

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

UNIVERSITÉ DE MOULOU D MAMMERI TIZI-OUZOU

FACULTÉ DE GÉNIE DE LA CONSTRUCTION

DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE



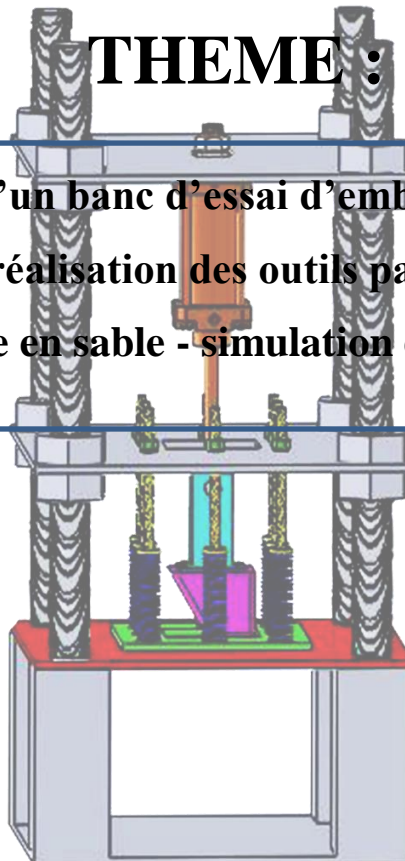
## MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE MASTER ACADÉMIQUE EN  
GÉNIE MÉCANIQUE

OPTION : CONSTRUCTION MÉCANIQUE

### THEME :

Conception d'un banc d'essai d'emboutissage de tissus  
composites, réalisation des outils par l'impression 3D  
et moulage en sable - simulation du préformage.



Promoteur :

M<sup>r</sup>: OULD OUALI . M

Co Promoteur :

M<sup>r</sup> : KHRIS . A

Réalisé par :

M<sup>lle</sup>: HADDAD Meriem

M<sup>lle</sup> : MEDJBOUR Sylia

PROMOTION 2019/2020

## REMERCIEMENT

*On tient à remercier tout d'abord, le bon dieu le tout puissant pour m' avoir donné la force de bien mener ce travail de recherche.*

*Nos remerciements s'adressent également à : notre promoteur **Mr OULD OUALI MOHAND** pour ces conseils, ses orientations et les enseignements nécessaires à la rédaction de ce mémoire. Ainsi que **Mr KHRIS AGHILES** pour son aide et son soutien pendant tout le long de notre travail.*

*Nos remerciements également les membres de jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant de lire et d'évaluer ce travail*

*Sans oublier nos enseignants et le personnel administratif du département de génie mécanique de l'université de **MOULOUD MAMMERI** de Tizi Ouzou*

*Ainsi toute personne qui nous ont aidés de près ou de loin à la réalisation de ce travail.*

## *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail*

*À mes chers parents RACHID et FAZIA  
leur amour inconditionnel et leurs sacrifices.*

*A mes chers frères HAKIM et SALIM*

*QUE J'aime,*

*À ma sœur adorée KARIMA et*

*Mon beau-frère MOKRANE*

*À ma belle-sœur adorée SADIA,*

*Au petit prince de la famille AKSIL*

*A mes chères amies (MERIEM,  
DYHIA, AZNAN, Md AREZKI, MASSINISSA,  
MOUKHTAR, OMAR, ZOUBIR, THILELI)*

*A la mémoire*

*de ma grande mère fatma paix a*

*son âme*

*Medjbour.s*



## **Sommaire**

# Sommaire

Listes des figures

Liste des tableaux

Sommaire

Introduction générale ..... 1

## *Chapitre I*

I.1	Généralité sur les matériaux composites .....	3
I.1.1	Introduction : .....	3
I.1.2	Définition des matériaux composites .....	3
I.1.3	Constituants des matériaux composites .....	3
I.1.4	Caractéristiques générales : .....	4
I.1.5	Classifications des composites .....	4
I.1.5.1	Selon la géométrie : .....	5
I.1.5.1.1	Composite à fibre : .....	5
I.1.5.1.2	Composites à particules : .....	5
I.1.5.1.3	Composite structuraux : .....	5
I.1.5.2	Selon la nature des constituants : .....	6
I.1.6	Matrice : .....	6
I.1.6.1	Les thermodurcissables : .....	6
I.1.6.2	Les thermoplastiques : .....	6
I.1.7	Les renforts textiles : .....	7
I.1.7.1	Les fibres de verre : .....	8
I.1.7.2	Fibre de carbone : .....	8
I.1.7.3	Fibre d'aramide (KEVLAR): .....	9
I.1.7.4	Fibre de bore : .....	9
I.1.7.5	Fibre de silicium : .....	9
I.1.8	Les charges et les additifs : .....	10
I.1.9	Conditionnement des renforts à base de fibres : .....	10
I.1.9.1	Unidirectionnelles : .....	10
I.1.9.2	Forme surfacique (bidimensionnel) : .....	10

I.1.9.2.1	Les mats :	10
I.1.9.2.2	Les tissus et rubans :	11
I.1.9.3	Fibres multidirectionnelles	13
I.1.10	Les procédés de mises en forme des matériaux composites :	14
I.1.10.1	Procédé d'Infusion sous vide :	14
I.1.10.2	Le procédé RTM :	15
I.1.10.3	Domaines d'applications de composite à renfort textile :	16
I.1.11	Étude du comportement des renforts tissés :	17
I.1.11.1	Echelles d'observation :	17
I.1.12	ETUDE DE CARACTERISATION	18
I.1.12.1	Essai de traction sur le tissu :	18
I.1.12.2	Essais de cisaillement :	20
I.1.13	Les défauts lors du préformage :	23
I.1.14	L'influence des paramètres sur les préformes :	23
I.2	Généralité sur le moulage en sable :	24
I.2.1	Définition de moulage :	24
I.2.2	Moulage en sable :	24
I.2.3	Le moule :	25
I.2.4	Principe du moulage en sable : Deux types de sable peuvent être utilisés:	25
I.2.4.1	Moulage au sable Silico-argileux dit sable noir ou « sable vert »:	25
I.2.4.2	Moulage au sable à prise chimique :	25
I.2.5	Les différents types de sable	27
I.3.	Conclusion :	27
II.	Introduction	29
II.1	Présentation de SOLIDWORKS	29
II.1.1	Les éléments de banc d'essai :	30
II.1.2	Conception des pièces:	31
II.1.3	Assemblage des pièces :	34
II.2	Les poinçons :	35
II.2.1	Impression 3D des modèles de poinçons :	37
II.2.1.1	Définition:	37
II.2.1.2	Fonctionnement d'une imprimante 3D	37
II.2.4	Imprimante 3D de type Zortrax M200 plus	38
II.2.1.4	Propriétés de l'imprimante Zortrax M200 Plus	38
II.2.1.5	Les modèles de poinçons :	39

II.2.2	Le moulage en sable :.....	41
II.2.2.1	Préparation du sable rouge :.....	41
III.2.2.2	Élaborations du moule :.....	42
II.2.2.3	La coulée :.....	43
II.2.3	Usinage .....	43
II.2.3.1	Réalisation d'un porte poinçon.....	43
II.2.3.2	Surfaçage et perçage des poinçons .....	45
III.1	Introduction.....	48
III.2	Problématique : .....	48
III.3	Préparation des éprouvettes:.....	48
III.4	Description de l'essai : .....	49
III.4.1	Les essais préliminaires :.....	49
III.4.1.1	Premières observations:.....	50
III.5	Les meilleurs essais:.....	52
III.5.1	Les résultats: .....	54
III.5.2	Les graphes : .....	57
III.6	Résultats :.....	63
III.7	Conclusion : .....	63
IV.1	Introduction :.....	64
IV.2	Brève présentation d'Abaque : .....	64
IV.3	Essais uniaxiaux .....	64
IV.3.1	Essai de traction .....	64
IV.3.2	Essai de cisaillement .....	68
IV.4	Essais d'emboutissage de tissus .....	71
IV.4.1	Emboutissage avec le poinçon 45A.....	71
IV.4.2	Emboutissage avec le poinçon 45S .....	77
	Conclusion et perspective .....	85

Annexe

Références bibliographiques



**Liste des figures**

**Et**

**Liste des tableaux**

## Liste des figures

Figure I-1 : classification des composite.....	3
Figure II-1 : banc d’essai d’emboutissage en profondeur .....	30
Figure II-2 : matrice.....	31
Figure II-3 : serre flan.....	31
Figure II-4 : La base .....	32
Figure II-5 : La tige de pression .....	32
Figure II-6 : La tige de guidage .....	33
Figure II-7 : Plaque support.....	33
Figure II-8 : Porte poinçon .....	34
Figure II-9 : Vérin + porte-poinçon + poinçon .....	35
Figure II-10 : Matrice + serre-flan + tige de pression .....	35
Figure II-11 : Les Poinçons.....	37
Figure II-12 : Les modèles de poinçons .....	41
Le sable rouge ou la bauxite est un sable de couleur brune/rougeâtre. Le sable est broyé et tamisé, puis réaliser un mélange de 90% de sable et 10% de silicate de sodium Figure III-2 .....	41
Figure II-14 : Préparation du sable rouge.....	41
Figure II-15 étapes de préparation des empreintes.....	42
Figure II-17 découpage de brut.....	43
Figure II-18 l’usinage.....	44
Figure II-19 perçage .....	44
Figure II-20 surfaçage.....	45
Figure II-21 : enlèvement de pauvre .....	45
Figure II-22 : les poinçons a l’état final.....	47
Figure III-11 :éprouvettes de Taffetas.....	48
Figure III-12 : repartions des charges sur serre flan .....	49
Figure III-13 : Distribution des surfaces.....	50
Figure III-14 : essais préliminaires.....	51
Figure III-15 : les meilleurs résultats .....	53
Figure III-16 : représente la variation de l’angle de cisaillement mesurée lors l’essai de préformage avec les outils 45S , 60S et 75S.....	57
Figure III-17 : représente la variation de l’angle de cisaillement mesurée lors l’essai de préformage avec outil 45S , 60S et 75S .....	58
Figure III-18 : représente la variation du glissement mesurée lors l’essai de préformage avec les outils 45S , 60S et 75S.....	58
Figure III-19 : représente la variation du glissement mesurée lors l’essai de préformage avec les outils 45S , 60S et 75S.....	59
Figure III-20 : représente la variation du glissement mesurée lors l’essai de préformage avec les outils 45S , 60S et 75S.....	59
Figure III-21 : représente la variation du glissement mesurée lors l’essai de préformage avec les outils 45S , 60S et 75S.....	60

Figure III-22 : représente la variation de l'angle de cisaillement mesurée lors l'essai de préformage avec les outils 45A , 60A e ,75A et 90.....	60
Figure III-23 : représente la variation de l'angle de cisaillement mesurée lors l'essai de préformage avec les outils 45A , 60A e ,75A et 90.....	61
Figure III-24 : représente la variation du glissement mesurée lors l'essai de préformage avec les outils 45A , 60A et 75A et 90.....	61
Figure III-25 : représente la variation du glissement mesurée lors l'essai de préformage avec les outils 45A , 60A et 75A et 90.....	62
Figure III-26 : représente la variation du glissement mesurée lors l'essai de préformage avec les outils 45A , 60A et 75A et 90.....	62
Figure IV -1 : représente la variation du glissement mesurée lors l'essai de préformage avec les outils 45A , 60A et 75A et 90.....	63
Figure IV -2 Courbe de traction du Taffetas : simulation vs expérimental .....	65
Figure IV -3 Déformation selon la direction de chargement .....	66
Figure IV -4 Déformation selon la direction perpendiculaire à la direction de chargement .....	68
Figure IV -5 courbe de cisaillement du Taffetas: simulation vs expérimental .....	68
Figure IV -6 Déformation selon la direction de chargement .....	69
Figure IV -7 : déformations totales selon la direction de cisaillement .....	70
Figure IV -8 la déformation maximale dans le plan du tissu .....	72
Figure IV -9 Déformation selon la direction du chargement dans le plan du tissu .....	74
Figure IV -10 la déformation selon la direction perpendiculaire dans le plan du tissu .....	75
Figure IV -11 : la déformation de cisaillement 12 dans le plan du tissu.....	77
Figure IV -12 la déformation maximale dans le plan du tissu .....	78
Figure IV -13 la déformation selon la direction de chargement dans le plan .....	80
Figure IV -14 la direction perpendiculaire dans le plan du tissu .....	81
Figure IV -15 : la déformation de cisaillement 12 dans le plan du tissu.....	83

## Liste des tableaux

Tableau III-1: résultats 75S.....	54
Tableau III-2: résultats 60s .....	54
Tableau III-3: résultats 45S.....	55
Tableau III-4: résultats 90.....	55
Tableau III-5: résultat 75A.....	56
Tableau III-6: résultats 60A .....	56
Tableau III-7: résultats 45A .....	57



## **Introduction générale**

## Introduction générale

Les matériaux composites connaissent une utilisation grandissante dans de nombreux domaines. Le domaine des transports, en particulier celui des transports aéronautiques, montre un grand intérêt pour ce type de matériaux. Le contexte économique et environnemental impose aux acteurs de ce secteur un allègement des structures permettant des gains en terme de capacité de chargement et d'économie d'énergie. Dans ce contexte, la maîtrise de l'élaboration des pièces est un point clé. Si les procédés de fabrication concernant les matériaux usuels tels que les métaux ont été largement étudiés et sont aujourd'hui assez bien maîtrisés, ceux relativement jeunes, s'appliquant aux matériaux composites demandent à être mieux connus afin d'assurer l'automatisation et la reproductibilité des processus industriels. Nous nous intéresserons en particulier aux procédés de fabrication de pièce composites où le renfort est d'abord mis en forme avant qu'une résine ne vienne figer la structure de la pièce. La présente étude se focalise ainsi sur la première de ces étapes au cours de laquelle les renforts fibreux présentent la particularité de pouvoir être fortement déformés, permettant ainsi la réalisation de formes complexes. La connaissance du comportement très particulier du renfort est alors indispensable pour garantir le succès de la mise en forme et la qualité des pièces fabriquées. On s'intéressera donc à la forme finale du renfort, à la position et à l'orientation des fibres mais aussi à l'apparition possible de défauts tels que flambement, glissement entre les chaînes, cisaillement ou la décohéation de mèches.

Afin de présenter convenablement notre travail, nous avons structuré notre mémoire comme suit :

Le chapitre I aborde quelques aspects généraux des renforts pour composites aux différentes échelles du matériau, un état de l'art sur le comportement des renforts tissés et leur procédé de mise en forme ainsi que des généralités sur moulage en sable.

Le chapitre II est dédié à la conception du dispositif de formage de tissus et d'un porte-poinçons. Les différents poinçons qui devront être utilisés au cours de ce travail ont été réalisés de deux manières. Dans un premier temps, nous avons conçu, puis imprimés en 3D les différents poinçons. Ces outils ont été renforcés dans un double objectif : les utiliser comme empreintes pour la réalisation de poinçons en aluminium par coulée dans le cadre d'un moulage en sable. Ou utilisation des poinçons imprimés en 3D comme outils suite à leurs renforcements.

Le chapitre III est consacré à la partie expérimentale de notre étude qui sera partitionnée en deux parties. D'abord des essais préliminaires seront effectués pour déterminer la configuration la plus optimale, après quoi nous lancerons des séries d'essais afin d'étudier l'influence de certains paramètres tels que l'orientation du tissu, la distribution de la pression du serre-flan...

Le chapitre IV concernera tout ce qui est simulation avec le code de calcul par éléments finis ABAQUS. On commencera par une présentation de ce logiciel. Puis, nous calibrerons la loi de comportement en utilisant les simulations en traction et cisaillement par Bias test. Finalement, nous présenterons quelques résultats de simulations numériques d'opérations de formage du tissu selon deux (02) configurations choisies.

Nous clôturerons ce mémoire par une conclusion générale et quelques perspectives.

***Chapitre I :***  
***Généralité sur les matériaux composites***  
***et***  
***le moulage en sable***

## Généralité sur les matériaux composites

### I.1.1 Introduction :

L'utilisation des matériaux composite a connu une importante progression ces dernières années, dans de nombreux secteurs d'activités tels que le bâtiment, l'automobile, aéronautique, particulièrement les composites à renfort textile.

La complexité structurelle des renfort textile est dû à leur multi échelle qui nécessite la connaissance de leur comportement mécanique et leur mécanisme de déformation afin de garantir le succès de la mise en forme et la qualité de la pièce. [1]

### I.1.2 Définition des matériaux composites

Un matériau composite est un produit constitué d'au moins deux matériaux, l'un étant un matériau plein et l'autre un liant (ou matrice) unissant les deux matériaux. Il existe de nombreux produits composites fabriqués avec plus de deux matières premières. Ces matériaux ne sont pas miscibles et possèdent des caractéristiques dissemblables. la quantité, la position et l'orientation des renforts ainsi que la sélection de la matrice sont des aspects critiques de la conception du produit et son développement. Ces paramètres doivent être optimisés pour améliorer constamment le produit.

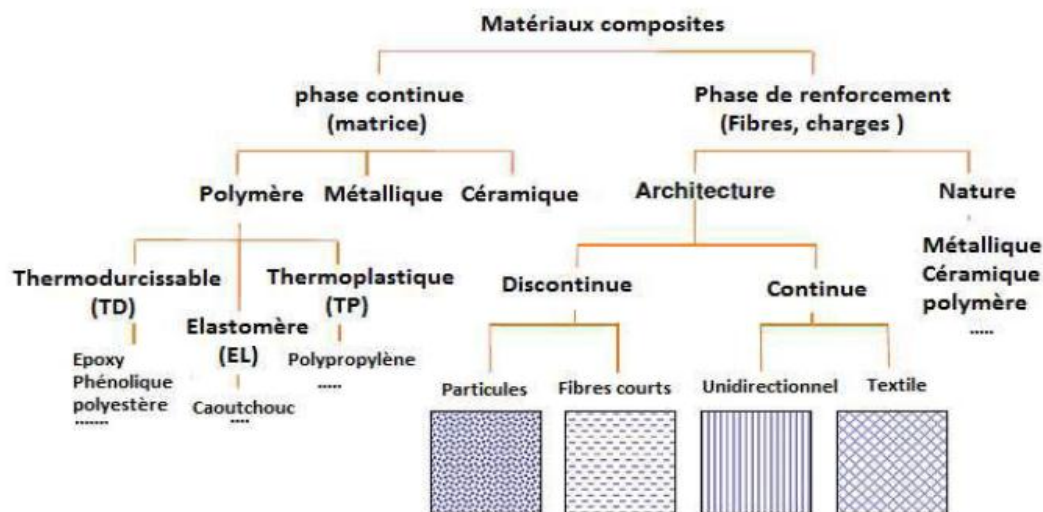


Figure 0-1 : classification des composite.[16]

### I.1.3 Constituants des matériaux composites

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

## *Chapitre I généralité sur les matériaux composites et le moulage en sable*

- La matrices
- Le renfort
- Les charges et les additifs [2]

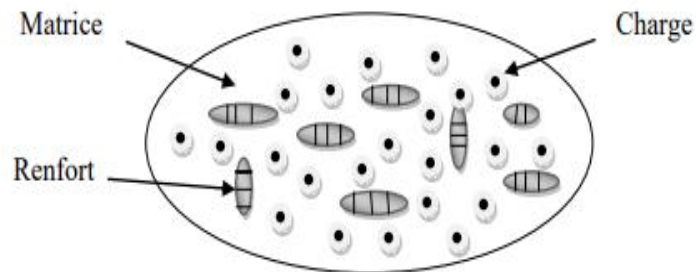


Figure I- 2 : schéma d'un matériau composite [2]

### **I.I.4 Caractéristiques générales :**

Selon la diversité des matériaux composites, leurs propriétés dépendent de plusieurs paramètres mais essentiellement de :

- La nature, quantité et propriétés des constituantes ;
- La géométrie et distribution du renfort ;
- L'interaction et l'interface fibre/ matrice.

Les caractéristiques des pièces fabriquées en matériaux composites sont :

- Grain de masse, bonne tenue en fatigue ;
- Ils sont non corrosifs et leurs limites élastiques très élevée.

Avec la présence de certains inconvénients comme :

- Anisotropie et tenue aux impacts très moyenne ;
- Sensibilité à la chaleur et l'humidité. [3]

### **I.I.5 Classifications des composites**

Composites sont classés soit selon la forme ou suivant la nature des constituants.

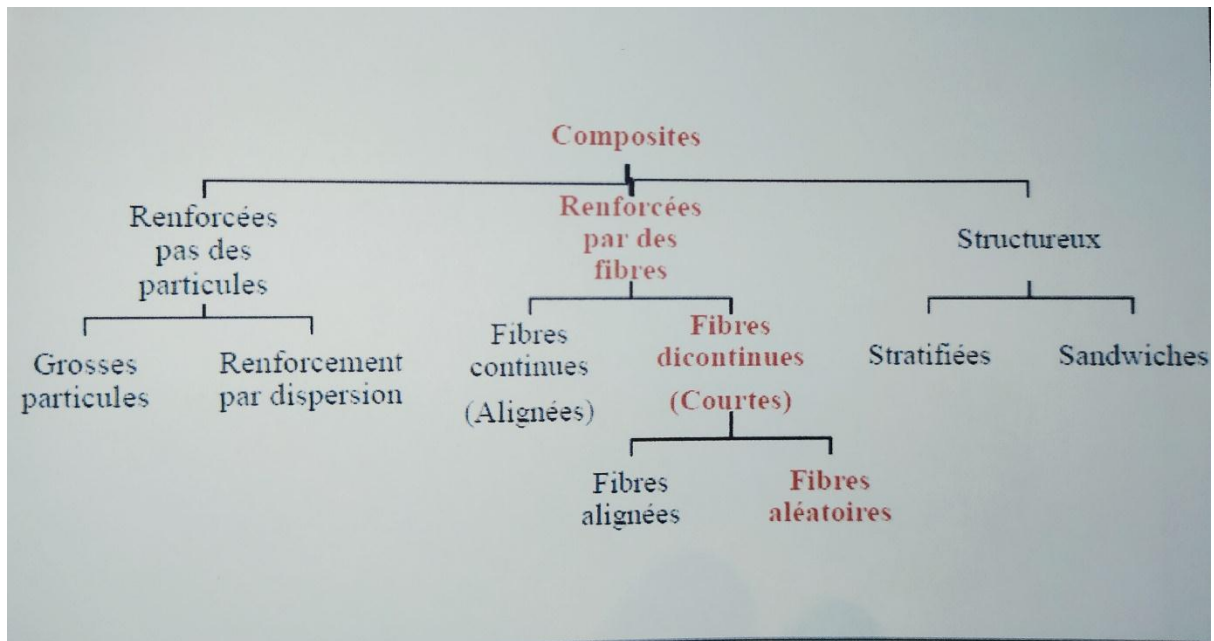


Figure I- 3 : Classification schématique des différents types de composites

### II.5.1 Selon la géométrie :

#### II.5.1.1 Composite à fibre :

Le renfort est sous forme de fibres continues ou discontinues.

#### II.5.1.2 Composites à particules :

Le renfort est sous forme de particules utilisées pour améliorer les propriétés du matériau et dans de nombreux cas elles sont utilisées comme charges afin de réduire le coût du matériau

#### II.5.1.3 Composite structuraux :

Les fibres sont dispersées d'une manière contrôlée ou non, on peut distinguer les structures suivantes :

- **Les stratifiés** : C'est un empilement de monocouches orientées d'une façon à optimiser les propriétés mécaniques du matériau.
- **Composites tissés** : Les fibres sont alignées en fils, elles sont ensuite tissées suivant des motifs, leurs variations dépendent des caractéristiques voulues pour le matériau.
- **Les sandwichs** : constitués essentiellement de deux couches de faible épaisseur qui enveloppent une autre couche de grande épaisseur, c'est un matériau de grande légèreté et bonne isolation thermique.

## *Chapitre I généralité sur les matériaux composites et le moulage en sable*

### **I.I.5.2 Selon la nature des constituants :**

Selon la nature de la matrice, les composites sont classées et divers renforts sont associés à ces matrices.

- **Composites à matrices organiques (CMO) :** réservés aux applications de haute technicité et travaillant à haute température.
- **Composites à matrices métalliques :** ils sont à base de renforts céramiques ou intermétalliques. Ils sont utilisés dans le secteur de l'industrie automobile et dans l'aéronautique [3]

### **I.I.6 Matrice :**

La matrice permet de lier les fibres du renfort entre elles, ainsi que de répartir les efforts (résistance à la compression ou à la flexion). La matrice est facilement déformable et assure la protection chimique des fibres, et lie les fibres du renfort entre eux et assure la répartition de la contrainte, c'est « l'emballage ». Les matrices doivent présenter une bonne compatibilité avec le renfort. En outre elles doivent avoir une masse volumique faible de manière à préférer aux matériaux composites des caractéristiques mécaniques spécifique élevées. Les résines les plus utilisées dans les matériaux composites sont :

- Les résines thermodurcissables
- Les résines thermoplastiques

Ces deux types de polymères diffèrent en leur structure moléculaire aussi bien que leur comportement [4]

#### **I.I.6.1 Les thermodurcissables :**

Les résines thermodurcissables ont des propriétés mécaniques élevées. Ces résines ne peuvent être mises en forme qu'une seule fois. Elles sont en solution sous forme de polymère. Les résines polyesters insaturées, les résines de condensation (phénoliques, aminoplastes, furaniques) et les résines époxy sont des résines thermodurcissables [5]

#### **I.I.6.2 Les thermoplastiques :**

Les thermoplastiques sont des chaînes de polymères interconnectées qui sont recyclables. Le recyclage et la réversibilité thermique sont très importants. Il existe également des thermoplastiques spéciaux pouvant résister à des températures de 200 C° ou plus. Les thermoplastiques ont la charge la plus importante en termes de production en raison de leur facilité de mise en œuvre et de leur faible coût [4]

## Chapitre I généralité sur les matériaux composites et le moulage en sable

### I.I.7 Les renforts textiles :

Les renforts constitués de fibres se présentent sous les formes suivantes : linéique (fils, mèches), tissus surfacique (tissus, mats), multidirectionnelle (tresse, tissus complexe, tissage tri directionnel ou plus)

Les renforts peuvent être catégorisés selon leurs géométries (fibres longues, fibres courtes, particules ou charges renforçâtes) selon leurs textures et architecture (unidirectionnels, toile ou taffetas... etc.) ou encore selon les matériaux utilisés pour fabriquer les fibres ou on peut distinguer cinq grandes classes de fibres les plus commercialisés dans le marché ; les fibres végétales

On dit qu'une fibre est longue lorsque sa longueur est identique à celle de la pièce, on parle alors de fibre continue. Les fibres sont coupées au moment de la fabrication du matériau composite, elles sont alors non travaillées (sous forme de mats) ou travaillées (tissées, tressées) pour obtenir des structures complexes telles que les toiles ou les taffetas.

Les fibres courtes ou discontinues ne mesurent que quelque centimètre, parfois des fractions de millimètres. Leur configuration peut être soit séparer, soit agglomérées sous forme de mats

Les renforts contribuent à améliorer la résistance mécanique et la rigidité des matériaux composites et se présentent sous forme filamentaire, allant de la particule de forme allongée à la fibre continue qui donne au matériau un effet directif, sont caractérisés par :

- La nature de la fibre, minérale ou organique.
- L'architecture du renfort [6]

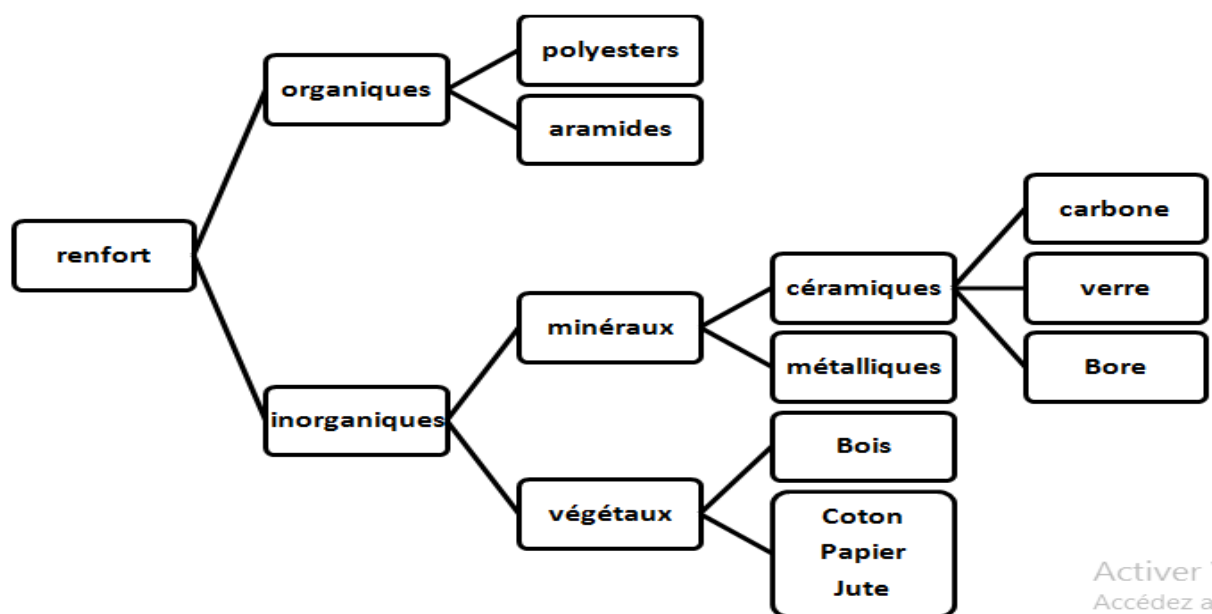


Figure I- 5 : type de renfort

## ***Chapitre I généralité sur les matériaux composites et le moulage en sable***

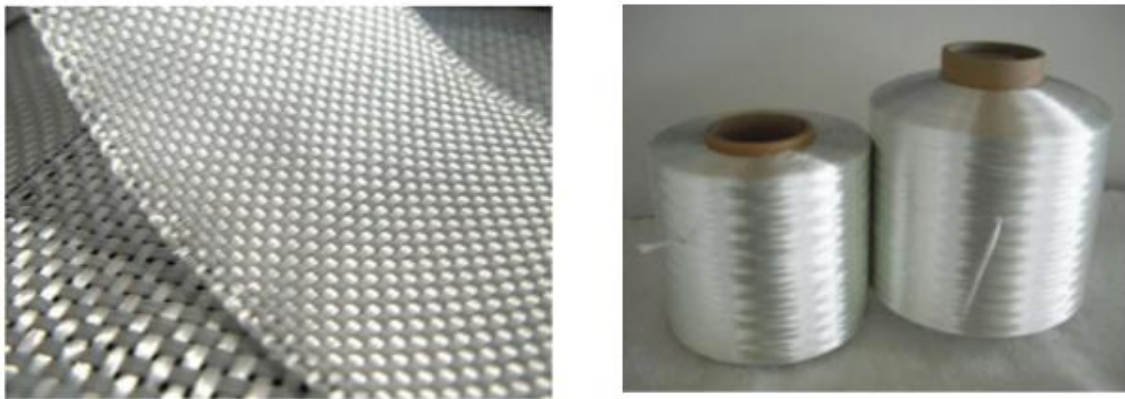
### **I.I.7.1 Les fibres de verre :**

Les fibres de verres sont élaborées à partir d'un verre filable, appelé verre textile, composé de silice, alumine, chaux, magnésie, etc. ces produit peu couteux, associés à des procédés assez simples d'élaboration, confèrent aux fibres de verre un excellent rapport performances/prix, qui les place de loin au premier rang des renforts utilisés actuellement dans les matériaux composites. [4]

On distingue différentes types de verre filables tel que :

- Verre E : pour les composites de grande diffusion et les applications courantes, bonnes propriétés électriques.
- Verre D : hautes propriétés diélectriques, pour la construction de matériel électroniques de télécommunication.
- Verre C : bonne résistance chimique.
- Verre R, S : caractéristiques mécaniques élevées pour la réalisation de structures à hautes performances mécaniques.

La fibre de verre, utilisée pour fabriquer de nombreux matériaux composite armés, existe partout autour de nous ce sont des matériaux hautement résistants qui aident à réduire le poids des matériaux, tout en améliorant leur performance [6]



**Figure I- 6 : Les fibres de verre**

### **I.I.7.2 Fibre de carbone :**

C'est la fibre la plus utilisée dans les applications hautes performances. Elle est obtenue à partir de PAN (Poly Acrylonitrile) ou à partir de Brai

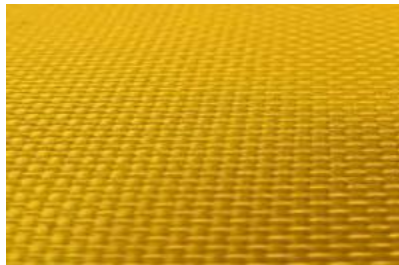


**Figure I- 7 : Fibre de carbone**

### **I.I.7.3 Fibre d'aramide (KEVLAR):**

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

- Les fibres à bas module : utilisées pour les câbles et les gilets pare-balles.
- Les fibres à haut module : employées dans le renforcement pour les composites à hautes performances.



**Figure I- 8 : Fibre d'aramide (KEVLAR)**

### **I.I.7.4 Fibre de bore :**

Fibre de haut module et insensible à l'oxydation à hautes températures, elles sont obtenues par dépôt en phase gazeuse sur un substrat en tungstène

### **I.I.7.5 Fibre de silicium :**

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

### **Autre types de fibres :**

Ce sont des fibres d'origines végétales (cellulose, lin, chanvre...etc.), d'origine minérales (amiante, silice... etc.), des fibres synthétiques (tergale, nylon ...etc.) ou métalliques (acier, cuivre, aluminium ...etc.). Elles sont avantageuses par leur isolation thermique, acoustique et prix de revient assez bas

## *Chapitre I généralité sur les matériaux composites et le moulage en sable*

### **I.I.8 Les charges et les additifs :**

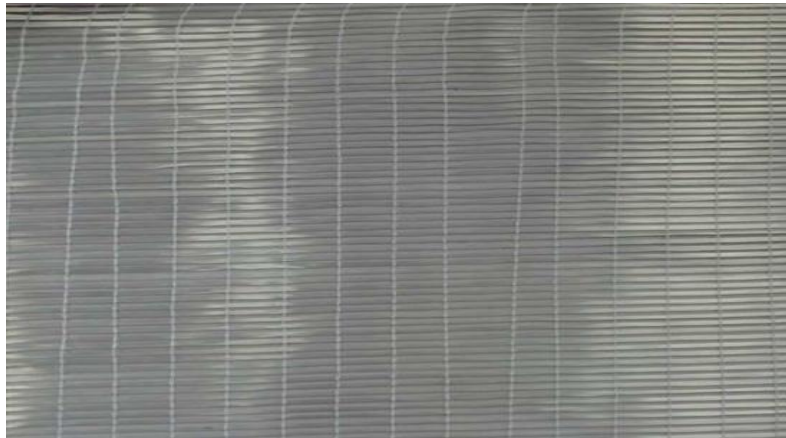
Ce sont des charges sous forme d'éléments fragmentaires liquides ou poudres, de nature minérale ou organique ajoutées à la résine pour améliorer les propriétés mécaniques du matériau composite diminuer le cout des matrices. Les additifs quant à eux peuvent être des colorants ou agents de démoulage de composites [3]

### **I.I.9 Conditionnement des renforts à base de fibres :**

L'assemblage des fibres utilisé lors de la fabrication du matériau constitue le « renfort » celui-ci peut être :

#### **I.I.9.1 Unidirectionnelles :**

Les fibres unidirectionnelles, sont orientées suivant une même direction de l'espace. Dans une nappe unidirectionnelle (UD), les fibres sont assemblées parallèlement les unes par rapport aux autres à l'aide d'une trame très légère. Taux de déséquilibre très grand. Les tissus se composent de fils de chaîne et de trames perpendiculaires entres eux. Le mode d'entrecroisement ou armure les caractérisé [8]



**Figure I- 9 : Les fibres unidirectionnelles ( 8 )**

#### **I.I.9.2 Forme surfacique (bidimensionnel) :**

Les files peuvent être utilisées pour réaliser les formes surfaciques de divers types : mats, tissus ou rubans, essentiellement développés dans le cas de fibres de verre.

##### **I.I.9.2.1 Les mats :**

Les mats sont des nappes de fils continus ou discontinus, disposés dans un plan sans aucune orientation préférentielle. Ils sont maintenus ensemble par un liant soluble ou non dans les résines, suivant la mise en œuvre. L'absence d'orientation préférentielle des fibres conduit à une isotropie des propriétés mécaniques du mat dans son plan.

## Chapitre I généralité sur les matériaux composites et le moulage en sable

La différence entre les mats à fils coupé et les mats à fils continus se situe essentiellement au niveau de leur propriété de déformabilité. Les premières sont peu déformables alors que les seconds permettent d'obtenir des « emboutis » profonds par un allongement régulier du mat dans toutes les directions. Une des principales applications de mats à fils continus est le moulage entre moule est contre-moule, de pièces pouvant avoir des formes complexes, par compression, injection ou moulage sous vide. [7]

### I.1.9.2.2 Les tissus et rubans :

Un tissu (ou ruban) est un ensemble surfacique de fils, de mèches, etc..., réalisé sur un métier.

Il est constitué

- **D'une chaîne** : ensemble de fils parallèles répartis dans un plan suivant la longueur du tissu
- **D'une trame** : ensemble de fils s'entrecroisant avec les fils de chaîne

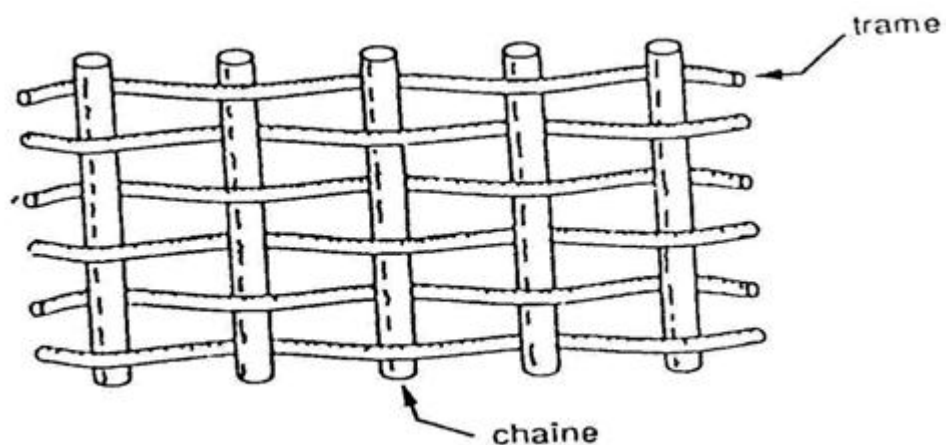


Figure I-10 : convention chaîne et trame

Dans le cas des structures tissées les mèches présentent une ondulation. Cette ondulation est quantifiée par l'embuvage et le retrait exprimé en pourcentage et calculé à partir des longueurs de mèches et de tissu suivant l'équation 1

$$\text{embuvage ou retrait} = \frac{\text{longueur de la meche} - \text{longueur du tissu}}{\text{longueur du tissu}} \times 100 \quad (1)$$

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

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

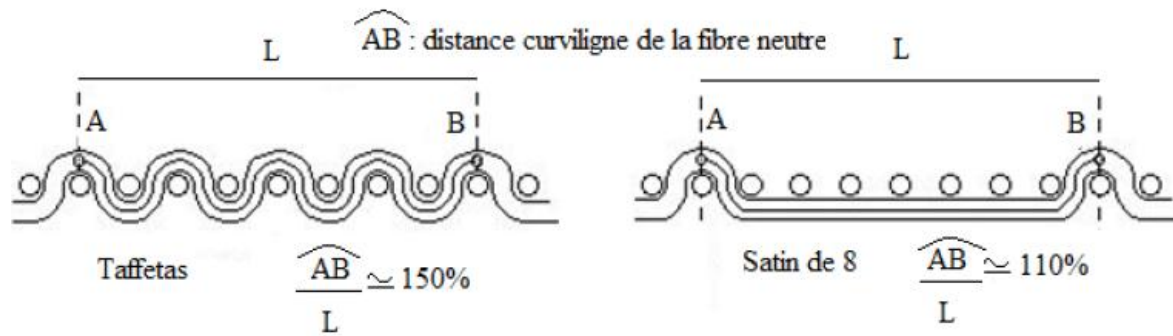


Figure I- 11 : principe de mesure de l'embuvage des structures 2D

L'embuvage et le retrait seront d'autant plus élevés que l'état d'ondulation du tissu sera important (**Figure I - II**). Ce phénomène entraîne une modification du comportement du tissu comparativement à celles des fils constitutifs. [11]

Les tissus différents par le type de fils utilisés (fils simples, mèches, etc.), donc par la masse linéique des fils, et par le mode d'entrecroisement (ou armure) des fils de chaîne et les fils de trame. La figure illustre les armures classiques utilisées : toile ou taffetas, sergé, satin.

