

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



UNIVERSITÉ MOULOUD MAMMERI DE TIZI OUZOU  
FACULTÉ DE GENIE DE LA CONSTRUCTION  
DEPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE



## MÉMOIRE

*De fin d'études*

En vue de l'obtention du diplôme de Master  
En Génie Mécanique

*OPTION : FABRICATION MECANIQUE ET PRODUCTIVE*

*Thème*

# Étude de comportement mécanique de PMMA en traction uniaxiale et biaxiale

Proposé par :  
Mr. K.HACHOUR

Étudié par :  
NEKROUCHE ANISSA  
MOHAMMEDI DJEDJIGA

Promotion 2017/2018

# Sommaire

Remerciements.....	i
Dédicaces.....	ii
Table des illustrations Figures.....	iv
Table des illustrations Tableau.....	vii
Liste des symboles.....	viii
Introduction générale.....	I
Chapitre.....	I
Introduction.....	1
Généralités sur les polymères.....	1
I.1.Définition :.....	1
I.2.Les procédés de fabrication d'un polymère.....	2
I.2.1. Polymérisation :.....	2
I.2.2. Polycondensation :.....	2
I.2.3. Polyaddition.....	2
I.3.Les différents types des polymères :.....	3
I.3.1. Les thermoplastiques.....	3
I.3.2.Les thermodurcissables.....	4
I.3.3 Les élastomères.....	4
I.4.Propriétés des polymères.....	4
I.4.1.Les propriétés mécaniques :.....	4
I.4.2.Les propriétés physiques.....	5
I.4.3.Les propriétés chimiques.....	5
I.4.4.Les propriétés optiques.....	5
I.4.5. les propriétés électrique.....	5

I.4.6. Les propriétés thermiques.....	6
I.5.Mise en oeuvre des polymères.....	6
I.6.Le matériau polyméthacrylat de méthyle :.....	10
I.7.Mode d'obtention des polyméthacrylat de méthyle.....	10
I.8.structure moléculaire.....	11
I.9.propriétés des PMMA.....	11
I.9.1. Les Propriétés physiques.....	11
I.9.2. Les Propriétés thermique.....	12
I.9.3. Les propriétés chimiques.....	12
I.9.4. Les propriétés électriques.....	12
I.10. caractéristique des PMMA.....	12
I.10.1. Les caractéristiques mécaniques.....	12
I.10.2. Caractéristique physique.....	13
I.10.3. Caractéristique thermiques.....	13
I.10.4. Caractéristique électrique.....	13
I.10.5. Caractéristique chimique.....	13
I.11.comportement mécanique de polyméthacrylat de méthyle.....	14
I.11.1. Effet de la vitesse de déformation.....	14
I.11.2. Effet de la température.....	14
I.12. Mise en oeuvre.....	15
❖ Propriétés de mise en oeuvre.....	16
❖ Utilisation.....	16
❖ Les avantages.....	17
❖ Les inconvénient.....	17
Généralités sur les essais mécaniques.....	18
I.13.Les essais mécaniques uniaxiaux.....	18
I.13.1. Essai de traction.....	18
I.13.1.1.définition.....	18
I.13.1.2. Description générale d'une machine de traction.....	19

I.13.1.3. L'éprouvette.....	20
I.13.1.4. Exploitation de l'essai.....	21
I.13.2. essai de compression.....	23
I.13.3. Essai de flexion.....	24
I.13.4. Essai de cisaillement.....	25
❖ Le Concept de Cisaillement .....	25
I.13.5. Essai de torsion.....	26
❖ But de l'essai de torsion .....	27
I.13.6. Essai de Fatigue.....	27
I.14. Les essais mécaniques multiaxiaux.....	27
I.14.1. Les essais mécaniques biaxiale.....	28
I.14.1.1. Traction biaxiale.....	28
❖ But de l'essai.....	28
❖ Principe de l'essai traction biaxial .....	28
❖ Les dispositifs de traction biaxiale .....	29
❖ les éprouvettes biaxiales .....	31
I.14.1.2. Traction-torsion.....	32
❖ Principe de l'essai .....	32
I.14.1.3. Essai de traction-cisaillement.....	32
I.15. Conclusion.....	34
Chapitre II Méthodes expérimentales	
II.1 Introduction.....	35
II.2 Le matériau d'étude.....	35
II.3 Géométrie des éprouvettes .....	35
II.3.1 Éprouvettes de traction uniaxiale.....	35
II.3.2 Éprouvette cruciformes.....	36
II.4 Dispositif de l'essai.....	38
II.4.1 Principe de fonctionnement.....	40
□ Les éléments constituent le dispositif sont donné comme suivent .....	40
II.4.2 Fixation de l'appareil traction biaxiale sur la machine de traction.....	45
II.4.3 Procédés de fabrication de la bride.....	48
❖ Croque des phases .....	49
❖ Le dispositif après la modification.....	52
II.5 L'essai de traction.....	53

