conditions sur le premier étai fixe par un encastrement qui s'étendra lui aussi sur plusieurs rangées de mailles sur une longueur de 40 mm, et on modélisera l'étai mobile quant à lui par un déplacement imposé sur R_p (ce déplacement vaut 130 mm)qui a déjà été couplé comme expliqué précédemment ce qui permettra de donner à toute la zone couplée le même déplacement. La figure 3.10 représente les conditions limites imposées pour cette simulation.

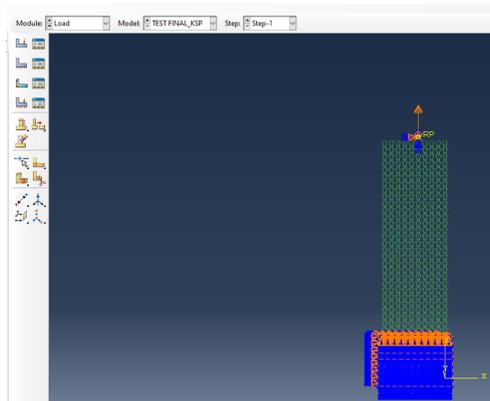


FIGURE 3.11 – Conditions limites pour l'essai sur le tricot seul

Lancement du calcul

Après avoir réglé tous les paramètres cités auparavant, nous pouvons désormais lancer le calcul dans la rubrique Job. Pour cela, on commence par créer un calcul, puis régler les paramètres de calcul : Activer la parallélisation et utiliser tous les coeurs réelles du processeur afin d'optimiser au maximum le temps de calcul, pour ce qui est disponible dans le centre de calcul du département, ce calcul a duré plus de **30 heures**. La figure 3.12 représente les itérations lors du calcul lancé.

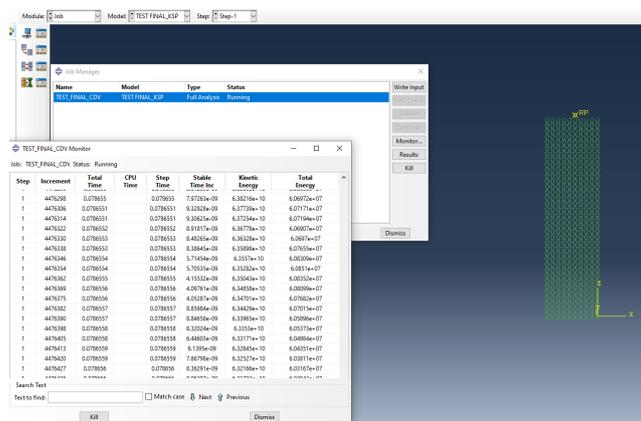


FIGURE 3.12 – Itérations lors du calcul de l'essai sur le tricot seul

Pour la suite des calculs, et vu le temps énorme que dure la simulation, nous modélisons notre éprouvette avec une longueur de 120 mm avec une extrémité encastree et une autre couplée au point de référence. Ceci est tout a fait faisable puisqu'au niveau **numérique** les deux modélisations sont équivalentes, le calcul durera ainsi près de 8h ce qui représente un gain de

temps considérable.

Le schéma obtenu est représenté dans la figure 3.13.

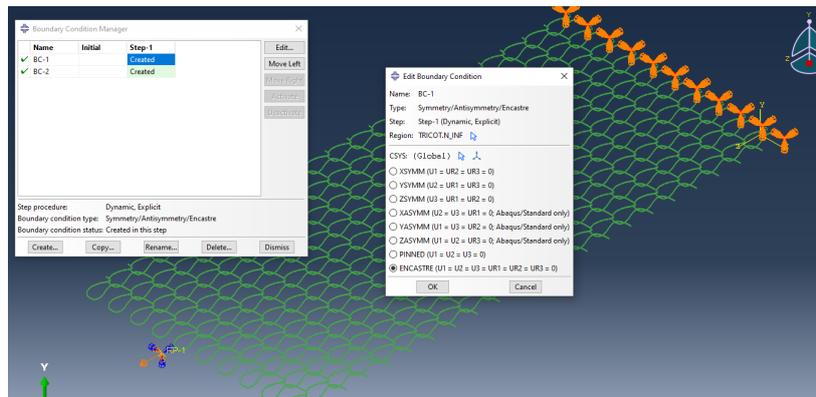


FIGURE 3.13 – Schéma de modélisation équivalent

Obtention des résultats

A la fin du calcul, nous pouvons visualiser les résultats obtenus en terme de : Force, Déplacement, contrainte,...Le traitement des résultats se fera dans la section suivante.

La figure 3.14 montre l'allure du tricot après déformation.

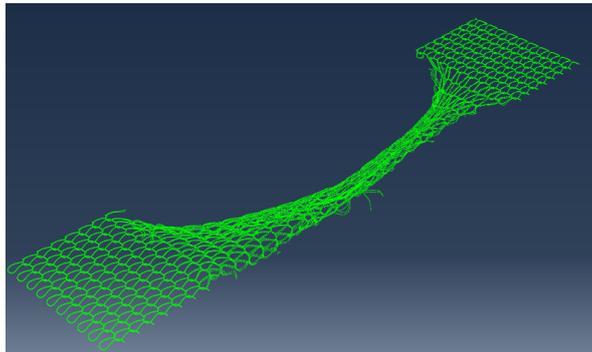


FIGURE 3.14 – Allure du tricot après déformation

Nous pouvons également visualiser la variation du déplacement le long du tricot, cette variation est représentée dans la figure 3.15, nous pouvons faire de même pour toutes les grandeurs souhaitées.

2.2 Étude sur la résine seule

Pour ce qui est de la résine, nous commençons par définir la géométrie de l'éprouvette dans la rubrique PART, la forme de cette éprouvette est parallélépipédique de la même taille que les éprouvettes expérimentales soit : $25 \times 5,5 \times 200 \text{ mm}^3$.

Par la suite, nous utilisons la rubrique PROPERTY en y introduisant directement les data obtenus lors des essais de traction dans la fenêtre "Uniaxial data" des propriétés *hyperelastique*. Pour définir quel modèle densité d'énergie de déformation choisir, on lance un calcul comparatif entre nos données et ceux disponibles sur Abaqus, ceci est possible grâce à la fonction **Evaluate**

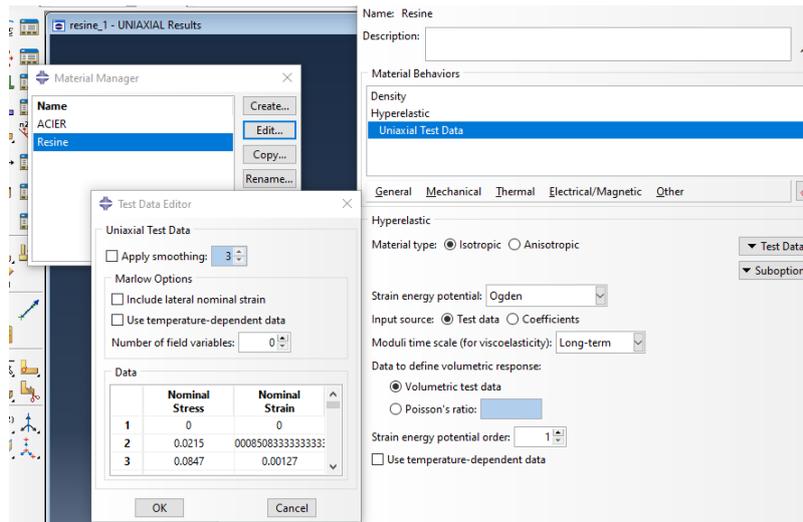


FIGURE 3.17 – Propriétés de la résine sur Abaqus

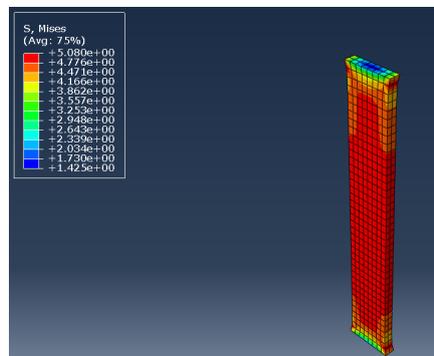


FIGURE 3.18 – Allure de la déformation de l'éprouvette de résine seule

2.3 Étude du composite dans la direction colonne

On commence par importer le tricot avec les dimensions normalisés selon la norme des matériaux composites **ASTM D3039** soit : $25 \times 200 \text{ mm}^2$.

Par la suite on crée notre matrice dans la rubrique PART avec des dimensions légèrement supérieures à celles du tricot pour avoir une immersion totale, il suffit de dessiner un rectangle et de faire une extrusion de la taille voulue.