- **Taffetas :**

Dans l'armure taffetas (figure 12), les fils de chaîne et de trame s'entrecroisent alternativement, conduisant à un tissu très plat, stable, mais peu déformable. Cette armure confère au tissu des propriétés mécaniques sensiblement identiques dans les deux directions chaîne et trame (pour des fils de tissage identiques). Toutefois l'armure taffetas conduit à un haut degré de courbure des fibres qui induit une diminution des performances mécaniques des composites

- **Sergé :**

Pour l'armure sergé, le nombre de chaîne et de fils trame qui s'entrecroisent peut varier. Dans un sergé 2 \* 1, les trame passent sur un fil chaîne et sous deux fils chaînes et des sergé 2 \* 2, les fils trame passent sur deux fils chaîne et sous deux fils chaîne. Ce type d'entrecroisement conduit à un motif répétitif du tissu sous forme de nervures diagonales. L'armure sergé offre l'avantage d'être à la fois souple et dense. Le tissu sergé permet ainsi un glissement entre les fils chaîne et trame et s'adapte bien à des moulages de formes complexes

- **Satin :**

L'armure satin est assez semblable à celle du sergé, mais le nombre de fils chaîne et de fils trame qui passent les uns sur les autres avant de s'entrecroiser est plus élevé. Chaque tissu satin est caractérisé par un nombre, usuellement 4 ou 8, indiquant que les fils chaîne passent

## Chapitre I généralité sur les matériaux composites et le moulage en sable

sur 4 ou 8 fils trame. Il en résulte un tissu avec une face qui contient plus de fils chaîne et une autre face plus de fils trame. L'armure satin est bien adaptée au moulage de formes complexes. [7]

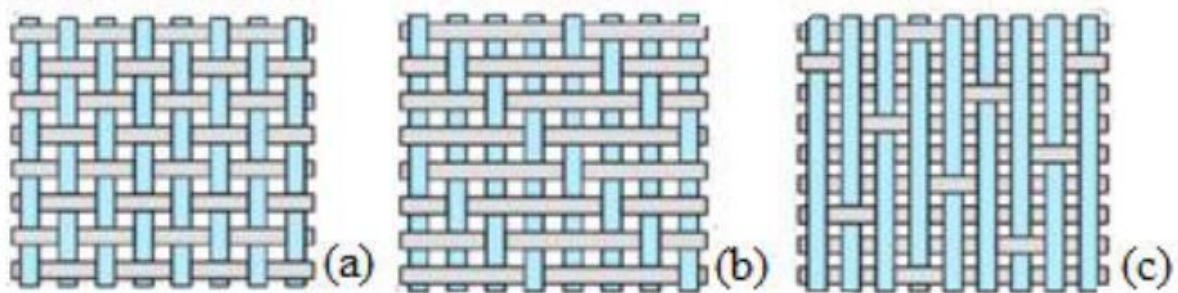


Figure I-12 : Armures pour un renfort tissé 2D. Taffetas (a) sergé 3x1 (b) et Satin de 8 (c) [7]

### I.1.9.3 Fibres multidirectionnelles

#### - Tresses et préformes

Tissage cylindrique ou conique avec des entrecroisements réguliers des fils qui a la particularité d'être modulable en diamètre. Les fils s'entrecroisent en hélice. Le diamètre de la tresse est lié au pas de l'hélice, fig (I-13) par conséquent à l'angle que font les fils entre eux.

Ce tissage nous permet des révolutions très résistantes ayant un diamètre variable le long de l'axe [7]

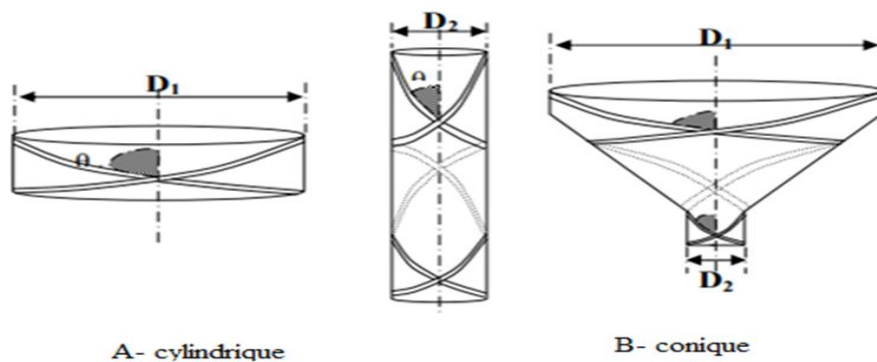


Figure I-13 : A- Tissage cylindrique et B- Tissage conique

#### - Tissus multidirectionnels

Les fibres sont tissées dans plusieurs directions. Ceci permet d'obtenir un tissu très dense et épais mais par conséquent peu souple, il est utilisé par exemple pour la réalisation de tuyère [7]. Des tissages 3D et 4D sont montrés respectivement sur la figure (I – I4).

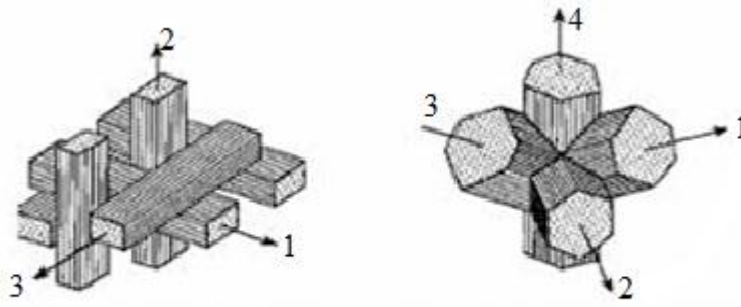


Figure I-14 : Tissus multidirectionnels (A) tissage 3D et (B) tissage 4D

### I.I.10 Les procédés de mises en forme des matériaux composites :

Les principaux procédés de mise en forme des matériaux composites sont illustrés comme suit :

#### 1- Le formage par moulage : il s'effectue sous les différentes formes suivantes :

- Au contact ;
- Poinçon – matrice ;
- Sous vide ;
- Par injection de résine (RTM) ;
- Par injection de pré-imprégnée ;
- Par injections de mousse
- Moulage de pièces de révolution ; (centrifugation et enroulement filamentaire).

#### 2- Autres procédés de formage :

- Formage procédés de formage ;
- Formage par estompage ;
- Préformage par assemblage tridimensionnel ;
- Découpe des tissus et détournage des stratifiés

Les procédés les plus utilisées pour la mise en forme des composites à renforts tissés et à matrice polymère peuvent être de type LCM (liquid composite moulding) sont l'infusion sous vide et le RTM [3]

#### I.I.10.1 Procédé d'Infusion sous vide :

Ce procédé consiste à déposer le renfort et la résine entre un moule et une membrane Étanche. Il permet d'utiliser simultanément l'effet du vide et de la pression atmosphérique. Une pompe à vide est utilisée pour créer une dépression permettant à de faciliter la distribution de la résine dans le renfort.[8]

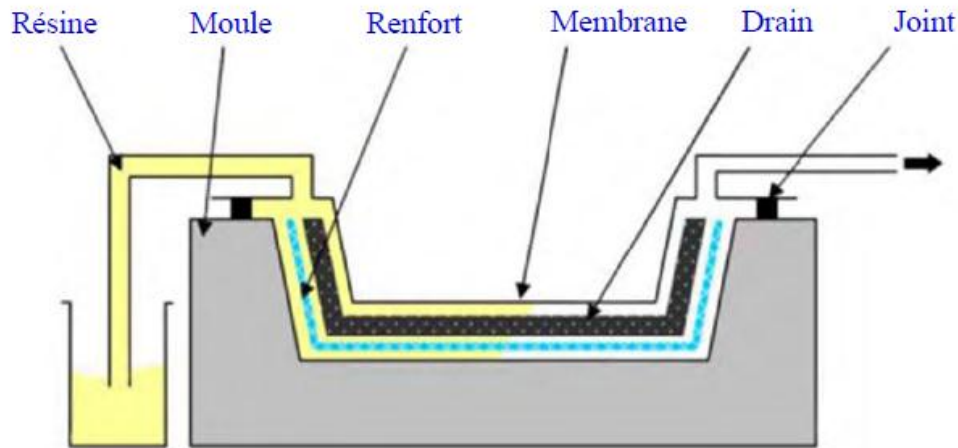


Figure I- 15 : principe de l'infusion sous vide

### I.I.10.2 Le procédé RTM :

Le procédé RTM (Resin Transfer Moulding) se décompose en trois étapes, comme présenté figure (I-15). La première étape, le préformage du renfort sec, consiste à mettre en forme le renfort dans un moule constitué d'une matrice et d'un poinçon. Ceci permet de mieux contrôler l'épaisseur de la pièce, les deux parties du moule étant rigides contrairement l'infusion sous vide. L'état de surface des deux côtés de la pièce est également meilleur. L'ajout de serre-flancs permet de tendre le renfort et d'éviter l'apparition de plis. Le renfort étant mis en forme, la résine est alors injectée et polymérisée (par chauffage pour une matrice thermodurcissable, par refroidissement pour une matrice thermoplastique). La pièce peut alors être démoulée. Une étape critique de ce procédé est la mise en forme du renfort sec. Celle-ci a une très forte influence sur la qualité de l'imprégnation de la résine et donc sur les caractéristiques mécaniques de la pièce composite obtenue. Elle constitue également le point fort du procédé RTM, la grande capacité de déformation du renfort sec permettant alors d'obtenir des formes non développables. [9]

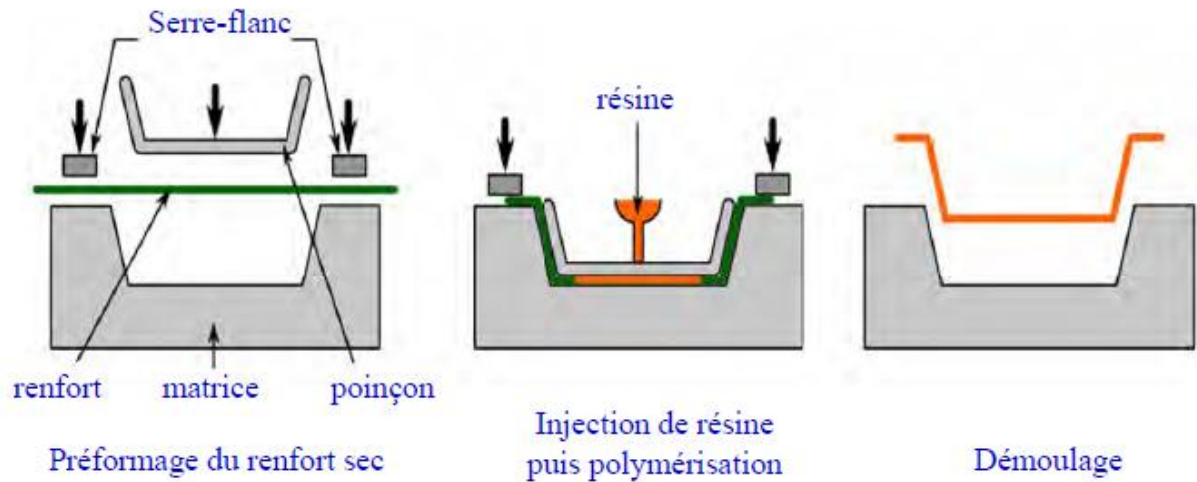


Figure I-16 : schéma de principe du procédé RTM

### I.I.10.3 Domaines d'applications de composite à renfort textile :

**Les sports et loisirs** : cannes à pêche, planche de ski et de snowboard, raquette de tennis, coque de bateau.....

**Construction et bâtiment** : plaque de renforts pour structures porteuse.....

**Industrie** : Les tuyaux flexibles sous pression hydraulique et les courroies de transmission d'énergie.....

**Transports** : Plaquettes de freins, disques de frein, ressorts de suspension, châssis, plaques de circuits imprimés, toit, hayon, porte, pare-chocs, de nombreuses pièces de la cellule de l'Arbus A380, les pales d'hélicoptère ....



Figure I-17 : Moteur d'avion

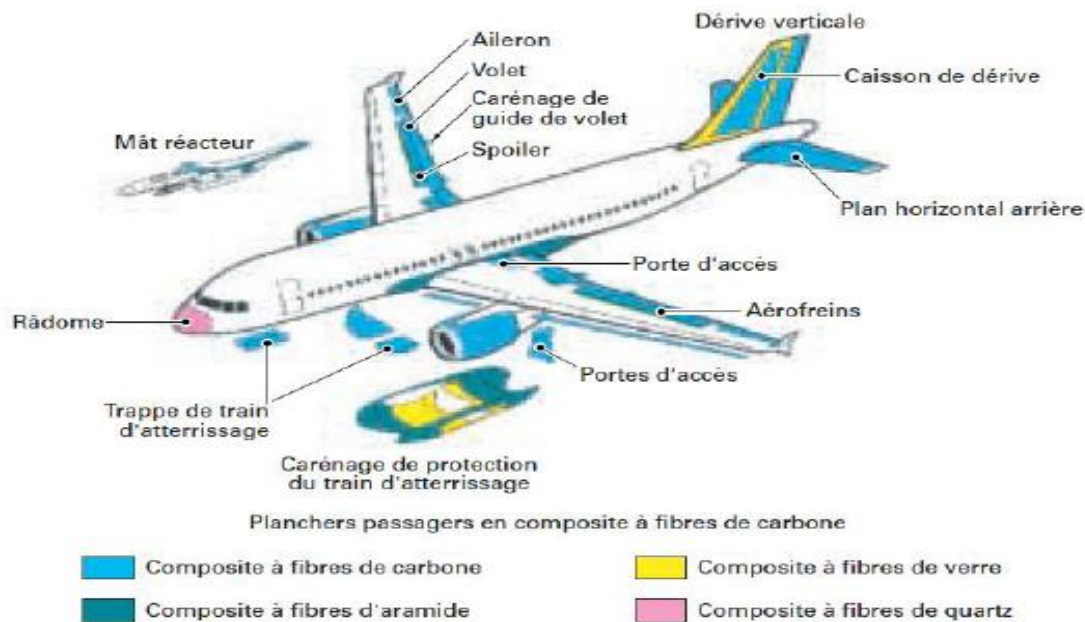


Figure I- 18 : pièces de structure en composite sur avion Airbus A320

### I.I.11 Étude du comportement des renforts tissés :

#### I.I.11.1 Echelles d'observation :

Les renforts tissés secs ont initialement été caractérisés via des essais spécifiques qui permettent de comprendre les modes de déformations macroscopiques et les mécanismes de déformations élémentaires associés. Le comportement mécanique macroscopique du tissu hérite de son comportement à l'échelle inférieure. Le renfort peut être caractérisé à trois échelles d'observation différentes (figure I – I9) :

- **l'échelle macroscopique** : qui est celle de la pièce complète s'étend du centimètre au mètre. À cette échelle, le renfort peut être assimilé à un milieu continu bidimensionnel.

Elle permet une étude de la déformation du renfort dans sa globalité, afin de caractériser l'apparition de plissements, de glissements de mèches, et plus généralement la formabilité d'une pièce complète.

- **l'échelle mésoscopique** : qui est celle la mèche, est de l'ordre du millimètre. Elle permet la mise en évidence des motifs de tissages périodiques sous forme de cellules unitaires ou de mailles élémentaires.

- **l'échelle microscopique** : est celle des filaments constituant les mèches. [8]

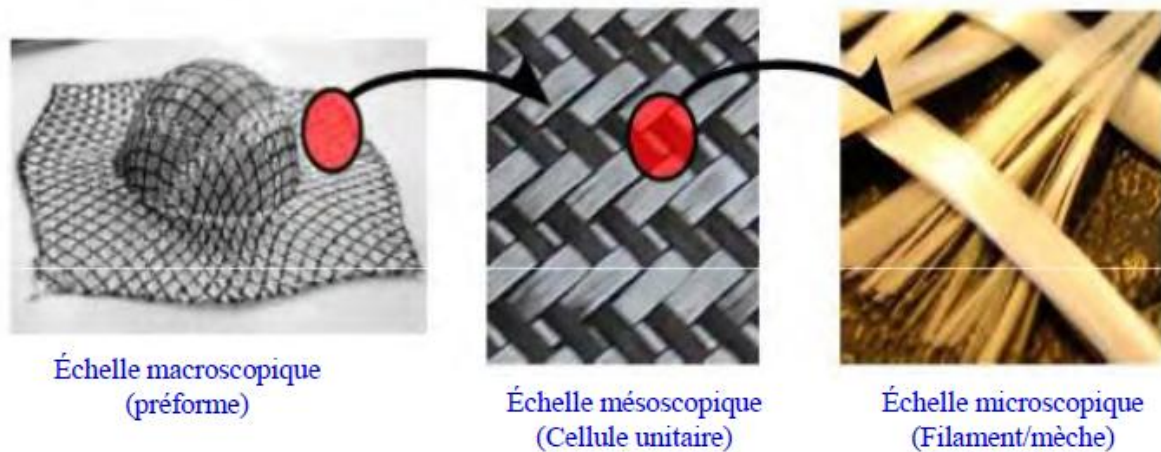


Figure I-19 : Aspect multi échelle de la structure du renfort tissé

## I.1.12 ETUDE DE CARACTERISATION

### I.1.12.1 Essai de traction sur le tissu :

Les propriétés mécanique force-allongement est indispensable pour l'évaluation de la rigidité du tissu. Cette mesure se fit par la mise sous tension d'une éprouvette du tissu en la sollicitant par une traction. Les propriétés force-allongement du tissu sont différentes dans les deux directions faut effectuer des mesures dans les deux directions orthogonales chaîne et trame. Afin de réaliser la mesure force-allongement, on distingue deux procédés des essais : traction uni axiale et traction bi axiale.

- Traction uni axiale ; l'essai est effectué à l'aide d'une machine de traction conventionnelle en respectant la norme [NFG00]. Grâce à cet essai nous pouvons calculer le module élastique et le coefficient de Poisson dans les deux directions.
- Traction bi axial : ce test est réalisé sur des machines spécifiques [KAW73a] [BUE01], [WIL08a]. Un dispositif récent, permettant des essais de traction sur des matériaux tissés dans deux directions simultanément, a été conçu au LMSP (Laboratoire de Mécanique des Système et des Procèdes, Orléans) présenté par la figure (I -20) repose sur le principe de deux losanges déformables Il permet de mener des essais à un rapport de déformations imposé entre les deux directions de tissage. Les mesures des déformations sont faites soit par les méthodes optiques, soit par des systèmes mécaniques.

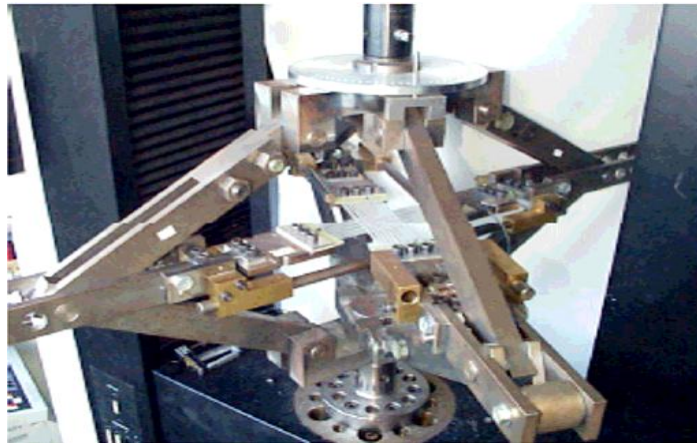


Figure I-20 : dispositif de traction bi axiale sur une éprouvette en croix [14]

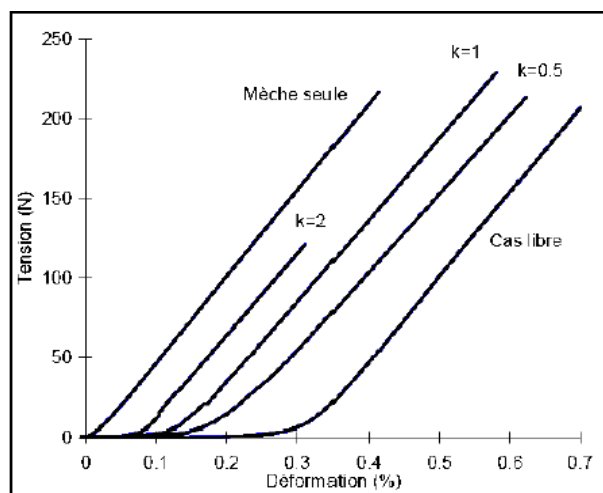


Figure I-21 : comportement en tension bi axiale pour un sergé 2x2 de carbone

La figure (21) présente les courbes expérimentales d'un essai de traction bi axiale sur un tissu équilibré, le sergé 2x2 de carbone avec différents rapports de bi axialité K

$$k = \frac{\varepsilon_{chaîne}}{\varepsilon_{trame}} \quad \text{avec } (\varepsilon: \text{déformation})$$

Les courbes de force-déformation mettent en évidence l'influence du tissage sur le comportement qui est nettement non linéaire, bien que celui des mèches seules soit linéaire. Les non linéarités sont observées aux faibles efforts et les linéarités sont visibles aux efforts plus importants. La partie linéaire du comportement est caractérisée par une rigidité proche (inférieure) de celle des mèches seules en traction. [10]

### I.I.12.2 Essais de cisaillement :

Le mécanisme de cisaillement correspond à une rotation des mèches autour de leurs intersections. Associé à une faible résistance en flexion, la capacité d'un matériau à se cisailier permet de générer les formes tridimensionnelles sans froisser ni plisser le renfort. Ce mécanisme est l'un des modes de déformation principal qui s'opère lors du préformage des renforts. [11]

#### Type de cisaillement :

Il existe deux types de cisaillement : cisaillement simple et cisaillement pur, qui peuvent être définis comme suit :

- **Le cisaillement simple** : se produit lorsqu'une étoffe de forme carré ou rectangulaire se déforme parallèlement par rapport à deux coté opposés figure 22

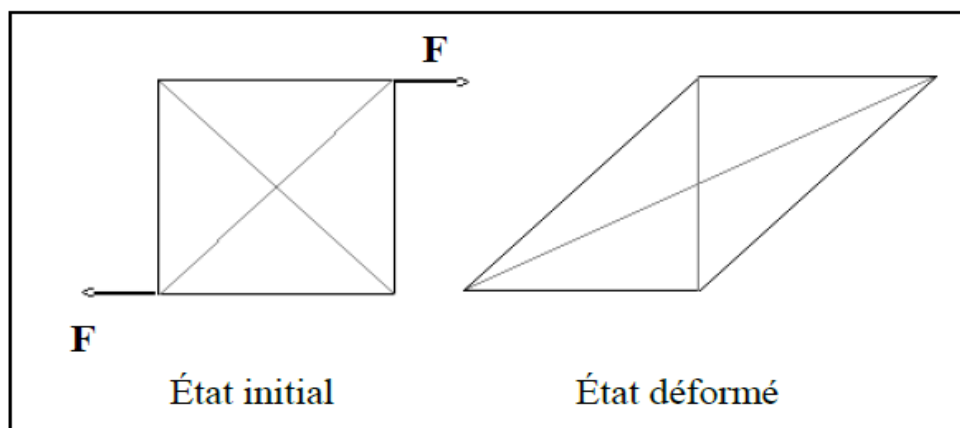


Figure I-22: principe de cisaillement simple

**Le cisaillement pur** : le cisaillement pur peut se produire quand une éprouvette de forme carré est soumise à une sollicitation de traction suivant la diagonale mais elle garde la même surface. Autrement dit la déformation est due à la variation d'angle entre les-ils qui gardent la même longueur initiale [11]

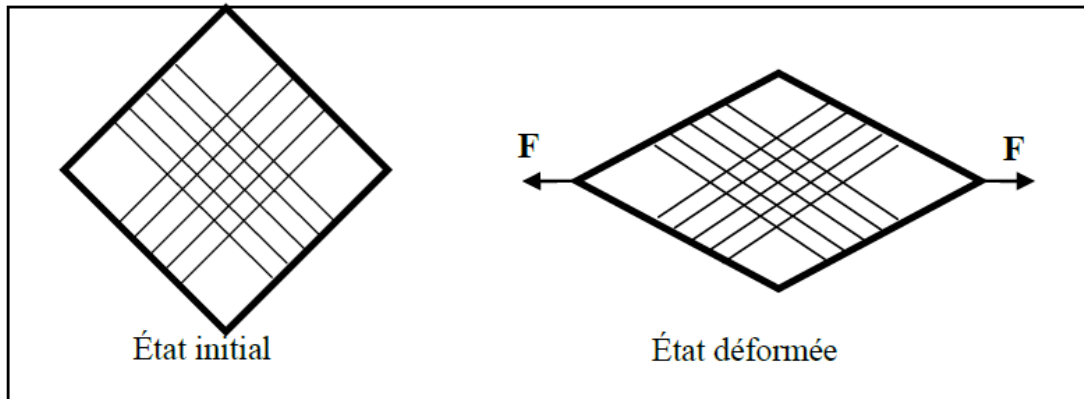


Figure I-23 : principe de cisaillement pur

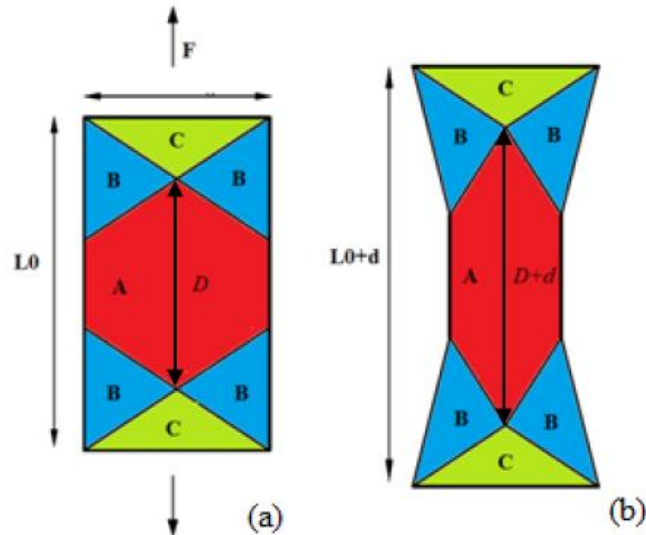
Deux protocoles sont classiquement utilisés pour identifier le comportement en cisaillement d'un renfort tissé :

- L'essai de cadre également, appelé Picture Frame
- L'essai de tension à  $45^\circ$ , appelé Bais-test. [8]

Le Bais-test est une des expérimentations existantes permettant de caractériser le comportement du tissu en cisaillement. Il consiste à effectuer un essai de traction sur un renfort tissé. L'orientation entre la direction de sollicitation et l'orientation du réseau est de  $\pm 45^\circ$ .

Si le rapport de dimensions (correspondant au rapport entre la longueur et la largeur initiale de l'éprouvette) est au moins égal à 2, trois zones peuvent par conséquent être distinguées après déformation comme représenté sur la **Figure I-23** :

- Une zone en cisaillement pur (**Zone A**) : les deux directions de mèches sont libres (non maintenues par les mors). On parle de cisaillement pur du fait qu'il n'existe en théorie aucune tension des mèches dû à leur liberté.
- Une zone en demi-cisaillement (**Zone B**) : l'angle de cisaillement correspond à la moitié de l'angle de la zone en cisaillement pur. Une direction de mèche est maintenue par les mors, l'autre reste libre.
- Une zone sans cisaillement (**Zone C**) : les deux directions de mèches sont maintenues par les mors, empêchant toute déformation. [8]



**Figure I-24 : comportement théorique d'un essai de cisaillement. Etat initial(a) et déformé (b)**

En se basant sur la géométrie déformée de l'éprouvette, dans la zone de cisaillement pur, l'angle de cisaillement peut être calculé analytiquement par l'équation (2)

$$\gamma = \frac{\pi}{2} - 2rccos \frac{D+d}{\sqrt{2D}} \quad (2)$$

Avec D et d sont respectivement la longueur de diagonale de la zone A et le déplacement de mors mobile de la machine de traction. [8]

### **Essai de cadre**

Le principe de l'essai de cadre (Figure 2.11) est d'imposer une cinématique de cisaillement pur sur l'ensemble de l'éprouvette. Pour ce faire, un cadre rigide constitué de quatre côtés de même longueur assemblés par des liaisons pivots à leurs extrémités est utilisé.

Une éprouvette carrée (moins éventuellement quelques mèches latérales) est fixée au cadre par des talons, les mèches étant parallèles aux bords du cadre. Le cadre est ensuite fixé à une machine de traction par deux de ses coins diagonalement opposés. [.]

Comme pour le Bais-test, l'angle de cisaillement peut être calculé via l'équation 3

$$\gamma = \frac{\pi}{2} - 2rccos \frac{\sqrt{2+d}}{2L} \quad (3)$$

## ***Chapitre I généralité sur les matériaux composites et le moulage en sable***

### **I.I.13 Les défauts lors du préformage :**

Lors du préformage le tisse est soumis à des sollicitation qui peuvent conduire à l'apparition de plusieurs types de défauts sur les renforts tels que :

- Des plis (déformation hors plan du renfort) ;
- De la décohésion ;
- Une ondulation ou un désalignement des mèches dans le plan du renfort ;
- La rupture de fibres ou de mèches ;
- Des boucles, correspondant à un flambement local des mèches lorsque leur courbure est trop prononcée
- Glissement des mèches [12]

### **I.I.14 L'influence des paramètres sur les préformes :**

La mise en forme des renforts fibreux est un procédé complexe à mettre en œuvre car la qualité de la pièce finale est fortement influencée à la fois par les paramètres matière et procédé. Ces paramètres sont multiples et sont, à un certain degré, maîtrisable

#### **➤ Matière**

- Armure du renfort (taffetas, satin, sergé)
- Architecture des mèches (ruban, torsadées,)
- Dimensions des mèches (épaisseur, largeur)
- Composition des mèches (100%, comêlé, traitements)
- Masse linéique (nombre de tex), surfacique
- Caractéristiques mécaniques de la mèche (tension, cisaillement,)
- Equilibrage et taux d'embuvage du renfort

#### **➤ Procédé :**

- Orientation des fibres par rapport au poinçon
- Géométrie du poinçon (courbes, arêtes, points triples, ...)
- Dimensions du poinçon (mm, cm, m)
- Vitesse d'emboutissage
- Pressions des serre-flans (uniforme ou non)
- Profondeur de préformage

## Chapitre I généralité sur les matériaux composites et le moulage en sable

- Positions, dimensions et géométrie des serres-flan
- Forme initiale du flan [11]

### I.2 Généralité sur le moulage en sable :

#### I.2.1 Définition de moulage :

Le moulage est l'action de prendre une empreinte qui servira ensuite de moule dans lequel sera placé un matériau et qui permettra le tirage ou la production en plusieurs exemplaires d'un modèle. Le moulage consiste donc à placer un matériau (liquide, pâte, poudre, feuille, plaque, paraison, préforme, pastille, etc.) dans un moule dont il prendra la forme. On a plusieurs types de moulage :

- Moulage en sable.
- Moulage métallique ou moulage permanent.
- Procédés spéciaux de moulage. [13]

#### I.2.2 Moulage en sable :

Le moulage en sable consiste à réaliser une empreinte dans un matériau plastique - du sable - à partir d'un modèle aux formes de la pièce. Deux châssis métalliques, parfaitement repérés entre eux, servent à maintenir le sable utilisé pour prendre l'empreinte du modèle. [13]

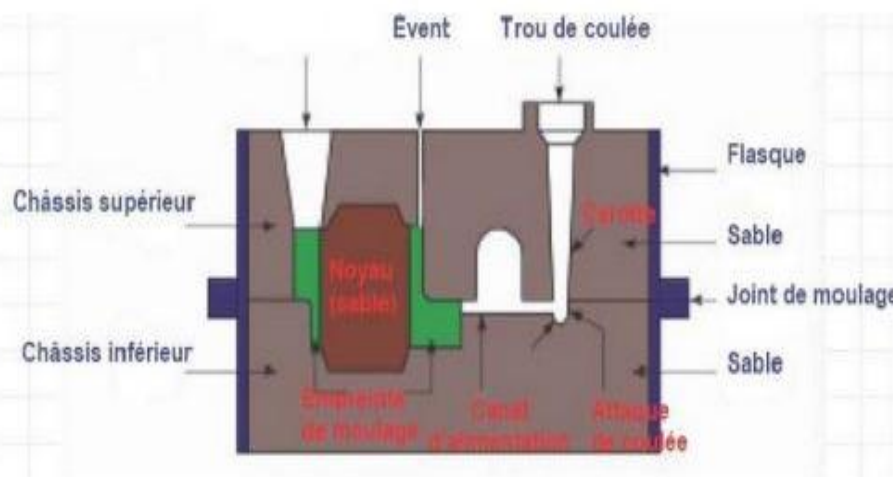


Figure I- moulage

25 : Le en sable

## *Chapitre I généralité sur les matériaux composites et le moulage en sable*

### **I.2.3 Le moule :**

Le moule en sable, est réalisé à partir de l'outillage décrit. Il se compose d'un fond de moule, d'un dessus de moule, et suivant les cas, d'un ou plusieurs noyaux. Si l'outillage de fonderie (le modèle) est permanent, il n'en est pas de même du moule qui sera cassé pour en extraire la pièce réalisée. On fabriquera donc autant de moules que de pièces à produire.

La technique du sable à prise chimique permet plus de précision que le sable noir et donne un meilleur aspect de peau de pièce. On peut obtenir, avec ce procédé, des toiles beaucoup plus fines. Elle s'applique principalement aux modèles montés en caissons et peut être aussi utilisée pour certains modèles nature en bois ou en résine ainsi que pour les modèles en stéréo lithographie et en polystyrène qui, eux, ne sont pas moulables au sable noir. Il s'agit, cette fois, d'un sable siliceux, tamisé, lavé et séché. [13]

### **I.2.4 Principe du moulage en sable : Deux types de sable peuvent être utilisés:**

#### **I.2.4.1 Moulage au sable Silico-argileux dit sable noir ou « sable vert »:**

Elle s'applique principalement aux modèles montés sur plaques et peut être aussi utilisée pour les modèles nature, en bois ou en résine. Le sable est principalement composé de silice cristallisée sous forme de quartz et d'argile sous la forme de bentonite, il est directement réutilisable après avoir été convenablement humidifié, aéré et tamisé. L'argile humidifiée sert de liant entre les grains de silice de granulométrie bien précise, par enrobage de ces grains. Il est de couleur brun-jaune lorsqu'il est neuf, mais il se colore très rapidement en noir au contact du métal chaud, d'où l'appellation de sable noir. Les deux parties principales du moule, le fond et le dessus, sont maintenues par des châssis, généralement en aluminium, qui comportent des douilles de centrage dans lesquelles on introduit des broches afin d'assurer le positionnement des deux demi moules. [ 13]

#### **I.2.4.2 Moulage au sable à prise chimique :**

-Le fondeur prépare la partie inférieure du moule : le demi modèle est recouvert de sable.

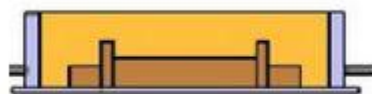


Figure I-26 : la partie inférieure du moule

## *Chapitre I généralité sur les matériaux composites et le moulage en sable*

-Pour la partie supérieure du moule, le fondeur positionne la deuxième partie du modèle sur la première. Il ajoute le modèle du chenal décollé puis remplit le châssis avec du sable

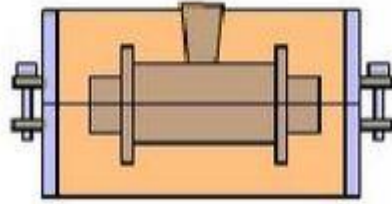


Figure I-27 : Le moule

-Le fondeur retire alors le demi-modèle, perce les événements et retouche les empreintes si cela est nécessaire

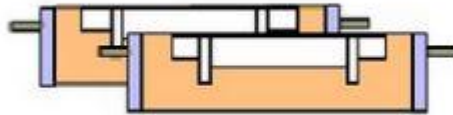


Figure I-28 : L'empreinte

-Le noyau est placé sur ses portées, puis le moule est refermé.

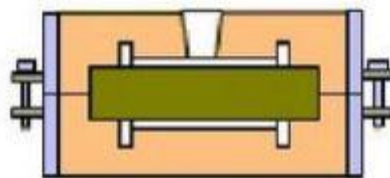


Figure I-29 : L'emplacement du noyau

-Le fondeur procède alors à la coulée de l'alliage en fusion dans le moule.

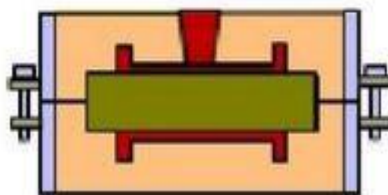


Figure I-30 : L'alliage dans le moule

## ***Chapitre I généralité sur les matériaux composites et le moulage en sable***

Une fois la pièce refroidie (on laisse refroidir entre 5 et 15 minutes), le moule est détruit. La pièce est séparée par sciage de son dispositif de coulée et des évents, un meulage supprime les bavures. La pièce brute de fonderie est alors prête pour l'usinage de ses surfaces fonctionnelles.[13]

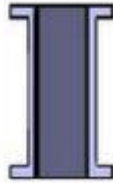


Figure I-31 : Pièce finie

### **I.2.5 Les différents types de sable**

- le sable auto-siccative (mélange de silice + huile siccative (tel que l'huile de lin)) qui durcit sous l'action de l'air
  
- le sable au silicate de soude qui durcit sous l'action du gaz carbonique (CO<sub>2</sub>) et peut être utilisé pour la confection des noyaux. Sa composition est généralement de :
  - 70 à 80% de silice => support
  - 5 à 15% d'argile => agglutinant
  - 7 à 10% d'eau
  - 3 à 5% d'impuretés (oxyde de fer, matières organiques, etc.)

Le fait de jouer sur ces pourcentages permet de faire varier les qualités demandées au sable. [13]

### **I.3.Conclusion :**

Les matériaux composites constituent une grande famille de matériaux dans laquelle les matériaux composites fibreux nous intéressent. Dans les applications de haute technologie, les fibres sont continuées et assemblées en mèches. Celles-ci peuvent alors être tissées afin d'assurer une bonne cohésion au sein du renfort. Les propriétés de ce dernier dépendent alors des caractéristiques mécaniques des fibres ainsi que des caractéristiques géométriques de sa

## ***Chapitre I généralité sur les matériaux composites et le moulage en sable***

structure. Lors de l'élaboration des pièces structurales complexes, le renfort est tout d'abord mis en forme avant que sa structure soit figée grâce à une matrice.



**CHAPITRE II :**  
**Conception et réalisation**

## II. Introduction

Dans ce chapitre nous allons développer une étude de conception assistée par ordinateur à l'aide de SOLIDWORKS. Ce dernier nous permet de réaliser des prototypes de poinçons de différents géométrie, nous avons aussi effectué une conception d'un banc d'essai d'emboutissage en profondeur tout en prenant en compte l'ensemble des éléments ce banc d'essai.

L'impression 3D des modèles de poinçons était faites afin de réaliser leurs empreintes lors du moulage en sable, puis les produits obtenus ont été usiner et rectifier pour en avoir un état de surface convenable et réaliser un porte poinçon.

### II.1 Présentation de SOLIDWORKS

SolidWorks est un logiciel de conception assisté par ordinateur (CAO), appartenant à la société **Dassault systèmes**. Il utilise le principe de conception paramétrique et génère trois types de fichiers qui sont liés comme suit : la pièce, l'assemblage et la mise en plan.