II.5.1 Essai de traction uniaxial.....	53
II.5.2 Essai de traction biaxiale.....	53
II.6 Conclusion.....	53
Chapitre III : Résultats et discussions	
III.1 Introduction.....	54
III.2 Étude du comportement mécanique du PMMA en traction uniaxiale.....	54
III.3 Effet de la vitesse de chargement sur le comportement mécanique du PMMA en traction uniaxiale.....	57
III.4 Étude du comportement mécanique du PMMA en traction biaxiale .....	60
III.4.1 : Effet de la vitesse sur le comportement du PMMA en charge biaxiale.....	62
❖ Caractéristique contraintes de PMMA a la traction biaxiale.....	63
III.4 Conclusion.....	64
Conclusion générale.....	II

# *Remerciements*

*Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail.*

*En second lieu, nous tenons à remercier notre encadreur MR HACHOUR, son précieux conseil et son aide durant toute la période du travail.*

*Nos vifs remerciements vont également aux membre du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail et de l'enrichir par leur propositions.*

*Nous adressons nos vifs remerciements à l'ensemble du personnel de l'atelier du hall technologie d'Oued Aïssi pour leurs aides dans notre activité.*

*Nous tenons également à remercier CHETTOUANI FODHIL et toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.*

*A nous familles et nos mères qui par leurs prières et leurs encouragements, on a pu surmonter tous les obstacles*

*A nous petites famille nous maris et mon bébé AYLAN*

*A mon père NEKROUCHE MOKRAN qui n'est pas là, mais je sais bien que son âme est toujours avec moi*

## *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail à :*

*A la mémoire de mon père que dieu le accueille dans son  
vaste paradis.*

*Ma très chère mère qui j'aime beaucoup qui est toujours à  
mes cotes.*

*Mes très chère frère Amar, Meziane et Arzeki.*

*Mes très chère sœurs Tassadit, Sabrina, Dihia et Messade qui  
m'ont toujours soutenu.*

*A ma très chère belle famille*

*Mon mari Moussa*

*A tout ma famille*

*A tout mes amis*

## *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail à :*

*Ma très chère mère que j'aime beaucoup*

*Mon très cher père qui est toujours à mes côtés ;*

*Mes très chère frère Mouloud, Farid, Rezki, Mohamed, Ahmed*

*Mes très chère sœur Louiza, Thiziri*

*Qui m'ont toujours soutenu*

*Les petits Sarah, Sifaxe, Ania, Thanina, Lina, Cylia, Ilyan,*

*Nihad, Melissa,*

*A ma très chère belle famille*

*Mon mari Imad*

*A mon petit bébé Aylan*

*A tout ma famille*

*A tout mes amis Louiza, Anissa, Dalila, Nourdin, Walid*

# Table des illustrations

## Figures

### Chapitre I : ÉTUDES BIBLIOGRAPHIQUES

<b>Figure I.1</b> : Polymères amorphes .....	5
<b>Figure. I.2</b> : Polymère semi-cristallin .....	6
<b>Figure I.3</b> : Tubes en PVC extrudé .....	8
<b>Figure I.4</b> : Pièce en matière plastique moulée par injection.....	9
<b>Figure I.5</b> : Processus d'injection et soufflage.....	9
<b>Figure I.6</b> : Extrusion-gonflage : formation d'une bulle cylindrique verticale, pour la production de films .....	10
<b>Figure I.7</b> : Rotomoulage .....	10
<b>Figure I.8</b> : procédé de thermoformage.....	11
<b>Figure I.9</b> : procédé de moulage.....	11
<b>Figure I.10</b> : La structure du PMMA.....	13
<b>Figure I.11</b> : Contrainte vraie-déformations vraie de PMMA pour trois vitesses de déformation a) $T=298$ K, b) $T=233$ K. La correction isotherme est appliquée à l'essai à 0.1s - 1 uniquement.....	16
<b>Figure I.12</b> Contrainte vraie vraie-déformation vraie du PMMA a $\dot{\epsilon} = 0.1$ différentes températures.....	17
<b>Figure I.13</b> : Photo de la machine de traction ZWICK.....	21
<b>Figure I.14</b> : Eprouvette de traction.....	22
<b>Figure I.15</b> : Diagramme effort-déformation de la traction simple.....	23
<b>Figure I.16</b> : Caractéristiques de l'essai de traction uniaxiale.....	25
<b>Figure I.17</b> : Test de compression simple figure : compression d'une éprouvette cylindrique.....	25
<b>Figure I.18</b> : Compression d'une éprouvette cylindrique.....	25
<b>Figure I.19</b> : Eprouvette de comprissions .....	26
<b>Figure I.20</b> : Essai de flexion « trois points » d'une poutre.....	26
<b>Figure I.21</b> : Illustration d'un essai de cisaillement.....	27
<b>Figure I.22</b> : Essai de torsion poutre soumise à deux moments opposés.....	28
<b>Figure I.23</b> : Essais de torsion expérimentale.....	28