La figure 3.19 montre le tricot obtenu depuis KSP.

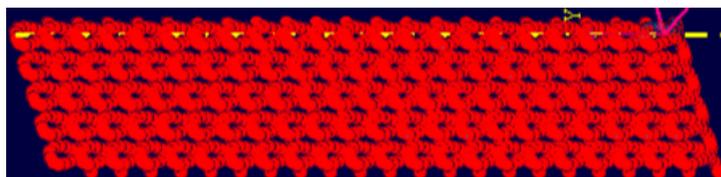


FIGURE 3.19 – Tricot 5 mailles dans la direction colonne depuis KSP

La figure 3.20 montre la matrice obtenue.

Nous passons à la rubrique Property dans laquelle on introduit les propriétés de la résine comme cela a été fait dans l'étude de la résine seule. Après cela, on passe à la rubrique

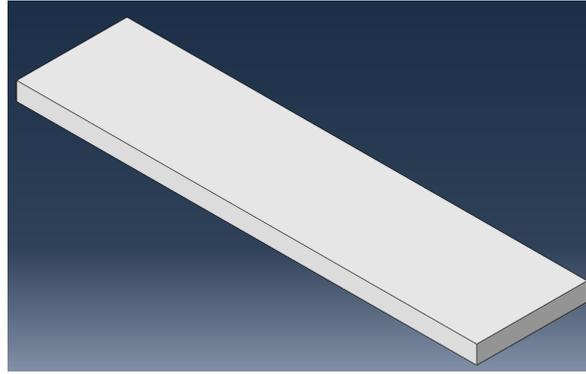


FIGURE 3.20 – Création de la matrice sur Abaqus

ASSEMBLY dans laquelle se fera l'assemblage du tricot et de la résine *géométriquement*, il est question de faire une translation du tricot avec un vecteur lui permettant d'être totalement immergé dans la matrice.

La figure 3.21 présente cet assemblage.

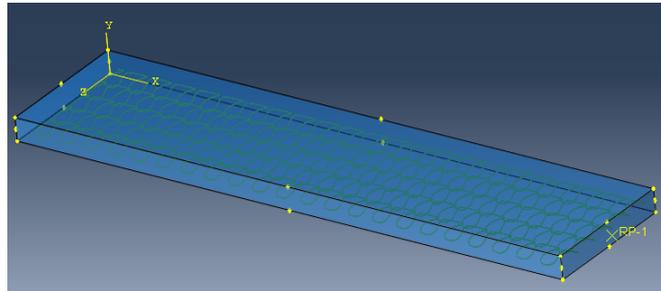


FIGURE 3.21 – Assemblage du tricot et de la résine

Définition des interactions

Pour cette étude, on aura besoin de trois interactions : La première est le couplage entre R_p et une des surfaces latérales ($25 \times 6,4 \text{ mm}^2$) comme cela a été expliqué précédemment.

La figure 3.22 montre ce couplage ainsi que ses paramètres.

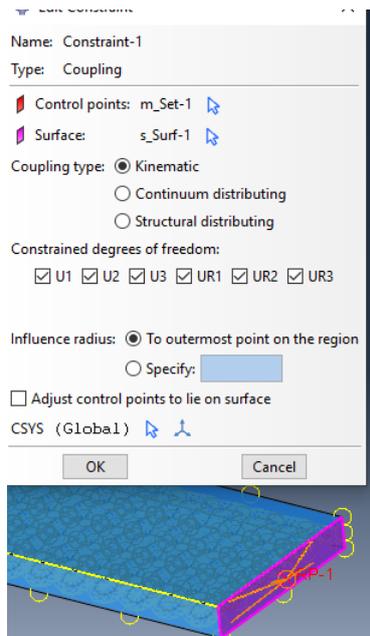


FIGURE 3.22 – Paramètres du couplage pour l'essai Résine + Tricot

La deuxième interaction est la création du contact de la même manière que pour le tricot seul. La troisième interaction est très importante pour ce calcul elle représente l'immersion du tricot dans la résine, en effet dans la rubrique ASSEMBLY cette immersion est géométrique de manière à le centrer dans la résine, cependant il est impératif de modéliser l'immersion **physique** entre le renfort et la matrice, cette immersion a été vérifiée expérimentalement en introduisant le tricot entre les deux couches de résine, pour ce qui est du numérique, on utilise la fonction *Embedded Region* qui assurera cette propriété et permettra de combiner les éléments des deux entités lors du maillage, il est donc nécessaire de choisir des éléments de maillage avec des tailles rapprochées afin d'avoir une compatibilité de taille et éviter les erreurs de distorsion tout en optimisant le temps de calcul.

La figure 3.23 représente la matrice et le renfort après avoir créé l'immersion.

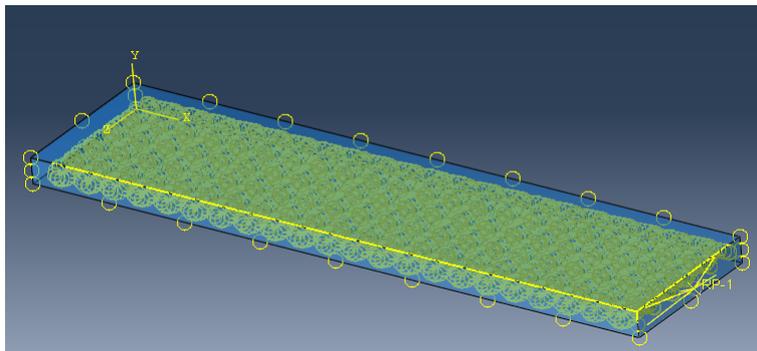


FIGURE 3.23 – Création de l'immersion : Fonction Embedded Region

Les paramètres de cette fonction sont représentés dans la figure 3.24.

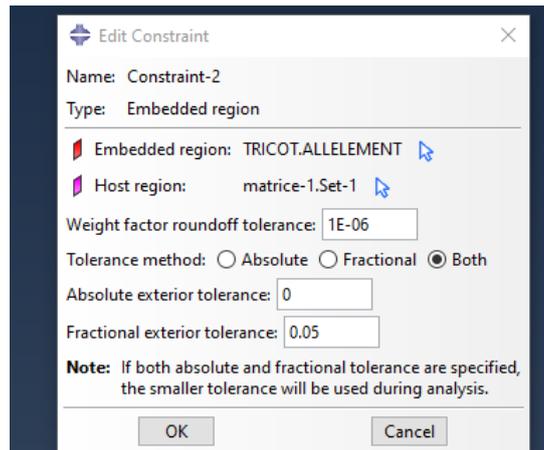


FIGURE 3.24 – Création de l’immersion : Fonction Embedded Region

La suite des étapes est semblable à celles du tricot seul ou de la résine seule, il s’agit d’imposer des conditions au limites : un encastrement et un déplacement sur les surfaces latérales. La rubrique suivante est la définition du maillage : MESH, afin d’optimiser le temps de calcul, on fera cette étude avec un maillage moyen de sorte a avoir un élément par largeur, par la suite et après avoir fixée les bons paramètres en terme de déplacement, on pourra raffiner ce maillage pour de meilleurs résultats, on choisi un élément hexaédrique.

La figure 3.25 montre le maillage de la matrice.

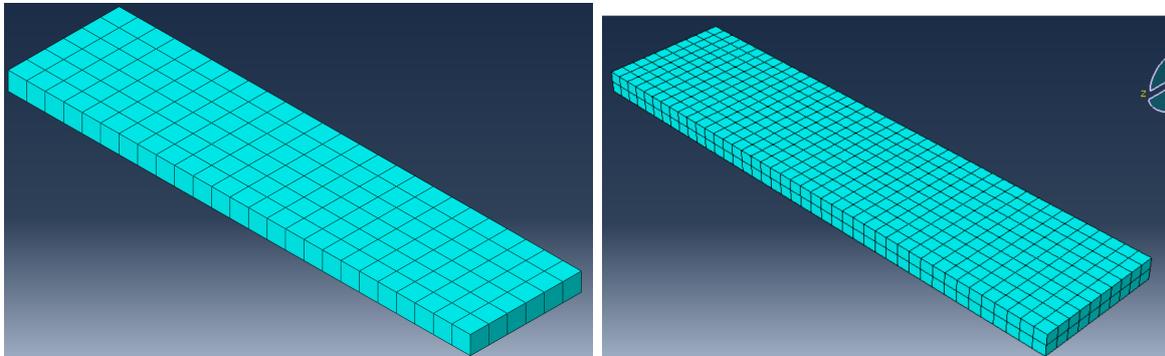


FIGURE 3.25 – Maillage initial et raffiné de la matrice

Les informations concernant l’élément type sont présentées dans la figure 3.26.