SolidWorks permet de réaliser la conception 3D de pièces en différents prototypes, Ce logiciel de CAO est réputé pour sa simplicité d'utilisation

Le logiciel SolidWorks permet de :

- Concevoir des objets en 3D de manière très précise
- Vérifier la conception d'un produit
- Mettre en place des mises en plan 2D
- Créer des images et animations de vos objets 3D
- Estimer le cout de la fabrication de vos objets 3D
- Développer des produits [13]

II.1.1 Les éléments de banc d'essai :

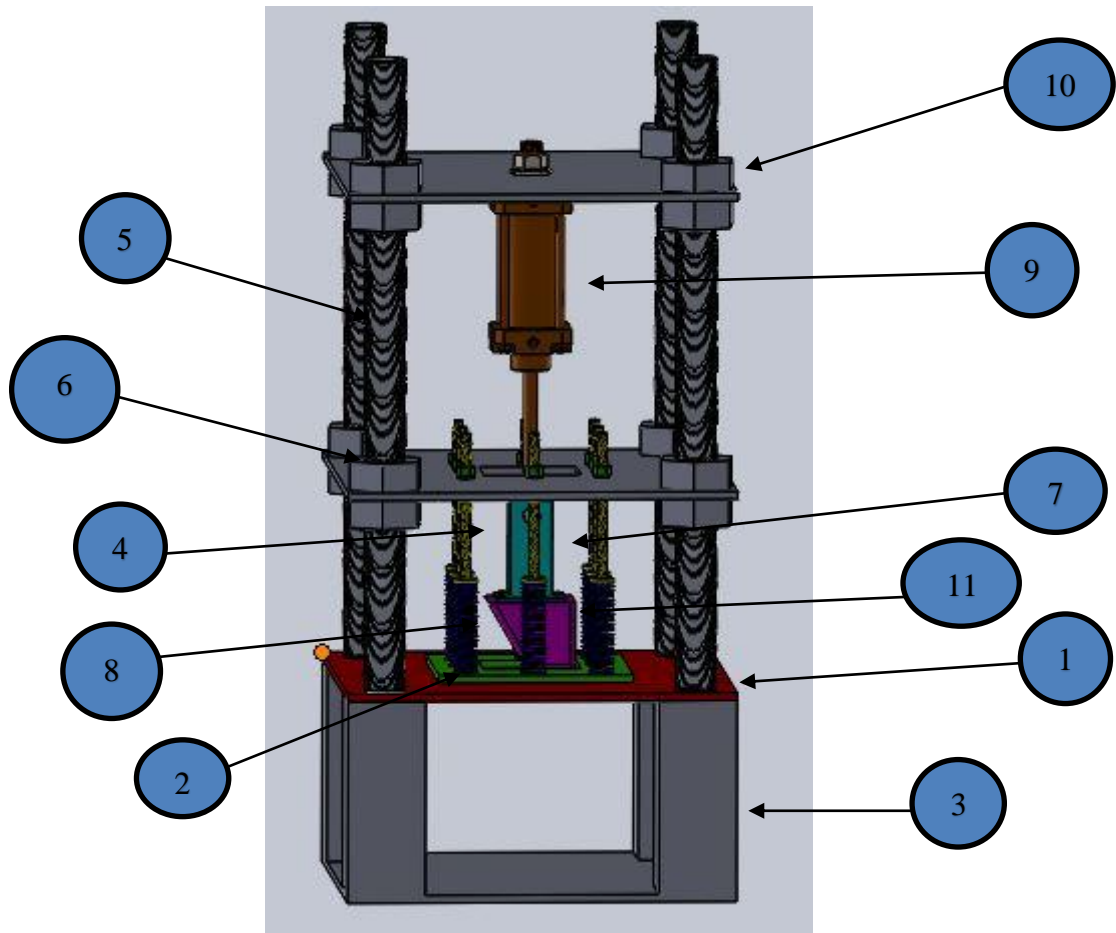


Figure II-1 : banc d'essai d'emboutissage en profondeur

- |                      |                        |
|----------------------|------------------------|
| 1 – matrice          | 8 – ressort            |
| 2 - serre flan       | 9 - vérin électrique   |
| 3 – la base          | 10 – écrou de fixation |
| 4 – tige de pression | 11 – poinçon           |
| 5 – tige de guidage  |                        |
| 6 - plaque support   |                        |
| 7 - porte-poinçon    |                        |

II.1.2 Conception des pièces:

En premier lieu, nous avons utilisé les commandes du logiciel SolidWorks tel que : esquisse, fonctions pour concevoir les différentes pièces du banc d'essais. Parmi les pièces les plus importante nous avons :

1/Matrice

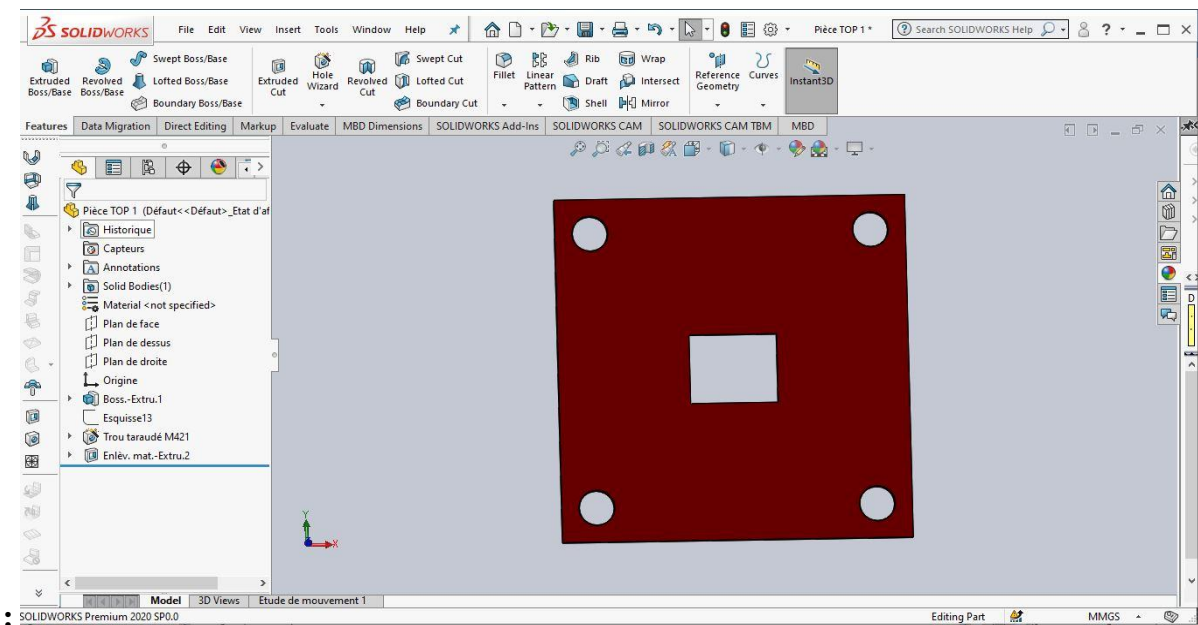


Figure II-2 : matrice

2/Serre flan :

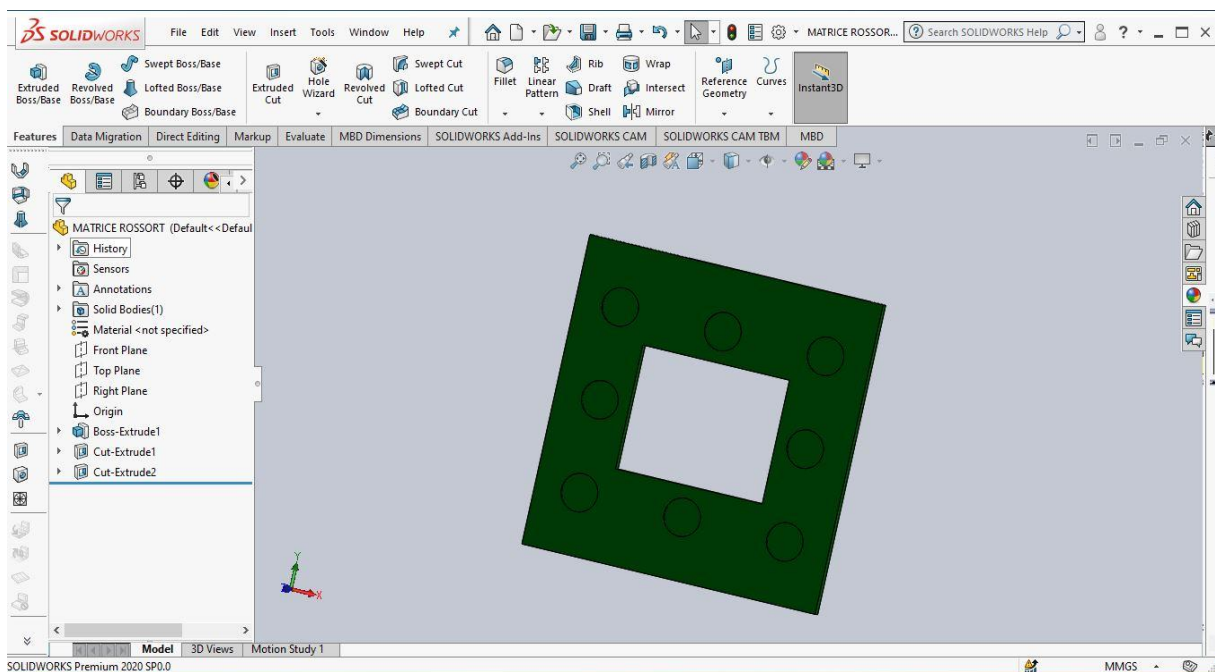


Figure II-3 : serre flan

## 3/La base :

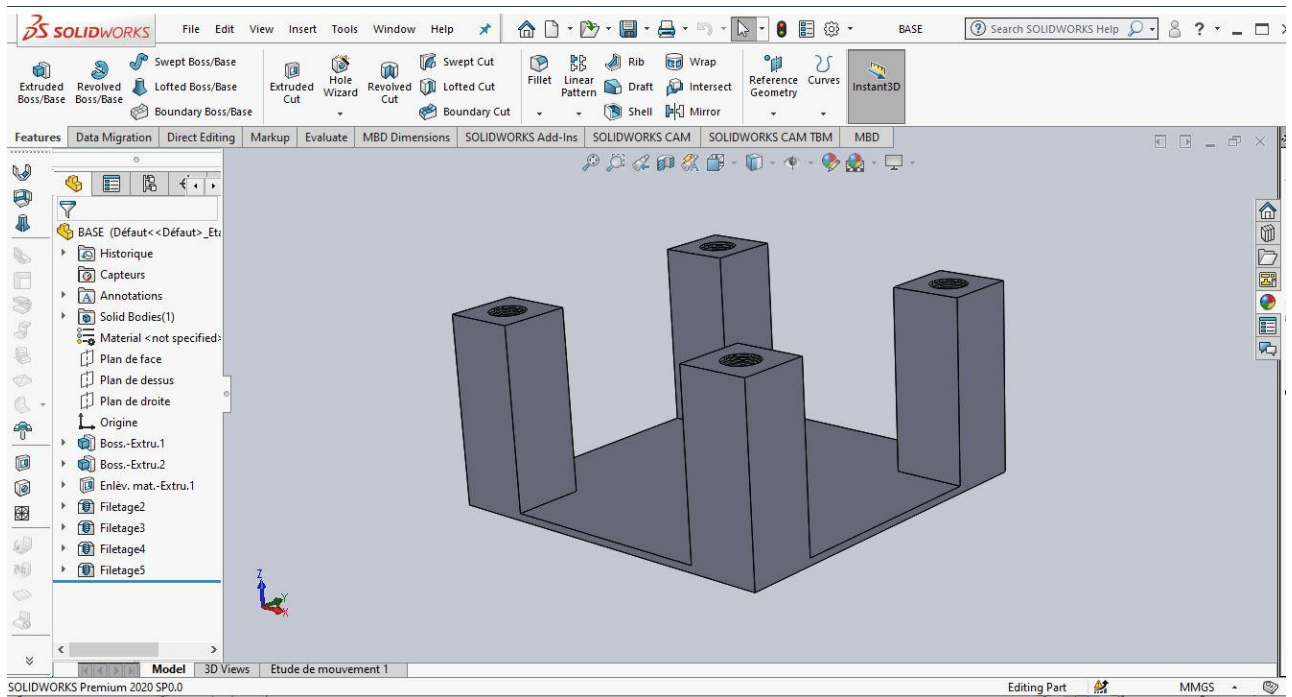


Figure II-4 : La base

## 4/La tige de pression

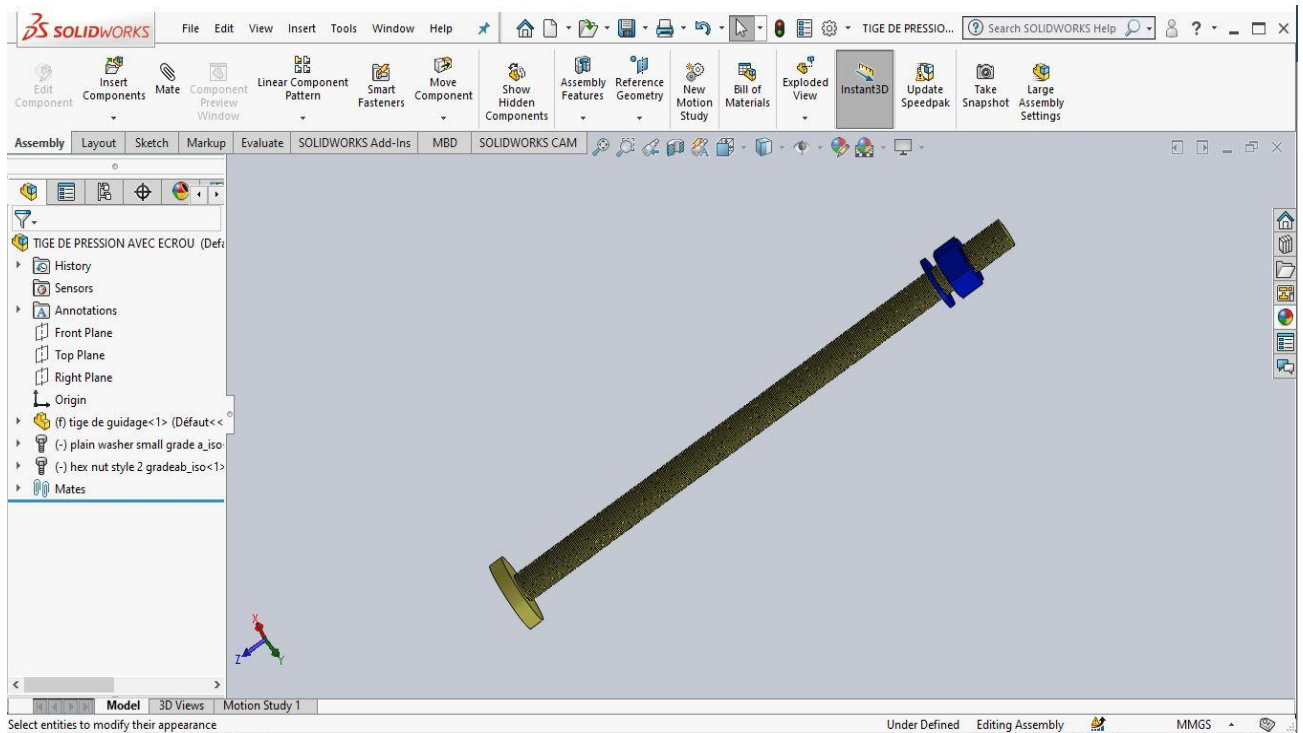


Figure II-5 : La tige de pression

5/La tige de guidage

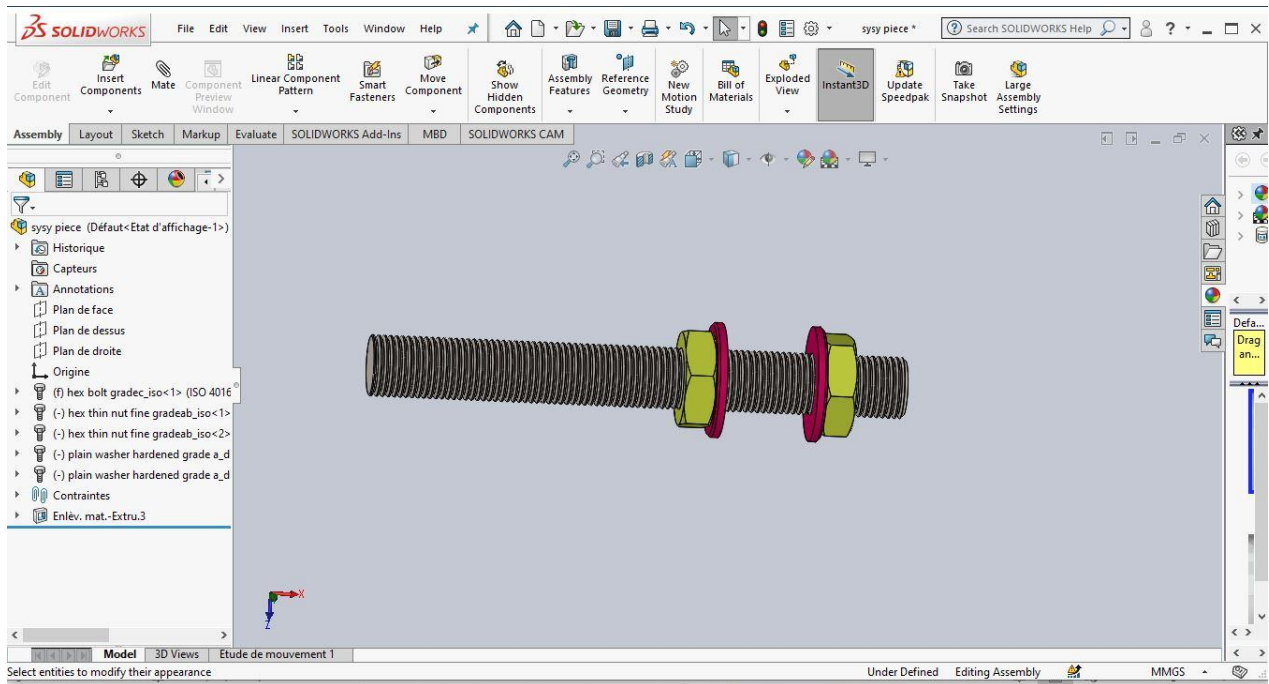


Figure II-6 : La tige de guidage

6/Plaque support

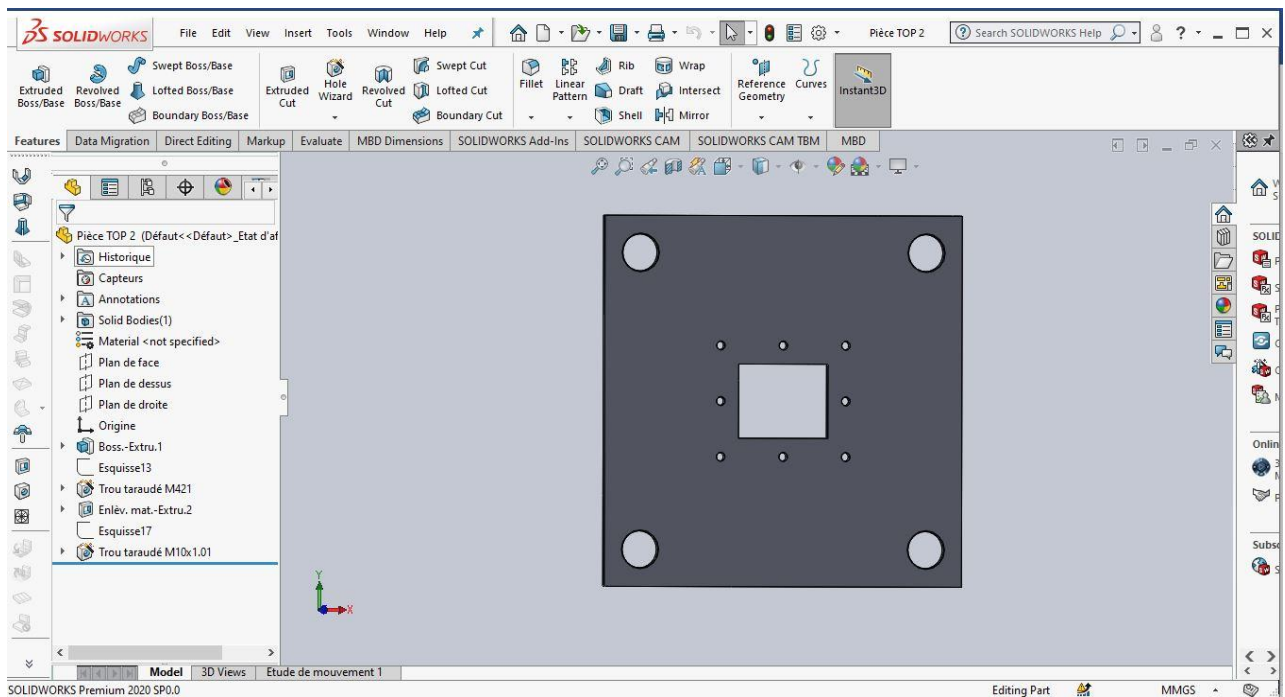


Figure II-7 : Plaque support

## 7/ Porte poinçon :

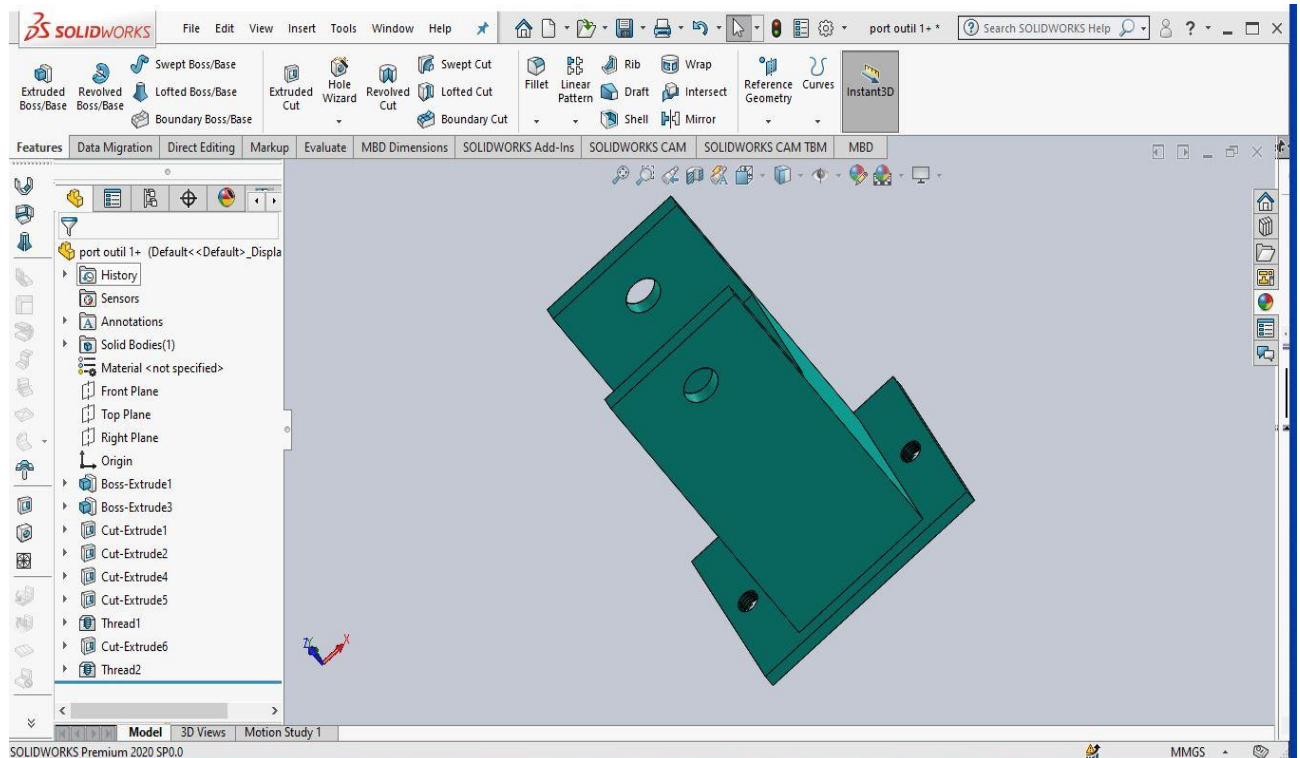


Figure II-8 : Porte poinçon

### II.1.3 Assemblage des pièces :

L'utilisation de la commande assemblage nous a permis d'effectuer le montage de toutes les pièces, en formant l'outil complet et la détection des interférences qui peuvent exister entre les pièces assemblées, le poinçon et la matrice au complet

### Vérin + porte-poinçon + poinçon :

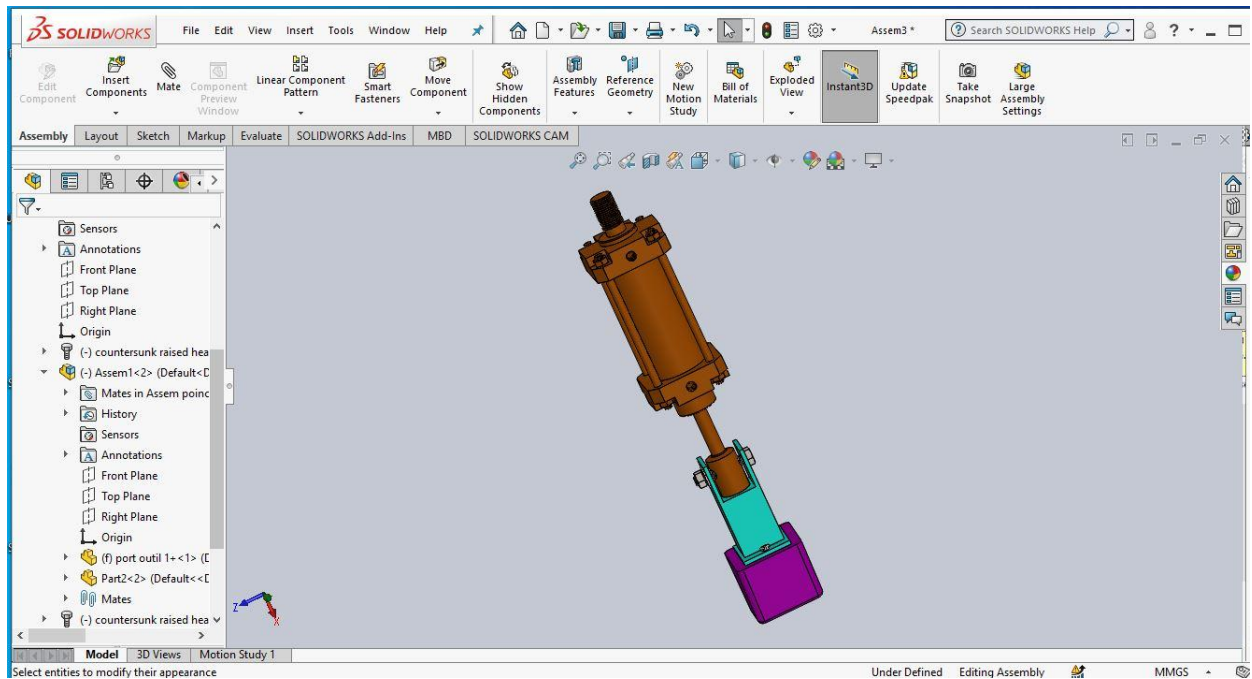


Figure II-9 : Vérin + porte-poinçon + poinçon

Matrice + serre-flan + tige de pression :

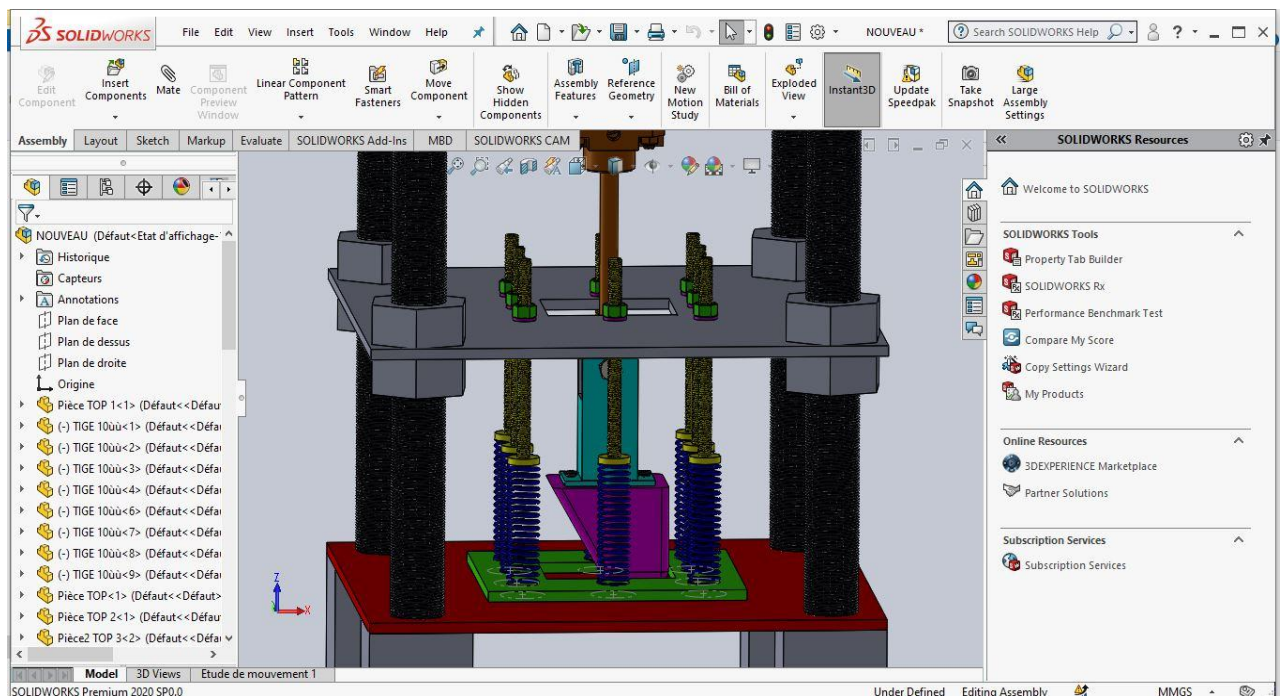
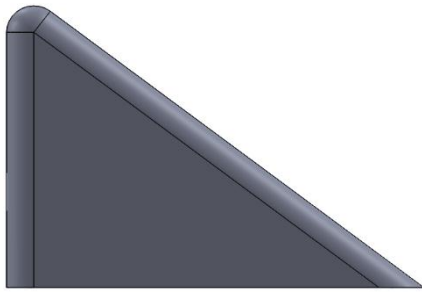


Figure II-10 : Matrice + serre-flan + tige de pression

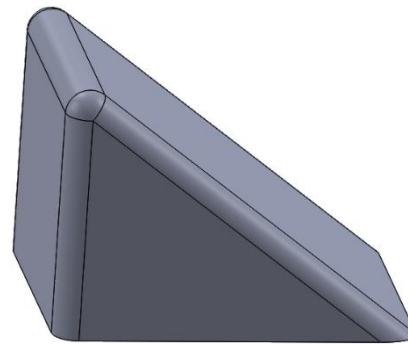
II.2 Les poinçons :

Les sept (07) poinçons présentant des angles (90; 75; 60; 45) et des surfaces d'attaque et arrêtes différente Figure II-12

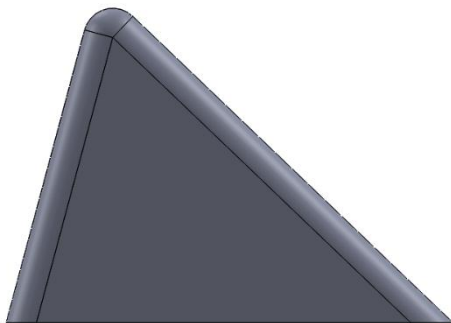
Ils peuvent être considérés comme de types ayant une géométrie complexe. La complexité vient du fait que ces géométries imposent au renfort des modifications conséquentes d'orientation dues aux courbures induites par les différentes arrêtes. Les points triples (points de jonction de trois arrêtes) génèrent également des difficultés sur la mise en forme du renfort.



90° A



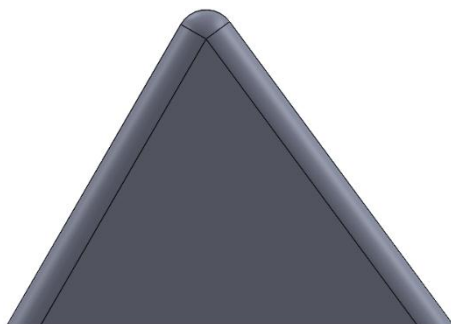
90° V



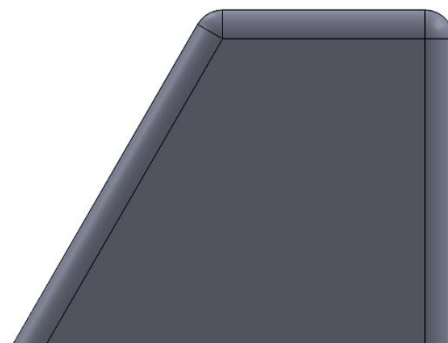
75° A



75° S



60° A



60° S

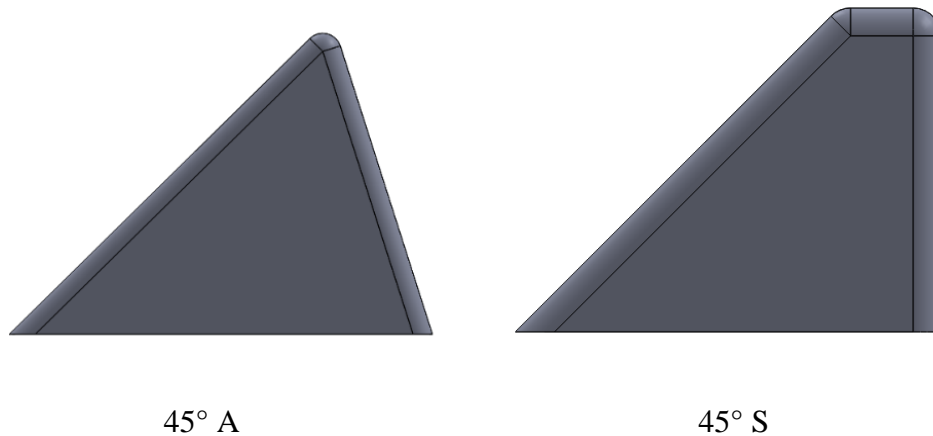


Figure II-11 : Les Poinçons

Après avoir mené à terme notre conception, nous passons à la réalisation d’empreintes pour le moulage en sable, ces dernières ont été faites par impression 3D.

## II.2.1 Impression 3D des modèles de poinçons :

### II.2.1.1 Définition:

L’impression tridimensionnelle ou bien la fabrication additive – plus couramment appelée impression 3D, est définie comme étant le procédé de mise en forme d’une pièce par ajout de matière, à l’opposé de la mise en forme traditionnelle par enlèvement de matière (usinage).

La fabrication additive était à l’origine réservée au prototypage et donc à la partie pré-production du cycle de vie d’un produit. Actuellement elle est aussi dans la phase de production d’un produit. Ce procédé s’insère également dans la phase post-production du cycle de vie d’un produit. En effet, elle peut être utilisée pour réparer des pièces endommagées ou bien pour remplacer les pièces anciennes dont la production en série est terminée qui n’existe plus en stock. Cependant elle présente la limite de se révéler beaucoup moins productive que l’usinage traditionnel et se limite donc aux productions de pièces en petites et moyennes séries. [14]

### II.2.1.1 Fonctionnement d’une imprimante 3D

La première étape consiste à dessiner la forme souhaitée sur le logiciel de CAO (conception assistée par ordinateur) il existe un nombre important de logiciels sur le marché qui permettent de créer ces modèles 3D. Les plans sont ensuite transmis à l’imprimante. En deuxième étape, l’imprimante traite cette modélisation 3D conformément à la logique de

fabrication additive : c'est-à-dire découper le modèle 3D en couches 2D grâce à un logiciel approprié autour de ces deux grandes fonctions, d'autres logiciels et matériels électroniques sont intégrés notamment pour assurer la communication entre l'imprimante et les ordinateurs.

L'imprimante 3D reçoit donc une série d'instructions qu'elle va restituer en objets 3D. plusieurs technologies existent pour passer de couches 2D à un objet 3D. deux grands types de procédés sont en fait utilisés pour former les objets :

- Soit la matière travaillée peut entrer en fusion et dans ce cas, elle peut être fondue peu à peu pour obtenir la forme souhaitée. (Exemple : polymère)
- Soit la matière peut être solidifiée sous l'action de la chaleur ou de la lumière (laser). (Exemples : résine ou alliage de titane)

Mais dans les deux cas, l'imprimante 3D « pense » couche par couche pour obtenir la forme 3D. chacune de ces méthodes implique des qualités propres qui jouent sur la durée nécessaire à l'obtention de l'objet mais aussi sur leur taille limite [15]

### **II.2.1.3 Imprimante 3D de type Zortrax M200 plus**

L'imprimante 3D professionnelle "Zortrax M200 Plus" figure utilisé durant notre étude a été fabriquée par la société polonaise Zortrax qui fournit des solutions complètes pour l'impression 3D. pour fabriquer des objets l'imprimante "Zortrax M200 Plus " fait passer le filament à travers la buse d'impression. Le matériau est alors projeté via la buse d'impression sous la forme d'une fine chaîne de matière fondue. Le mouvement de la buse d'impression est coordonné par la plaque d'impression qui s'abaisse progressivement à mesure que chaque couche se dépose, de sorte à ce qu'une nouvelle couche recouvre la précédente jusqu'à la fin de l'impression. [15]

### **II.2.1.4 Propriétés de l'imprimante Zortrax M200 Plus**

- Imprimante 3D à une seule tête d'impression.
- Technologie : LPD (dépôt de plastique par couche) / FFF.
- Taille d'objet : 200 x 200 x 180 mm
- Précision : 90-390 microns (pour une buse de 0,4 mm).
- Diamètre de la buse : 0,3mm, 0,4mm, 0,6mm.