<b>Figure I.24</b> : principe de l'essai de fatigue par flexion rotative ou charge axial.....	29
<b>Figure I.25</b> : Image de gauche : éprouvette de traction biaxiale montée .image de droite : dispositif de traction biaxial de laboratoire 3s à Grenoble.....	30
<b>Figure I.26</b> : Dispositif d'essais biaxiaux .....	31
<b>Figure I.27</b> : Dispositif d'essais biaxiaux .....	31
<b>Figure I.28</b> : Système de traction biaxiale.....	32
<b>Figure I.29</b> : Montage pour essais. Biaxiaux Bhatnagar.....	32
<b>Figure I.30</b> : Dispositif triaxial Welsh .....	32
<b>Figure I.31</b> : Dispositif de traction biaxiale, Makinde.....	33
<b>Figure I.32</b> : Dispositif de traction biaxiale, Institut Fraunhofer.....	33
<b>Figure I.33</b> : Eprouvettes cruciformes de différents types.....	33
<b>Figure I.34</b> : Sollicitation en traction-torsion.....	34
<b>Figure I.35</b> : principe de l'essai Arcan.....	35
<b>Figure I.36</b> : a) Éprouvette papillon en chargement biaxial	
b) État de contrainte plane développé au centre de l'éprouvette.....	35

## **Chapitre II : méthodes expérimentales**

<b>Figure II.1</b> : éprouvette simple.....	36
<b>Figure II.2</b> : éprouvette cruciforme .....	36
<b>Figure II.3</b> : Différents éléments principaux.....	38
<b>Figure II.4</b> : Bâti cruciforme.....	40
<b>Figure II.5</b> : Porte-glissière.....	41
<b>Figure II.6</b> : Glissière.....	41
<b>Figure II.7</b> : Bride.....	42
<b>Figure II.8</b> : Mors.....	42
<b>Figure II.9</b> : Bras.....	43
<b>Figure II.10</b> : Tête supérieure.....	43
<b>Figure II.11</b> : Téton de guidage.....	44
<b>Figure II.12</b> : Goupille.....	44
<b>Figure II.13</b> : fixation de l'appareil sur la machine de traction.....	45
<b>Figure II.14</b> : bride modifiée .....	47

<b>Figure II.15 : usinage de bride .....</b>	<b>48</b>
<b>Figure II.16: Le dispositif apres les modifications.....</b>	<b>52</b>

### **Chapitre III : Résultats et discussions**

<b>Figure.III.1 : comportement du PMMA en traction uniaxiale <math>v=0.2\text{mm/min}</math>.....</b>	<b>55</b>
<b>Figure.III.2 : comportement du PMMA en traction uniaxiale <math>v=0.4\text{mm/min}</math>.....</b>	<b>55</b>
<b>Figure.III.3 : comportement du PMMA en traction uniaxiale <math>v=0.6\text{mm/min}</math>.....</b>	<b>56</b>
<b>Figure.III.4 : comportement du PMMA en traction uniaxiale <math>v=0.8\text{mm/min}</math>.....</b>	<b>56</b>
<b>Figure.III.5 : comportement du PMMA en traction uniaxiale <math>v=1\text{mm/min}</math>.....</b>	<b>57</b>
<b>Figure.III.6 : comportement du PMMA en traction uniaxiale.....</b>	<b>57</b>
<b>Figure III .7 : effet de la vitesse de chargement sur module de Young.....</b>	<b>59</b>
<b>Figure III .8 : effet de la vitesse de chargement sur la limite élastique du matériau.....</b>	<b>59</b>
<b>Figure III .9 : effet de la vitesse de chargement sur contrainte maximal .....</b>	<b>60</b>
<b>Figure III.10 : comportement du PMMA en traction biaxial <math>V=0.5</math>.....</b>	<b>61</b>
<b>Figure III.11 : comportement du PMMA en traction biaxial <math>V=1</math>.....</b>	<b>61</b>
<b>Figure III.12 : effet de la vitesse de déformation sur le comportement des PMMA .....</b>	<b>62</b>

# ***Table des illustrations***

## ***Tableau***

### ***Chapitre II : méthodes expérimentales***

***Tableau II.1 : dimensions de l'éprouvette cruciforme.....37***

***Tableau II.2 : Différents éléments principale.....39***

***Tableau II.3 : tableau d'usinage de bride.....49***

### ***Chapitre III : Résultats et discussions***

***Tableau III. 1 : caractéristique des contraintes de PMMA en traction simple.....58***

***Le tableau.III.2 : Caractéristique contraintes de PMMA a la traction biaxiale.....63***

# Liste des symboles

<b><i>L</i></b> : Longueur totale .....	( <b><i>mm</i></b> )
<b><i>L0</i></b> : Longueur entre repère .....	( <b><i>mm</i></b> )
<b><i>A%</i></b> : Allongement relatif total .....	( <b><i>%</i></b> )
<b><math>\epsilon\%</math></b> : Allongement relatif .....	( <b><i>%</i></b> )
<b><i>Re</i></b> : Résistance à la traction .....	( <b><i>MPa</i></b> )
<b><math>\sigma</math></b> : Résistance élastique à la traction .....	( <b><i>MPa</i></b> )
<b><i>Rm</i></b> : Résistance à la rupture .....	( <b><i>MPa</i></b> )
<b><i>F</i></b> : Force appliquée .....	( <b><i>N</i></b> )
<b><i>Fr</i></b> : Force reparti .....	( <b><i>N</i></b> )
<b><i>Z%</i></b> : Coefficient de striction .....	( <b><i>%</i></b> )
<b><i>Az</i></b> : Allongement localisé de striction .....	( <b><i>mm</i></b> )
<b><i>Ar</i></b> : Allongement jusqu'au maximum de la charge .....	( <b><i>mm</i></b> )
<b><i>Lu</i></b> : Longueur de l'éprouvette après rupture .....	( <b><i>mm</i></b> )
<b><i>Su</i></b> : Diamètre après rupture .....	( <b><i>mm</i></b> )
<b><i>E</i></b> : Module d'Young.....	( <b><i>MPa</i></b> )
<b><i>S0</i></b> : Dimension de l'éprouvette initiale .....	( <b><i>mm</i></b> )
<b><i>Sr</i></b> : Section de la vis et la goupille .....	( <b><i>mm<sup>2</sup></i></b> )