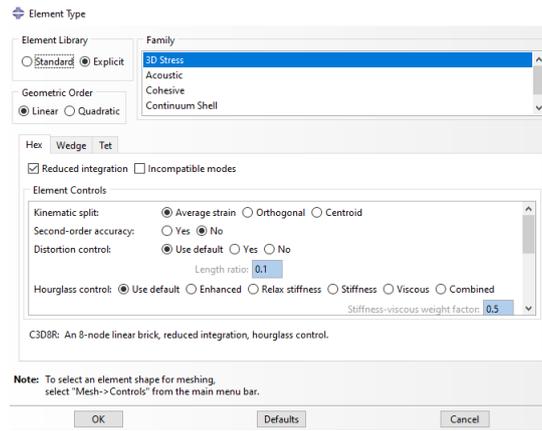


FIGURE 3.26 – Informations sur l'élément type utilisé

Le temps de calcul cette fois ci augmente par rapport au calcul de la résine seule en raison de la complexité de la simulation et la présence de nombreuses interactions mais reste inférieur à celui de la simulation des tricots secs, il est d'approximativement **2 heures** (taille de l'élément de maillage=3) pour le maillage initial et près de **9 heures** (taille de l'élément de maillage=1) pour le maillage raffiné.

La figure 3.27 montre la déformation après calcul pour le matériau composite.

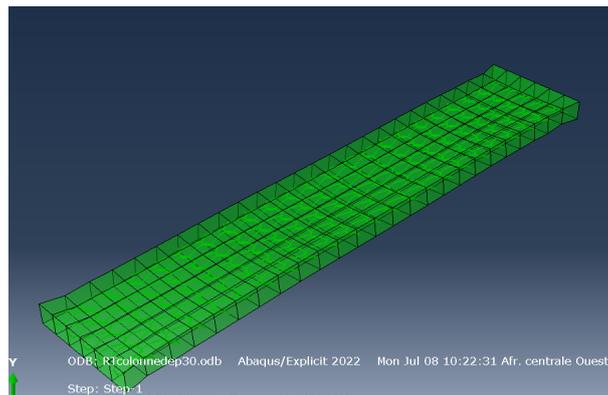


FIGURE 3.27 – Allure de la déformation pour le matériau composite : tricot+ résine

2.4 Étude du composite dans la direction rangée

Nous voulons à présent simuler le comportement du tricot dans la direction rangée comme cela a été fait dans l'étude expérimental, pour cela nous allons créer un nouveau tricot sur KSP dans la direction rangée, ce tricot est présentée dans la figure 3.28.

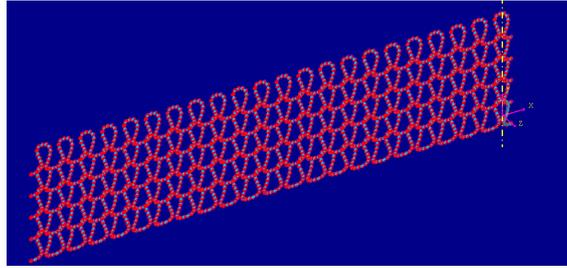


FIGURE 3.28 – Tricot dans la direction rangée généré par KSP

Nous procédons exactement de la même manière que pour la direction colonne. La figure 3.29 montre la déformée de la structure.

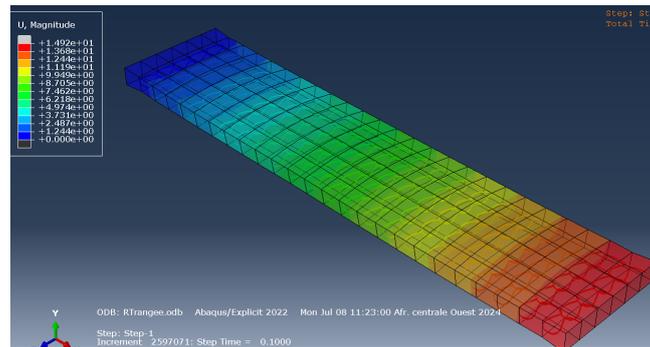


FIGURE 3.29 – Déformée du composite Tricot + Résine dans la direction rangée

3 Résultats et discussions

Dans cette section seront présentés les résultats des différentes simulations. Une comparaison sera faite par la suite entre certaines valeurs numériques et expérimentales afin d'évaluer ces simulations.

3.1 Résultat pour la simulation du tricot avec une taille de 5 mailles

Après avoir obtenu les résultats du calcul, on combine les deux courbes : Force en fonction du temps et Déplacement en fonction du temps en utilisant la fonction *combine*. On exporte par la suite les data depuis Abaqus vers EXCEL afin de mieux visualiser les courbes, le graphe force déplacement est représenté dans la figure 3.30

On voit à partir de la figure 3.30 que la force maximale qu'atteint ce tricot pour les conditions imposées (un déplacement de 130 mm) est de 192,57 N.

On remarque que la mouvement du tricot est très instable et contient de nombreuses vibrations, ceci peut s'expliquer par le fait que le schéma choisi soit *Dynamique* ce qui a pour conséquence la présence de l'effet d'inertie du tricot.

3.2 Résultat pour la simulation du tricot seul de taille normalisée

De la même manière expliquée précédemment, on obtient le graphe : Force- Déplacement pour un tricot de taille normalisée selon la norme ISO 13934 cette taille est équivalente à nombre

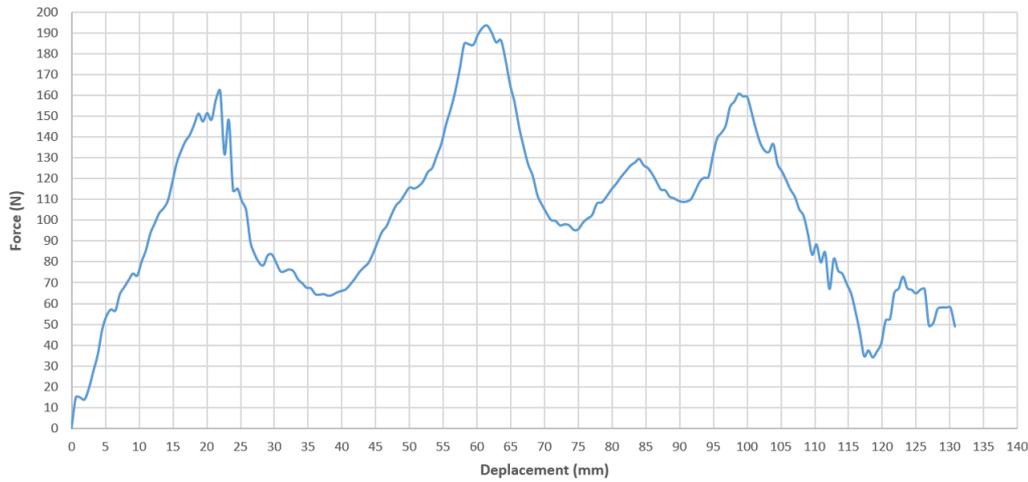


FIGURE 3.30 – Courbe Force-Déplacement pour tricot 5 mailles

de mailles égal à 10 mailles (55 mm).

Le graphe que nous venons de citer est représenté dans la figure 3.31.