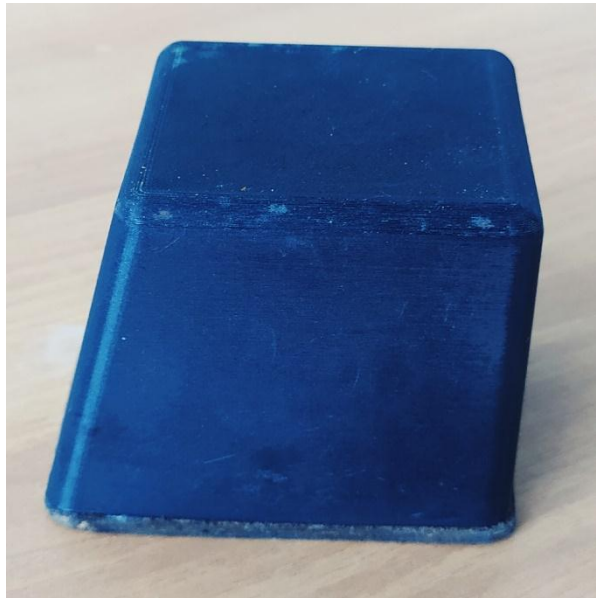
- Large palette de matériaux : (Z-NYLON, Z-FLEX, Z-PLA Pro, Z-PETG, Z-PCABS, Z-SEMIFLEX, Z-ultra, Z-HIPS, Z-VERRE, Z-ESD, Z-ASA Pro, Z-ABS)
- Ecran tactile intégré
- Connectivité : USB, RJ45, Wifi.
- Température d'impression maximale (extrudeuse) : 290°C
- Température maximale de la plateforme: 105°C
- Caméra intégrée [15]

### II.2.1.5. Les modèles de poinçons :

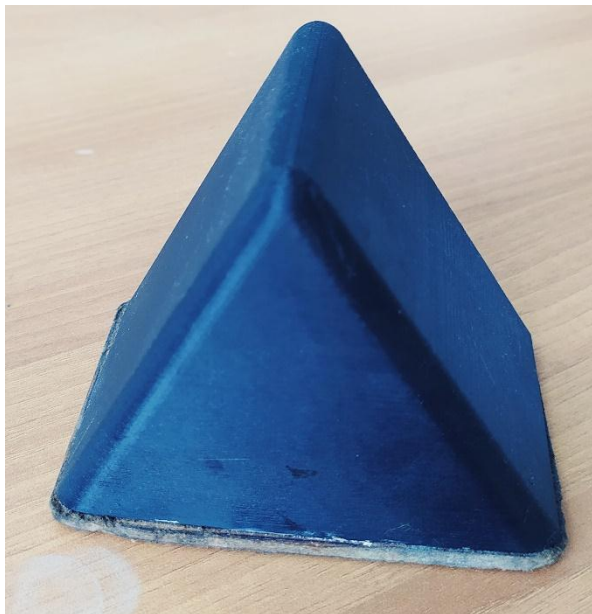




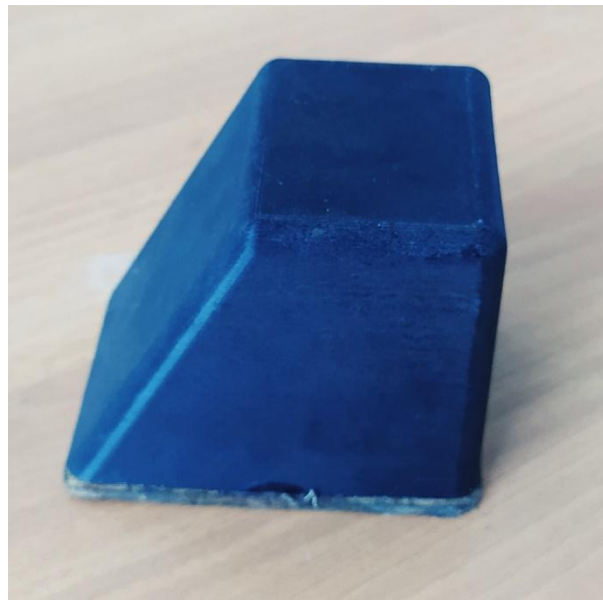
75A



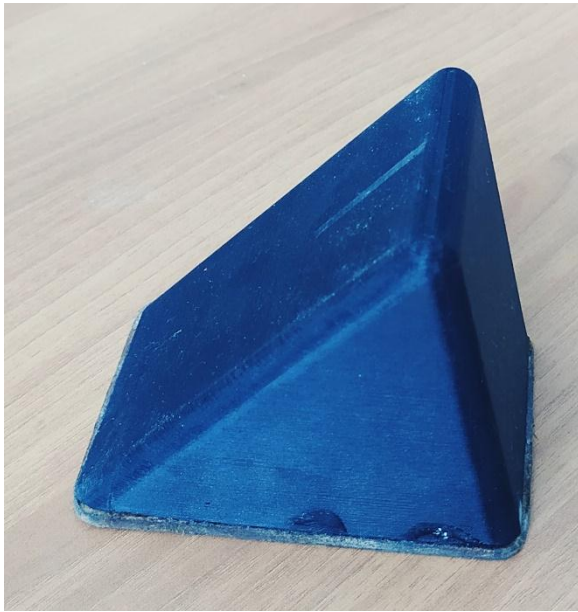
75S



60A



60S



45A



45S

Figure II-123 : Les modèles de poinçons

## II.2.2 Le moulage en sable :

### II.2.2.1 Préparation du sable rouge :

Le sable rouge ou la bauxite est un sable de couleur brune/rougeâtre. Le sable est broyé et tamisé, puis réaliser un mélange de 90% de sable et 10% de silicate de sodium Figure II-13

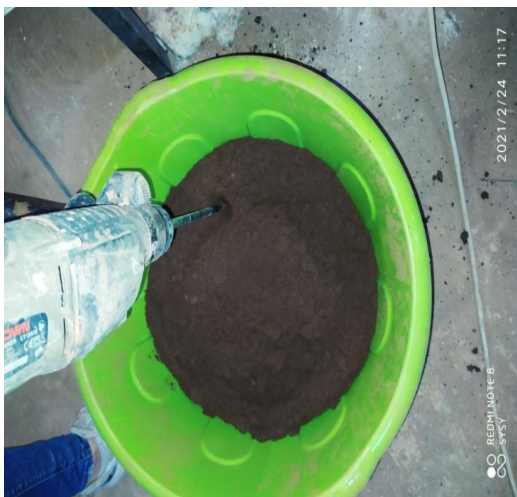


Figure II-14 : Préparation du sable rouge

II.2.2.2 Élaborations du moule :

Le châssis est rempli de ce mélange tamisé en contact avec la forme des poinçons, il doit être réparti d'une manière uniforme et est progressivement tassé à la main, puis compacter à l'aide d'un fouloir lorsque le niveau de sable dépasse la hauteur suffisante pour ne pas endommager le modèle. Afin d'obtenir une surface plane, le mélange est arasé à hauteur de châssis. Enfin, les empreintes sont retirées pour passer à la coulée après avoir durci ce dernier à l'aide d'un gaz CO<sub>2</sub>.



Figure II-15 étapes de préparation des empreintes

### II.2.2.3 La coulée :

Le moule est mis à proximité du four contenant l'alliage d'aluminium liquide avoisinant les 650 C°. La coulée doit être faite rapidement et en un seul geste ; puis démoulé après 24h fig



Figure II-16 la coulée

Une fois les poinçons démoulés, nous les avons amenés au niveau du hall de technologie Oued Aissi, dans le but d'améliorer l'état de surface (ébavurage, surfacage, polissage) ; nous avons réalisé deux perçages, puis taraudages pour chaque poinçon pour qu'il puisse être fixé aux porte poinçon.

### II.2.3 Usinage

#### II.2.3.1 Réalisation d'un porte poinçon

Les figures suivantes illustrent les différentes étapes de la réalisation d'un porte poinçon :



Figure II-17 découpage de brut



Figure II-18 l'usinage



Figure II-19 perçage

II.2.3.2 Surfaçage et perçage des poinçons

Les figures citées ci-dessous montrent les différentes étapes de surfaçage et perçage des poinçons :

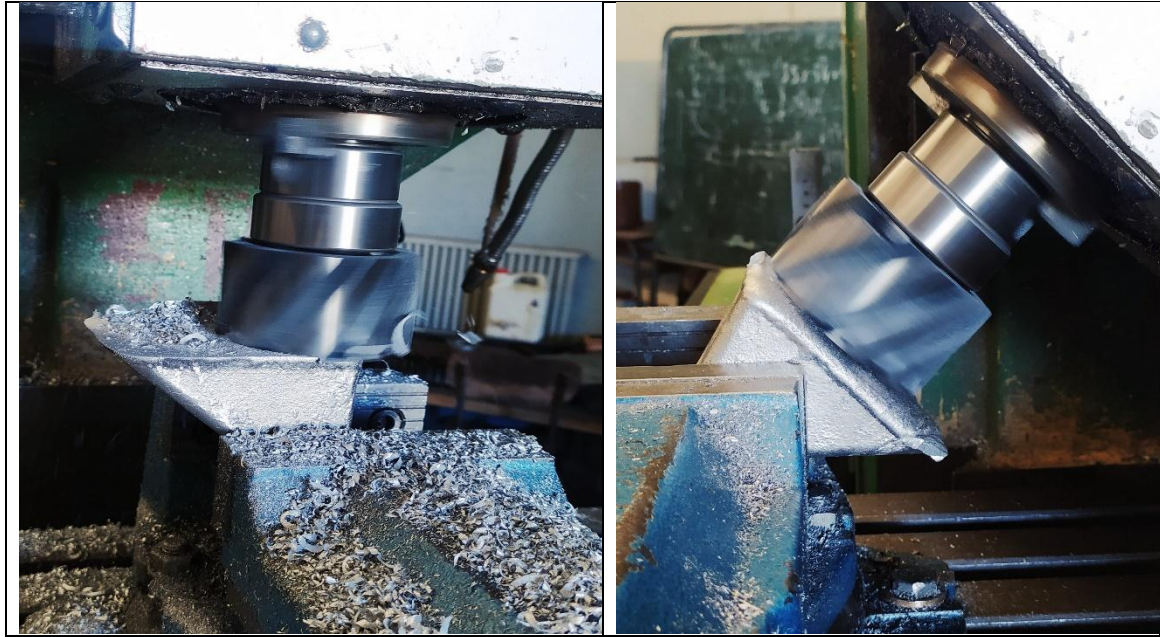


Figure II-20 surfaçage



Figure II-21 : enlèvement de pauvre

Les images suivantes (II-22) génèrent les poinçons à l'état final prêt pour entamer nos essais expérimentaux :

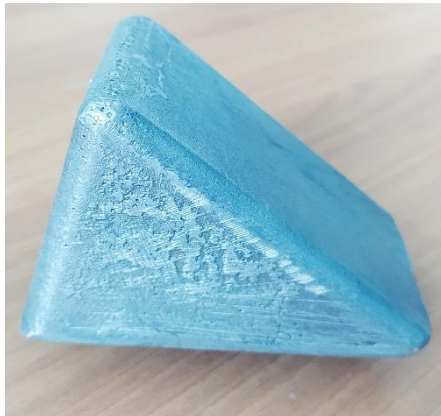
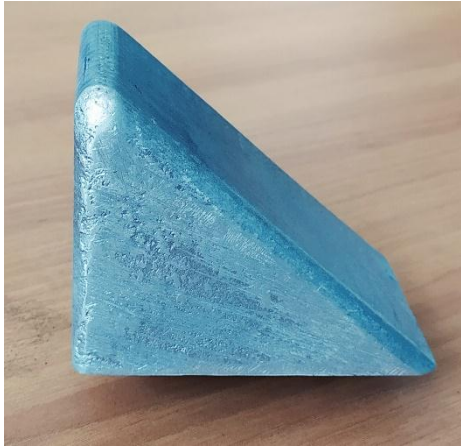




Figure II-22 : les poinçons a l'état final

### II Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la conceptions d'un banc d'essais d'emboutissage. Nous avons aussi conçu et réalisé les différents outils en utilisant l'impression 3D et le moulage en sable ; dans le chapitre suivant, nous donnons les résultats obtenus avec ce bac d'essais.



## **CHAPITRE III**

### **Essais d'emboutissage et l'interprétation des résultants**

## Chapitre III : Essais d'emboutissage et l'interprétation des résultants

### III.1 Introduction

Le chapitre III est dédié à l'approche expérimentale du préformage de renforts secs pour composite à base de fibres de verre armure taffetas nous avons utilisé un banc d'essais, disponible au laboratoire en utilisant des géométries complexes ainsi qu'en variant l'orientation du renfort, les pressions et la géométrie du poinçon. Ces paramètres de mise en forme vont influencer sur l'apparition des défauts qui seront par la suite exposés au cours de la discussion des résultats obtenus.

### III.2 Problématique :

Le préformage de renforts secs ne bénéficie pas d'un état de connaissances avancé comme c'est le cas pour l'emboutissage de tôles métalliques. En outre, la diversité des types de renforts (type de matériau, architecture de tissage) combinée à la complexité des mécanismes mis en jeu pendant l'étape de préformage dans ces matériaux multi-échelles et à forte anisotropie, qui sont encore mal maîtrisés ou non identifiés, ne permettent pas d'extrapoler les résultats du préformage d'une pièce à une autre. L'analyse de l'état des déformations aux échelles mésoscopique et, macroscopique et la caractérisation des défauts lors de la mise en forme, permet de fournir une base de données nécessaire pour la validation des simulations numériques. En effet, les codes de calcul permettent de réduire significativement les temps de développement du procédé de préformage, mais faut-il que leurs résultats soient fiables d'où la nécessité d'une validation avec l'expérimental.

### III.3 Préparation des éprouvettes:

Le renfort utilisé dans le cadre de ce travail est un tissu taffetas. Pour se faire, nous avons découpé en plusieurs échantillons de dimension (300X300mm<sup>2</sup>). Puis nous avons mis des points qui serviront comme repère pour la détermination des glissements et cisaillements.

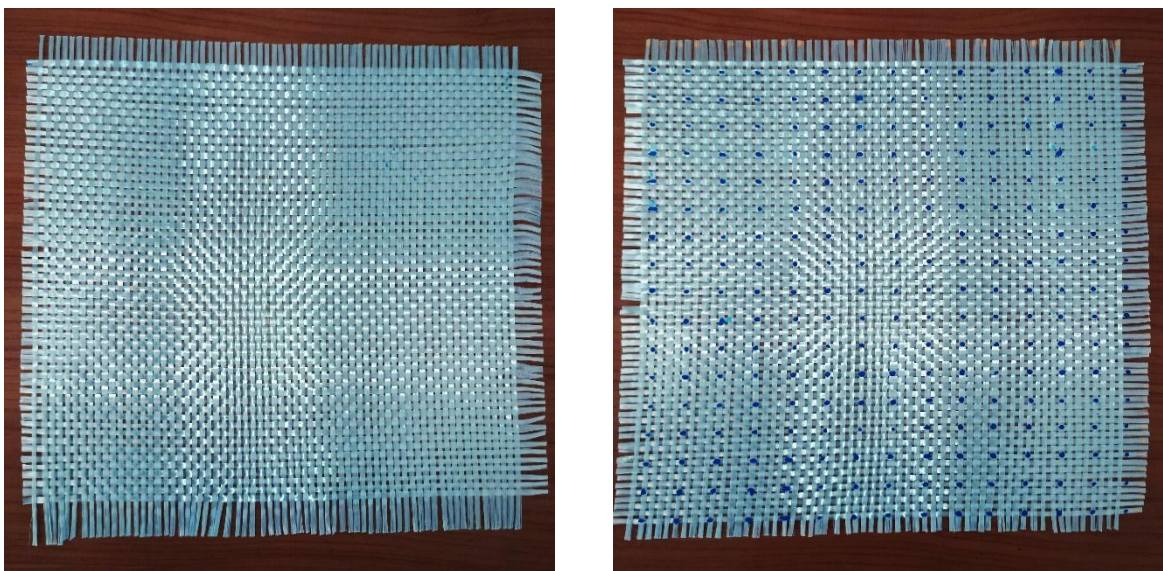


Figure II-14 :épreuves de Taffetas

## Chapitre III : Essais d'emboutissage et l'interprétation des résultants

### III.4 Description de l'essai :

L'échantillon de tissu est placé entre le serre-flan et la matrice auquel nous avons appliqué une pression 0.00051Mpa qui sert de maintien. Le vérin électrique relié au poinçon impose un déplacement de 70 mm avec une vitesse de 2,6 mm/s.

#### III.4.1 Les essais préliminaires :

Afin de déterminer la meilleure configuration (celle qui présente le moins de défauts), nous avons choisi de réaliser des essais en utilisant deux poinçons 75S et 75A avec la variation de deux paramètres procédé :

- Orientation du tissu par rapport la matrice :

0° degré ; 45° degré ; 60° degré ; 75° degré

- Répartition des charges sur le serre flan :

4 points de pressions

8 points de pressions

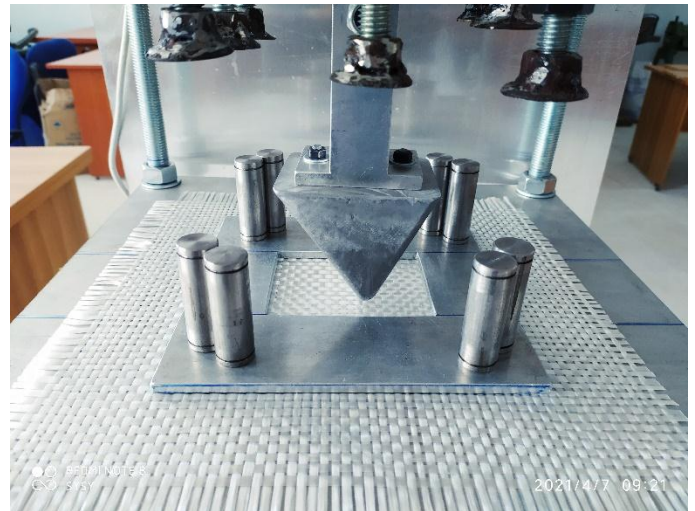


Figure II-15 : repartions des charges sur serre flan

Nous avons numéroté chaque surface par 1, 2, 3, 4 et 5 ainsi chaque arête par 1/2, 1/3, 1/4, 1/5, 2/3, 3/4, 4/5 et 5/2 pour pouvoir les identifier comme illustre la figure suivante:

## Chapitre III : Essais d'emboutissage et l'interprétation des résultants

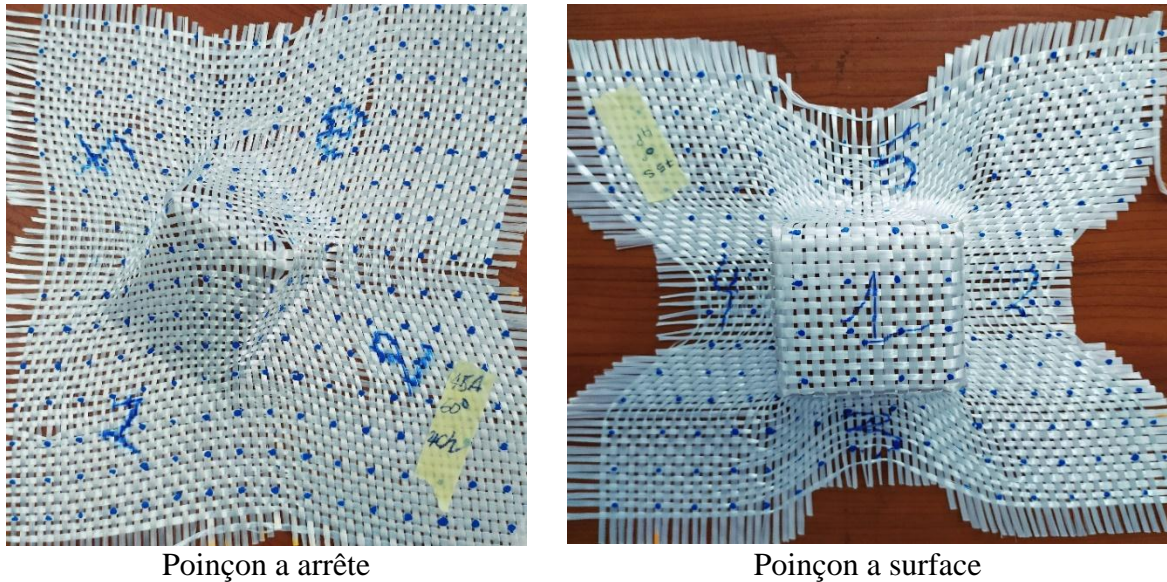


Figure II-16 : Distribution des surfaces

### III.4.1.1 Premières observations:

- Flambement sur les surfaces et arrêtes.
- Un autre phénomène observé lors du préformage se rapporte aux glissements entre les réseaux de mèche et/ou trames à différent endroit, particulièrement aux niveau des arrêtes, où un écartement des mèches laissant entrevoir une partie des arrêtes d'attaque.
- Des cisaillements sur les surfaces des poinçons.

D'après les résultats obtenus, que nous donnons en annexe sous forme de tableaux, nous avons choisi la meilleure configuration pour :

- Le 75S : orientation du tissu  $75^\circ$  et les charges reparties en 8 point
- Le 75A : orientation du tissu  $60^\circ$  les charges reparties en 4 point

Résultats en images citées ci-dessous :

### Chapitre III : Essais d'emboutissage et l'interprétation des résultants

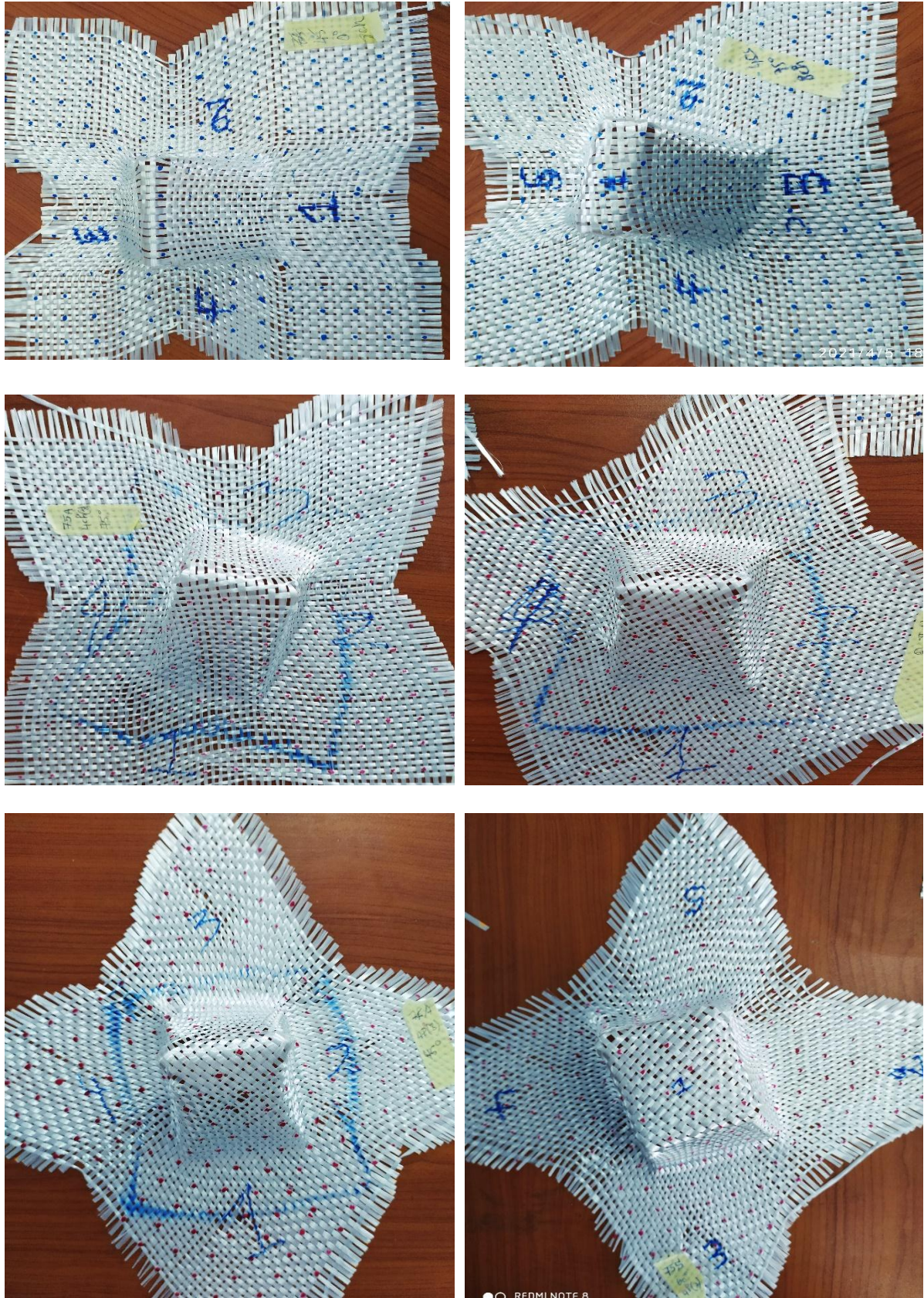


Figure II-17 : essais préliminaires

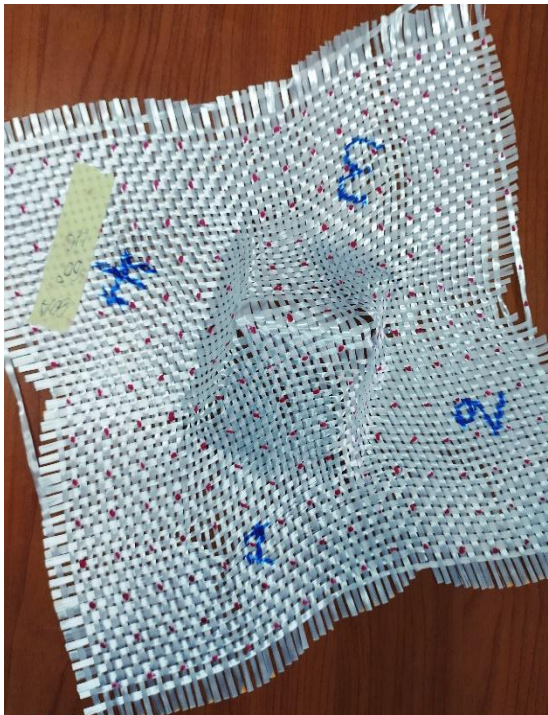
## Chapitre III : Essais d'emboutissage et l'interprétation des résultants

### III.5 Les meilleurs essais:

Après avoir choisi les meilleures configurations à partir des essais préliminaires, nous les avons par la suite appliqués sur les autres géométries des poinçons. Résultats en images citées ci-dessous :



90



75A

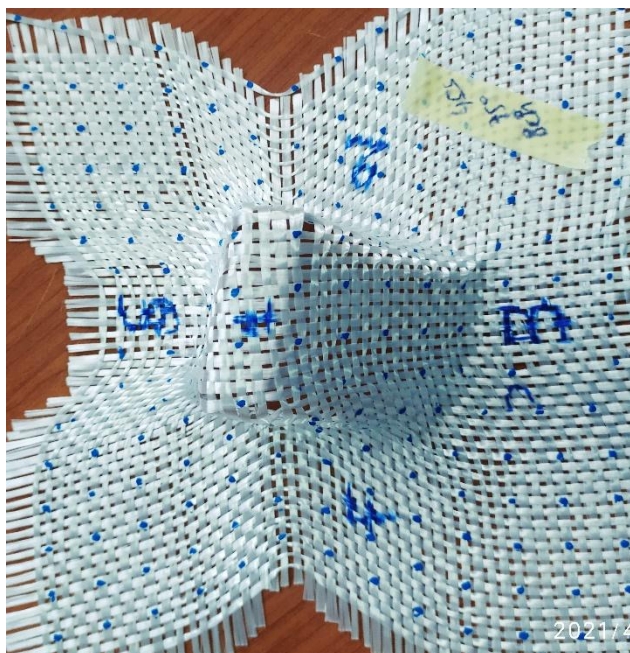


75S

### Chapitre III : Essais d'emboutissage et l'interprétation des résultants



60A



60S



45A



45S

Figure II-18 : les meilleurs résultants

## Chapitre III : Essais d'emboutissage et l'interprétation des résultants

### III.5.1 Les résultants:

Dans cette section, nous représentons les résultats obtenu sous forme de tableaux donnant les flambements, les valeurs des glissements et des angles de cisaillement pour chaque poinçon.

#### 1) Poinçons à surfaces :

Tableau II-1: résultats 75S

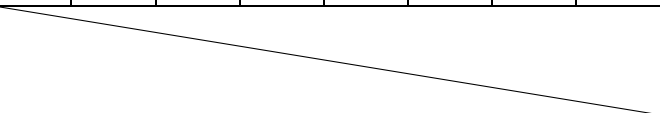
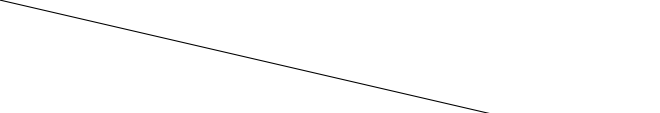
Poinçon 75S	Faces					arrêtes							
	1	2	3	4	5	1/2	1/3	1/4	1/5	2/3	3/4	4/5	5/2
Disposition des charges : 8 l'angle de position du tissu : 0°													
Glissement (mm)	4	8	2	3	3	23	22	38	19	16	20	30	25
Flambement	×	×	×	×	×								
L'angle de cisaillement en degré	5	8	3	30	8	/							
Disposition des charges : 8 l'angle de position du tissu : 75°													
Glissement (mm)	3	8	4	4	4	3	5	3	8	3	3	2	6
Flambement		×									×	×	×
L'angle de cisaillement en degré	10	10	24	43	0	/							

Tableau II-2: résultats 60s

Poinçon 60S	Faces					arrêtes							
	1	2	3	4	5	1/2	1/3	1/4	1/5	2/3	3/4	4/5	5/2
Disposition des charges : 8 l'angle de position du tissu : 0°													
Glissement (mm)	0	10	2	21	20	15	10	9	4	4	4	4	4
Flambement		×		×						×	×	×	×
L'angle de cisaillement en degré	3	8	32	5	13	/							
Disposition des charges : 8 l'angle de position du tissu : 75°													
Glissement (mm)	3	3	5	4	3	5	4	11	10	5	8	6	13
Flambement					×					×	×	×	×
L'angle de cisaillement en degré	10	28	43	13	22	/							



## Chapitre III : Essais d'emboutissage et l'interprétation des résultants

Tableau II-3: résultats 45S

Poinçon 45S	Faces					arrêtes							
	1	2	3	4	5	1/2	1/3	1/4	1/5	2/3	3/4	4/5	5/2
Disposition des charges : 8 l'angle de position du tissu : 0°													
Glissement (mm)	2	18	18	18	5	6	16	23	5	6	6	6	6
Flambement				×	×	×				×	×		
L'angle de cisaillement en degré	5	8	3	30	8								
4Disposition des charges : 8 l'angle de position du tissu : 75°													
Glissement (mm)	4	5	4	8	2	6	0	7	2	6	0	10	3
Flambement		×		×						×	×	×	
L'angle de cisaillement en degré	0	29	8	30	4								

### 2)Poinçons à arrête :

Tableau II-4: résultats 90

Poinçon 90	Faces				arrêtes				
	1	2	3	4	1/2	1/4	3/4	3/2	1/3
Disposition des charges : 8 l'angle de position du tissu : 0°									
Glissement (mm)	3	14	19	19	13	13	17	6	22
Flambement		×			×			×	
L'angle de cisaillement en degré	8	33	33	34					
Disposition des charges : 4 L'angle de position du tissu 60°									
Glissement (mm)	4	13	12	7					
Flambement		×		×		×	×		
L'angle de cisaillement en degré	25	33	26	26	22				

### Chapitre III : Essais d'emboutissage et l'interprétation des résultants

Tableau II-5: résultat 75A

Poinçon 75A	Faces				arrêtes				
	1	2	3	4	1/2	1/4	3/4	3/2	1/3
Disposition des charges : 8 l'angle de position du tissu : 0°									
Glissement (mm)	17	17	7	2	8	3	3	6	10
Flambement	×				×				×
L'angle de cisaillement en degré	6	24	2	5					
Disposition des charges : 4 L'angle de position du tissu 60°									
Glissement (mm)	4	6	10	12	10	6	18	20	4
Flambement			×					×	×
L'angle de cisaillement en degré	28	39	33	33					

Tableau II-6: résultats 60A

Poinçon 60A	Faces				arrêtes				
	1	2	3	4	1/2	1/4	3/4	3/2	1/3
Disposition des charges : 8 l'angle de position du tissu : 0°									
Glissement (mm)	7	26	10	22	13	8	12	8	15
Flambement			×			×		×	
L'angle de cisaillement en degré	20	39	15	27					
Disposition des charges : 4 l'angle de position du tissu : 60°									
Glissement (mm)	2	8	3	2	13	10	5	15	6
Flambement				×		×	×		
L'angle de cisaillement en degré	8	26	35	32					

## Chapitre III : Essais d'emboutissage et l'interprétation des résultants

Tableau II-7: résultats 45A

Poinçon 45A	Faces				arrêtes				
	1	2	3	4	1/3	1/4	3/4	3/2	1/3
Disposition des charges : 8 l'angle de position du tissu : 0°									
Glissement (mm)	7	36	14	15	20	12	10	10	20
Flambement	×			×			×		
L'angle de cisaillement en degré	2	21	2	35					
Disposition des charges : 4 l'angle de position du tissu : 60°									
Glissement (mm)	2	5	3	11	4	4	8	4	5
Flambement		×				×			×
L'angle de cisaillement en degré	14	35	40	35					

### III.5.2 Les graphes :

Dans cette section, nous représentons les résultats obtenu sous forme de graphe donnant les variations de l'angle de cisaillement et du glissement pour les différents outils.

#### 1) Poinçons à surfaces

##### 1.1) Cisaillement :

##### 1.1.1) Orientation 0° du tissu :

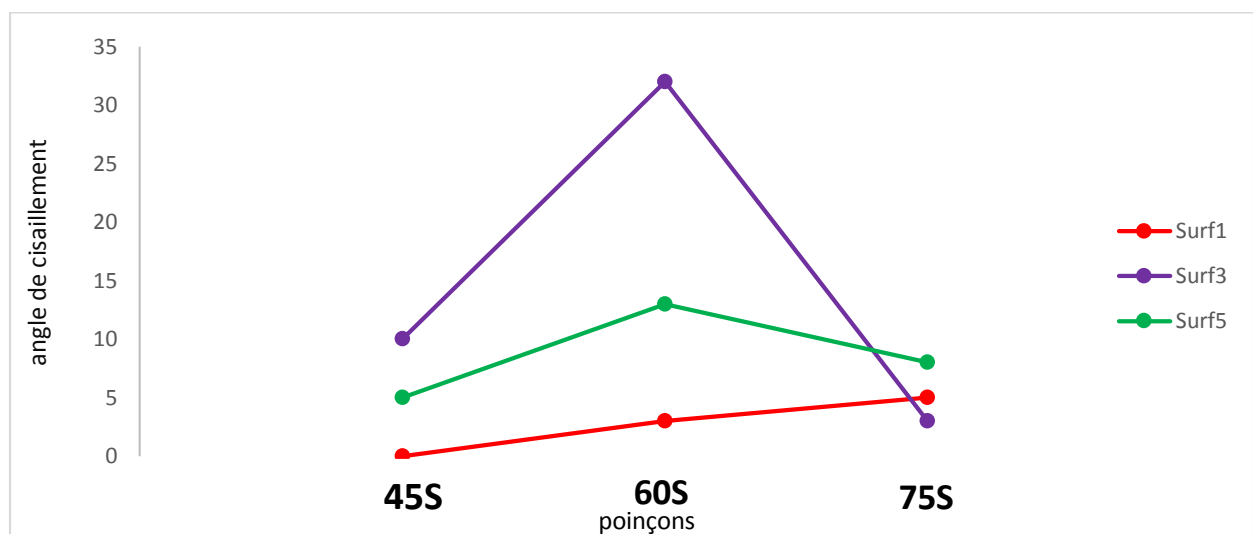


Figure II-19 : représente la variation de l'angle de cisaillement mesurée lors l'essai de préformage avec les outils 45S , 60S et 75S

# Chapitre III : Essais d'emboutissage et l'interprétation des résultants

## 1.1.2) Orientation 75° du tissu :

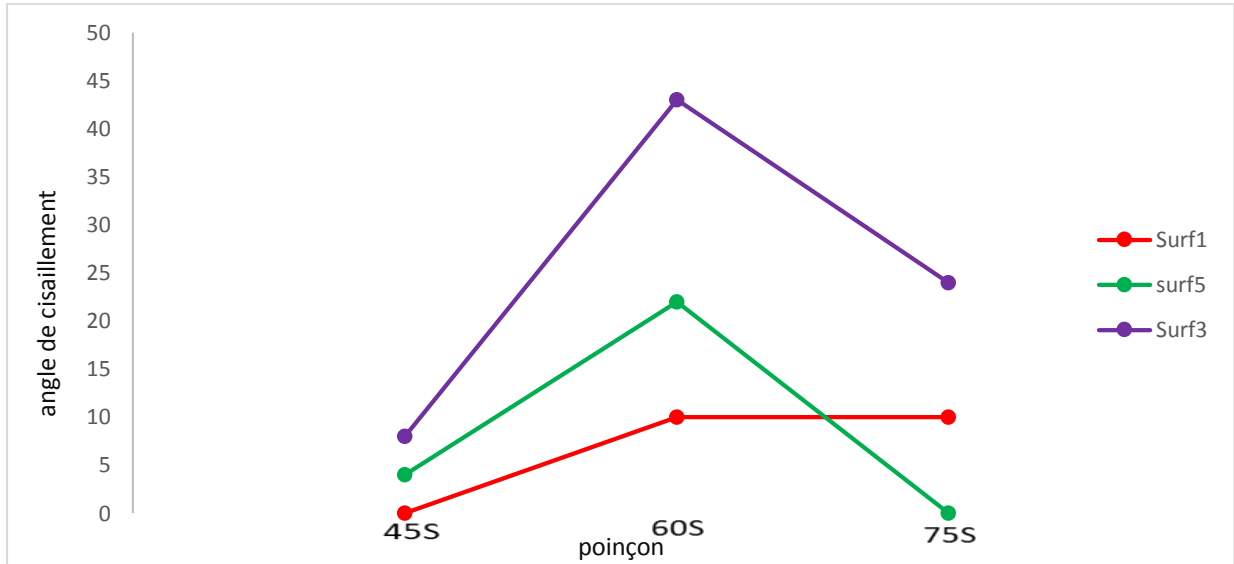


Figure II-20 : représente la variation de l'angle de cisaillement mesurée lors l'essai de préformage avec outil 45S , 60S et 75S

## 1.1) Glissement

### 1.2.1) Orientation 0° du tissu

#### a) les Surfaces :

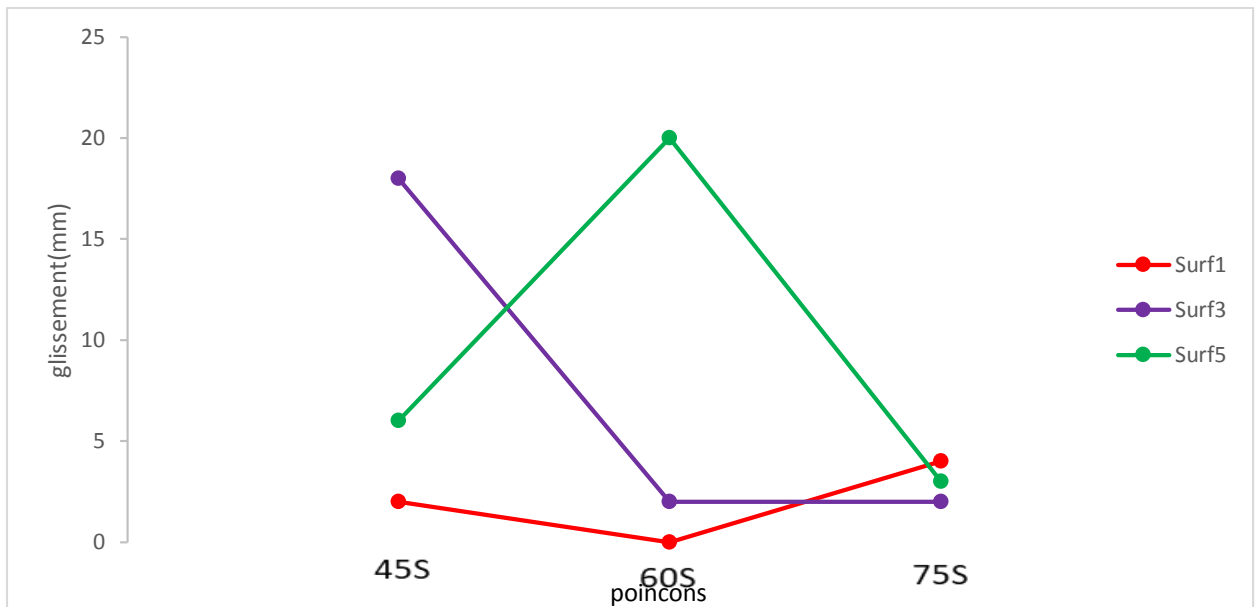


Figure II-21 : représente la variation du glissement mesurée lors l'essai de préformage avec les outils 45S , 60S et 75S