## Introduction générale

Les matériaux polymères sont présents partout dans notre quotidien et sont utilisés dans de nombreux secteurs d'activités. Cependant, la caractérisation mécanique des polymères s'effectue le plus souvent par de simples essais uniaxiaux. Il s'agit par exemple d'essai de traction pour déterminer des caractéristiques mécaniques simples telles que le module d'Young, la limite d'élasticité, l'allongement ou la contrainte à la rupture.

Le poly méthacrylate de méthyle, que les scientifiques appellent PMMA, est un thermoplastique transparent, utilisé pour remplacer le verre, pour des vitres incassables. La barrière autour des patinoires qui empêche les palets de HOCKEY de voler dans le visage des spectateurs et en PMMA.

Notre travail consiste en premier lieu à caractériser le matériau de l'étude par des essais de traction simple et à déterminer l'effet de la vitesse de déformation sur son comportement. Par la suite, on présentera les modifications apportées sur le dispositif de traction biaxial. Réalisé au niveau du laboratoire L2C2M afin d'effectuer des essais de traction biaxiale à différentes vitesses sur des éprouvettes cruciforme en PMMA.

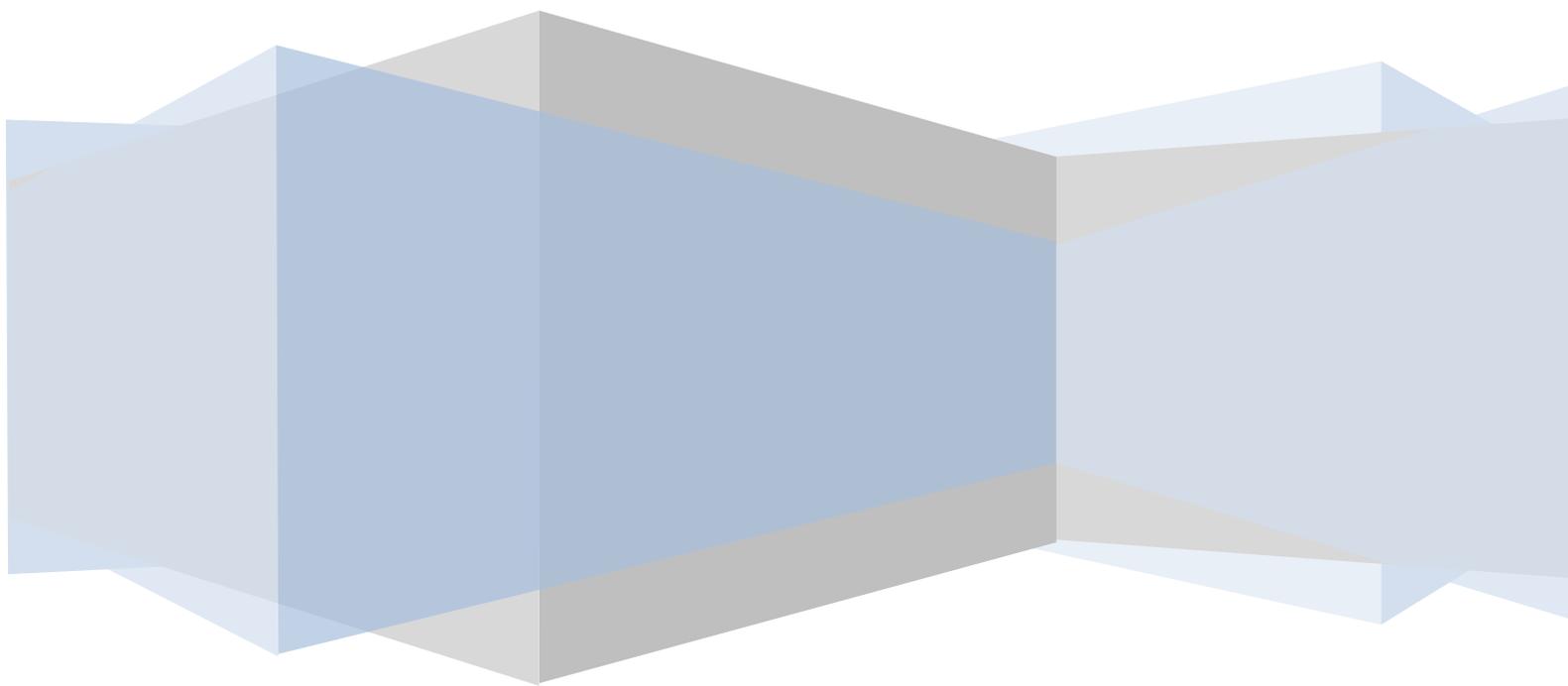
Ce mémoire est structuré en trois (03) chapitres :

- **Chapitre I :** Ce chapitre présente une étude bibliographique sur les principales généralités sur les polymères en particulier le poly méthacrylate de méthyle (PMMA), De même un aperçu sur les différents types d'essai mécanique uniaxiaux et multiaxiaux seront présentés.
- **Chapitre II :** Dans ce chapitre nous présenterons la conception du dispositif de traction biaxial et les modifications apportées, ainsi que le mode opératoire de la procédure expérimentale.
- **Chapitre III :** Dans ce chapitre nous présenterons les résultats des essais de traction uniaxiale et du PMMA. On discutera alors le comportement mécanique et nous dévoilerons l'influence de la vitesse sur les caractéristiques mécanique de ce matériau.