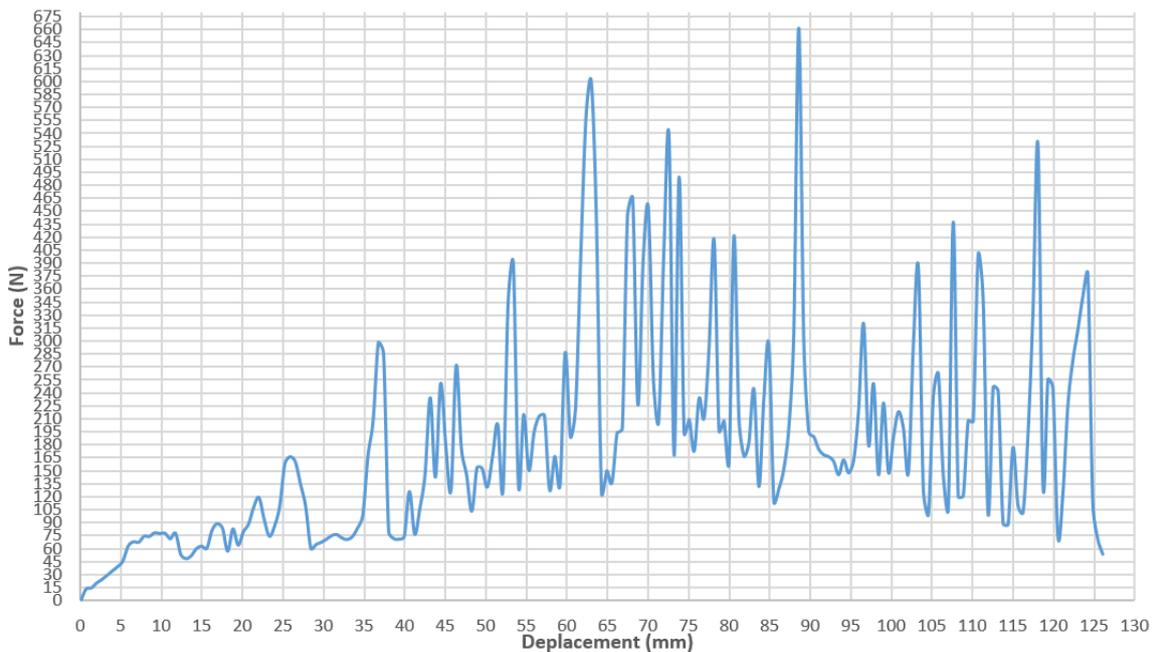


FIGURE 3.31 – Courbe Force-Déplacement tricot 10 mailles

Nous remarquons la présence des mêmes fluctuations pour cette simulation. La valeur de la force maximale atteinte est de 662,25 N. le tricot a un comportement semblable à celui observe dans les essais expérimentaux : Courbure symétriques, défilement progressif, grandes variations de la force maximale le long du déplacement et forte élongation.

3.3 Résultats pour la simulation de la résine seule

Les résultats pour la résine seule sont obtenu de la même façon, nous commençons par générer les courbes : Force et déplacement en fonction du temps, puis on le combine et exportons les datas vers Excel, le graphe ainsi obtenu est présenté dans la figure 3.32.

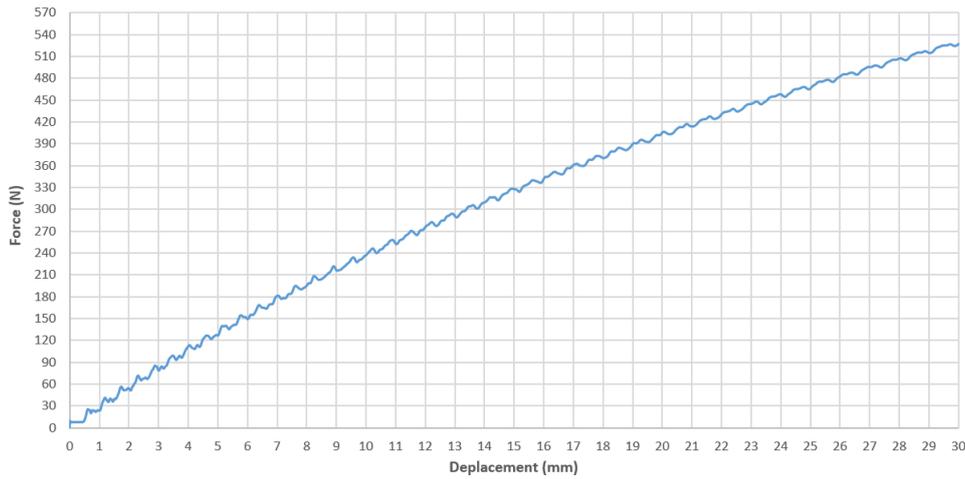


FIGURE 3.32 – Courbe : Force- Déplacement de la simulation de la résine seule.

3.4 Résultat pour la simulation du composite dans la direction colonne

La courbe obtenu suite a la combinaison des courbes de la force et du déplacement en fonction du temps est représentée dans la figure 3.33.

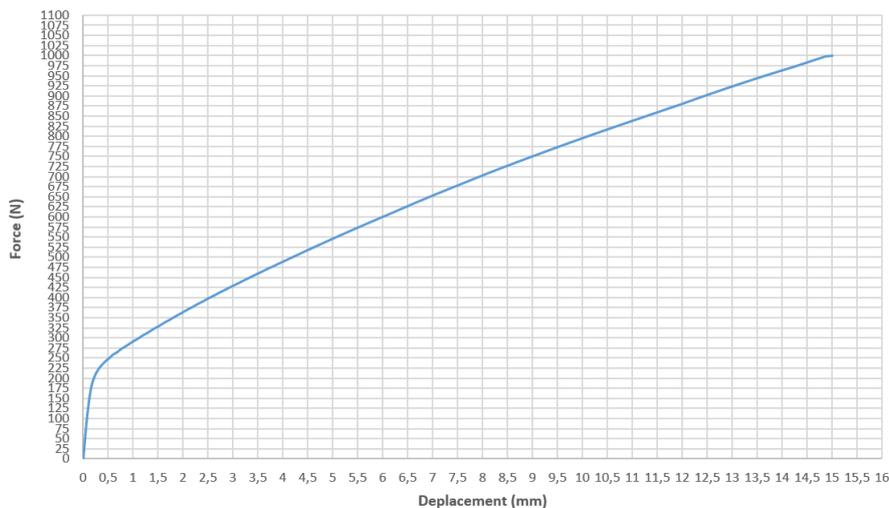


FIGURE 3.33 – Courbe : Force-Déplacement du composite dans la direction Colonne

Nous pouvons voir que l’allure de la courbe est semblable à celle de la résine seule : une augmentation constante qu’on peut diviser en deux domaines avec différentes pentes, cependant, on note clairement une grande différence de valeurs de force obtenues pour un même déplacement imposé, ceci est du au renforcement qu’offre la présence du tricot dans la résine. Ce renforcement peut être calculé de la manière ci après.

On remarque que le déplacement imposé diffère pour la résine seule (30 mm) et la résine renforcée (15 mm), c’est pour cela que nous allons tronquer la partie qui excède afin de pouvoir faire une comparaison dans le mêmes conditions.

$$\text{Taux de renforcement} = \frac{F_{RT \text{ colonne}} - F_{resine \text{ seule}}}{F_{resine \text{ seule}}} \quad (3.1)$$

La valeur de la force maximale obtenue dans la simulation de la résine seule pour un déplacement de 15 mm est de 327 N.

A.N :

$$Taux\ de\ renforcement = \frac{1000 - 327}{327}$$

Nous trouvons un renforcement dans la direction colonne d'une valeur de :

$$Taux\ de\ renforcement = 205,81\%$$

3.5 Résultat pour la simulation du composite dans la direction rangée

Nous allons par la suite refaire la même procédure pour le matériau composite : résine + tricot dans la direction rangée, le graphe obtenu est représenté dans la figure 3.34.

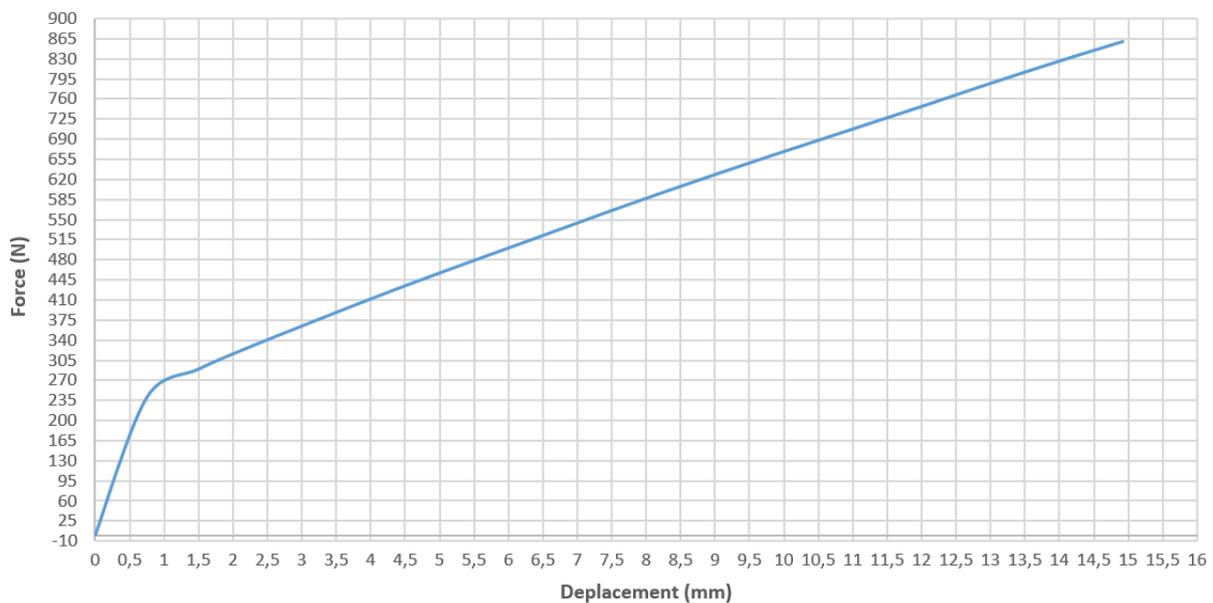


FIGURE 3.34 – Courbe Force Déplacement pour Composite : Résine + Tricot direction Rangée