## Chapitre III : Essais d'emboutissage et l'interprétation des résultants

### b) les Arrêtes :

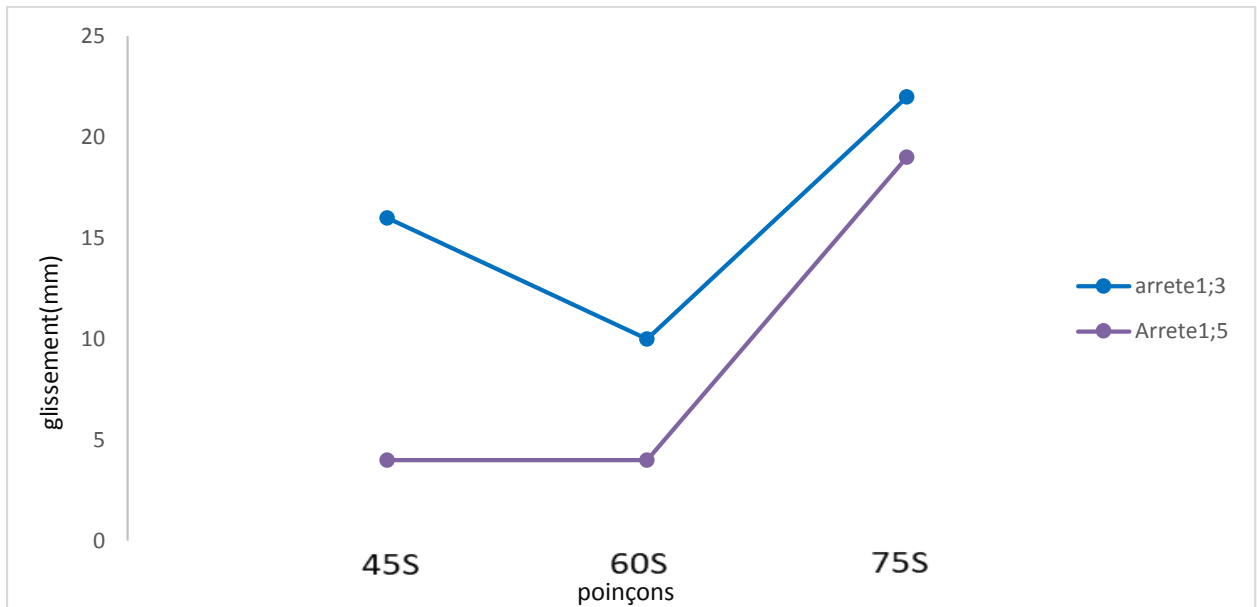


Figure II-22 : représente la variation du glissement mesurée lors l'essai de préformage avec les outils 45S , 60S et 75S

### 1.2.2) Orientation 75° du tissu

#### a) les Surfaces

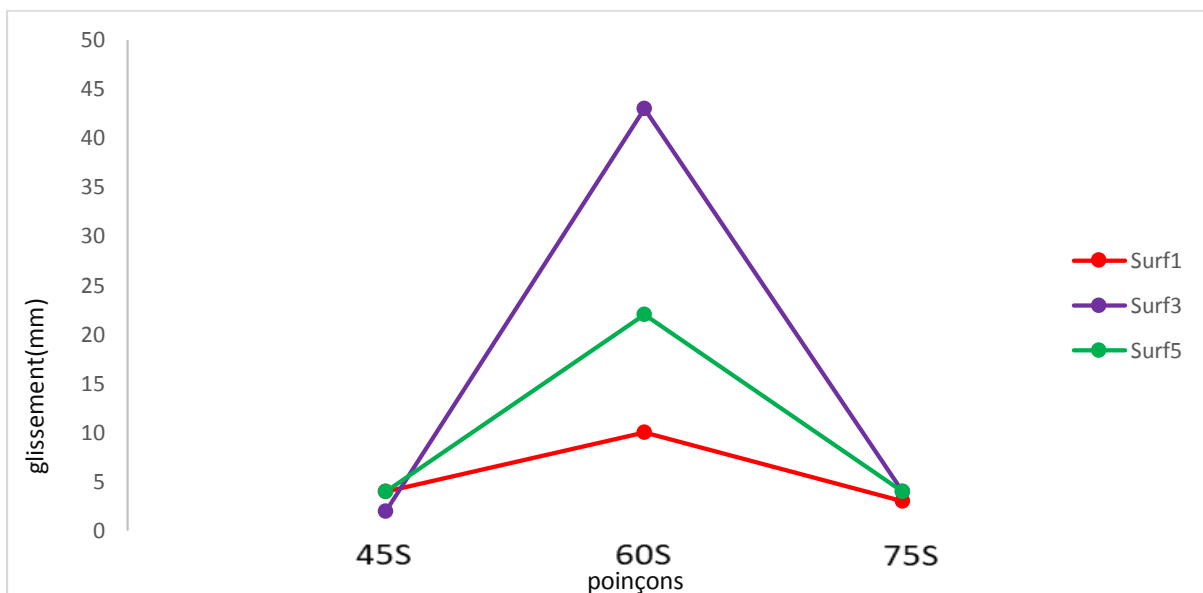


Figure II-23 : représente la variation du glissement mesurée lors l'essai de préformage avec les outils 45S , 60S et 75S

## Chapitre III : Essais d'emboutissage et l'interprétation des résultants

### b) les Arrêtes :

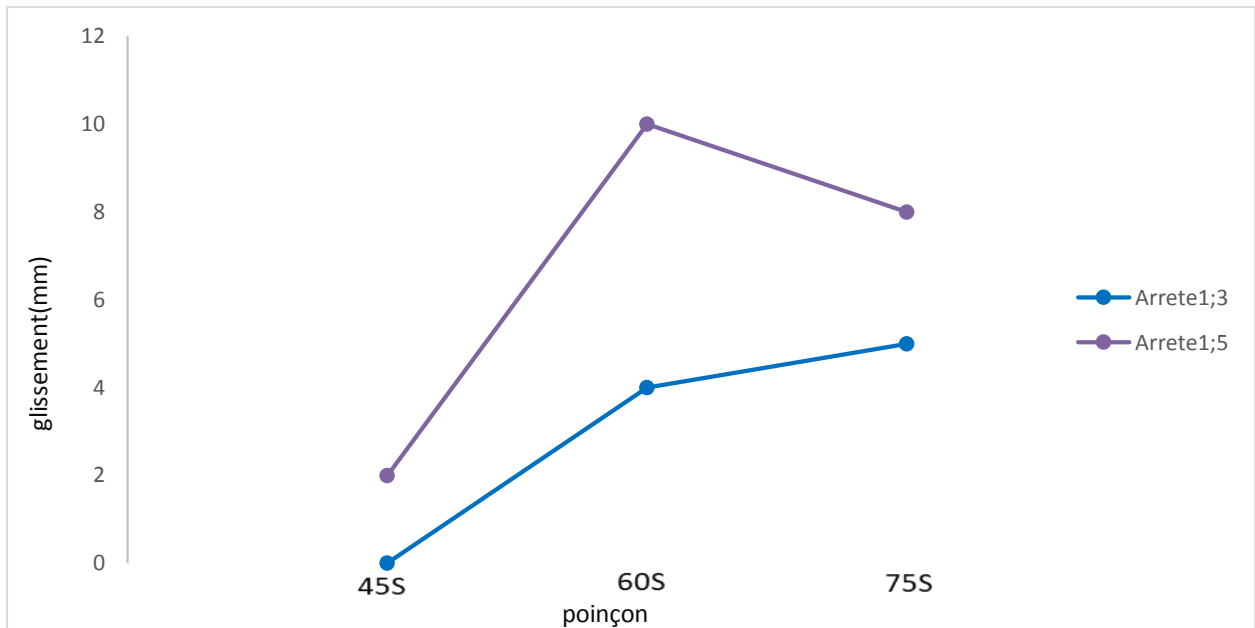


Figure II-24 : représente la variation du glissement mesurée lors l'essai de préformage avec les outils 45S , 60S et 75S

### 2)Poinçons à arrête

#### 2.1) Cisaillement :

##### 2.1.1) Orientation 0° du tissu

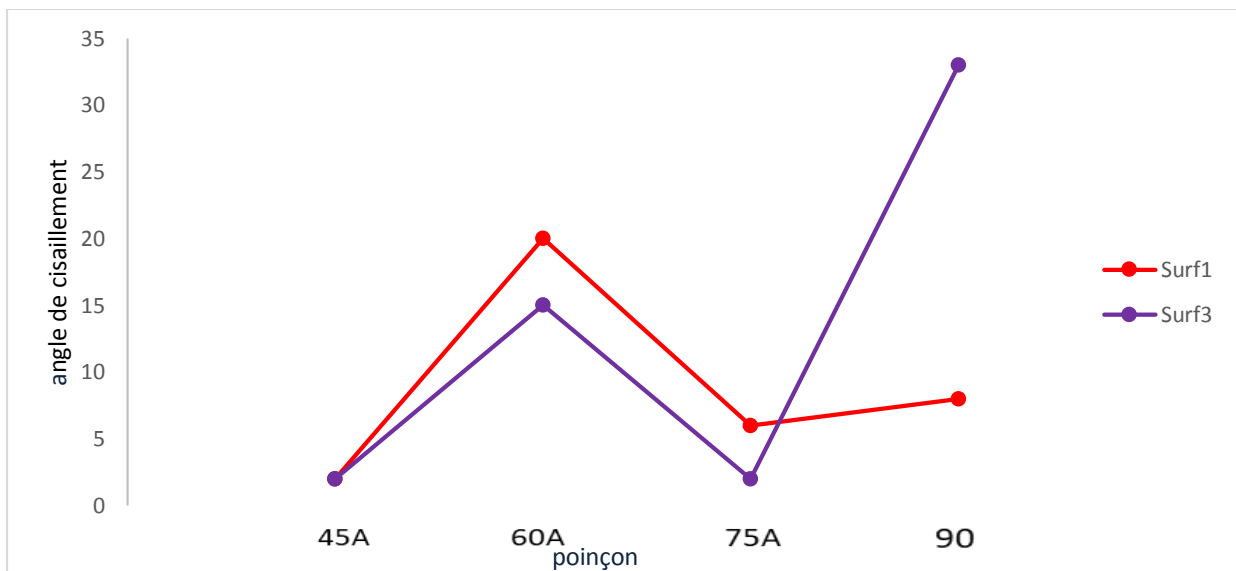


Figure II-25 : représente la variation de l'angle de cisaillement mesurée lors de l'essai de préformage avec les outils 45A , 60A e ,75A et 90

## Chapitre III : Essais d'emboutissage et l'interprétation des résultants

### 2.1.2) Orientation 60° du tissu

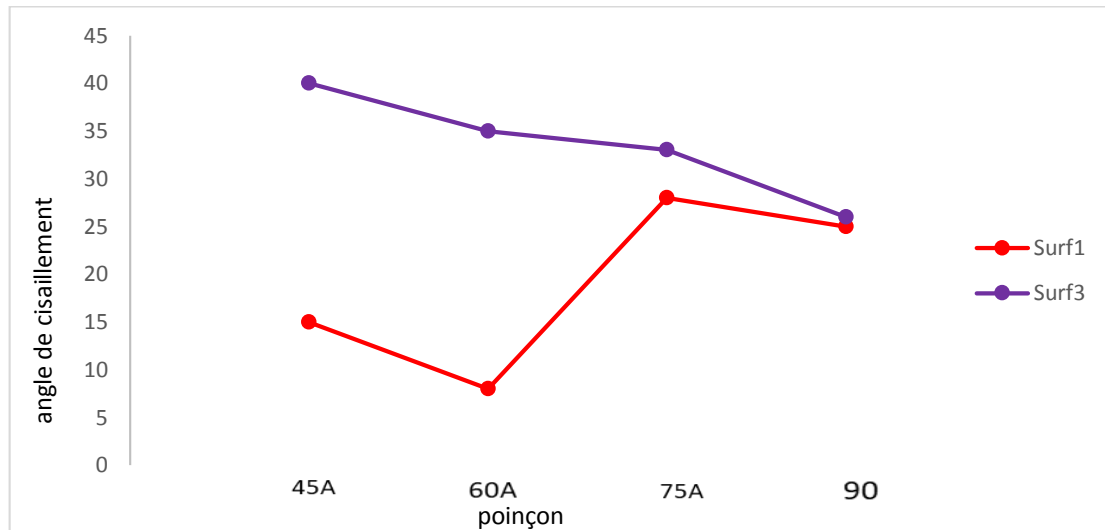


Figure II-26 : représente la variation de l'angle de cisaillement mesurée lors l'essai de préformage avec les outils 45A , 60A e ,75A et 90

## 2.2) Glissement

### 2.2.1) Orientation 0° du tissu

#### a) Sur les Surfaces :

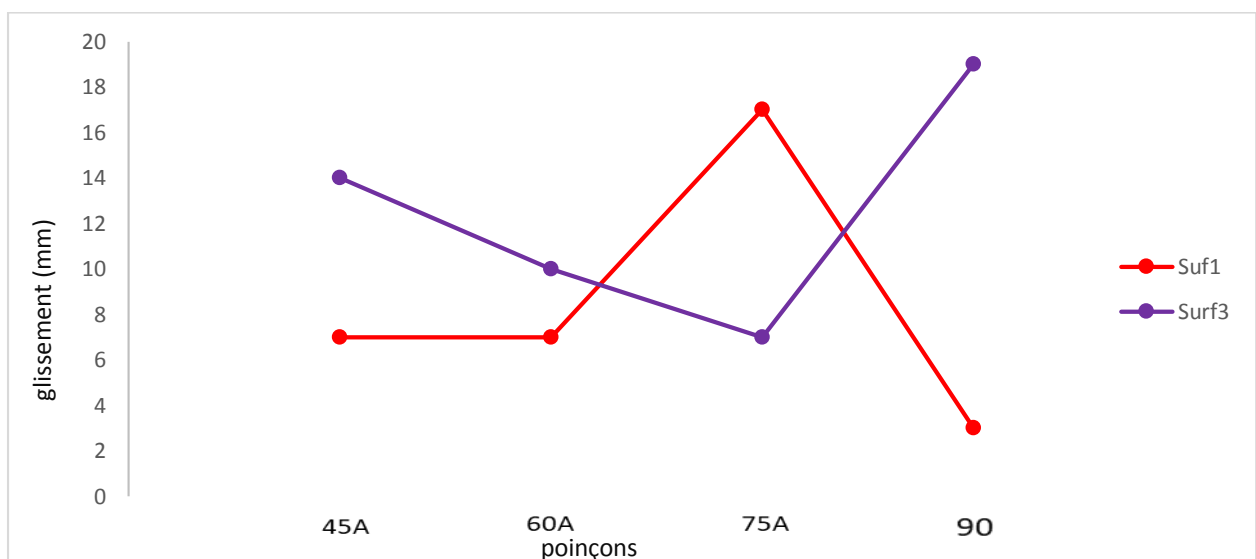


Figure II-27 : représente la variation du glissement mesurée lors l'essai de préformage avec les outils 45A , 60A et 75A et 90

## Chapitre III : Essais d'emboutissage et l'interprétation des résultants

### b) Sur les Arrête :

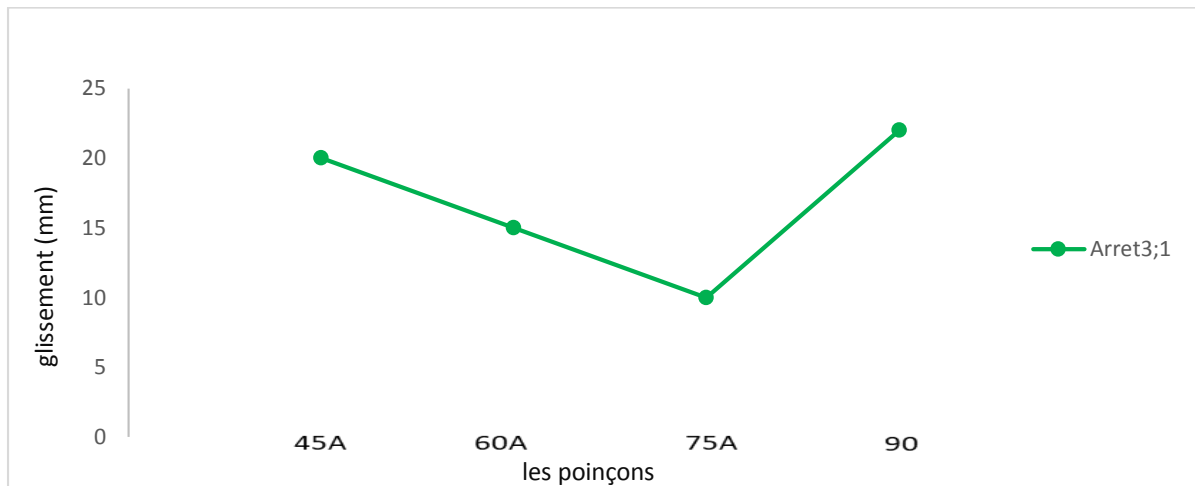


Figure II-28 : représente la variation du glissement mesurée lors l'essai de préformage avec les outils 45A , 60A et 75A et 90

### 2.2.2) Orientation 60° du tissu :

#### a) Sur les Surface :

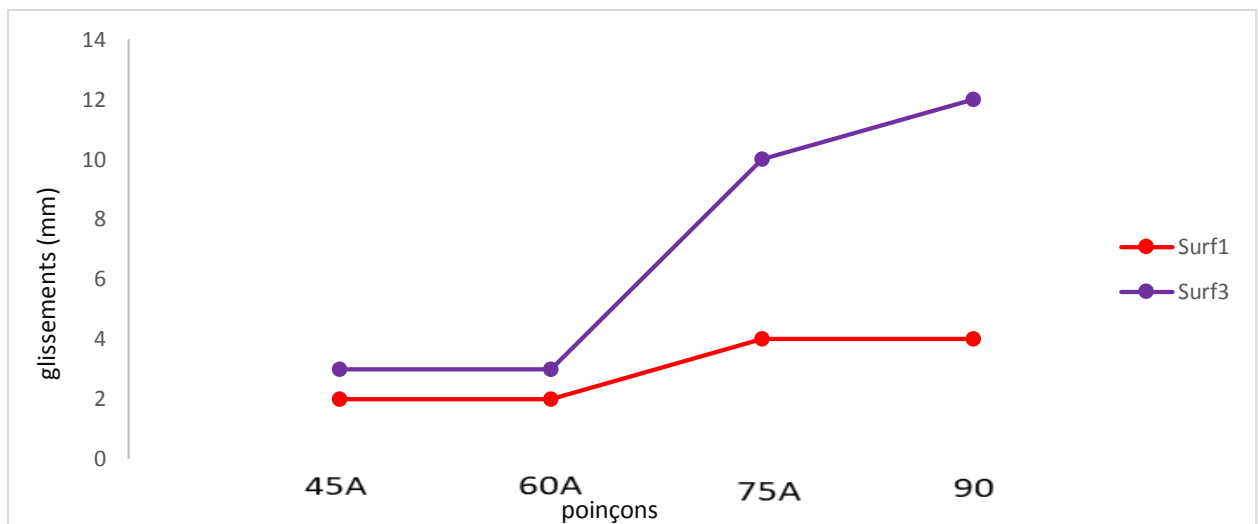


Figure II-29 : représente la variation du glissement mesurée lors l'essai de préformage avec les outils 45A , 60A et 75A et 90

## Chapitre III : Essais d'emboutissage et l'interprétation des résultants

### b) Sur les Arrêtes :

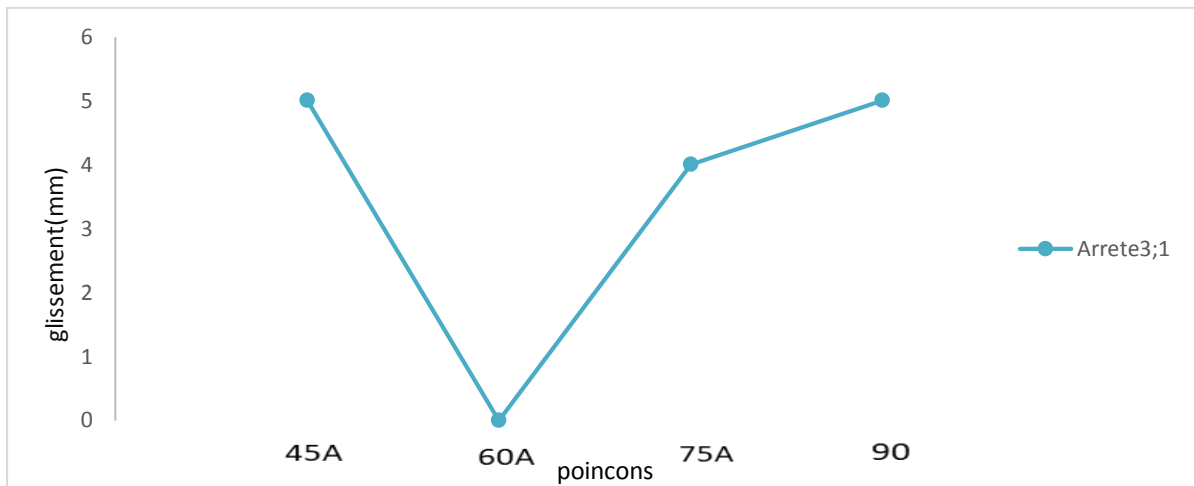


Figure II-30 : représente la variation du glissement mesurée lors l'essai de préformage avec les outils 45A , 60A et 75A et 90

### III.6 Résultats :

#### Poinçon à surface :

- Le cisaillement avec l'outil 45S est le même pour un tissu orienté à  $0^\circ$  et  $75^\circ$
- Le cisaillement est maximal pour l'outil 60S et minimal pour 45S
- La surface 1 (surface d'attaque) est la surface ou il y a le moins de cisaillement à l'opposé de la surface 3 ou le cisaillement est maximal pour la majorité des cas
- Le glissement est le plus petit sur la surface 1 pour toute les orientations

#### Poinçons à arrête :

- Le cisaillement maximum a aussi lieu sur la surface 3

Le cisaillement au niveau de la surface 1 pour poinçon à arrête est plus important que celui de la surface 3 pour le poinçon à surface pour le même angle d'inclinaison. Cela montre l'influence de la surface ou de l'arrête d'attaque sur le cisaillement au niveau de la surface inclinée.

L'orientation  $0^\circ$  du tissu présente moins de cisaillement et plus de glissement par rapport aux autres orientations employées.

### III.7 Conclusion :

Dans cette étude, une approche expérimentale sur la préformabilité du tissu à base de fibres de verre, a été réalisée sur un dispositif de préformage, où la disposition des charges sur le serre flanc et l'orientation du tissu ont eu un impact important sur les résultats obtenus. Après analyse des courbes et d'autres résultats expérimentaux, nous avons abouti à ces résultats qui nous paraissent pertinentes.



## **CHAPITRE IV**

### **Simulation du préformage**

**IV.1 Introduction :**

La simulation de la mise en forme des renforts tissés permet d'étudier les conditions de faisabilité d'une telle opération en limitant les essais expérimentaux et donc les coûts de développement, la simulation permet d'accéder à des informations ainsi que de prédire l'apparition de défaut. La simulation est donc un outil important pour l'optimisation de conception de pièces à base de renfort textile.

**IV.2 Brève présentation d'Abaque :**

Fondé en 1978, ABAQUS, est l'un des premiers fournisseurs mondiaux de logiciels et services pour l'analyse par éléments finis. La gamme de logiciels d'ABAQUS est particulièrement réputée pour sa technologie, sa qualité et sa fiabilité. Elle s'est imposée comme partie intégrante des processeurs de conception de sociétés de renommées mondiale dans tous les secteurs. ABAQUS offre les meilleures solutions pour des problèmes linéaires, non linéaires, explicites et dynamiques. Le logiciel fournit un environnement inégalé pour l'analyse par éléments finis, proposant un grand nombre d'alternatives aux opérations impliquant de fournisseur et des produits multiples. ABAQUS, c'est une structure de plus de 350 personnes, 24 agences implantées dans le monde et un réseau de distributeurs sur les marchés émergents.

Dun point de vue technique, les résultats obtenus grâce à ABAQUS sont le bilan des énergies, des forces nodales, des déformations, des déplacements, des contraintes, des vitesses, des accélérations. [1]

**IV.3 Essais uniaxiaux**

Nous avons utilisé un modèle de comportement dédié aux tissus : VFABRIC, ce modèle nécessite l'introduction des valeurs des courbes contrainte-déformation en traction selon la chaîne et la trame ainsi que la courbe de cisaillement.

Le tissu est modélisé par des éléments coques S4R avec une taille moyenne de l'éléments de 3mm.

La matrice et le serre-flan ont été encastrés et on a imposé un déplacement de 70mm à l'outil. Tous les outils sont supposés rigides

**IV.3.1 Essai de traction**

Afin de calibrer le modèle de comportement, nous avons d'abord réaliser des simulations de traction sur des mèches. Nous donnons sur la figure (IV-I) une comparaison entre les résultats expérimentaux et ceux obtenus avec le logiciel de simulation ABAQUS.

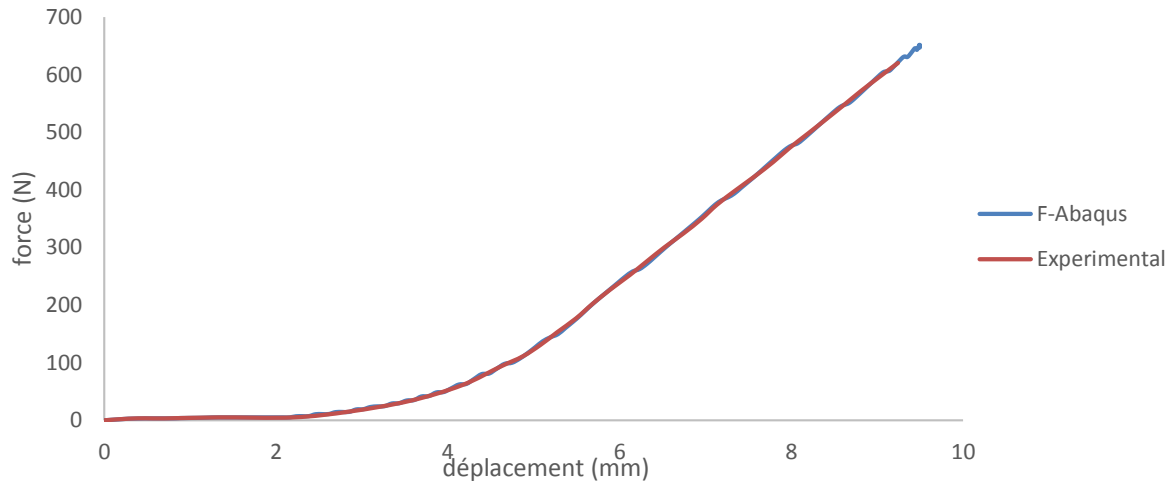
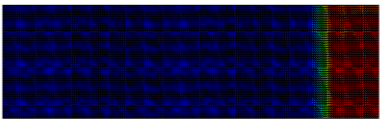
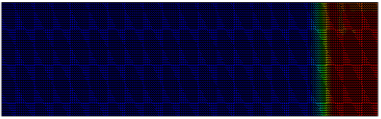


Figure II-1 Courbe de traction du Taffetas : simulation vs expérimental

Nous observons que les courbes expérimentale et numérique sont confondues. Ce qui confirme la pertinence du modèle que nous avons utilisé.

La figure (IV-2) donne la distribution des déformations totales selon la direction de chargement dans le tissu et dans les mèches à des déplacements différents de la partie supérieure.

Déformation	Déformations des mèches
U= 32347	
<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="margin-right: 10px;"> <p>LE, LE11 (Avg: 75%)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>+1.532e-02</li> <li>+1.529e-02</li> <li>+1.525e-02</li> <li>+1.522e-02</li> <li>+1.518e-02</li> <li>+1.514e-02</li> <li>+1.511e-02</li> <li>+1.507e-02</li> <li>+1.504e-02</li> <li>+1.500e-02</li> <li>+1.497e-02</li> <li>+1.493e-02</li> <li>+1.490e-02</li> </ul> </div>  </div>	<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="margin-right: 10px;"> <p>EFABRIC, EFABRIC11 (Avg: 75%)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>+1.544e-02</li> <li>+1.540e-02</li> <li>+1.536e-02</li> <li>+1.533e-02</li> <li>+1.529e-02</li> <li>+1.526e-02</li> <li>+1.522e-02</li> <li>+1.518e-02</li> <li>+1.515e-02</li> <li>+1.511e-02</li> <li>+1.508e-02</li> <li>+1.504e-02</li> <li>+1.500e-02</li> </ul> </div>  </div>

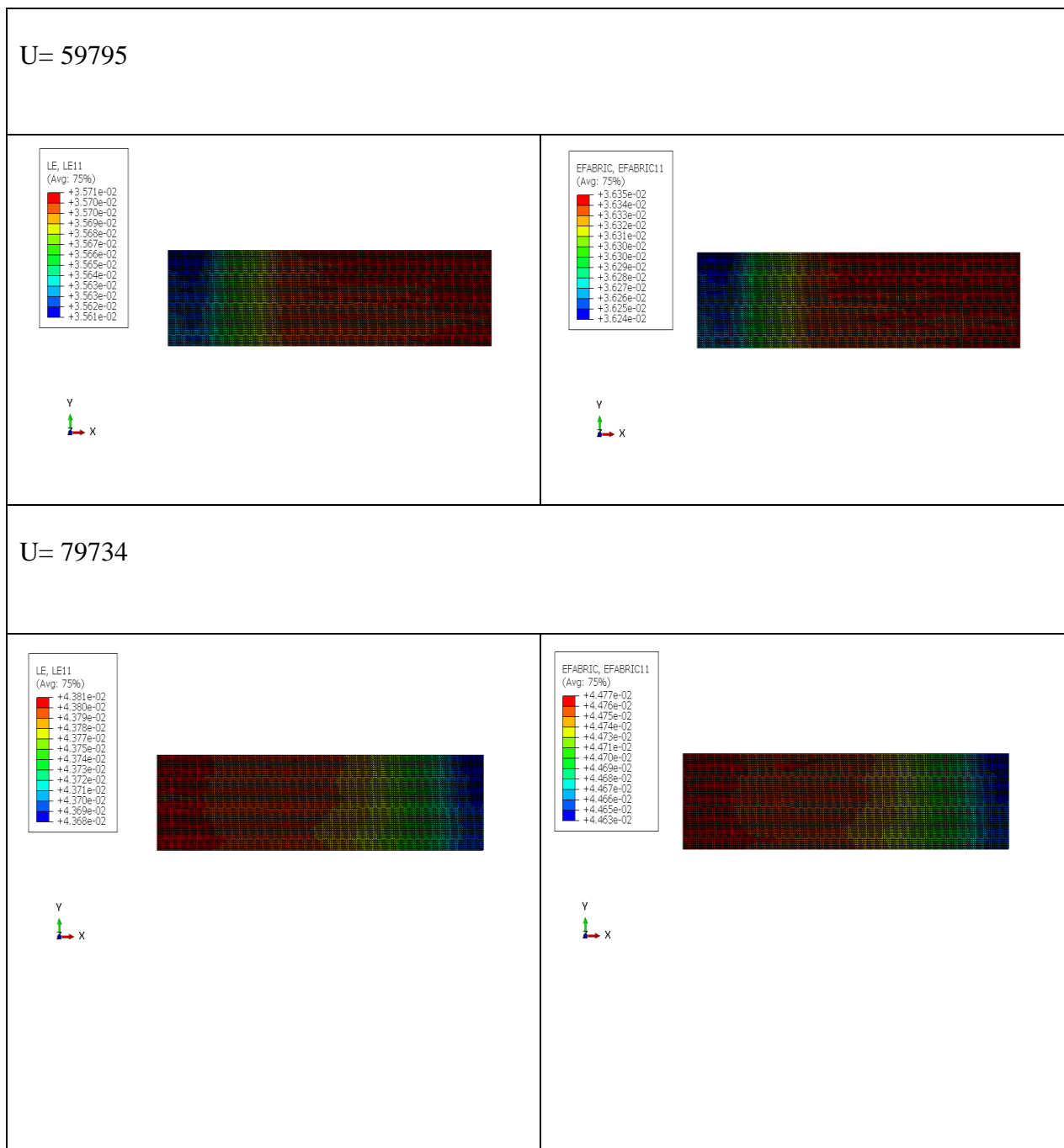
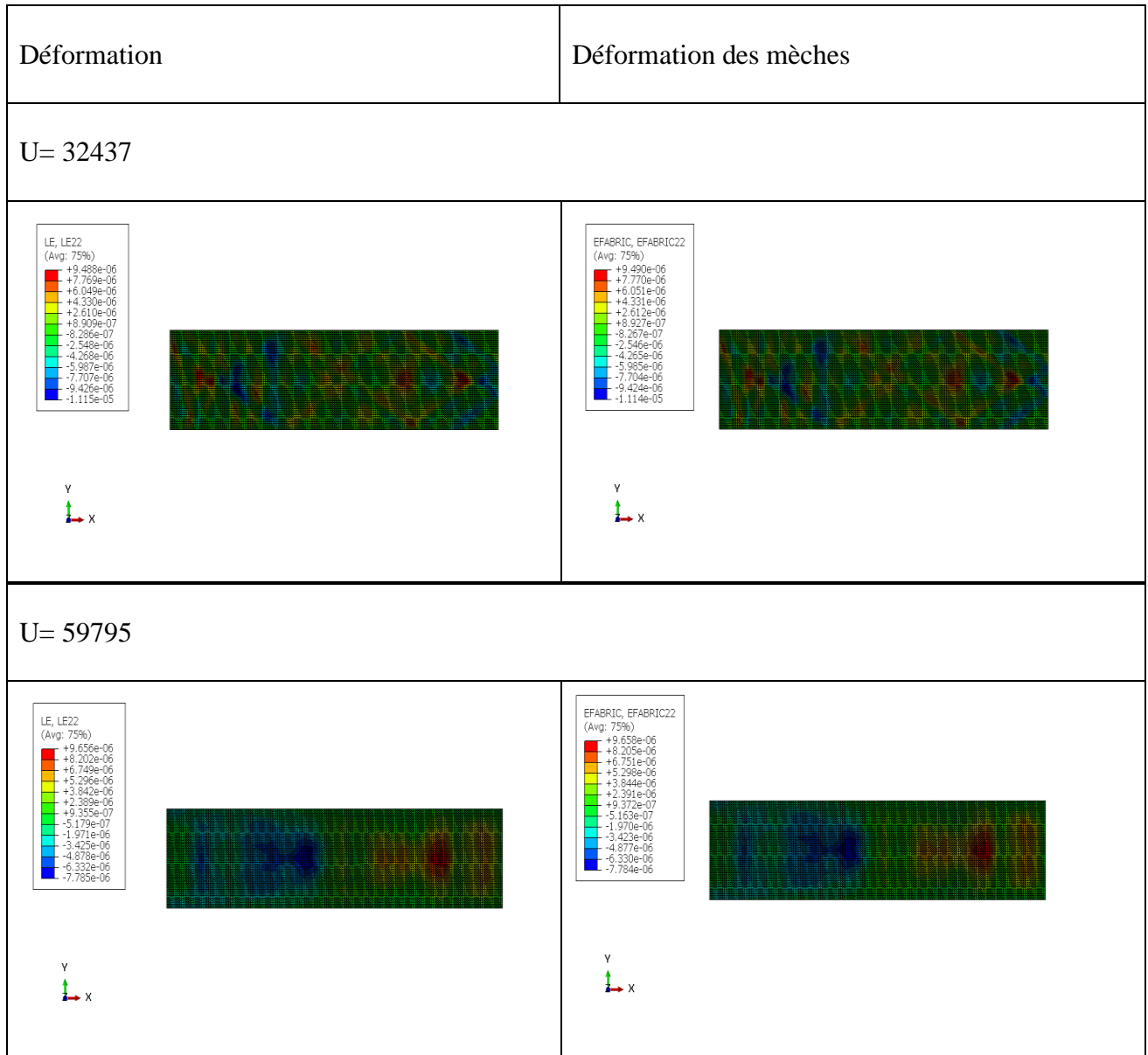


Figure IV -2 Déformation selon la direction de chargement

## Chapitre IV :

## Simulation du préformage

La figure (IV-3) donne la distribution des déformations totales selon la direction perpendiculaire à la direction de chargement dans le tissu et dans les mèches à des déplacements différents de la partie supérieure.



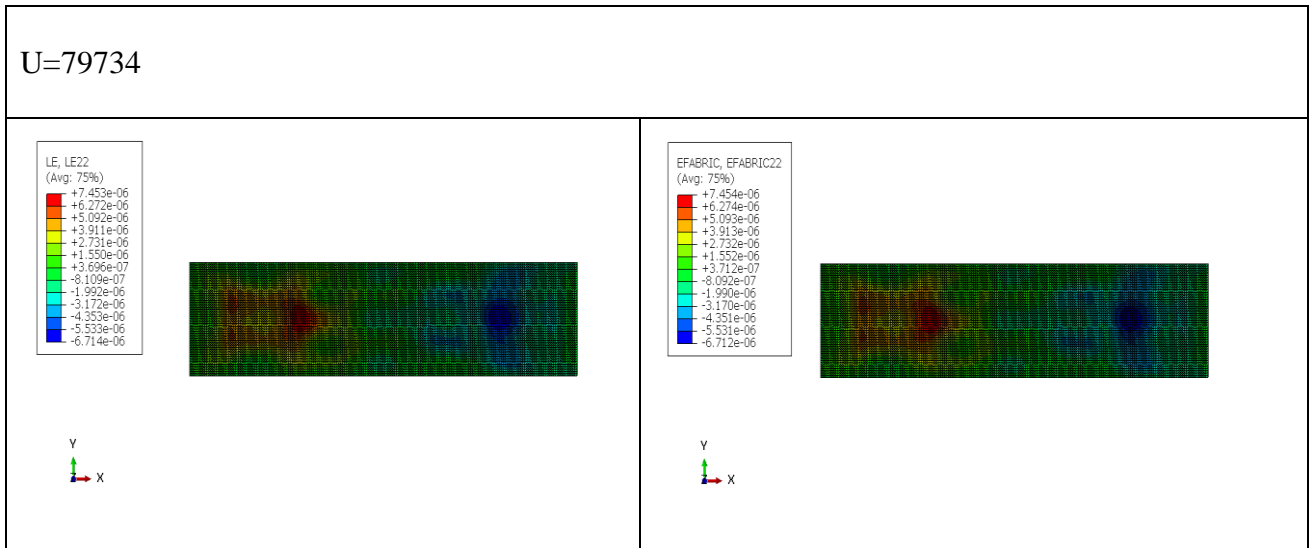


Figure IV -3 Déformation selon la direction perpendiculaire à la direction de chargement

IV.3.2 Essai de cisaillement

Toujours dans un souci de calibration du modèle de comportement, nous avons effectué des simulations d'un essai de cisaillement d'une mèche.

Nous donnons sur la figure (IV-4) une comparaison entre les résultats expérimentaux et ceux obtenus avec le logiciel de simulation ABAQUS.

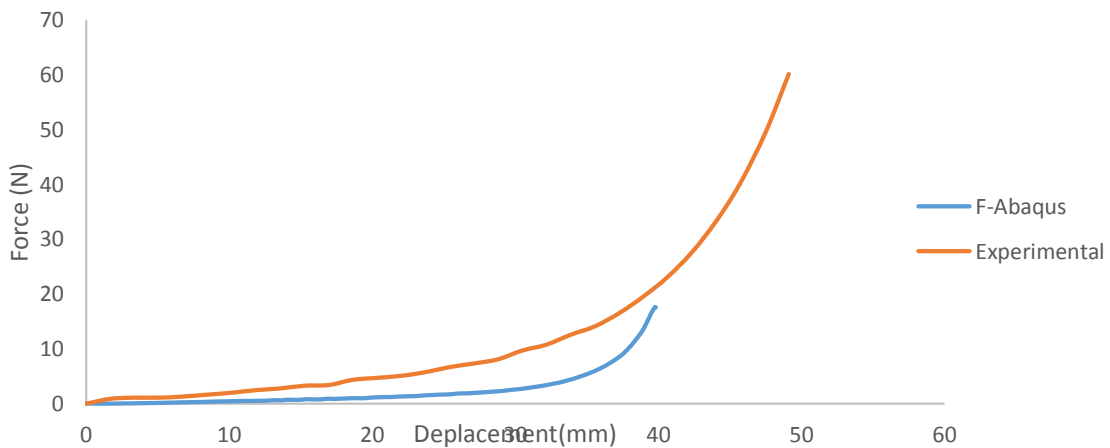


Figure IV -4 courbe de cisaillement du Taffetas: simulation vs expérimental

Nous observons que les courbes expérimentale et numérique ont la même allure. Un écart apparaît à parti d'un angle supérieur à 20°, comme rapporté par plusieurs auteurs.

La figure (IV-5) donne la distribution des déformations totales selon la direction de chargement dans le tissu et dans les mèches à des déplacements différents de la partie supérieure.