En fin, en concluant notre travail par une conclusion général

# **Chapitre I**

## **étude bibliographe**



## Introduction

Les matériaux polymères sont généralement utilisés pour leurs propriétés mécaniques particulières et leur aptitude à être mis en œuvre. Ces qualités sont étroitement liées à leur structure et il est possible, à partir d'une structure moléculaire donnée, d'imaginer la morphologie qui en découle et les propriétés qui s'y rattachent. [1]

Ce chapitre a pour objet de présentation des principales généralités sur les polymères, et en particulier le polymère de poly méthacrylate de méthyle (PMMA), ce dernier est polymère amorphe thermoplastique hautement transparent. Donc il est important de connaître leur mécanisme de réaction avec leur avantage et leur inconvénient spécifique.

## Généralités sur les polymères :

### I.1.Définition :

Le terme polymère vient du grec « polus » qui signifie «nombreux, plusieurs»et « mêros » qui signifie «unité, partie»).

Un polymère est une macromolécule formée de l'enchaînement covalent d'un très grand nombre  $n$  d'unités de répétition qui dérivent d'un ou de plusieurs monomères (qui sont également appelés motifs) et préparée à partir de molécules appelées monomères.

Les propriétés des polymères dépendent de la nature chimique des macromolécules, et en particulier des liaisons qui peuvent s'établir entre les atomes de la chaîne voisines

Les liaisons interatomiques peuvent être souples ou rigides, faibles ou fortes

La « forme » de la macromolécule peut s'agir d'une chaîne linéaire longue ou courte, ou bien d'une structure ramifiée, réticulée.

Les macromolécules peuvent se placer au hasard ou bien dont alignées.

De manière plus précise, les propriétés des polymères dépendent :

- Du type d'assemblage (liaisons et formes) et de la nature chimique des monomères qui les constituent
- Du degré de polymérisation,
- De la formulation, c'est-à-dire de la nature et de taux des ingrédients que l'on introduit.

On distingue par ailleurs :

- Les homopolymères (linéaires, branchés ou étoilés), comme le polystyrène, qui sont des polymères constitués par l'association de molécules provenant d'un seul motif monomère
- Les copolymères lorsque la polymérisation s'effectue sur deux ou plusieurs monomères différents
- Les polymères réticulés pour les quels les macromolécules s'enchaînent dans les trois directions de l'espace (macromolécules réticulées) [2]

## **I.2. Les procédés de fabrication d'un polymère :**

Les techniques de transformation des plastiques dépendent de la nature des polymères et de la destination des produits finis. Quelques méthodes sont régulièrement utilisées pour la fabrication des pièces et des objets en polymère. Les principaux procédés de fabrication industrielle sont :

L'injection, l'injection soufflage, l'extrusion, l'extrusion soufflage, le thermoformage, l'expansion moulage, le calandrage, le roto moulage.

On passe du monomère au polymère essentiellement de trois façons, par polymérisation, polycondensation, ou polyaddition.

### **I.2.1. Polymérisation :**

La synthèse des polymérisations, peut être en jeu des réactions différentes : polymérisation en chaîne ou polymérisation par étapes et se faire dans des conditions différentes. Selon le milieu de réaction, on distingue la polymérisation en masse, en solution ou en milieu dispersé. Ces différents procédés, ou techniques de polymérisation, dépendent des caractéristiques du produit désiré, des applications envisagées, de considérations financière et écologiste. [3]

### **I.2.2. Polycondensation :**

La polycondensation est également désignée par le terme « polymérisation par étapes » la formation de la macromolécule se fait par des réactions de condensation successives entre les fonctions chimiques des monomères di ou polyfonctionnels. Ces réactions s'accompagnent généralement de l'élimination de petites molécules telles que H<sub>2</sub>O, fonction des polymères en présence. est souvent utilisée pour la production d'adhésifs, de revêtement, de plastiques techniques' de fibres, de films et de nombreux polymères à hautes performances. Au cours de la réaction de polycondensation, les monomères volatiles sont retirés et les pré-polymères de poids moléculaire inférieur forment des polymères ayant un poids moléculaire plus élevé. [3]

### **I.2.3. Polyaddition :**

Une réaction polyaddition est une réaction avec amorçage et sans résidu, consistant en addition successive des molécules monomères sur une molécule initiatrice. Sans libération de sous produit est une réaction de polymérisation en chaîne [3]