La courbe obtenue a une allure similaire à celle obtenue pour la résine seule avec des valeurs supérieures ce qui se traduit par un renforcement qu'on peut calculer facilement par la formule suivante :

$$Taux\ de\ renforcement = \frac{F_{RT\ rangée} - F_{résine\ seule}}{F_{résine\ seule}} \quad (3.2)$$

On fera de même pour ce qui est de la valeur de la force maximale de la résine seule :

A.N :

$$Taux\ de\ renforcement = \frac{859 - 327}{327}$$

Nous trouvons un renforcement dans la direction rangée d'une valeur de :

$$Taux\ de\ renforcement = 162,69\%$$

3.6 Comparaison des résultats obtenus pour la résine seule et avec renfort

Afin de comparer les résultats de la simulation de la résine seule et renforcées, nous allons d'abord dessiner les trois courbes : Force-Déplacement dans le même graphe comme représentée dans la figure 3.35.

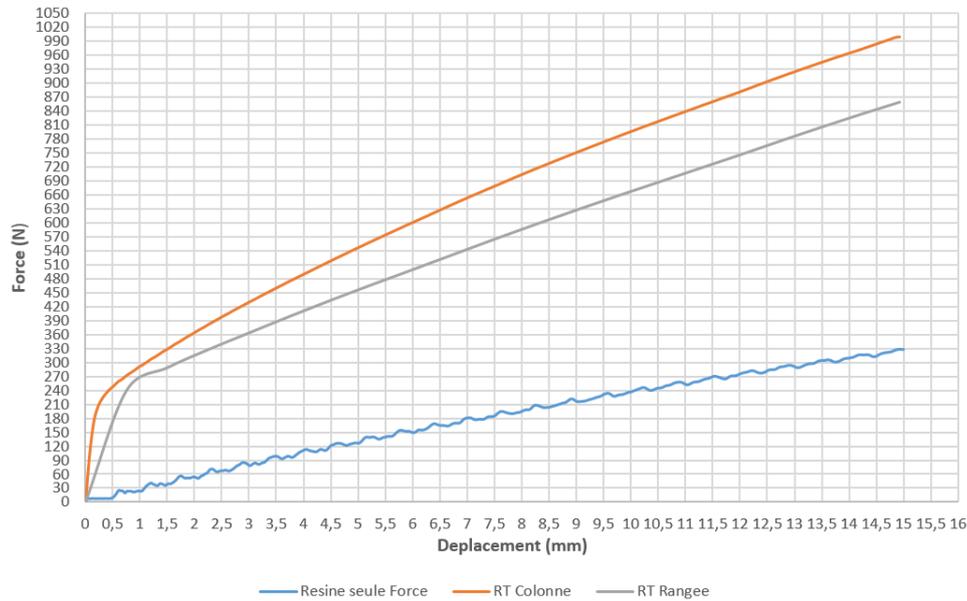


FIGURE 3.35 – Courbe comparative Force Déplacement pour la résine seule et renforcée.

4 Comparaison des résultats numériques aux résultats expérimentaux

Dans cette section, nous allons comparer les résultats expérimentaux aux résultats numériques obtenus depuis les simulations équivalentes, la comparaison se fait par rapport à l'expérimental que nous considérons comme référence, on aura donc :

$$Valeur_{comparative} = \frac{|Valeur_{Experimentale} - Valeur_{Numerique}|}{Valeur_{Experimentale}} \quad (3.3)$$

Nous prendrons la valeur de l'effort maximal en Newton et le résultat de la comparaison en pourcentage.

Le tableau 3.1 résume les valeurs comparées.

TABLE 3.1 – Tableau résumant les valeurs expérimentales et numériques à titre comparatif

Approche	Expérimentale	Numérique	Comparaison (%)
Tricot 5 mailles	229 N	193,6 N	+15,4%
Tricot 10 mailles	836 N	662,25 N	+20,78%
Résine seule	600 N	525,82 N	+12,36%
Composite : R-T Colonne	834 N	1000 N	-19,78 %
Composite : R-T Rangée	756 N	859,61 N	-13,62 %

5 Conclusion

Après avoir fait les différentes simulations présentées dans ce chapitre, nous pouvons conclure que les outils numériques choisis représentent un moyen fiable et efficace pour simuler les structures tricotées. Les simulations du composite : tricot + résine donnent des résultats semblables aux résultats expérimentaux. Cette conclusion est vérifiée pour les simulations de la résine seule et des tricots seuls avec une erreur inférieure à 21%.

Conclusion générale et Perspectives

Ce projet de fin d'étude intitulé : Élaboration, caractérisation et simulation de structures renforcées par des renforts sous forme de tricot a eu pour but d'étudier les structures tricotées à l'état sec et en renfort selon deux approches : une première approche expérimentale au moyen de tests de traction et une seconde approche numérique en utilisant le logiciel Abaqus pour simuler le comportement de ces structures générées par KSP.

Nous avons commencé par aborder des notions théoriques sur les différents types de renforts, le comportement de la résine, le comportement du tricot sec et en renfort ainsi que les différentes modélisations pour ces structures. Nous avons également présenté un état de l'art des principaux travaux ayant étudiés les structures tricotées ainsi que leurs résultats.

Afin d'aboutir à notre objectif, nous avons fait une étude expérimentale selon les étapes suivantes : l'élaboration des moules et éprouvettes d'essais, la réalisation des dispositif de traction pour les éprouvettes plates et en gaine, le déroulement des essais de traction et les résultats obtenus.

Pour les essais de traction sur tricots seuls, nous avons constater que la taille idéale pour des essais de traction est de 55 mm de larguer qui correspond à la taille fixée par la norme ISO 13934, cette taille nous permet d'avoir pour la direction colonne une élongation de 110% avec un effort maximal de 836N.

L'essai de traction sur éprouvette plate dans la direction rangée n'a pas pu se faire en raison de la course insuffisante d'où le fait d'avoir eu recours au éprouvettes cylindriques.

Les tricots se comporte mieux sous forme cylindriques (en gaine), après avoir fait une étude paramétrique selon la taille de la gaine. Nous avons remarqué une stabilisation de valeurs cette fois aussi pour une largeur de 55 mm, ce qui confirme le résultat précédent. Nous remarquons une grande élongation dans la direction rangée qui s'explique par le défilement des mailles du tricots dans cette directions.

Pour les essais sur composite à renfort tricotées, nous notons un renforcement dans les deux directions : colonne et rangée. Pour une taille de 25 mm de larguer, nous avons un renforcement de 39% dans la direction colonne et de 26% dans la direction rangée. Pour la taille de 55 mm de largeur nous avons eu un renforcement de 43% dans la direction colonne et de 24% dans la direction rangée. Nous pouvons conclure que le renforcement est meilleur dans la direction colonne, qu'il croit pour une augmentation de largeur et donc de nombre de mailles et qu'il est pratiquement constant dans la direction rangée. Ce résultat confirme ce qui a été présenté dans le premier chapitre où a été exposé le comportement du tricot en renfort.

D'autre part, nous avons réalisé une étude numérique pour simuler le comportement du tricot sec et en renfort sur Abaqus en générant le tricot depuis KSP. Nous avons pour cela utilisé plusieurs fonctions pour modéliser au mieux notre simulation et se rapprocher de l'essai expérimental, nous pouvons citer la fonction *Embedded Region* qui assure l'immersion physique

du renfort dans la matrice, ainsi que le contact afin de modéliser la résistance des mèches entrelacées.

Les résultats obtenus sont le fruit de plusieurs adaptations de paramètres et nous pouvons conclure qu'ils sont acceptables puisque la comparaison avec l'expérimental nous donne une erreur qui n'excède pas les 21%.

Pour finir, nous pouvons conclure que les résultats obtenus suite à cette étude sont satisfaisants. Ce projet comporte plusieurs aspects de la mécanique et a permis d'accroître des compétences en : conception, simulation sur Abaqus, fraisage, moulage,... . Pour ce qui est de la suite de ce travail, nous espérons pouvoir modéliser le comportement du tricot seul à l'état plan afin d'obtenir des résultats avec une plus haute précision, de pouvoir également modéliser le tricot sous forme de gaine très utilisé dans l'industrie automobile. Nous souhaitons également tester expérimentalement ce tricot dans des matrices élastomères sous pression pour mieux se rapprocher de certaines applications industrielles.