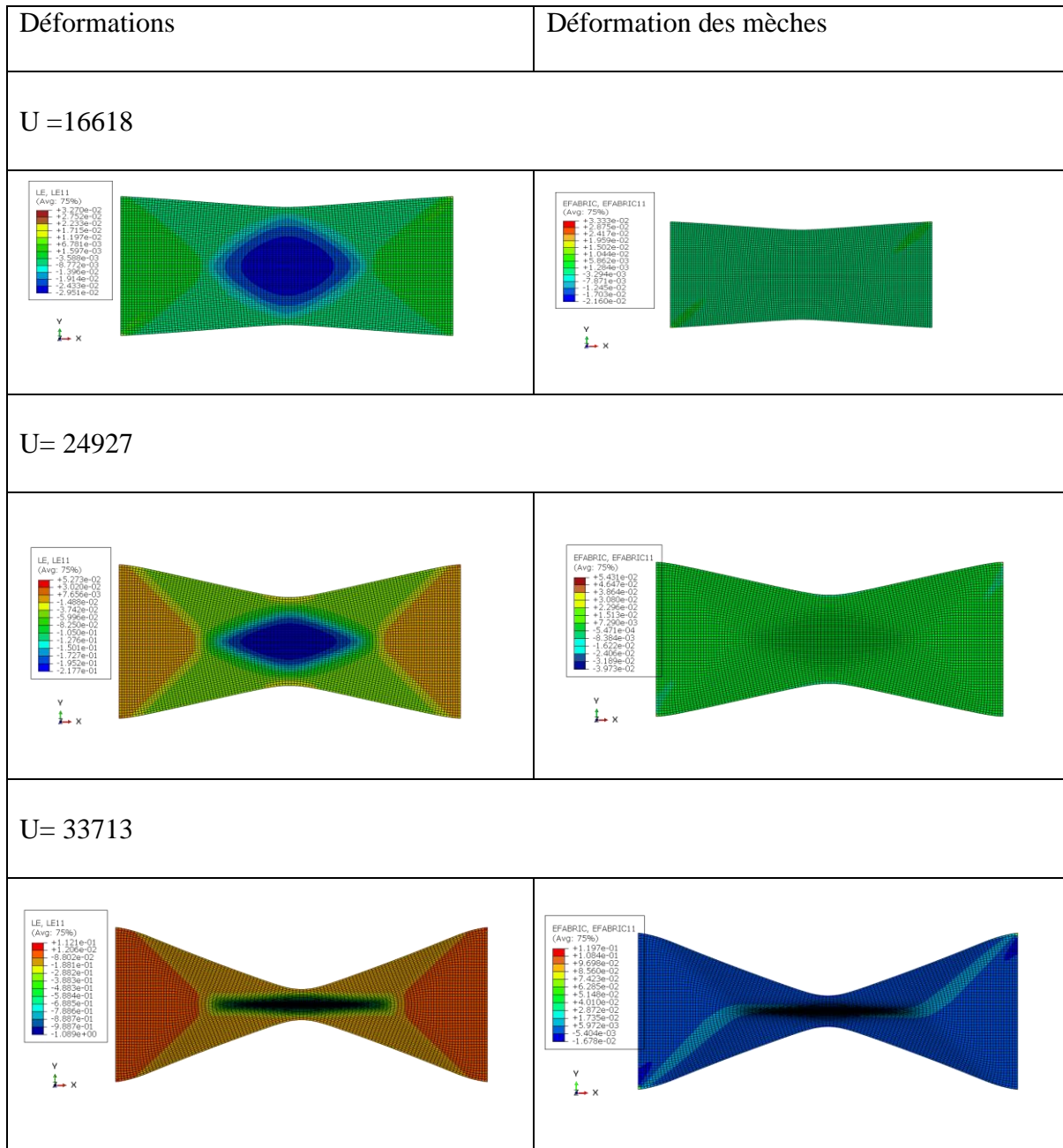


Figure IV -5 Déformation selon la direction de chargement

La figure (IV-6) donne la distribution des déformations totales selon la direction de cisailment 12 dans le tissu et dans les mèches à des déplacements différents de la partie supérieure.

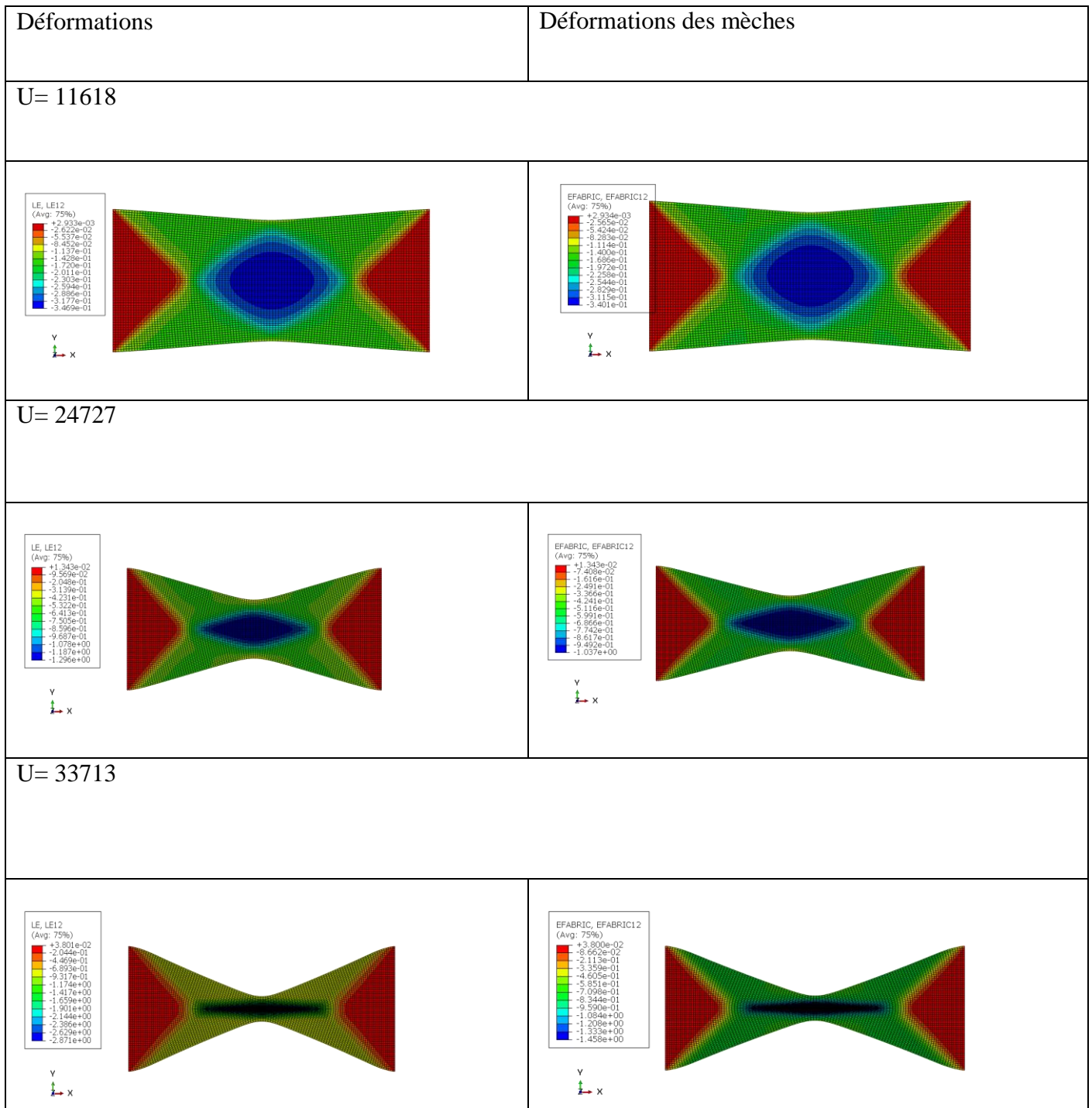


Figure IV -6 : déformations totales selon la direction de cisaillement

IV.4 Essais d'emboutissage de tissus

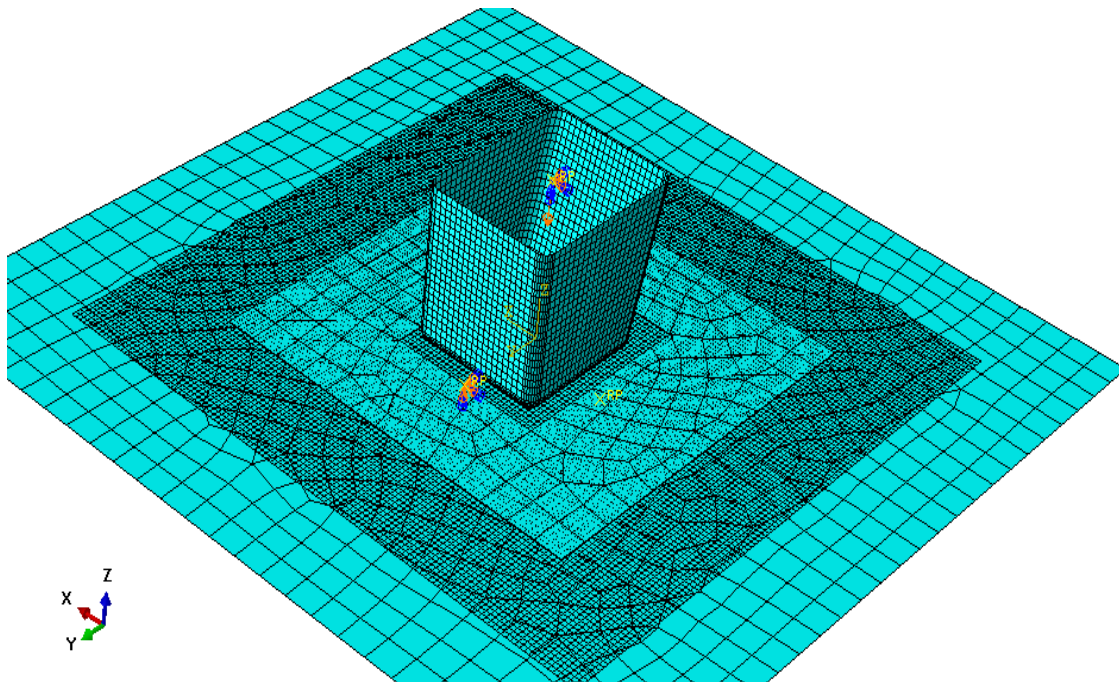
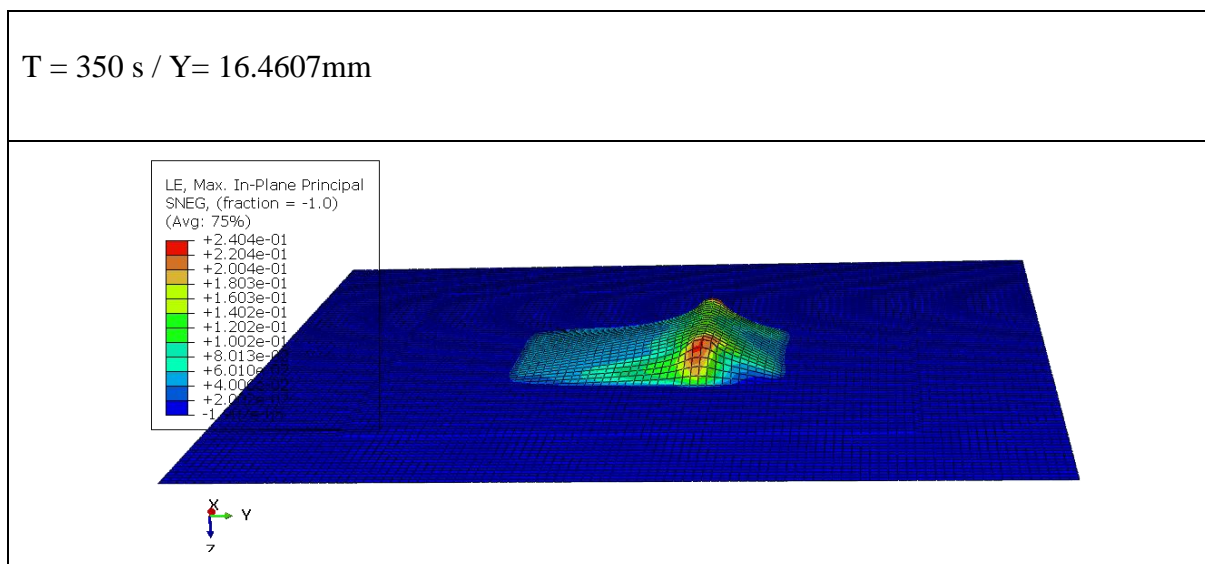


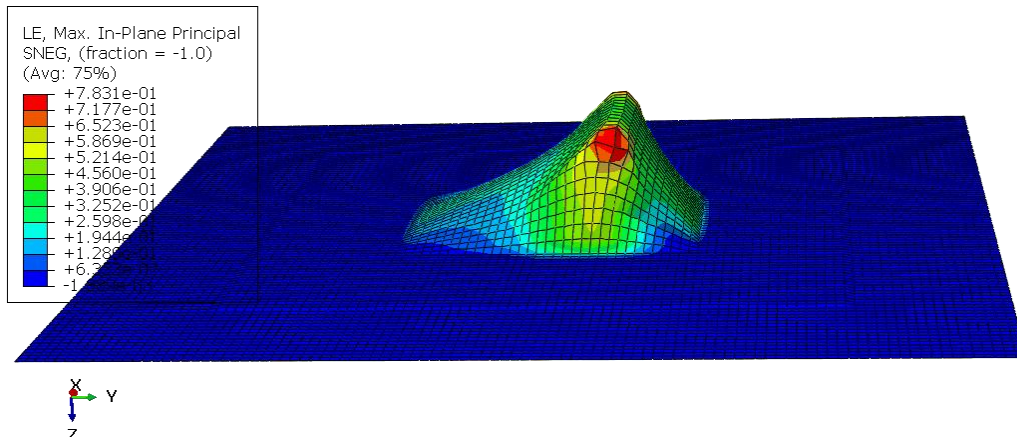
Figure IV -7 l'assemblage

IV.4.1 Emboutissage avec le poinçon 45A

Nous donnons sur la figure (IV-8) la répartition de la déformation maximale dans le plan du tissu pour des déplacements différents du poinçon.



T = 550 s / Y = 41.5181mm



T = 800 s / Y = 65.9454mm

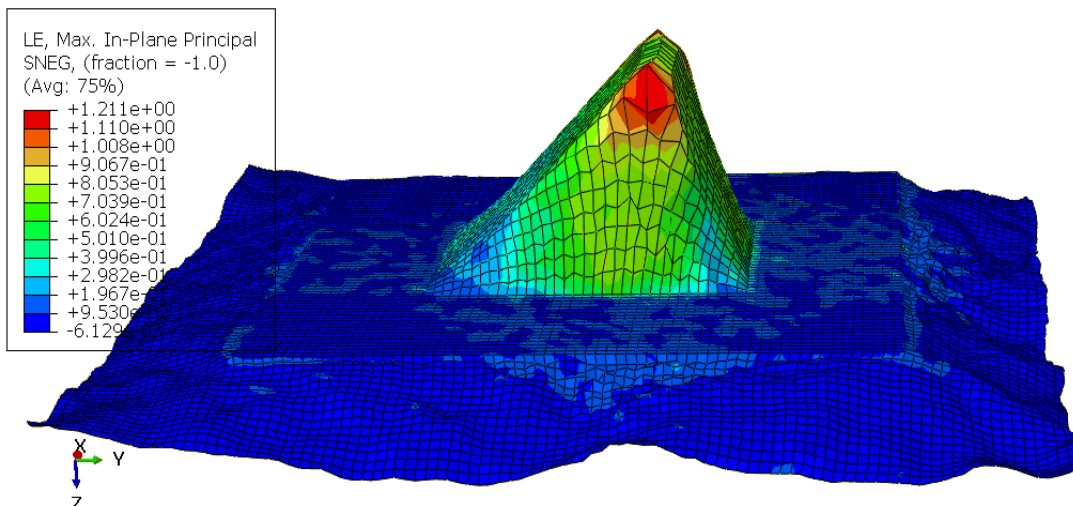
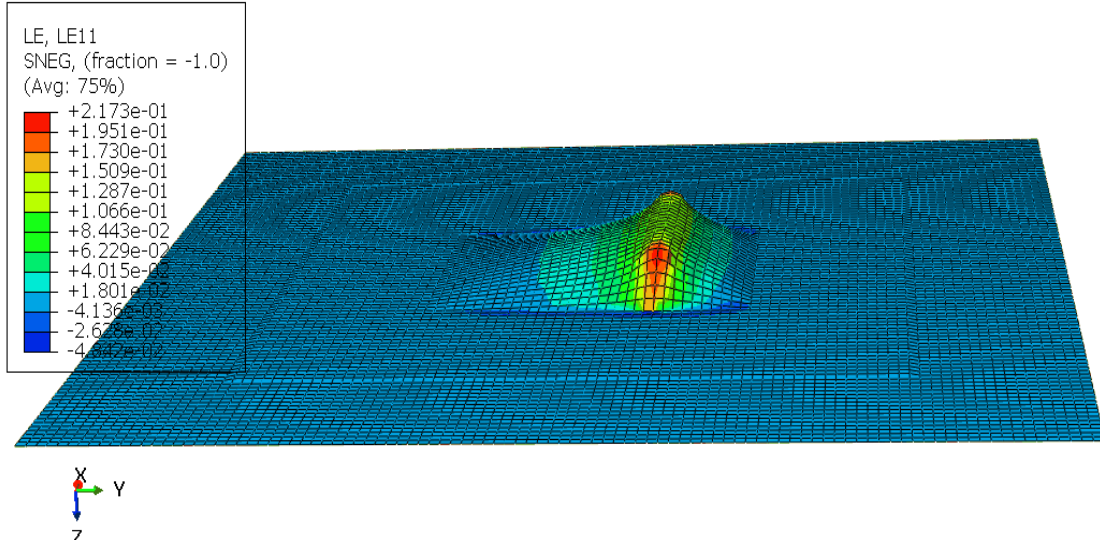


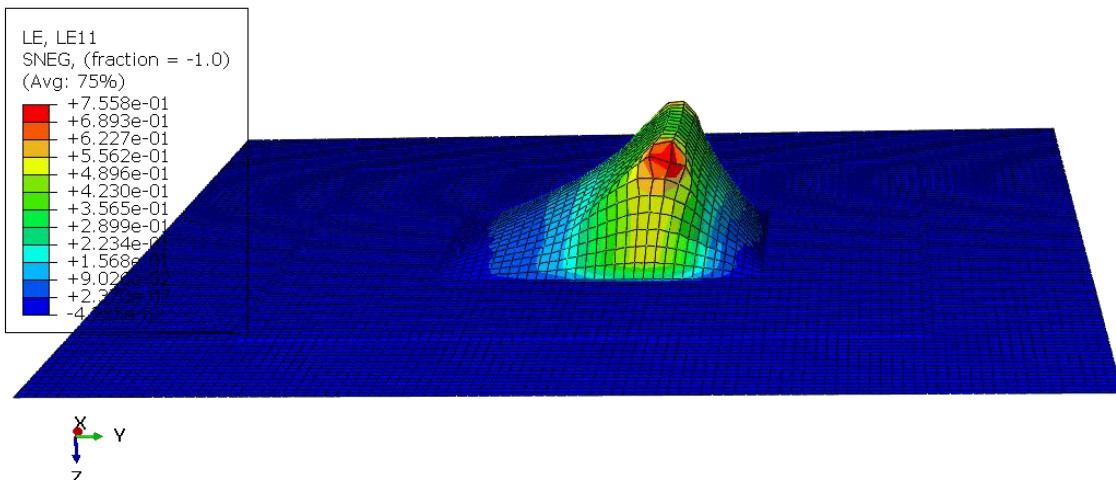
Figure V-8 la déformation maximale dans le plan du tissu

Nous donnons sur la figure (IV-9) la répartition de la déformation selon la direction du chargement dans le plan du tissu pour des déplacements différents du poinçon.

T = 350 s / Y = 16.4607mm



T = 550 s / Y = 41.5181mm



T = 800 s / Y = 9454mm

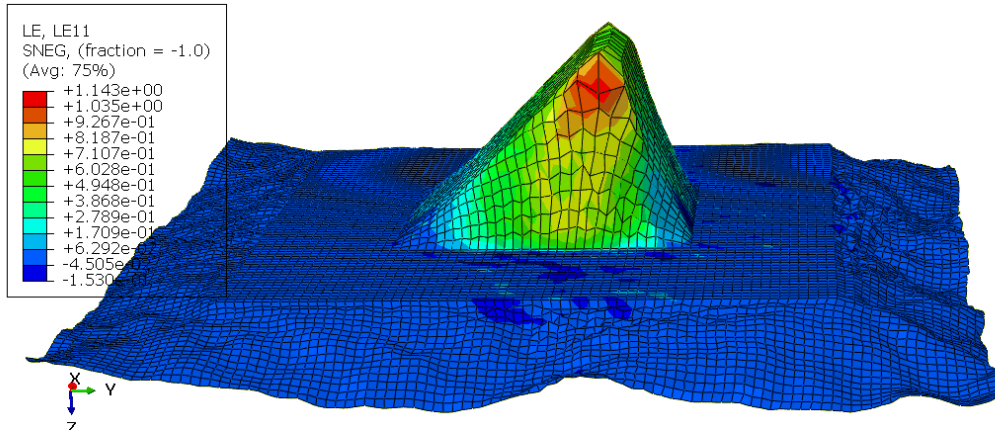
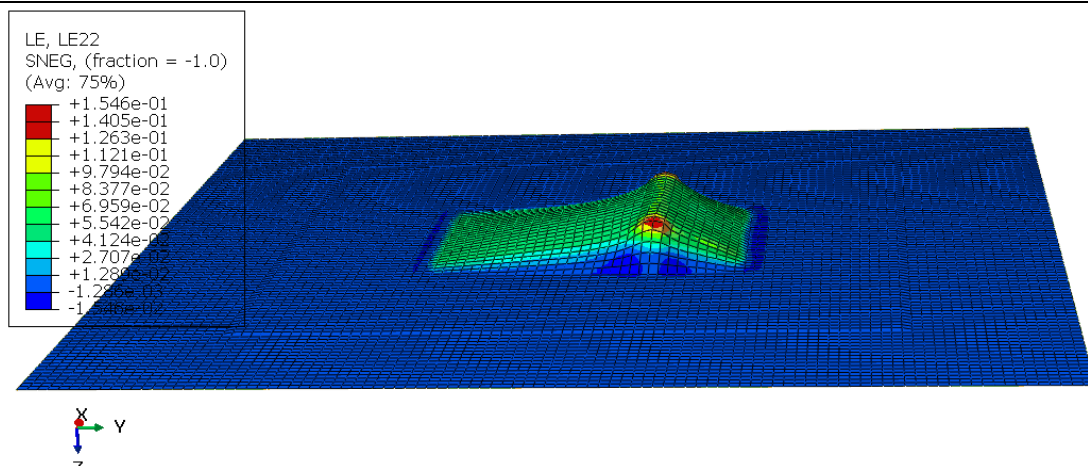


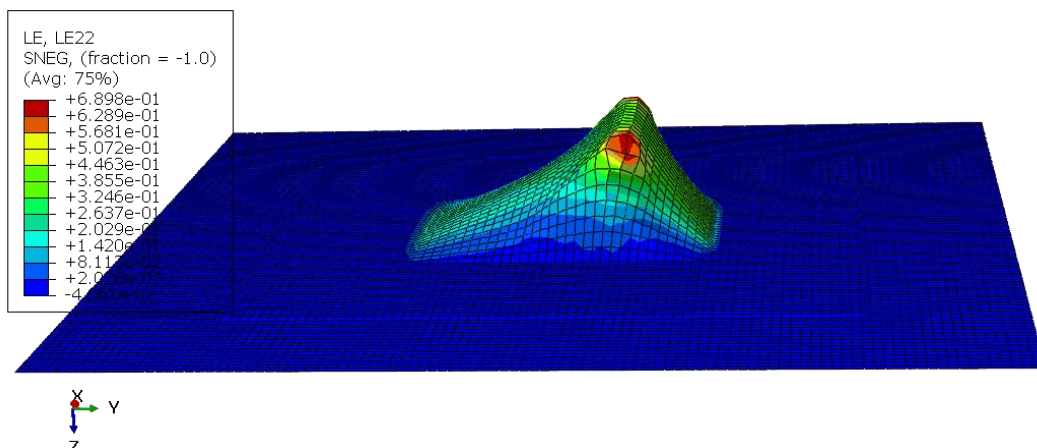
Figure IV -9 Déformation selon la direction du chargement dans le plan du tissu

Nous donnons sur la figure (IV-10) la répartition de la déformation selon la direction perpendiculaire dans le plan du tissu pour des déplacements différents du poinçon

T = 300 s / Y = 16.4607mm



T = 550 s / Y = 41.5181mm



T = 800 s / Y = 65.9454mm

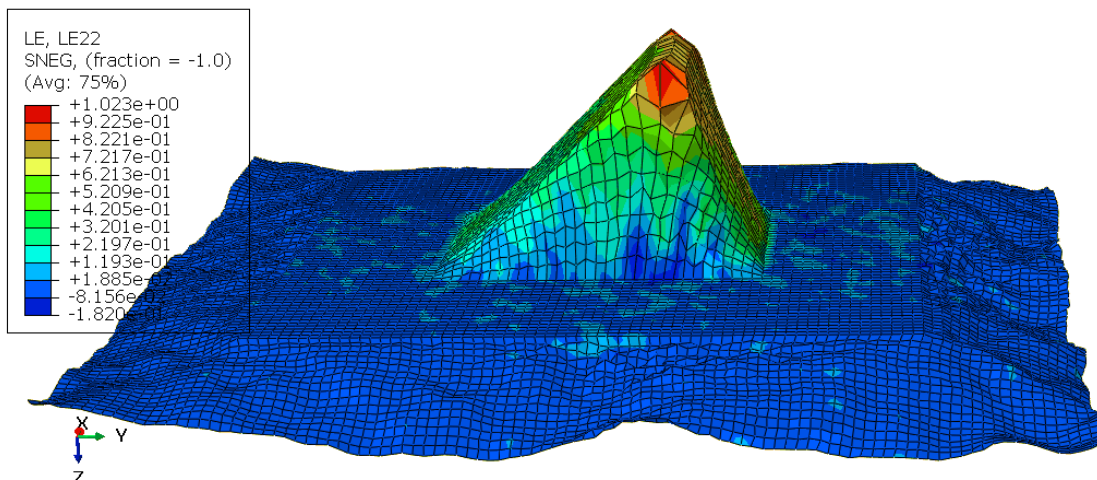
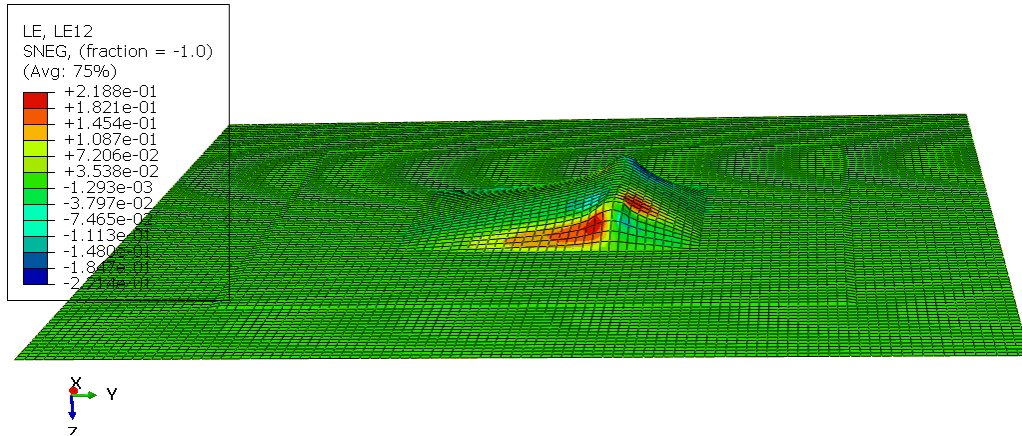


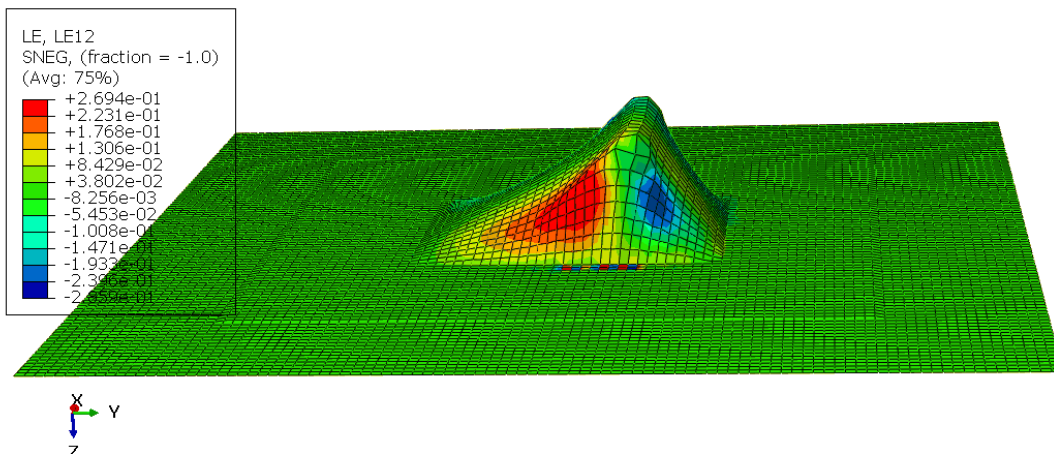
Figure IV -10 la déformation selon la direction perpendiculaire dans le plan du tissu

Nous donnons sur la figure (IV-11) la répartition de la déformation de cisailment 12 dans le plan du tissu pour des déplacements différents du poinçon.

T = 300 s / Y = 16.4607mm



T = 550 s / Y = 41.5181mm



T = 800 s / Y = 65.9454mm

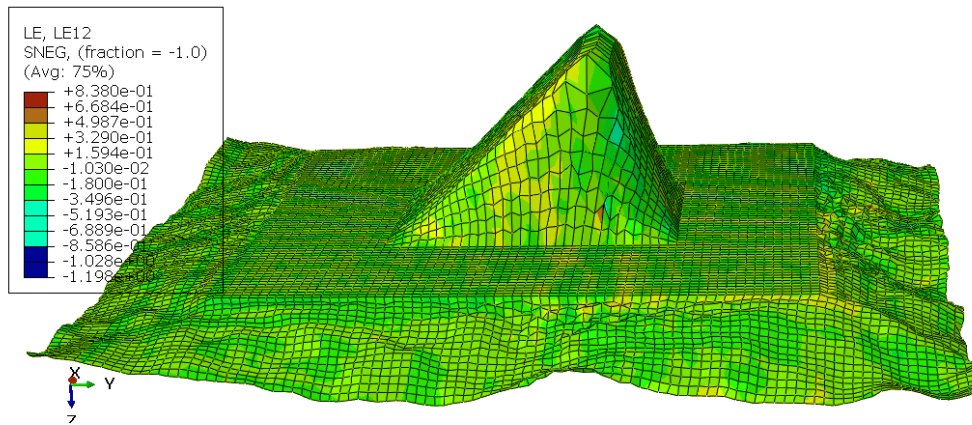
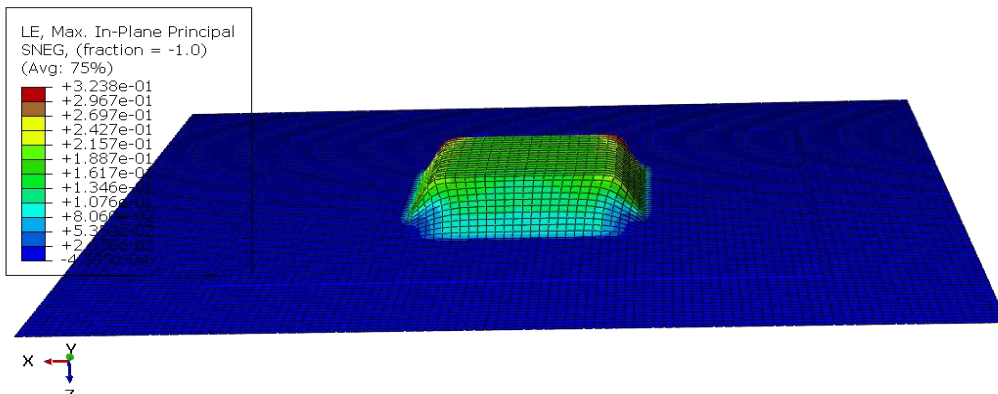


Figure IV -11 : la déformation de cisaillement 12 dans le plan du tissu

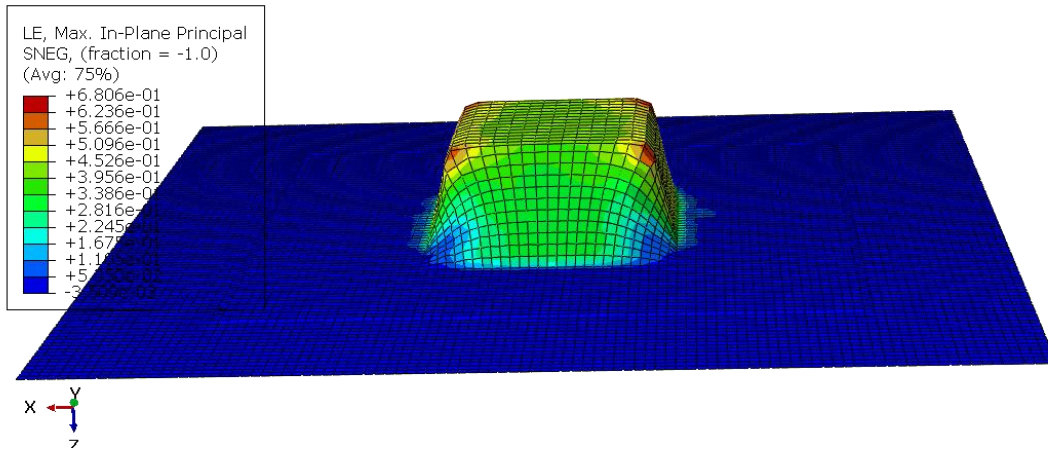
#### IV.4.2 Emboutissage avec le poinçon 45S

Nous donnons sur la figure (IV-12) la répartition de la déformation maximale dans le plan du tissu pour des déplacements différents du poinçon.

T = 300 s / Y =16.4617mm



T = 550 s / 41.5177mm



T = 800 s / Y = 65.9459 mm

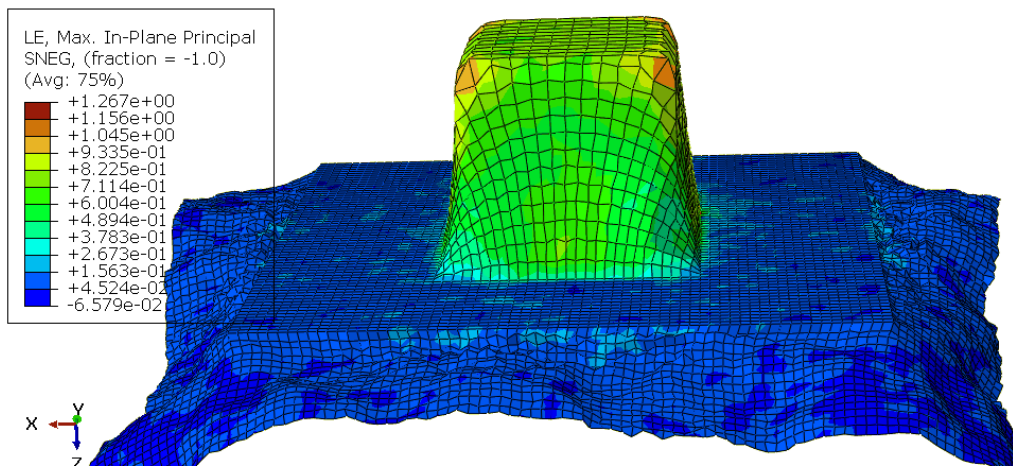
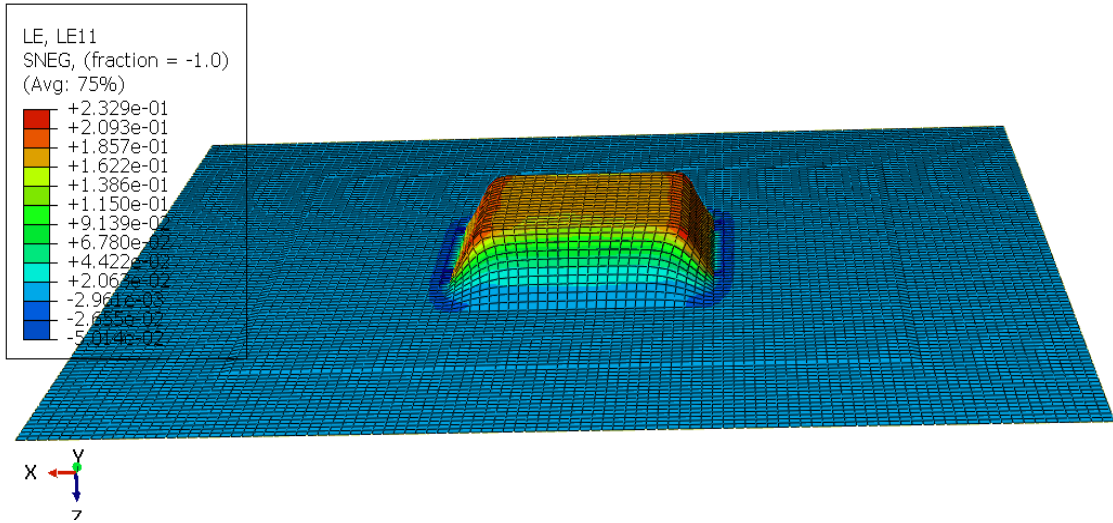


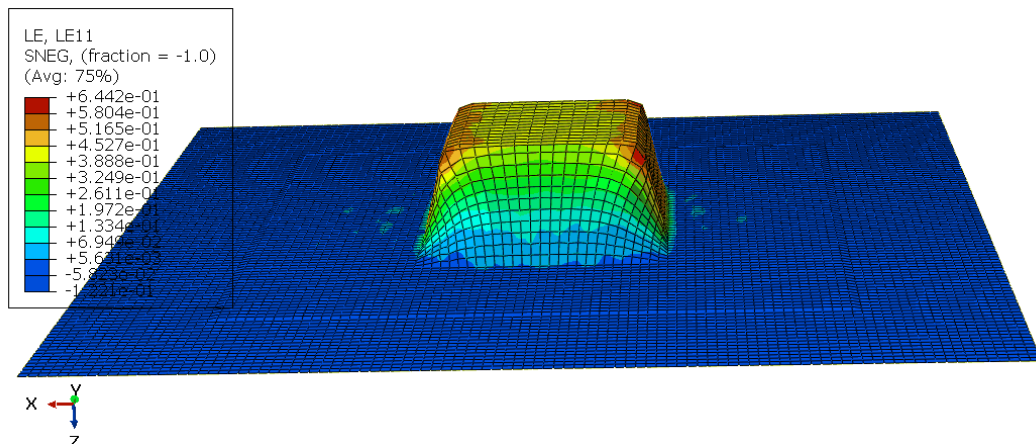
Figure IV -12 la déformation maximale dans le plan du tissu

Nous donnons sur la figure (IV-13) la répartition de la déformation selon la direction de chargement dans le plan du tissu pour des déplacements différents du poinçon.