---

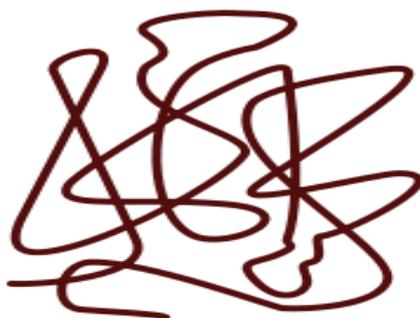
### I.3. Les différents types des polymères :

#### I.3.1. Les thermoplastiques :

Un thermoplastique est un polymère linéaire ou ramifié pouvant être ramolli par Chauffage ils deviennent souples, malléables et durcissent à nouveau quand on les refroidit, ces matériaux conservent leurs propriétés et ils sont facilement recyclables. [4]

- **Les polymères amorphes :**

Un composé amorphe est un composé dans lequel les atomes ne respectent aucun ordre a moyenne et grande distance, ce qui le distingue des composés cristallisés .la condition sur la distance est importante car, à courte distance, la structure de la plupart des composés est ordonnée à cause des règles de Gillespie les verres, les élastomères et les liquides sont des composés amorphes.

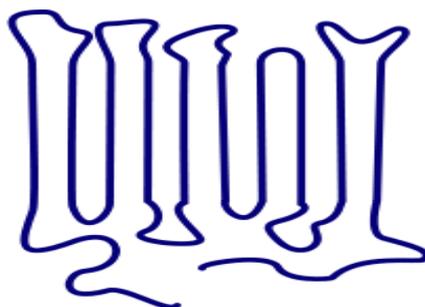


*Figure I.1 : polymères amorphes*

- **Les polymères Semi cristallins :**

Un polymère semi-cristallin possède des zones cristallines (généralement sous forme de sphéroïdes) et des zones amorphes.

Ainsi on assiste à un dépliage local des chaînes linéaires, ce qui permet l'apparition de lamelles constituées de mailles cubique, orthorhombiques sont soit amorphes, soit semi-cristallins.



*Figure. I.2 : polymère semi-cristallin*

---

### **I.3.2. Les thermodurcissables :**

Un thermodurcissable est un produit (poudre à mouler solide ou résine liquide) transformé irréversiblement par polymérisation en un réseau tridimensionnel infusible et insoluble que l'on qualifie de thermo durci. [5]

### **I.3.3 Les élastomères :**

Un élastomère est un polymère linéaire ou ramifiée transformé par vulcanisation en un réseau tridimensionnel faiblement réticulé infusible et insoluble. [6]

Ces polymères présentent les mêmes qualités élastiques que le caoutchouc, un élastomère au repos est constitué de longues chaînes moléculaires repliées sur elles même, sous l'action d'une contrainte, les molécules peuvent glisser les unes par rapport aux autres et se déformer

## **I.4. Propriétés des polymères :**

Lorsqu'on parle de propriété d'un matériau, on se réfère à la façon dont il réagit à une sollicitation. On pourrait aussi la nommer une sensibilité à cette stimulation, ou bien son inverse, la stabilité et la résistance. Ainsi, les propriétés thermiques décrivent le comportement du matériau vis-à-vis de la chaleur. [7]

### **I.4.1. Les propriétés mécaniques :**

Les propriétés mécaniques décrivent le comportement des matériaux soumis à des sollicitations mécaniques telles que des pressions, des étirements, des torsions, des frottements, des cisaillements, des chocs. Elles dépendent fortement du type de contrainte appliquée.

#### **Les principes sont :**

- La résistance : caractérise la contrainte maximale que peut supporter un matériau avant de se rompre sous choc mécanique.
- La dureté : résistance d'un matériau à la pénétration d'un corps sous l'effet d'une pression.
- La ductilité : capacité du matériau à se déformer de manière irréversible avant de rompre
- La rigidité : fonction de l'intensité des liaisons entre atomes ou molécules (module d'Young)
- La ténacité : capacité d'un matériau à emmagasiner de l'énergie avant sa rupture

---

### **I.4.2. Les propriétés physiques :**

Avant tout, rappelons qu'il existe une grande variété de matières plastiques, tout comme il existe un grand nombre d'alliages métalliques.

Une des caractéristiques physiques générales des polymères est la masse volumique en ce qui concerne le rapport (résistance à la traction /masse volumique), certains polymères sont en fait supérieurs bien à des matériaux métalliques.

La faible masse volumique des plastiques est due au faible poids atomique des principaux atomes de leurs chaînes (principalement l'hydrogène et le carbone).

Ces propriétés physique très particulières ont conduit au développement d'outils théorique spécifique. [29]

### **I.4.3. Les propriétés chimiques :**

Les polymères sont employés pour la fabrication d'imperméables, d'emballage, de boîte de conservation, des flacons pour les laboratoires, de citerne, de gaines de câble, pour l'induction de tissus, etc.