Bibliographie

- [1] Martin Lefebvre. *Sur une approche multi-échelle de l'influence de la vitesse sur le comportement mécanique d'un composite biosourcé Lin/Elium*. Theses, Université de Strasbourg, December 2022.
- [2] Youssef Cherradi, Hocine Kebir, Aicha Boukhriss, Habiba Ennamiri, and Mustafa Benyoucef. Mechanical behaviour of 3d monofilament knitted fabrics : Modeling, simulation and validation. *Journal of Industrial Textiles*, 51 :152808372210915, 06 2022.
- [3] Youssef Cherradi, Hocine Kebir, Aicha Boukhriss, Habiba Ennamiri, and Mustafa Benyoucef. Mechanical behaviour of 3d monofilament knitted fabrics : Modeling, simulation and validation. *Journal of Industrial Textiles*, 51 :152808372210915, 04 2022.
- [4] Laura Balea, Gilles Dusserre, and Gérard Bernhart. Composites à renfort tricoté : Relations entre contexture, nature du renfort et propriétés mécaniques du composite infusé. In AMAC, editor, *17èmes Journées Nationales sur les Composites (JNC17)*, page 139, Poitiers-Futuroscope, France, June 2011.
- [5] Laura Balea. Comportement des matériaux composites à renforts tricotés élaborés par injection de résine. In AMAC, editor, *17èmes Journées Nationales sur les Composites (JNC17)*, page 139, Université de Toulouse, France, April 2011.
- [6] Mario de Araujo, Raul Fangueiro, and Hong Hu. Modelling and simulation of the mechanical behaviour of weft-knitted fabrics for technical applications : Part i : General considerations and experimental analyses. *AUTEX Research Journal*, 3 :111–123, 09 2003.
- [7] Mario de Araujo, Raul Fangueiro, and Hong Hu. Modelling and simulation of the mechanical behaviour of weft-knitted fabrics for technical applications. part iv : 3d fea model with a mesh of tetrahedric elements. *Autex Research Journal*, 4 :72–80, 06 2004.
- [8] Minh Quang Pham, Oliver Döbrich, Wolfgang Trümper, Thomas Gereke, and Chokri Cherif. Numerical modelling of the mechanical behaviour of biaxial weft-knitted fabrics on different length scales. *Materials*, 12(22) :3693, 2019.
- [9] Lei-Ming Zhu, Philipp Schuster, and Uwe Klinge. Mesh implants : An overview of crucial mesh parameters. *World journal of gastrointestinal surgery*, 7 :226–36, 11 2015.
- [10] Djihad Rial, Amine Tiar, Hocine Kebir, Jean-Marc Roelandt, and Eric Wintrebert. Metallic braided structures : The mechanical modeling. *Advanced Engineering Materials*, 17, 06 2015.
- [11] Mozhddeh Ghahremani and Ali Asghar Jeddi. Noise absorption modeling of rib knitted fabrics. *Textile Research Journal - TEXT RES J*, 80 :1392–1404, 08 2010.
- [12] Olena Kyzymchuk, Yordan Kyosev, Liudmyla Melnyk, and Nataliya Sadretdinova. The investigation of the geometry changes of body legs with compression stocking in static position. *Communications in Development and Assembling of Textile Products*, 4 :213–221, 07 2023.

-
- [13] L. Bouten. *Identification des propriétés mécaniques des tissus constitutifs du mollet pour l'étude mécanique de la contention*. Theses, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, March 2009. 181 pages.
- [14] Laura Balea, Gilles Dusserre, Gérard Bernhart, and Nicolas Dumont. Comportement mécanique de textiles tricotés techniques pour des applications composites = Mechanical behaviour of technical knitted fabrics for composite applications. In Philippe OLIVIER et Jacques LAMON, editor, *JNC 16*, page 10 p., Toulouse, France, June 2009. AMAC.
- [15] Alenka Pavko-Čuden, Ales Hladnik, and Franci Sluga. Loop length of plain single weft knitted structure with elastane. *Journal of engineered fibers and fabrics*, 8 :110–120, 06 2013.
- [16] C.D Rudd, M.J Owen, and V Middleton. Mechanical properties of weft knit glass fibre/polyester laminates. *Composites Science and Technology*, 39(3) :261–277, 1990.
- [17] P Tan, L Tong, and G.P Steven. Modelling for predicting the mechanical properties of textile composites—a review. *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing*, 28(11) :903–922, 1997.
- [18] M-A. Bueno. 4 - structure and mechanics of knitted fabrics. In P. Schwartz, editor, *Structure and Mechanics of Textile Fibre Assemblies*, Woodhead Publishing Series in Textiles, pages 84–115. Woodhead Publishing, 2008.
- [19] M. Konopasek. A theoretical analysis of the tensile properties of plain-knitted fabrics. *The Journal of The Textile Institute*, 66 :161–165, 11 2008.
- [20] Benjamin Hagege. *Simulation du comportement des milieux fibreux en grandes transformations : Application aux renforts tricotes*. Theses, Arts et Métiers ParisTech, October 2004.
- [21] Hocine Kebir, Wajdi Zouari, Mustapha Assarar, and Ayad Rezak. A specific eight-node hexahedral finite element for the analysis of 3d fibre-reinforced composites. *Composite Structures*, 303 :116269, 10 2022.
- [22] Omar Khondker, I. Herszberg, and K-H Leong. An investigation of the structure-property relationship of knitted composites. *Journal of Composite Materials - J COMPOS MATER*, 35 :489–508, 03 2001.
- [23] Aurélien Dolay. *Développement et caractérisations de fibres piezoélectriques à âme métallique pour applications aéronautiques*. Theses, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis, December 2013.
- [24] J Leprince, G Leloup, J Vreven, P Weiss, and A Raskin. Polymères et résines composites. *Encyclopédie Médico-Chirurgicale. Odontologie*, 2010.
- [25] Bruno Passilly, Olga Smerdova, Pierre Zanesse, Marina Pecora, Jean-Michel Roche, and Marco Gigliotti. Comportement de la résine epoxy en nanoindentation à haute température. In *Journées Nationales sur les Composites 2017*, 77455 Champs-sur-Marne, France, June 2017. École des Ponts ParisTech (ENPC).
- [26] Vincent Joudon. *Caractérisation expérimentale de l'initiation et de la propagation de fissure dans une résine epoxy sous chargement dynamique*. Theses, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis, December 2014.
- [27] Immanuel David Madukauwa-David and Monssef Drissi-Habti. Numerical simulation of the mechanical behavior of a large smart composite platform under static loads. *Composites Part B : Engineering*, 88 :19–25, 2016.

- [28] I. Doghri and A. Ouair. Homogenization of two-phase elasto-plastic composite materials and structures : Study of tangent operators, cyclic plasticity and numerical algorithms. *International Journal of Solids and Structures*, 40(7) :1681–1712, 2003.
- [29] Fethi Abbassi, Abderraouf Gherissi, Ali Zghal, Sébastien Mistou, and Joël Alexis. Micro-scale modeling of carbon-fiber reinforced thermoplastic materials. *Applied Mechanics and Materials*, 146 :1–11, 2012.
- [30] Deghboudj Samir and Université Tébessi-Tébessa. *Logiciel de Simulation en Génie Mécanique Abaqus*. 11 2021.

Webographie

https://fr.wikipedia.org/wiki/Essai-de-traction	03/2024
https://www.astm.org/	03/2024
https://fr.wikipedia.org/wiki/Abaqus	03/2024
https://www.sciencedirect.com/science/article/	03/2024
https://www.iso.org/fr/home.html	03/2024
https://www.techniques-ingenieur.fr/	04/2024
https://www.azaros.eu/fr/produit/fibres-metalliques/	04/2024
https://www.researchgate.net/	04-07/2024
https://hal.science/	04-07/2024
https://fr.wikipedia.org/wiki/	05/2024
https://fr.wikipedia.org/wiki/Hyperélasticité	06/2024
https://fr.wikipedia.org/wiki/	06/2024
https://www.maxicours.com/se/cours/tolerance-d-ajustement-2/	07/2024
https://jackadit.com/index.php?p=metro3	07/2024

Annexes



FICHE TECHNIQUE

Sikafloor®-264

REVÊTEMENT DE SOL ET COUCHE DE SCELLEMENT ÉPOXYDIQUE

DESCRIPTION

Sikafloor®-264 est une résine époxydique à 2 composants, colorée.

« Extrait sec à 100% selon la méthode d'essai de la Deutsche Bauchemie e.V. (organisation allemande pour les produits chimiques de la construction) ».