T = 300 s / Y = 16.4617mm



T = 550s / Y = 41.5177mm



T = 800 s / Y = 65.9459 mm

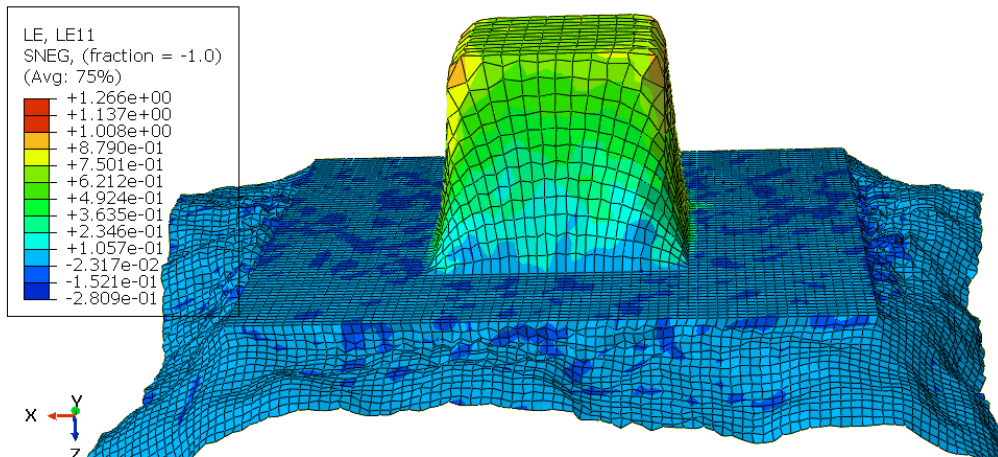
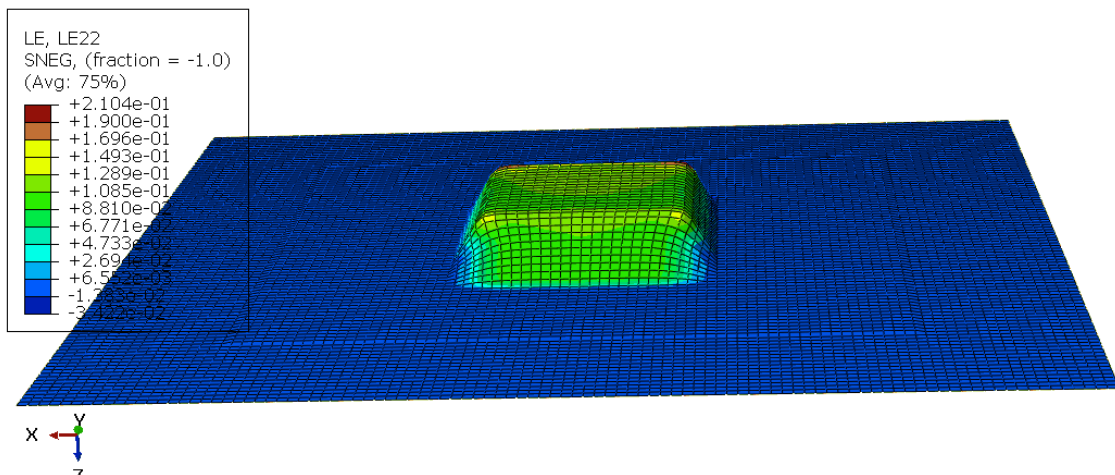


Figure IV -13 la déformation selon la direction de chargement dans le plan

Nous donnons sur la figure (IV-14) la répartition de la déformation selon la direction perpendiculaire dans le plan du tissu pour des déplacements différents du poinçon.

T = 300 s / Y = 16.4617mm



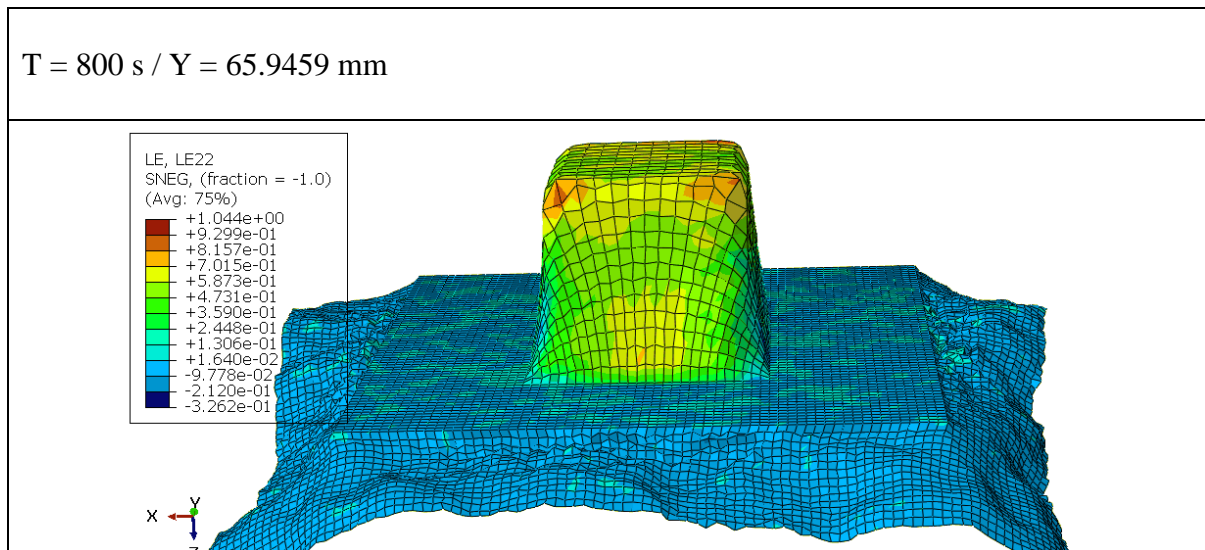
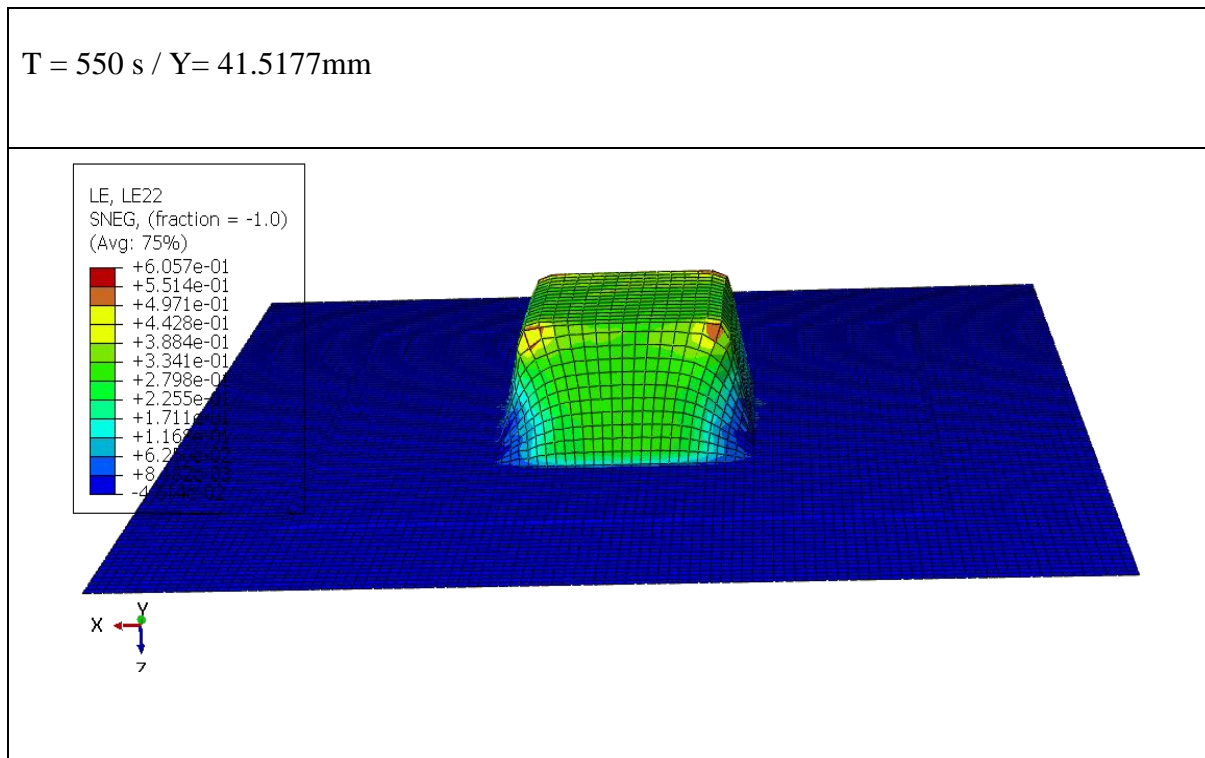
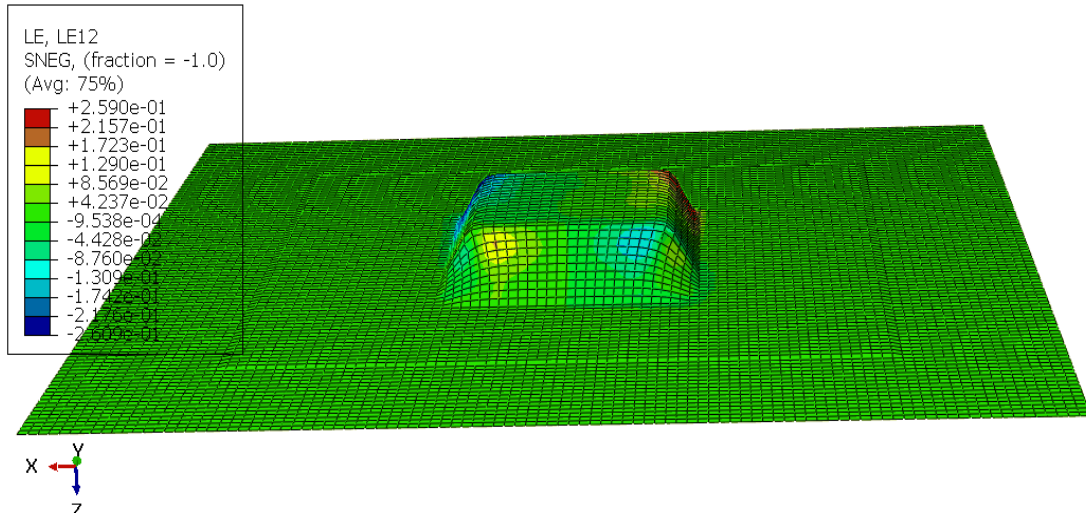


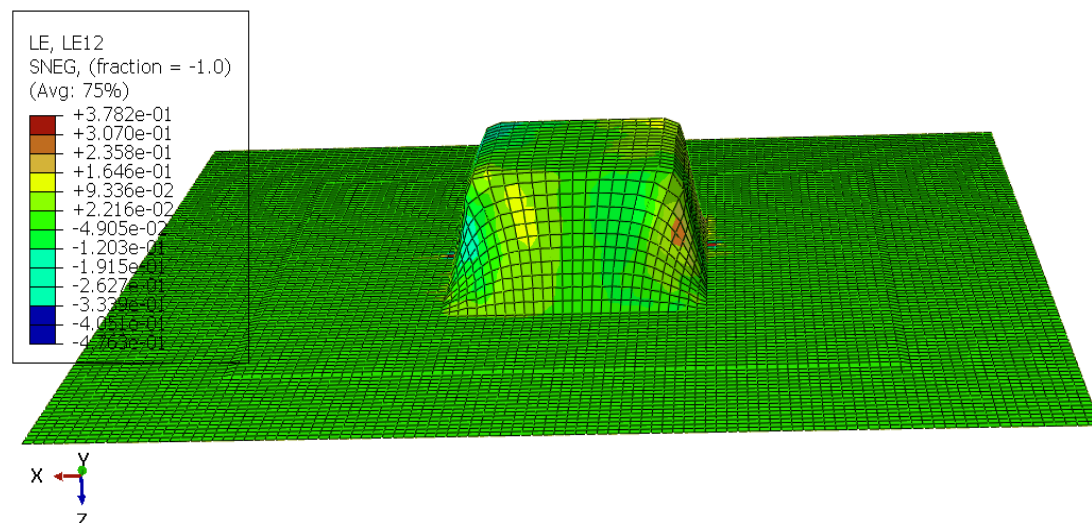
Figure IV -14 la direction perpendiculaire dans le plan du tissu

Nous donnons sur la figure (IV-15) la répartition de la déformation de cisailment 12 dans le plan du tissu pour des déplacements différents du poinçon.

T = 300 s / Y= 16.4617mm



T = 550 s / Y = 41.5177 mm



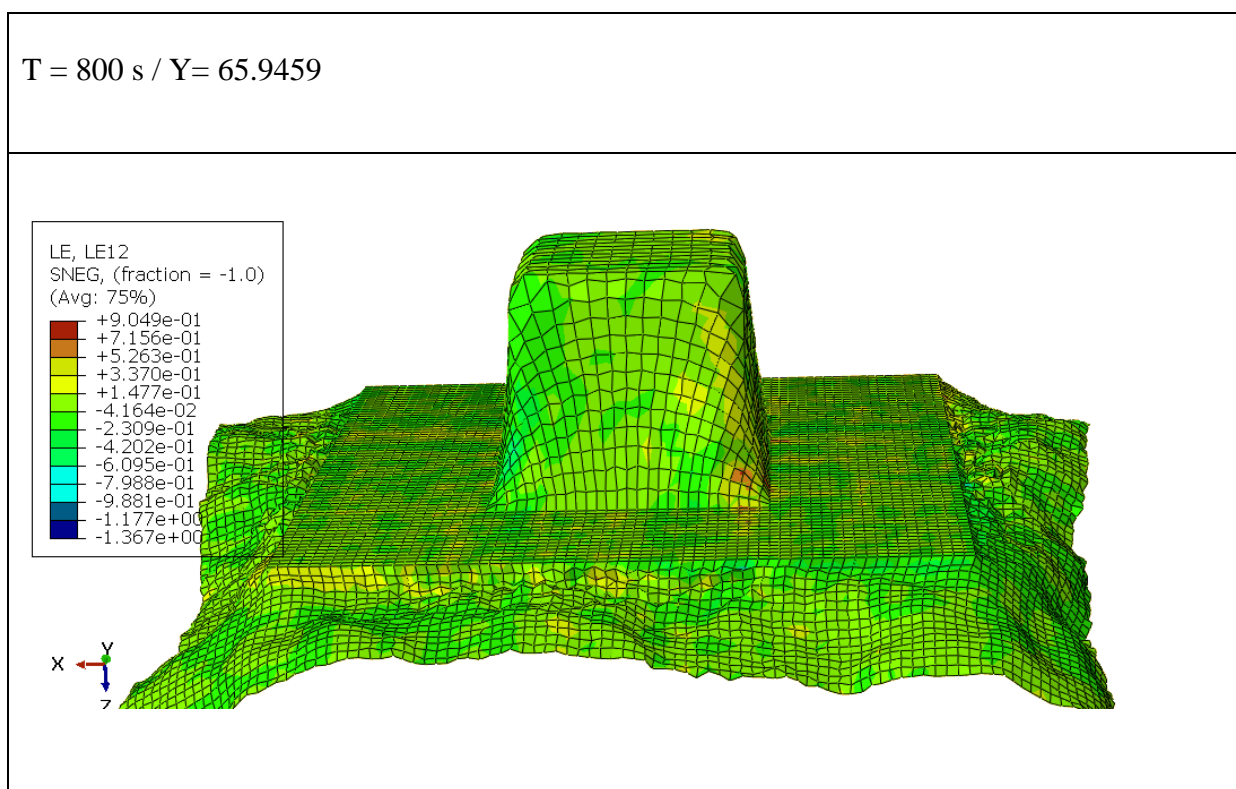


Figure IV -15 : la déformation de cisaillement 12 dans le plan du tissu

## 5 Conclusion

ABAQUS nous a permis de faire la simulation numérique en traction et cisaillement pour le calibrage du modèle, ainsi que la simulation d'emboutissage pour les poinçons 45A et 45S. Nous avons pu à la fin de ces opérations, de montrer la répartition des différentes déformations au niveau des préformes obtenues et leur évolution à différents instants.



**Conclusion et perspective**

## Conclusion et perspective

Ce travail de master a été consacré à l'étude du formage des tissus composites de taffetas. Nous avons d'abord commencé par la conception et l'étude d'un banc d'essais d'emboutissage de composites. Par la suite, nous avons réalisé un porte outil remplissant certaines exigences liées au procédé. Nous avons ensuite conçu les outils qui seront utilisés pour le formage des tissus. Deux procédés ont été utilisés : l'impression 3D et le moulage en sable. Les pièces imprimées en 3D ont été renforcées afin, d'abord, de pouvoir être utilisés comme empreintes pour le moulage en sable ; puis, éventuellement, être utilisées dans le futur comme outils.

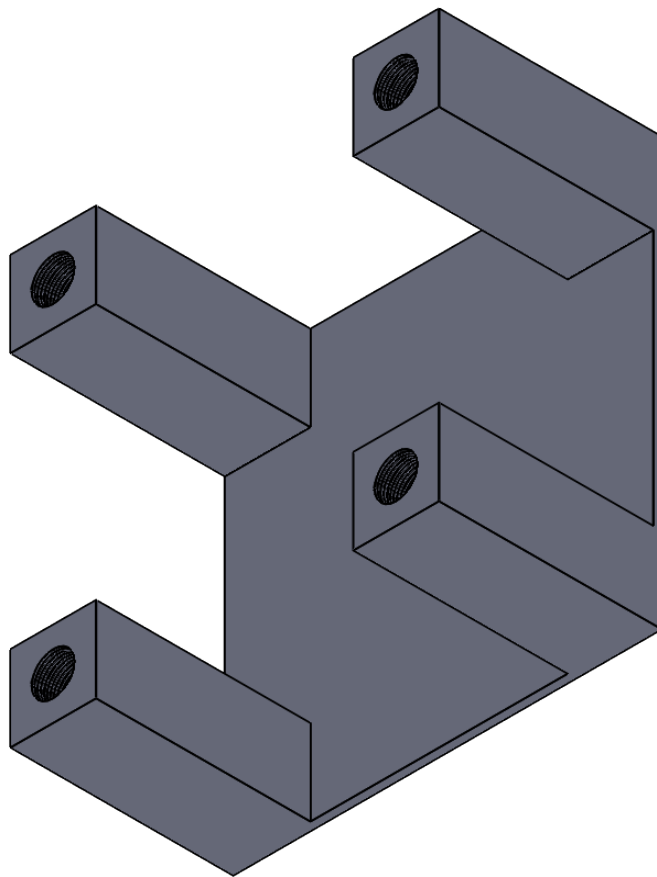
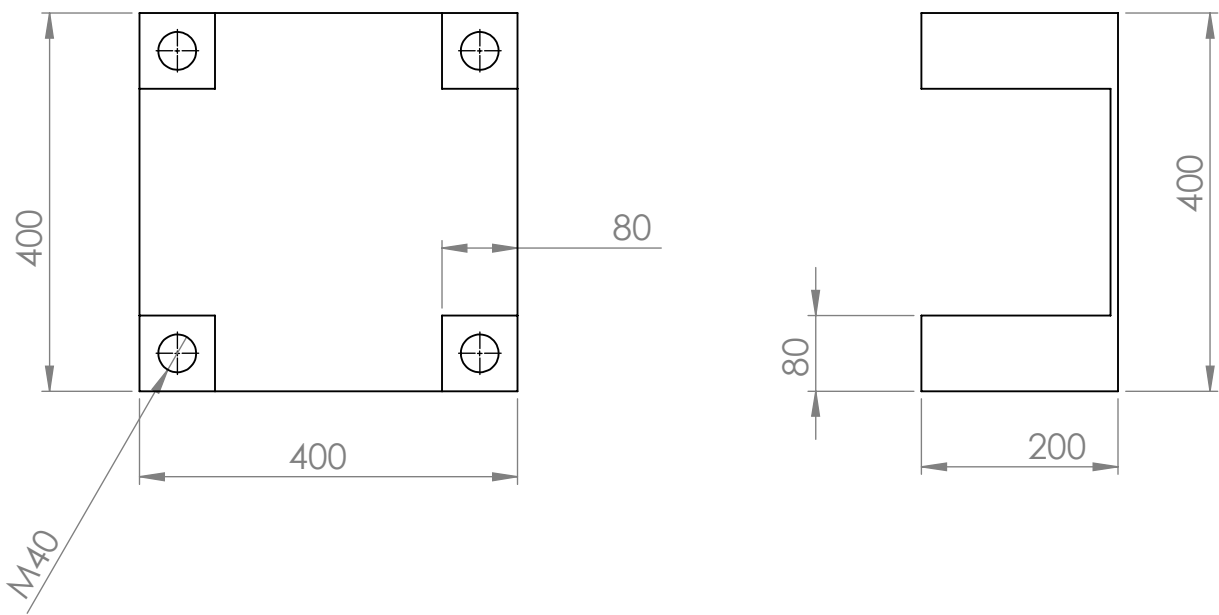
Une fois le banc testé avec les outils que nous avons réalisé, nous sommes passés aux essais sur les tissus de taffetas. Nous avons ainsi réalisé des essais d'emboutissage sous différentes conditions d'orientations d'outils et de dispositions de la pression sur le serre-flan. Le choix de plusieurs outils avec des orientations différentes de l'angle d'attaque a élargi la portée de notre étude. L'objectif de cette partie est la compréhension des défauts et des mécanismes de déformation des renforts au cours du procédé dans le but d'optimiser le formage et réalisé ainsi des préformes viables. A partir des résultats obtenus, nous avons mis en évidence des défauts récurrents de mise en forme : la décohésion du réseau de mèches, un phénomène de flambement de mèches et, un phénomène de glissement que nous avons essayé d'estimer et d'expliquer.

Afin de compléter la présente étude, nous avons utilisé l'outil numérique. Ainsi, nous avons d'abord effectué des simulations numériques en traction et cisaillement afin de calibrer le modèle de comportement. Par la suite, nous avons effectué quelques simulation d'emboutissage de tissus, toujours avec le même logiciel de simulation numérique Abaqus.

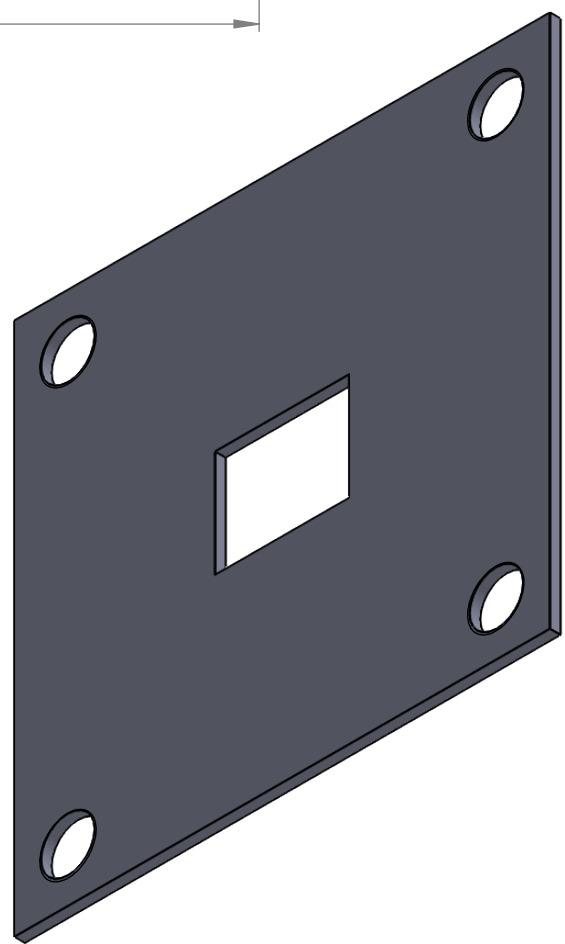
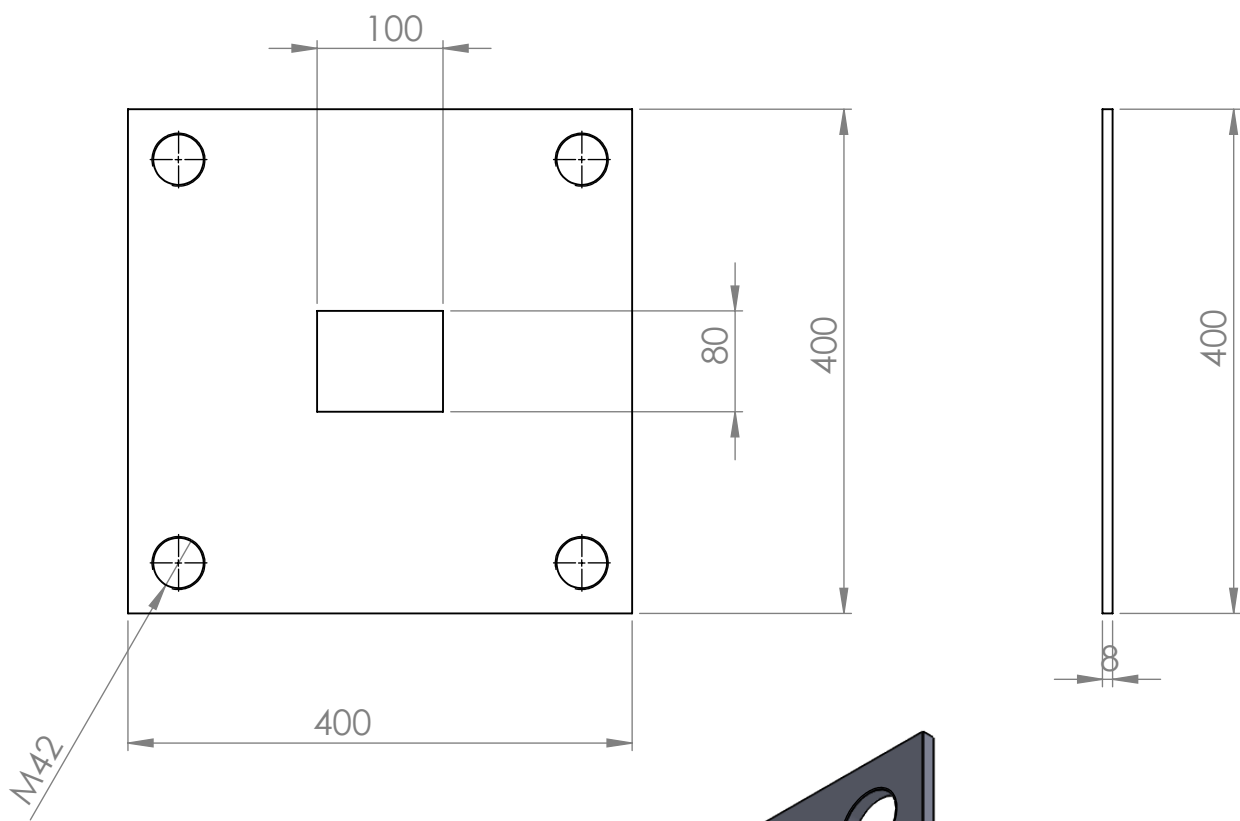
Le travail réalisé au cours de notre projet de fin d'études nous a permis de comprendre la difficulté et la complexité de manipulation et mise en forme des tissus. Nous suggérons, à titre de perspectives, l'amélioration du dispositif d'essai en lui rajoutant des capteurs de position ainsi que d'utiliser des vérins pour l'application de la pression du serre-flan. Aussi, il serait plus intéressant et commode d'opter pour des méthodes optiques qui permettent de réaliser des mesures sans contacts pour assurer plus de précision dans les mesures.



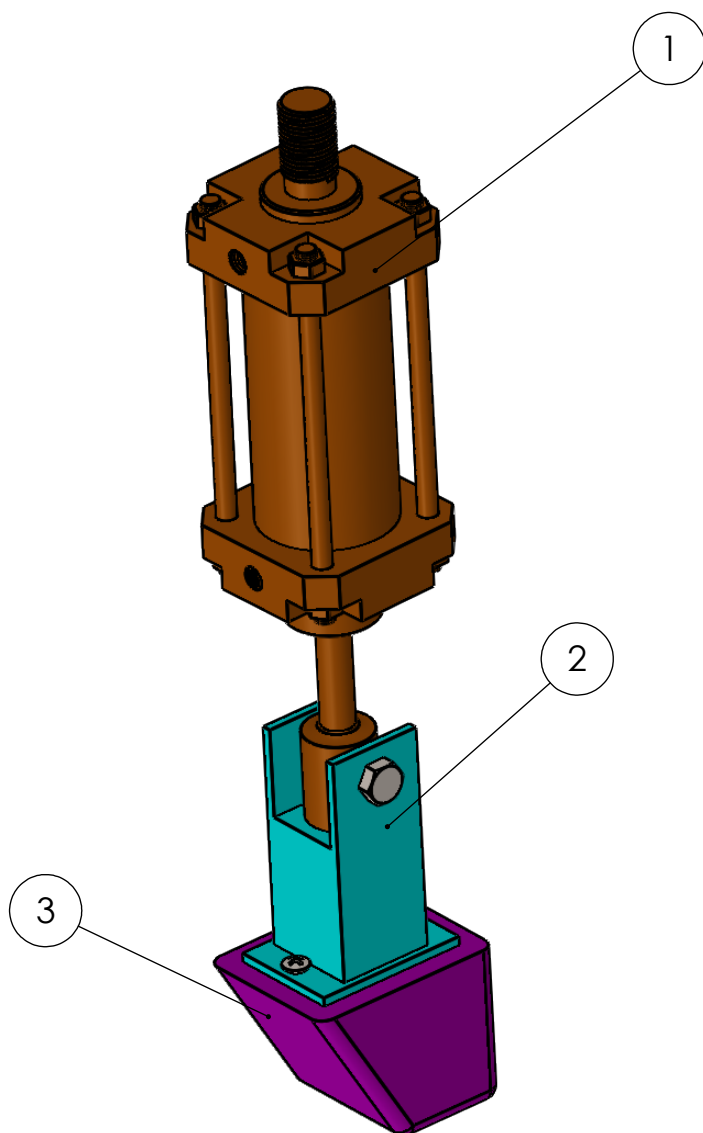
# **Annexes**



<p>Echelle: 1: 3</p>	<p style="text-align: center;"><b>BASE</b></p> <p style="text-align: center;"><b>Banc d'essai d'emboutissage en profondeur</b></p>	<p style="text-align: center;"><b>MEDJBOUR.S</b> <b>HADDAD.M</b></p>
		<p style="text-align: center;">Projet de fin d'études 2019/2020</p>
<p style="text-align: center;">A4</p>	<p style="text-align: center;">Université Mouloud Mammeri Tizi Ouzou</p>	<p style="text-align: center;">M2 CM</p>



<p>Echelle: 1:3</p>	<p style="text-align: center;"><b>MATRICE</b></p> <p style="text-align: center;"><b>Banc d'essai d'emboutissage en profondeur</b></p>	<p style="text-align: center;"><b>MEDJBOUR.S</b> <b>HADDAD.M</b></p>
		<p style="text-align: center;">Projet de fin d'études 2019/2020</p>
<p style="text-align: center;">A4</p>	<p style="text-align: center;">Université Mouloud Mammeri Tizi Ouzou</p>	<p style="text-align: center;">M2 CM</p>



1	vérin électrique
2	porte-poinçon
3	poinçon

Echelle:  
1:2

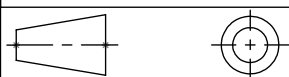
**partie mobile**

**MEDJBOUR.S**

**HADDAD.M**

**Banc d'essai d'emboutissage en profondeur**

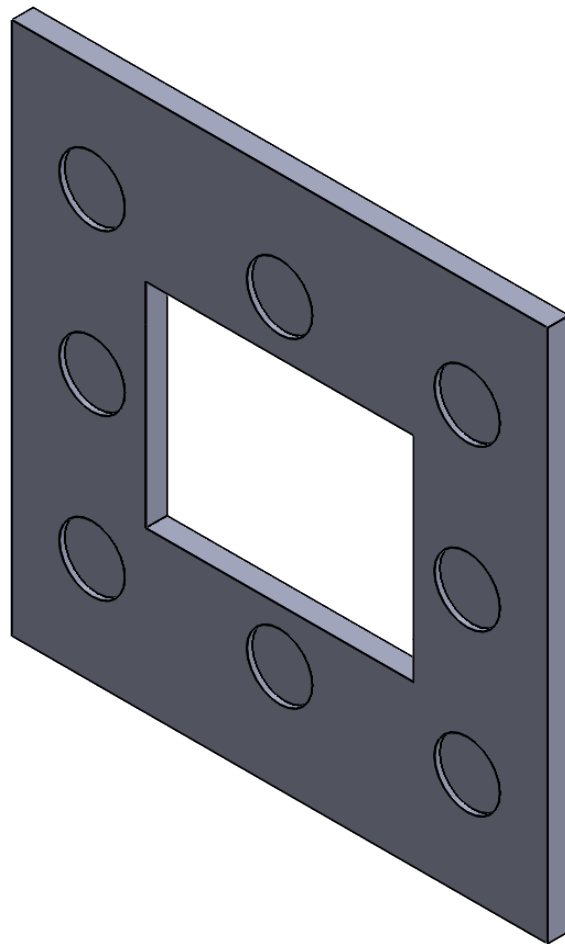
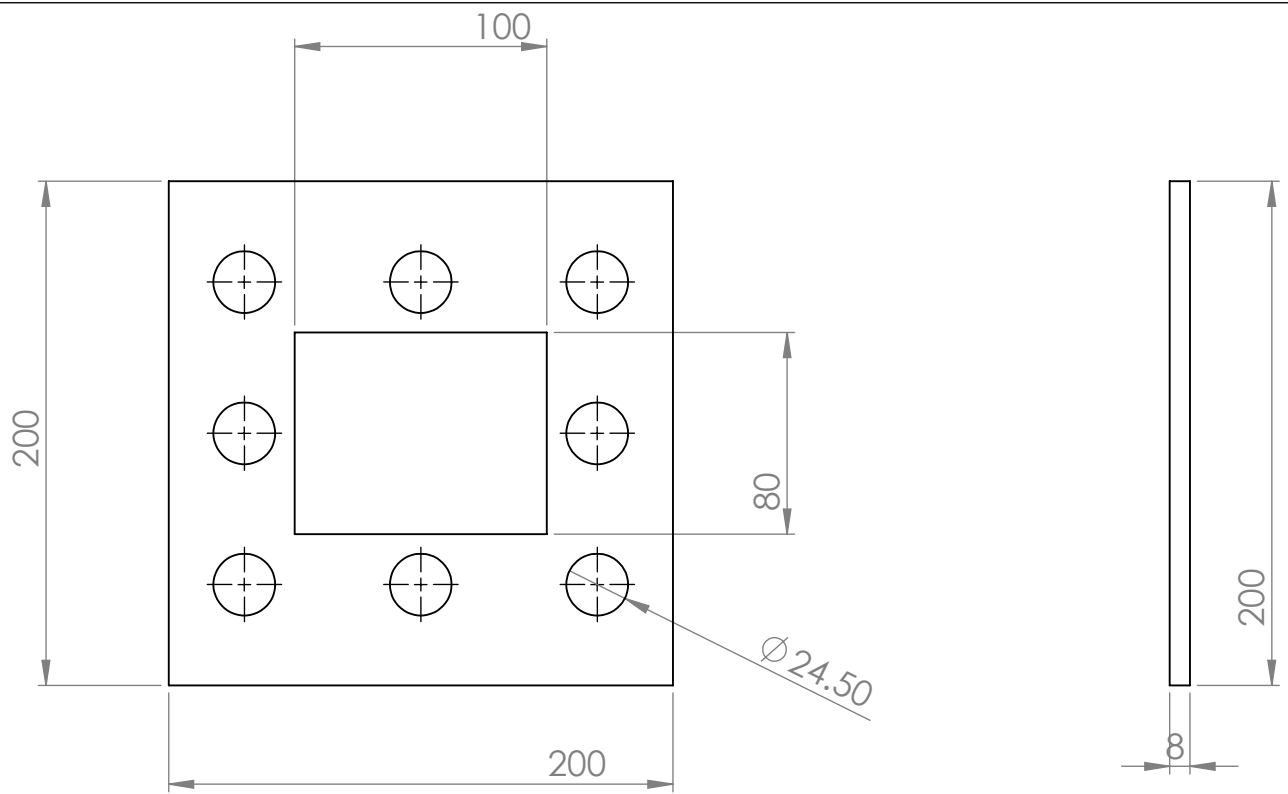
Projet de fin d'études  
2019/2020



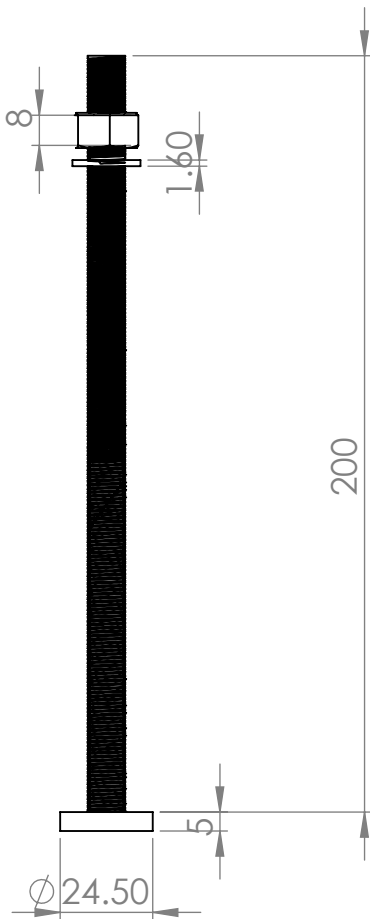
A4

Université Mouloud Mammeri Tizi Ouzou

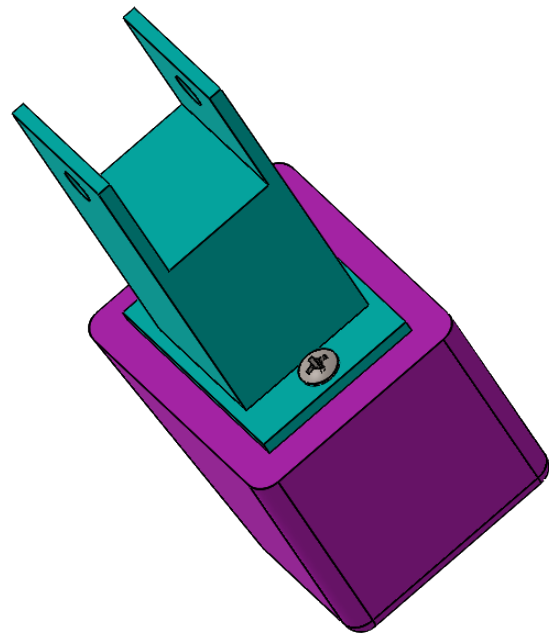
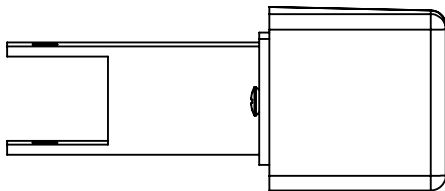
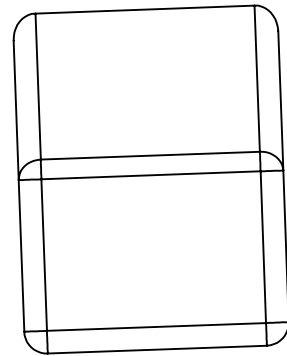
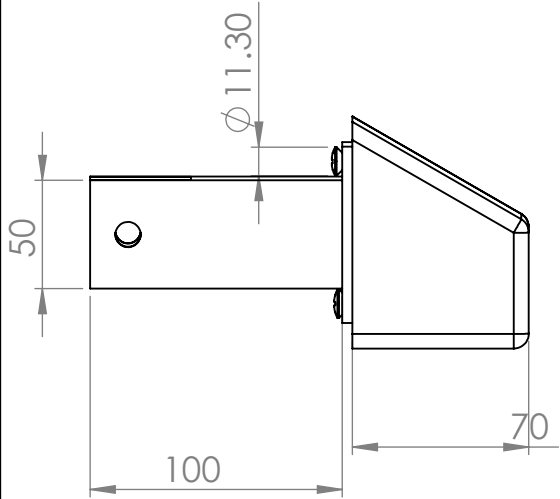
M2 CM