Le comportement chimique du matériau dépend en grande partie de la nature chimique du polymère, mais aussi de sa sensibilité aux agents extérieurs. L'action des produits chimiques sur le matériau solide provoque la rupture des liaisons et donc dégrade le polymère chimiquement. [29]

### **I.4.4. Les propriétés optiques :**

Les hauts polymères "pures" sont généralement incolores en couche minces du fait de la présence des structures conjuguées dans le motif structural régulier (polyamides) ou résultant d'un début d'une dégradation thermique [29]

### **I.4.5. Les propriétés électrique :**

Les polymères sont connus pour leur caractère diélectrique, ce qui justifie leur utilisation très large comme isolant électrique ; mais ils peuvent être utilisés éventuellement comme conducteurs s'ils sont chargés de molécules de carbone conductrices. [29]

---

### **I.4.6. Les propriétés thermiques :**

Les polymères sont des isolants thermiques et électriques. Typiquement, la conductivité thermique (K) d'un polymère est mille fois plus faible que celle de cuivre et cent fois plus faible que celle de l'acier. [29]

### **I.5. Mise en œuvre des polymères :**

Pour répondre à toutes les exigences en termes de formes et de cadences, plusieurs méthodes de mise en forme des matériaux polymères ont été développées

#### **I.5.1. Extrusion :**

Procédé continu pour fabriquer des profilés complexes, plaques, feuilles, films, etc., à une cadence de production élevée ; une variante de coextrusion.



*Figure I.3 : Tubes en PVC extrudé*

#### **I.5.2. Filage :**

Souvent à partir du polymère à l'état fondu ; l'obtention de fibres textiles (marques Tergal, Térylène (sv), Dacron, nylon<sup>4</sup>, Rilsan, Orlon, lycra<sup>4</sup>, Tyvek, Dyneema, Kevlar, etc.) ; se fait par filage.

### I.5.3. injection :

Ce procédé permet d'obtenir une grande variété de pièces, bonne précision et bon aspect de surface, cadence élevée (éléments d'appareils ménagers, engrenages, pompes, etc.) . [29]



*Figure I.4 : Pièce en matière plastique moulée par injection*

### I.5.4. Moulage par soufflage :

Le moulage par soufflage est un procédé de mise en forme par moulage de matériaux polymères thermoplastiques tels que le PET, PP, PVC qui est utilisé pour fabriquer en discontinu des corps creux, tels des bouteilles et des flacons. Le moulage par soufflage permet généralement de fabriquer des PEHD corps creux de plus faible capacité que le roto moulage

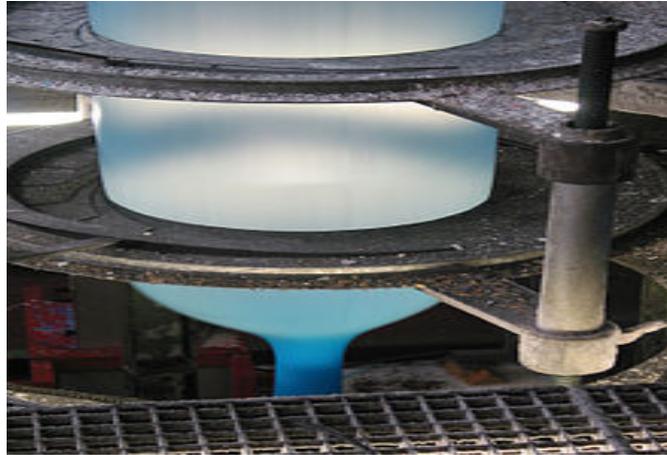


*Figure I.5 : Processus d'injection et soufflage.*

### I.5.5. Extrusion-gonflage :

L'extrusion-gonflage est un procédé de mise en forme de films ou de gaine en matière thermoplastique. Elle permet de fabriquer des films allant de 7  $\mu\text{m}$  jusqu'à des gaines allant à plus de 200  $\mu\text{m}$  d'épaisseur. [29]

L'extrusion-gonflage est utilisée pour fabriquer des sacs plastiques (sacs poubelles, sacs de congélation, etc.), des rideaux de douche, des parapluies, des cirés, des films agricoles, etc.



*Figure I.6 : Extrusion-gonflage : formation d'une bulle cylindrique verticale, Pour la production de films.*

### **I.5.6. Rotomoulage :**

Le Rotomoulage, qu'il soit réactif ou par voie fondue, est une technique de mise en œuvre permettant d'obtenir des pièces généralement creuses, de volumes et de formes variés. Des produits rotomoulés sont utilisés dans de multiples secteurs tels que l'équipement, le nautisme, l'industrie du jouet outdoor, l'automobile Pièce fermée, pouvant être de très grandes dimensions (citernes, jouets, ballons, etc.). [29]



*Figure I.7 : Rotomoulage*

### I.5.7. Thermoformage :

Ce procédé convient très bien pour des pièces de grande surface et de faible épaisseur (emballages, pièces pour l'automobile et le bâtiment, baignoires, etc.) .



Figure I.8 : procédé de thermoformage

### I.5.8. Moulage par compression ou par compression-transfert :

C'est des procédés applicables aux résines thermodurcissables prépolymérisées (partiellement polymérisées) (phénoplastes, aminoplastes, polyesters insaturés, etc.).

Concernant les plastiques renforcés, une quinzaine de procédés de mise en œuvre est de nos jours disponible (pultrusion...).