DOMAINES D'APPLICATION

Sikafloor®-264 est destiné uniquement à des utilisateurs professionnels expérimentés.

Sikafloor®-264 est utilisé comme :

- Revêtement de sol pour béton ou chapes cimentées soumises à des sollicitations normales à moyennes, p.ex. entrepôts de stockage et d'activités logistiques, salles de production, ateliers, garages et rampes de chargement.
- Couche de scellement pour systèmes saupoudrés dans les parkings à plusieurs étages et souterrains, les hangars de maintenance et les locaux humides, par ex. dans l'industrie des boissons et l'industrie alimentaire.

CARACTÉRISTIQUES / AVANTAGES

- Bonne résistance chimique et mécanique
- Mise en œuvre simple
- Étanche aux liquides
- Surface brillante
- Possibilité d'exécuter une surface antidérapante

INFORMATIONS ENVIRONNEMENTALES

Satisfait aux exigences de LEED v2009 IEQc 4.2 : Matériaux à faibles émissions COV : peintures et revêtements

AGRÈMENTS / NORMES

- Certificat d'émissions de particules Sikafloor®-264 : CSM Déclaration de qualification – ISO 14644-1, classe 4 - n° de rapport SI 0904-480 et GMP classe A, n° de rapport SI 1008-533.
- Certificat d'émissions d'éléments volatils Sikafloor®-264 : CSM Déclaration de qualification – ISO 14644-8, classe 6,5 - n° de rapport SI 0904-480.
- Bonne résistance biologique selon la norme ISO 846, n° de rapport CSM 1008-533
- Classe réaction au feu conformément à la norme EN 13501-1, n° de rapport 2013-B-2119/01, MPA Dresde, Allemagne, juin 2013.
- Revêtement de sol en résine synthétique selon la norme EN 13813:2002, Déclaration de Performance 02 08 01 02 05 00000003 1008, et doté d'un marquage CE.
- Revêtement pour la protection du béton selon la norme EN 1504-2:2004, Déclaration de Performance 02 08 01 02 05 00000003 1008, certifié par l'organisme de contrôle de la production en usine n° 0921, certificat de conformité 2017, et doté d'un marquage CE.
- Certificat de conformité ISEGA 40974 U15.



FICHE TECHNIQUE
Sikafloor®-264
Octobre 2018, Version 08.01
0208110200200000055

INFORMATION SUR LE PRODUIT

Base chimique	Epoxy	
Conditionnement	Composant A	Boîtes de 23,7 kg
	Composant B	Boîtes de 6,3 kg
	Composant A+B	Ensembles 30 kg
	Composant A	Fûts de 220 kg
	Composant B	Fûts de 59 kg et 177 kg
	Composant A+B	1 fût du composant A (220 kg) + 1 fût du composant B (59 kg) = 279 kg 3 fûts du composant A (660 kg) + 1 fût du composant B (177 kg) = 837 kg
Aspect / Couleur	Résine- composant A	Liquide coloré
	Durcisseur- composant B	Liquide transparent
Couleurs standards : RAL 7032 et RAL 7035. Autres couleurs sur demande.		
Sous l'influence de l'exposition directe au soleil, une légère décoloration ou modification de la couleur peut se produire ; celle-ci n'a aucune influence sur la fonctionnalité et les performances du revêtement.		
Durée de conservation	24 mois à partir de la date de production si les conditions de stockage sont respectées	
Conditions de stockage	Sikafloor®-264 doit être conservé à une température comprise entre +5 °C et +30 °C, dans les emballages d'origine fermés et intacts, au sec	
Densité	Composant A	~ 1,64 kg/l (DIN EN ISO 2811-1)
	Composant B	~ 1,00 kg/l
	Mélange A+B	~ 1,40 kg/l
	Toutes les valeurs mesurées à +23 °C.	
Extrait sec en poids	~ 100%	
Extrait sec en volume	~ 100%	

INFORMATIONS TECHNIQUES

Dureté Shore D	~ 76 (7 jours/+23°C)	(DIN 53 505)
Résistance à l'abrasion	~35 mg (CS 10/1000/1000) (7 jours/+23°C)	(DIN 53109)
Résistance à la compression	~ 53 N/mm ² (chargé 1:0,9 avec F34) (28 dagen/+23°C)	(EN 196-1)
Résistance à la flexion	~ 20 N/mm ² (chargé 1:0,9 avec F34) (28 jours/+23°C)	(EN 196-1)
Adhérence	>1,5 N/mm ² (rupture dans le béton)	(ISO 4624)
Résistance chimique	Résiste à de nombreux produits chimiques. Demander la liste détaillée des résistances.	
Résistance thermique	Exposition*	Chaleur sèche
	Permanente	+50°C
	Court terme (maximum 7 jours)	+80°C
	Court terme (maximum 12 heures)	+100°C
Chaleur humide à court terme (*) si l'exposition est occasionnelle (par ex. nettoyage à la vapeur, etc.) : maximum +80 °C		
* Pas d'exposition chimique et mécanique simultanée et uniquement en combinaison avec des systèmes saupoudrés Sikafloor® d'une épaisseur de couche de ~ 3 à 4 mm		

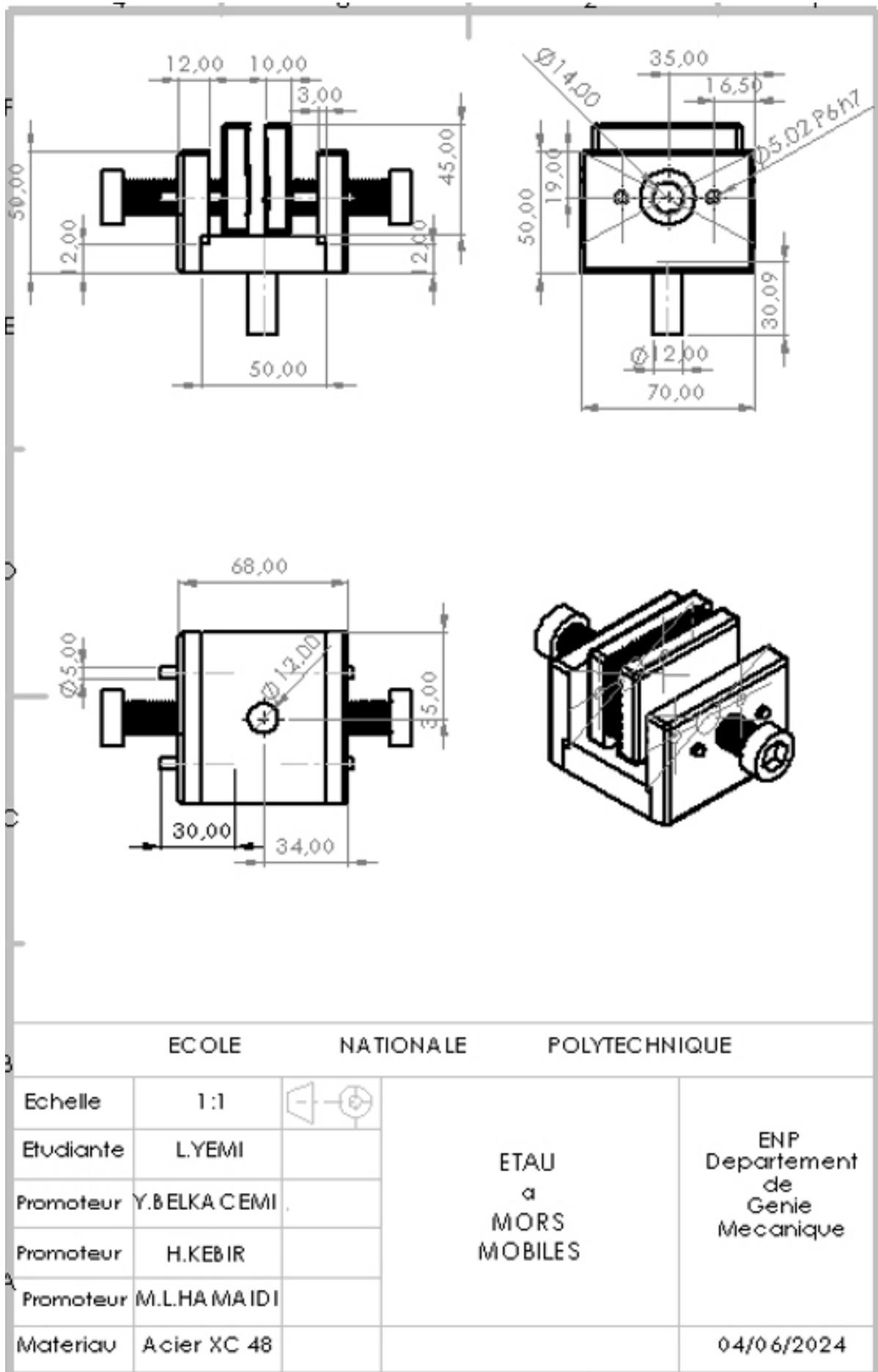
FICHE TECHNIQUE
Sikafloor®-264
Octobre 2018, Version 08.01
020811020020000055