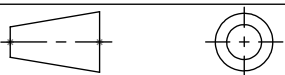


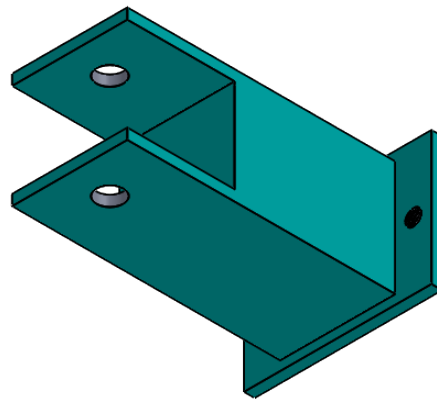
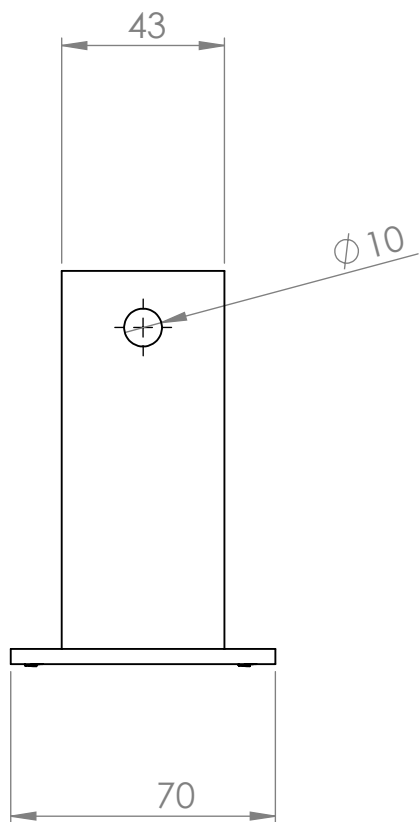
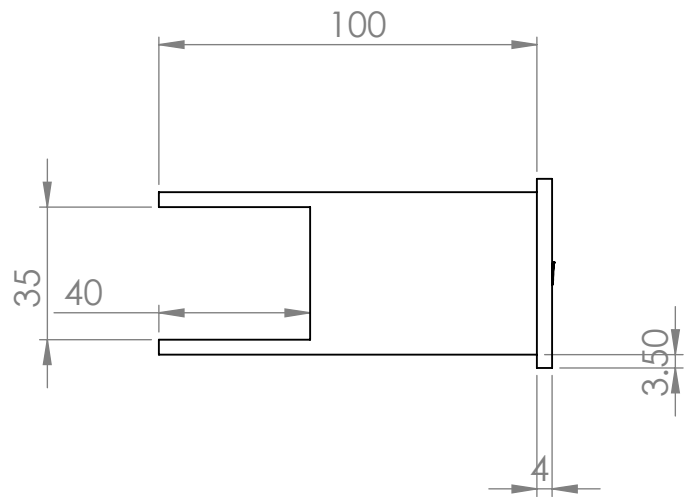
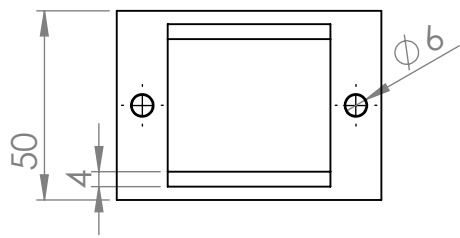
Echelle: 1:3	<b>SERRE FLAN</b>  <b>Banc d'essai d'emboutissage en profondeur</b>	<b>MEDJBOUR.S</b>  <b>HADDAD.M</b>
		Projet de fin d'études 2019/2020
A4	Université Mouloud Mammeri Tizi Ouzou	M2 CM



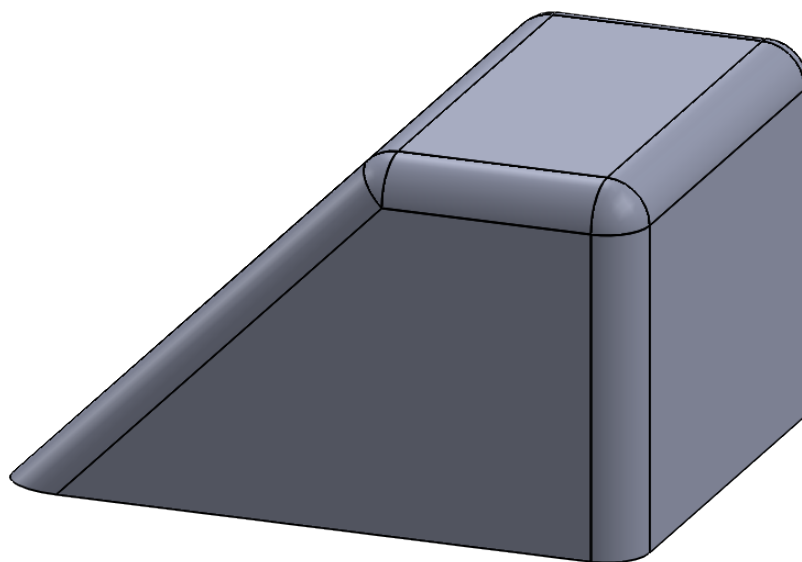
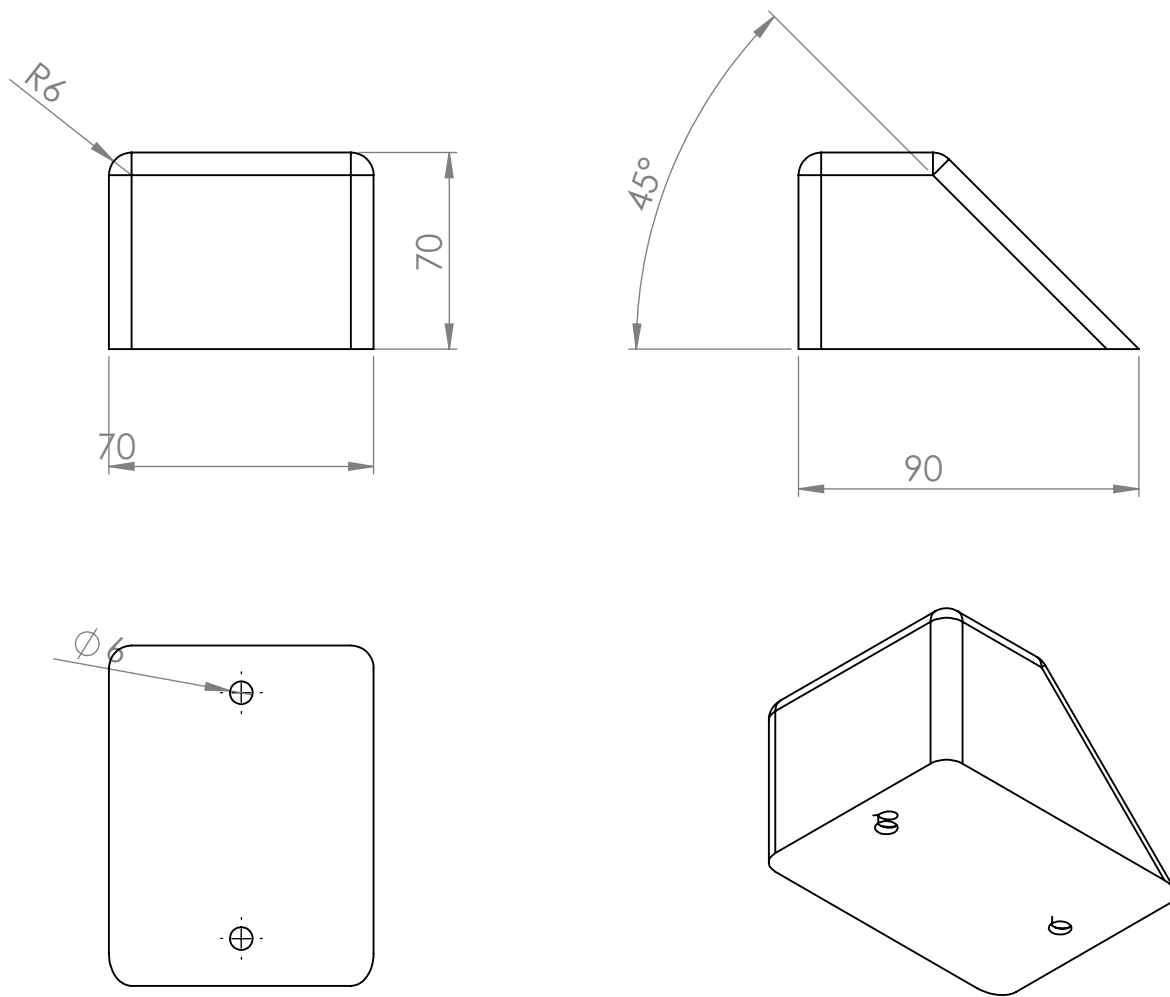
<p>Echelle: 1:12</p>	<p><b>TIGE DE PRESSION</b></p> <p><b>Banc d'essai d'emboutissage en profondeur</b></p>	<p><b>MEDJBOUR.S</b> <b>HADDAD.M</b></p>
		<p>Projet de fin d'études 2019/2020</p>
<p>A4</p>	<p>Université Mouloud Mammeri Tizi Ouzou</p>	<p>M2 CM</p>



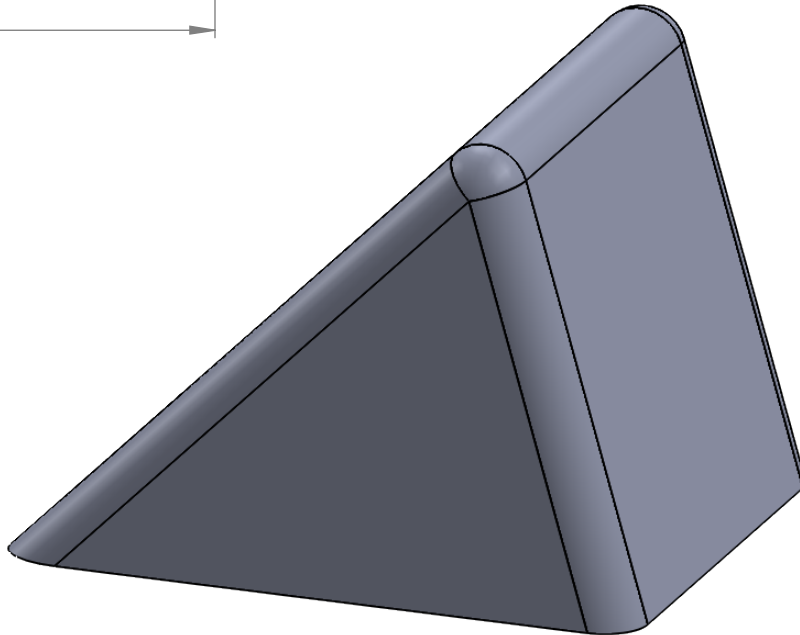
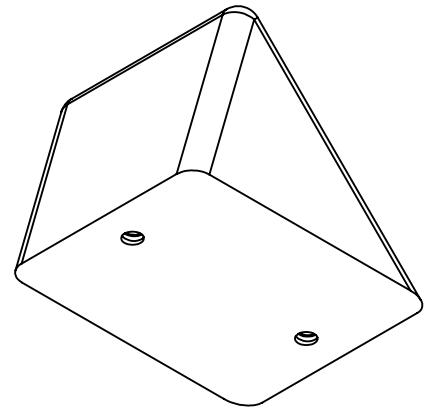
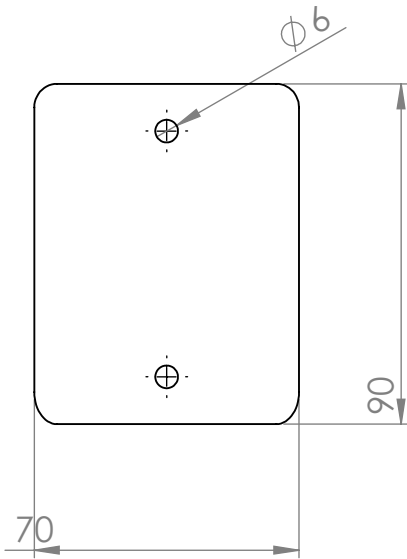
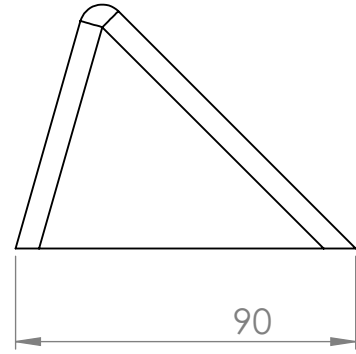
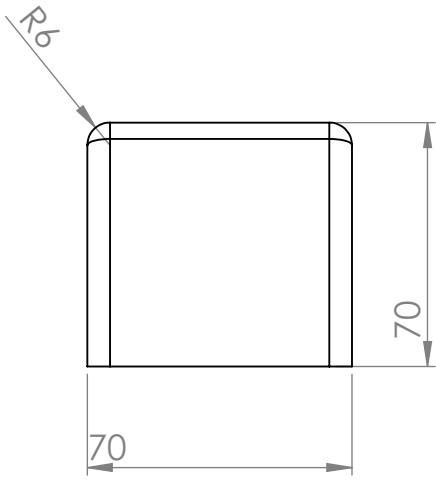
<p>Echelle: 1: 3</p>	<p align="center"><b>PORTE-POINÇON ET POINÇON</b></p> <p align="center"><b>Banc d'essai d'emboutissage en profondeur</b></p>	<p align="center"><b>MEDJBOUR.S</b></p> <p align="center"><b>HADDAD.M</b></p>
		<p align="center">Projet de fin d'études 2019/2020</p>
<p align="center">A4</p>	<p align="center">Université Mouloud Mammeri Tizi Ouzou</p>	<p align="center">M2 CM</p>



<p>Echelle: 1:3</p>	<p align="center"><b>PORTE POINÇON</b></p> <p align="center"><b>Banc d'essai d'emboutissage en profondeur</b></p>	<p align="center"><b>MEDJBOUR.S</b></p> <p align="center"><b>HADDAD.M</b></p>
		<p align="center">Projet de fin d'études 2019/2020</p>
<p align="center">A4</p>	<p align="center">Université Mouloud Mammeri Tizi Ouzou</p>	<p align="center">M2 CM</p>



<p>Echelle: 1:3</p>	<p align="center"><b>POINÇON 60 S</b></p> <p align="center"><b>Banc d'essai d'emboutissage en profondeur</b></p>	<p align="center"><b>MEDJBOUR.S</b> <b>HADDAD.M</b></p>
		<p align="center">Projet de fin d'études 2019/2020</p>
<p align="center">A4</p>	<p align="center">Université Mouloud Mammeri Tizi Ouzou</p>	<p align="center">M2 CM</p>



Echelle:  
1:3

**POINÇON 60A**

**MEDJBOUR.S**

**HADDAD.M**

**Banc d'essai d'emboutissage en profondeur**

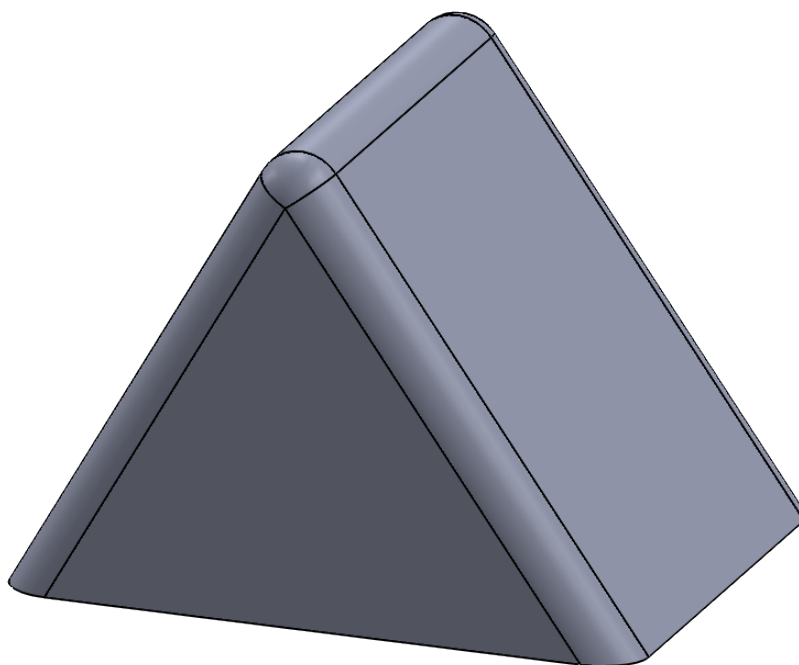
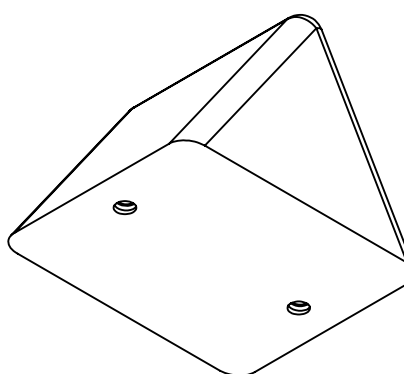
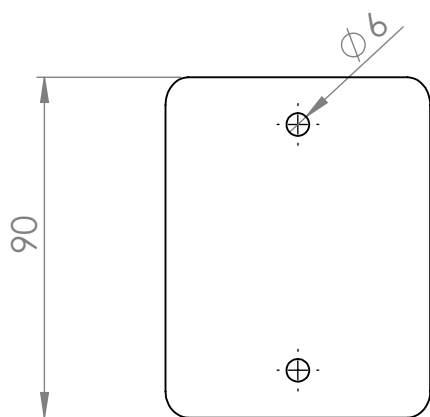
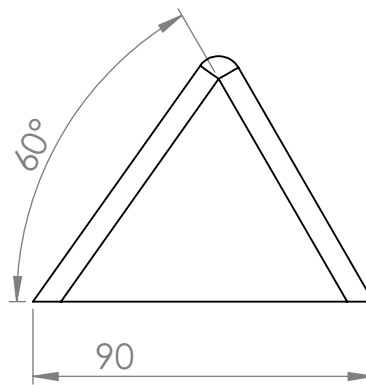
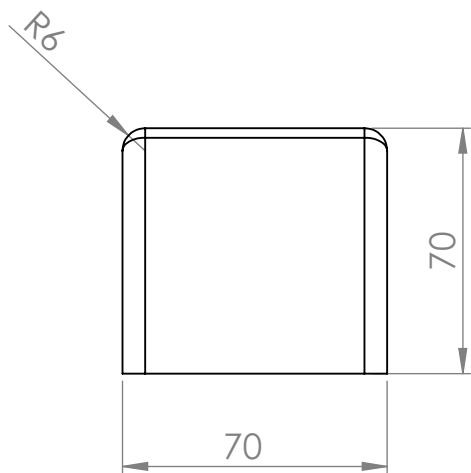
Projet de fin d'études  
2019/2020



A4

Université Mouloud Mammeri Tizi Ouzou

M2 CM



Echelle:  
1:2

**POINÇON 60 A**

**MEDJBOUR.S**  
**HADDAD.M**

**Banc d'essai d'emboutissage en profondeur**

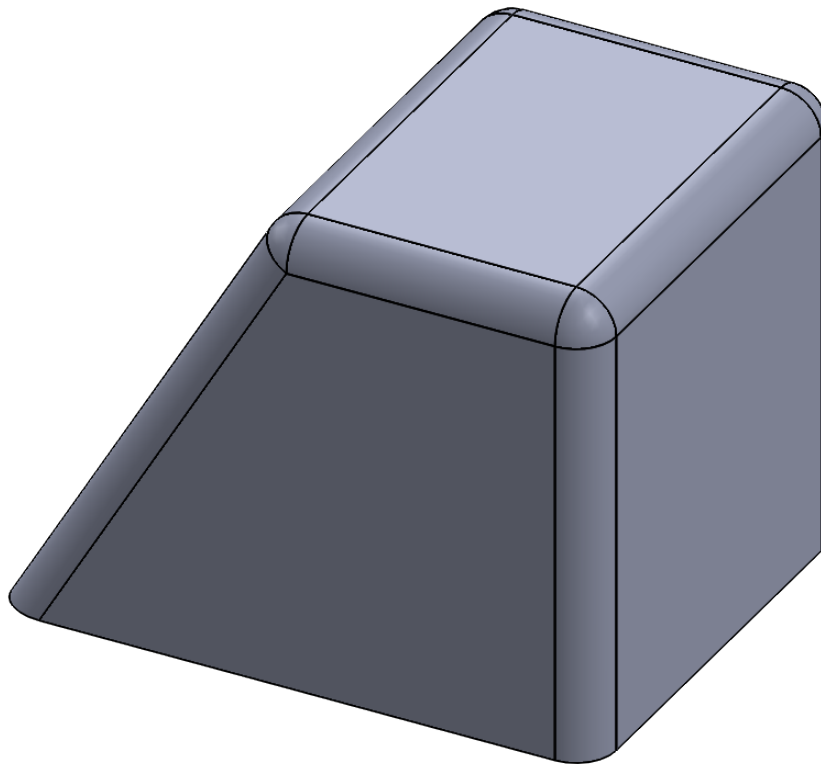
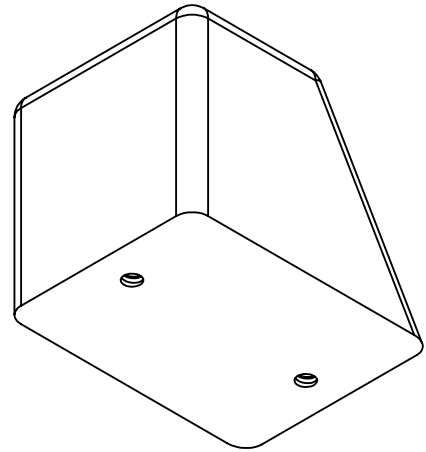
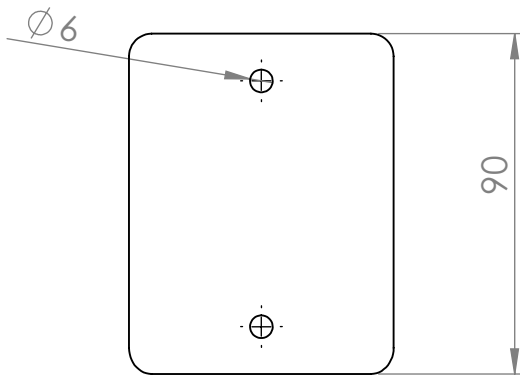
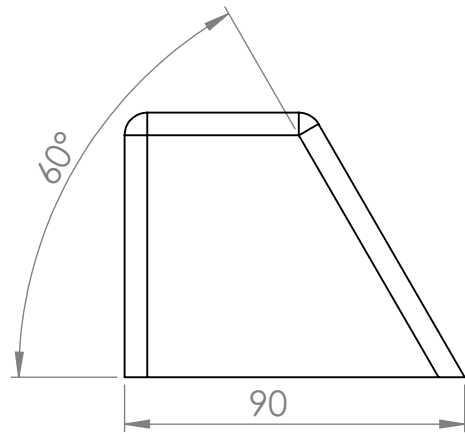
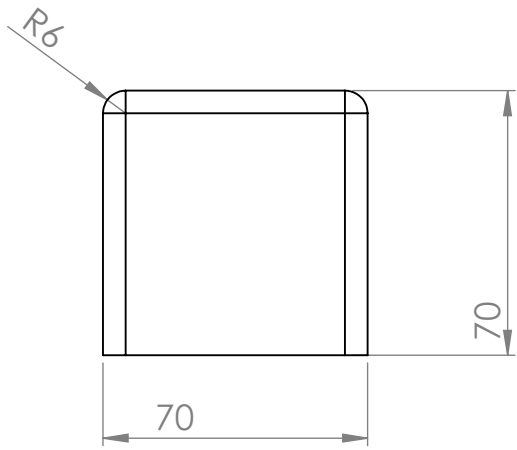
Projet de fin d'études  
2019/2020



A4

Université Mouloud Mammeri Tizi Ouzou

M2 CM



Echelle:  
1:2

**POINÇON 60 S**

**MEDJBOUR.S**

**HADDAD.M**

**Banc d'essai d'emboutissage en profondeur**

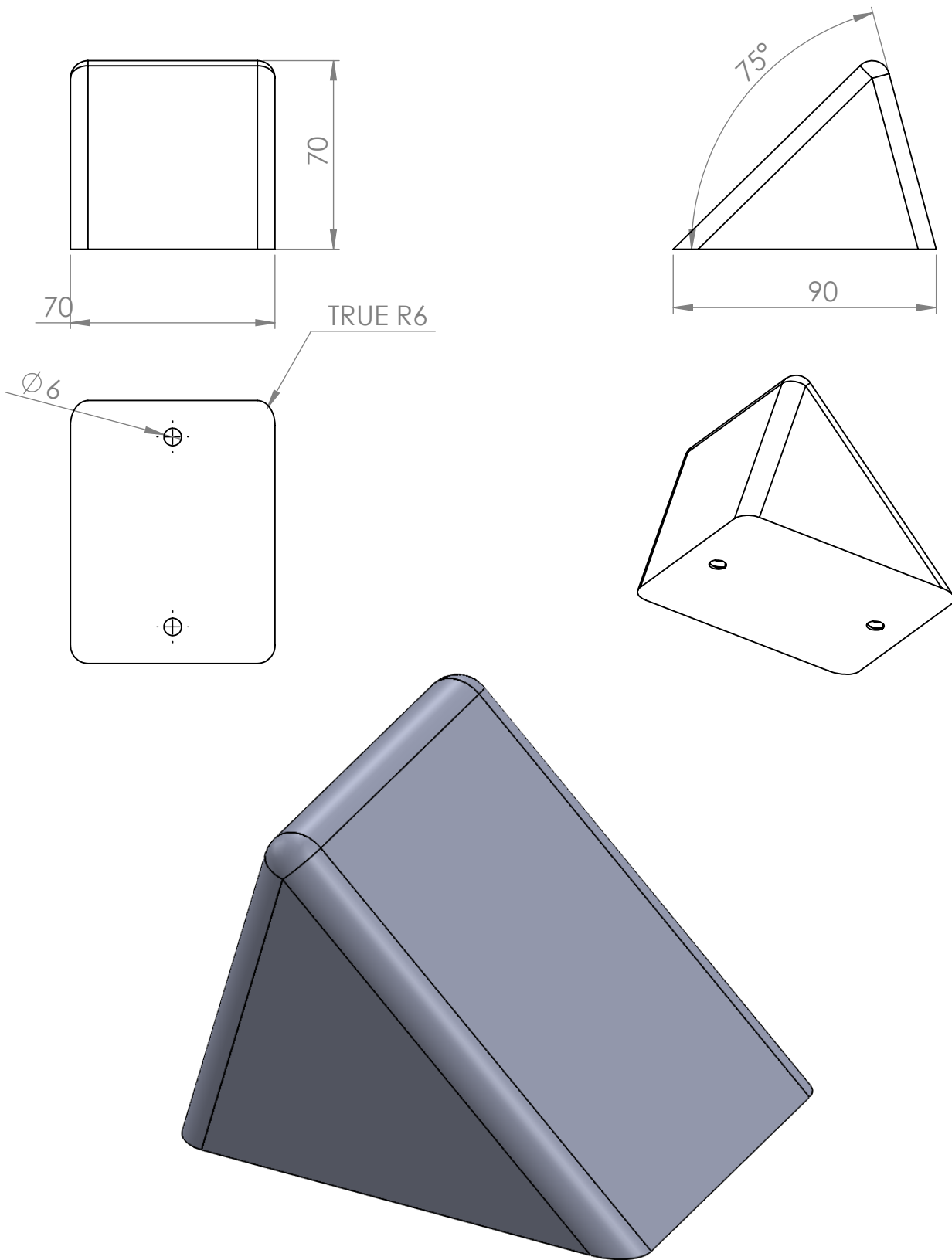
Projet de fin d'études  
2019/2020

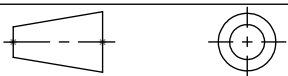


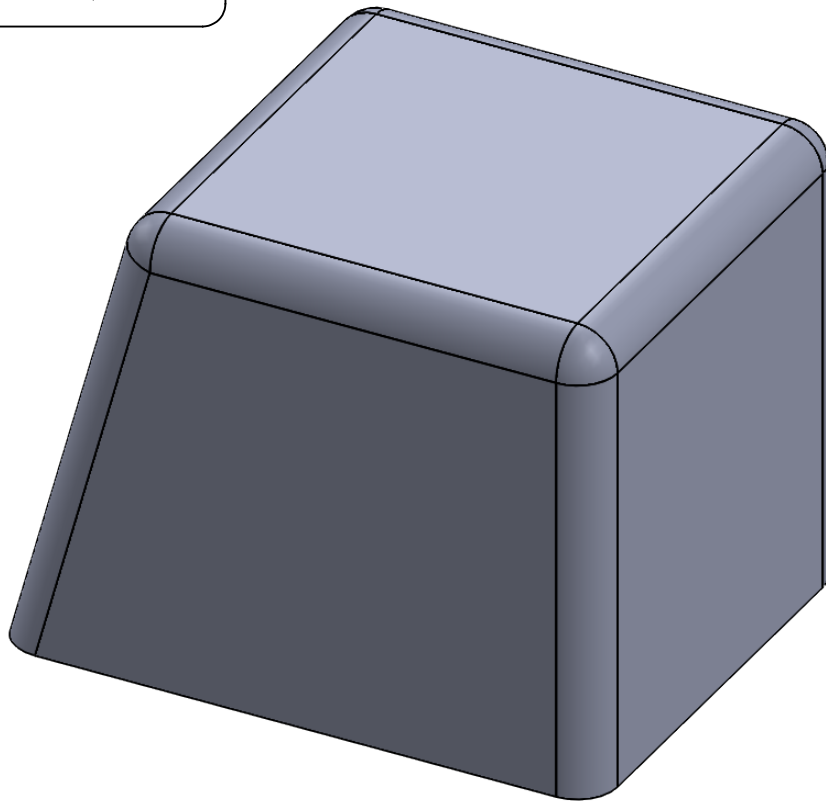
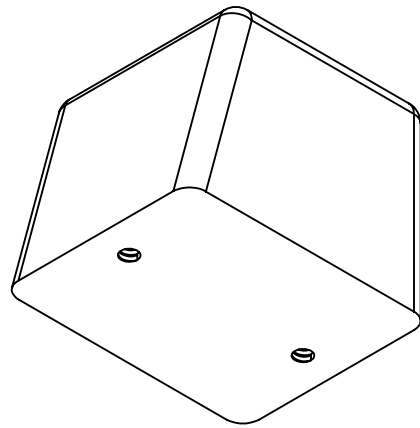
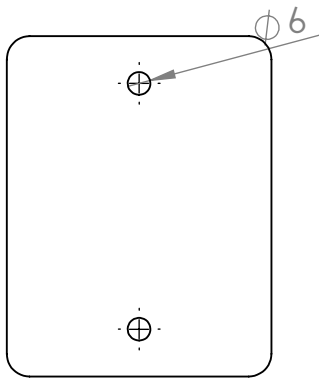
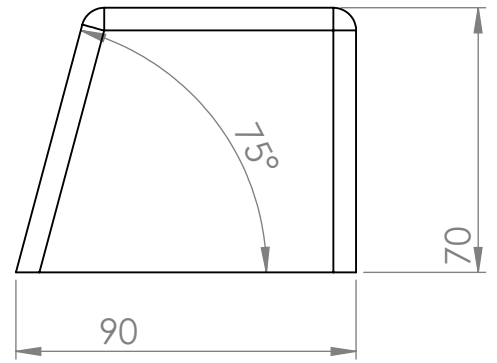
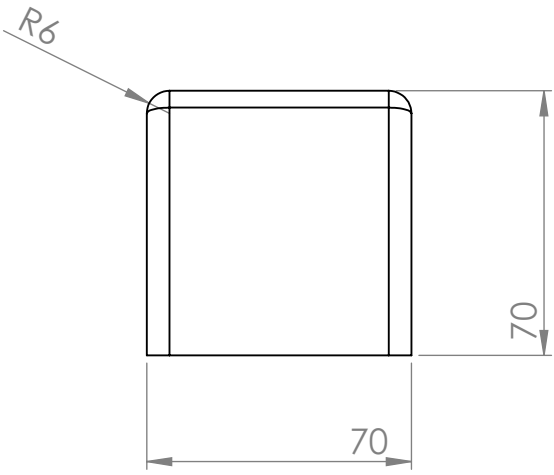
A4

Université Mouloud Mammeri Tizi Ouzou

M2 CM



<p>Echelle: 1:2</p>	<p align="center"><b>POINÇON 75 A</b></p> <p align="center"><b>Banc d'essai d'emboutissage en profondeur</b></p>	<p align="center"><b>MEDJBOUR.S</b></p> <p align="center"><b>HADDAD.M</b></p>
		<p align="center">Projet de fin d'études 2019/2020</p>
<p align="center">A4</p>	<p align="center">Université Mouloud Mammeri Tizi Ouzou</p>	<p align="center">M2 CM</p>



Echelle:  
1:3

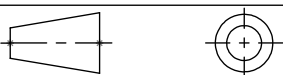
**POINÇON 75S**

**MEDJBOUR.S**

**HADDAD.M**

**Banc d'essai d'emboutissage en profondeur**

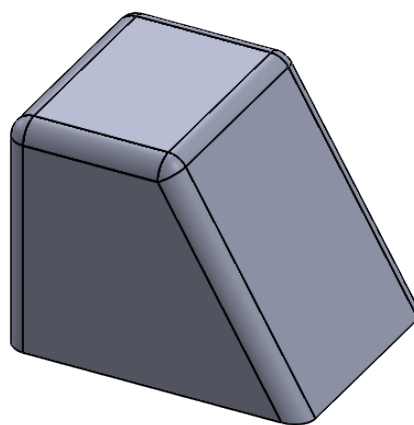
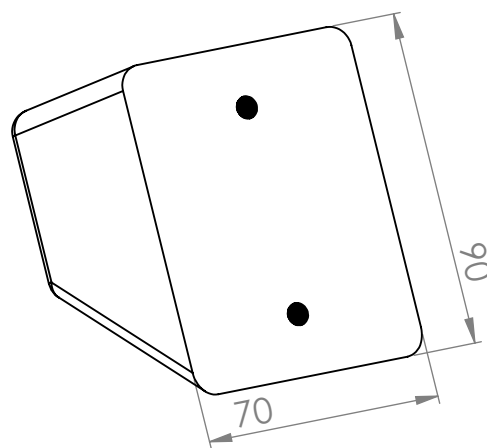
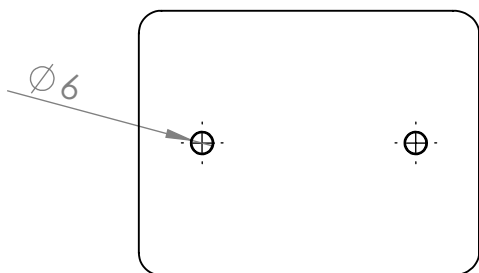
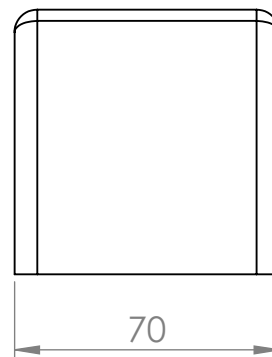
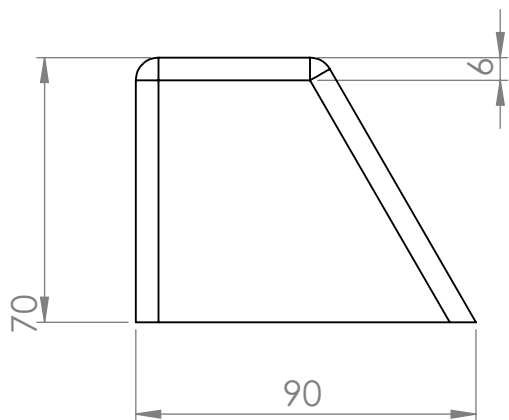
Projet de fin d'études  
2019/2020




A4

Université Mouloud Mammeri Tizi Ouzou

M2 CM



<p>Echelle: 1:1</p>	<p>poinçon 64 s banc d'essai d'emboutissage en profondeur</p>	<p>MEDJBOUR.S HADDAD.M</p>
		<p>Projet de fin d'études 2019/2020</p>
<p>A4</p>	<p>Université Mouloud Mammeri Tizi Ouzou</p>	<p>M2 CM</p>

Poinçon : 75s

Charge : 8 L'angle de position du tissu 0°	Faces					L'arrête							
	1	2	3	4	5	1/2	1/3	1/4	1/5	2/3	3/4	4/5	5/2
Glissement (mm)	4	8	2	3	3	23	22	38	19	16	20	30	25
Flambement	x	x	x	x									
L'angle de cisaillement	5	8	3	30	8								

Charge : 8 L'angle de position du tissu 45°	Faces					L'arrête							
	1	2	3	4	5	1/2	1/3	1/4	1/5	2/3	3/4	4/5	5/2
Glissement (mm)	3	8	6	6	8	6	2	5	3	5	0	4	3
Flambement									x	x	x	x	x
L'angle de cisaillement	5	0	30	34	40								

Charge : 8 L'angle de position de tissu 60°	Faces					L'arrête							
	1	2	3	4	5	1/2	1/3	1/4	1/5	2/3	3/4	4/5	5/2
Glissement (mm)	5	6	12	11	14	7	8	7	5	7	13	8	3
Flambement										x	x	x	x
L'angle de cisaillement	5	40	43	30	47								

Charge : 8 L'angle de position du tissu 75°	Faces					L'arrête							
	1	2	3	4	5	1/2	1/3	1/4	1/5	2/3	3/4	4/5	5/2
Glissement (mm)	3	8	4	4	4	3	5	3	8	3	3	2	6
Flambement											x	x	x
L'angle de cisaillement	10	10	24	43	0								

Charge : 4 L'angle de position du tissu 0°	Faces					L'arrête								
	1	2	3	4	5	1/2	1/3	¼	1/5	2/3	3/4	4/5	5/2	
Glissement (mm)	2	2	4	5	6	23	24	42	34	36	46	46	36	
Flambement	×				×									
L'angle de cisaillement	2	3	6	28	8									

Charge : 4 L'angle de position du tissu 45°	Faces					L'arrête								
	1	2	3	4	5	1/2	1/3	¼	1/5	2/3	3/4	4/5	5/2	
Glissement (mm)	0	10	6	9	8	3	4	0	5	10	8	8	10	
Flambement										×	×	×	×	
L'angle de cisaillement	5	0	30	34	25									

Charge : 4 L'angle de position du tissu 60°	Faces					L'arrête								
	1	2	3	4	5	1/2	1/3	¼	1/4	2/3	3/4	4/5	5/2	
Glissement (mm)	0	11	8	14	10	6	3	10	5	3	3	6	2	
Flambement										×	×	×	×	
L'angle de cisaillement	45	30	34	10	30									

Charge : 4 L'angle de position du tissu 75°	Faces					L'arrête								
	1	2	3	4	5	1/2	1/3	1/4	1/5	2/3	3/4	4/5	5/2	
Glissement (mm)	5	15	10	11	20	7	7	7	8	4	4	3	5	
Flambement										×	×			
L'angle de cisaillement	2	15	29	2	36									

Charge : 8 L'angle de position du tissu 0°	Faces				L'arrête				
	1	2	3	4	1/2	1/4	¾	3/2	1/3
Glissement (mm)	2	17	27	58	4	2	24	36	4
Flambement	×	×	×						
L'angle de cisaillement	1	40	8	16					

Charge : 8 L'angle de position du tissu 45°	Faces				L'arrête				
	1	2	3	4	1/2	1/4	¾	3/2	1/3
Glissement (mm)	5	7	4	11	2	13	13	8	3
Flambement	×	×			×	×	×	×	
L'angle de cisaillement	5	0	30	34					

Charge : 8 L'angle de position du tissu 60°	Faces				L'arrête				
	1	2	3	4	1/2	1/4	¾	3/2	1/3
Glissement (mm)	1	11	3	17	2	10	15	13	4
Flambement						×	×	×	
L'angle de cisaillement	20	24	36	24					

Charge : 8 L'angle de position du tissu 75°	Faces				L'arrête				
	1	2	3	4	1/2	1/4	¾	3/2	1/3
Glissement	9	15	2	15	11	8	20	17	8
Flambement					×	×	×	×	
L'angle de cisaillement	17	9	36	30					

Charge : 4 L'angle de position du tissu 0°	Faces				L'arrête				
	1	2	3	4	1/2	1/4	3/4	3/2	1/3
Glissement (mm)	5	65	8	30	5	2	17	5	38
Flambement		x	x	x					
L'angle de cisaillement	1	41	19	14					

Charge : 4 L'angle de position du tissu 45°	Faces				L'arrête				
	1	2	3	4	1/2	1/4	3/4	3/2	1/3
Glissement (mm)	3	7	8	23	14	12	29	13	3
Flambement					x	x	x	x	
L'angle de cisaillement	10	30	40	0					

Charge : 4 L'angle de position du tissu 60°	Faces				L'arrête				
	1	2	3	4	1/2	1/4	3/4	3/2	1/3
Glissement (mm)	4	7	6	8	5	11	25	13	4
Flambement				x	x	x	x	x	
L'angle de cisaillement	5	37	46	35					

Charge : 4 L'angle de position du tissu 75°	Faces				L'arrête				
	1	2	3	4	1/2	1/4	3/4	3/2	1/3
Glissement (mm)	2	13	10	19	3	8	33	28	6
Flambement		x		x					
L'angle de cisaillement	10	60	39	1					