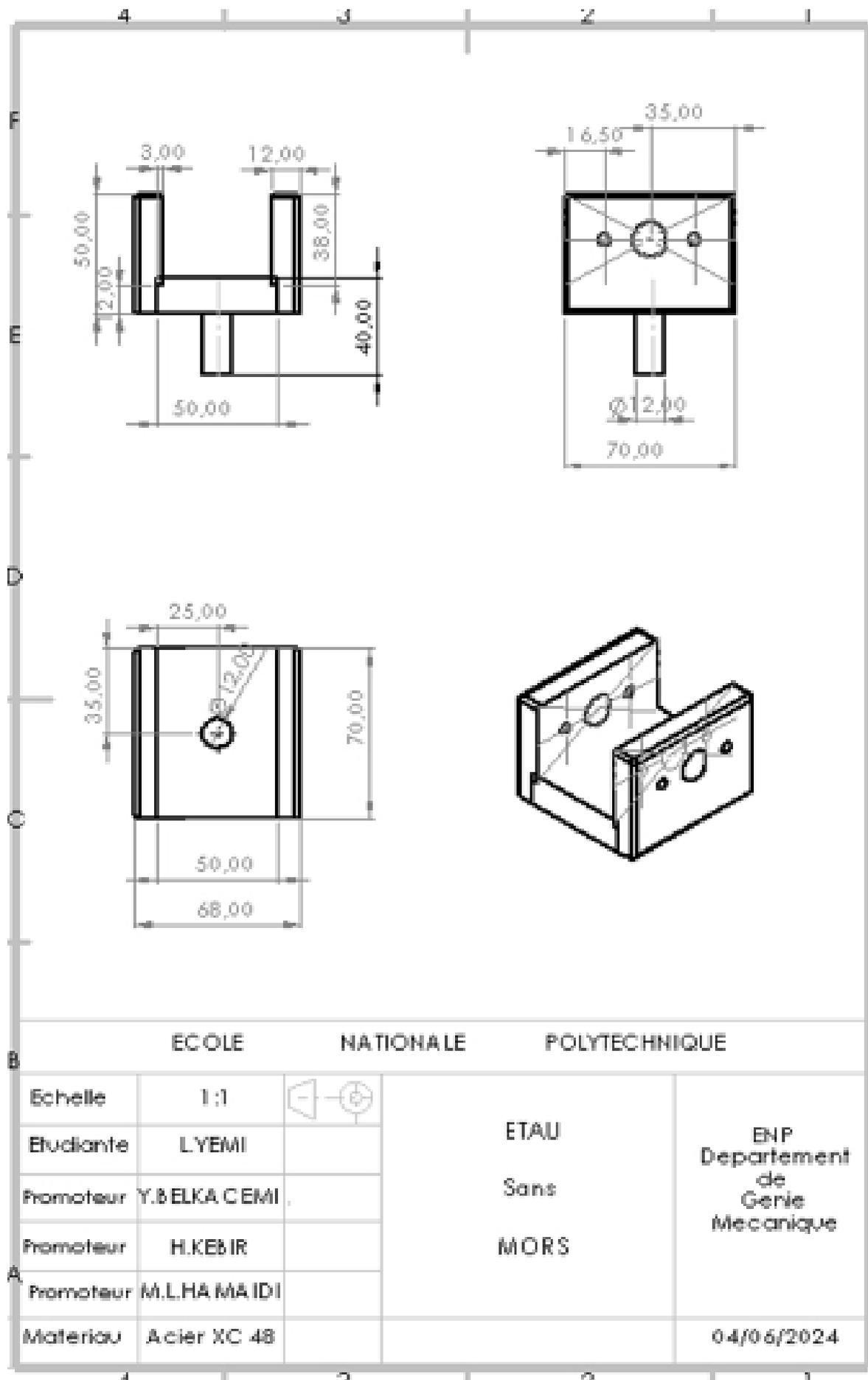
2 / 5

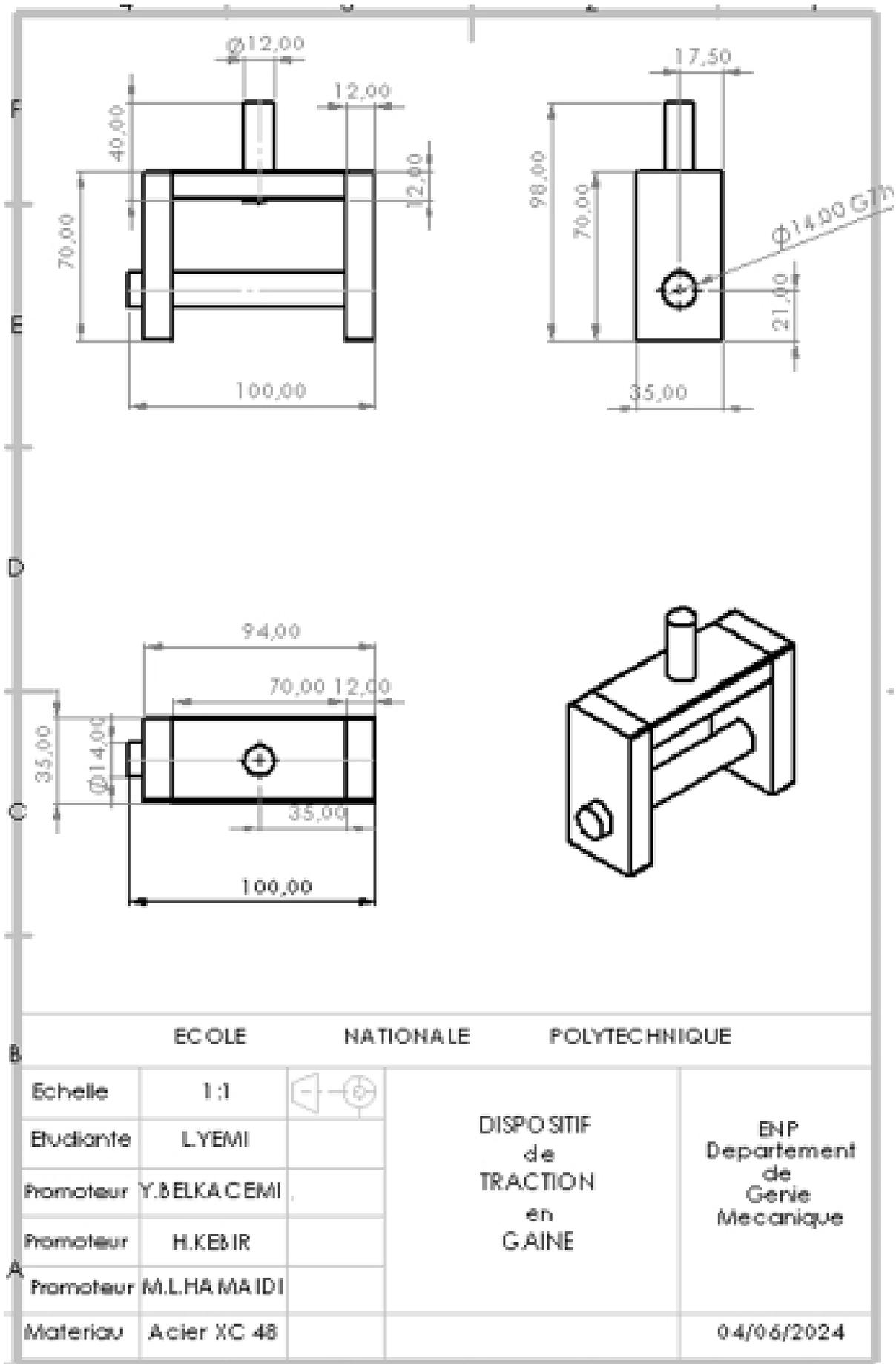
BUILDING TRUST



FIGURE 3.37 – Fiche technique résine sikafloor-264 page 2







ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Echelle	1:1		DISPOSITIF de TRACTION en GAINÉ	ENP Département de Genie Mécanique
Etudiante	LYEMI			
Promoteur	Y.BELKA CEMI			
Promoteur	H.KEBIR			
Promoteur	M.L.HA MAIDI			
Matériau	Acier XC 48			04/05/2024