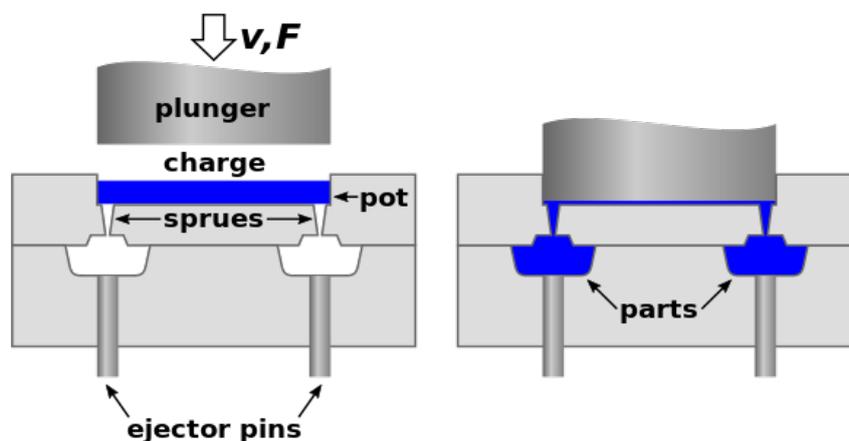


Figure I.9 : procédé de moulage

---

## **I.6. Le matériau polyméthacrylat de méthyle :**

Le poly (méthacrylate de méthyle) (souvent abrégé en PMMA, de l'anglais poly(méthyle méthacrylate)) est un polymère amorphe thermoplastique hautement transparent, obtenu par polymérisation du monomère méthacrylate de méthyle. Sa transparence, son aspect visuel et sa résistance aux rayures font que le PMMA peut être considéré comme une alternative légère au verre. Il est parfois appelé verre acrylique.

Le PMMA peut remplacer le polycarbonate (PC) dans des applications qui nécessitent davantage de transparence, de résistance aux UV et ou de résistance aux rayures, et si les propriétés de haute résistance aux chocs ne sont pas indispensables pour l'application.

Le PMMA a été produit pour la première fois en 1933, par la société ROHM and HAAS. Les plus grandes marques de PMMA sont Altugras, Plexiglas et Diakon.

Formule chimique du PMMA, polyméthacrylat de méthyle

Le PMMA se présente sous forme de pastilles thermoplastiques, destinées à l'injection, à l'extrusion et ou soufflage. [8]

## **I.7. Mode d'obtention des polyméthacrylat de méthyle :**

Le PMMA est un thermoplastique amorphe, transparent et sans couleur qui est dur et rigide mais fragile et sensible à l'entaillage. Il a une bonne résistance à l'abrasion et aux U.V. et une excellente transparence optique mais une résistance médiocre à la basse température, à la fatigue et aux solvants bien que combustible, la quantité de fumée qu'il émet est faible.

Dans ses qualités courantes, le PMMA peut être fabriqué par extrusion ou par injection. On utilise également la coulée de monomères (pour une description) qui permet d'atteindre des masses moléculaires bien plus élevées (masses moléculaire qui ne peuvent être traitées par fusion du fait de leur viscosités de fusion très élevée) avec des propriétés améliorées.

Les articles fabriqués par coulée de monomères se rencontrent le plus fréquemment sous forme de plaques des insectes ou des pièces de montre, par exemple, sont enchâssés.

## I.8. structure moléculaire :

Le PMMA est un polymère vinylique, fabriqué par polymérisation radicalaire à partir du monomère méthacrylate de méthyle. [9]

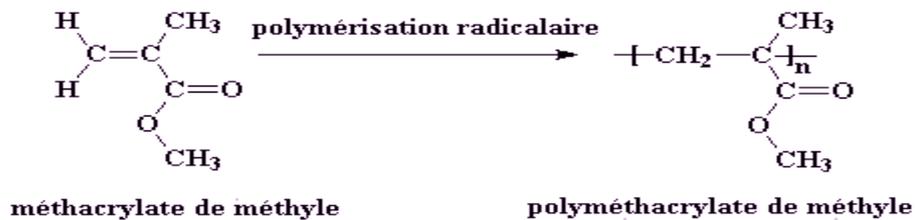


Figure I.10 : la structure de PMMA [9]

Comme vous pouvez le voir sur la figure, la structure du méthacrylate de méthyle ressemble à l'état du Massachusetts. Mais le Massachusetts ne polymérise pas parce qu'il est unique. Voici une meilleure image du monomère méthacrylate de méthyle, en 3-D:

## I.9. propriétés des PMMA :

### I.9.1. Les Propriétés physiques :

Sa température de transition vitreuse ( $T_v$ ) est comprise entre  $46^{\circ}\text{C}$  pour un PMMA isotactique (les groupes ester sont alignés du même côté de la chaîne) et  $159^{\circ}\text{C}$  pour un PMMA syndiotactique (les groupes ester sont alternés autour de la chaîne). La majorité des PMMA sur le marché actuellement est atactique, avec une  $T_v$  comprise entre  $90^{\circ}\text{C}$  et  $105^{\circ}\text{C}$ . La modification du groupe ester induit également un abaissement de  $T_v$  (ex : éthyle :  $65^{\circ}\text{C}$ , n-butyl :  $20^{\circ}\text{C}$ ). Le PMMA peut également être modifié par copolymérisation avec d'autres monomères tels que des acrylates, des acrylonitriles, des styrènes et butadiènes

- Très grande transparence, très limpide avec un aspect grillant
- Propriété optique exceptionnelle (transmission lumineuse supérieure à celle du verre jusque dans le proche UV, transparence, limpidité, brillance). Indice de réfraction de 1,49
- Aspect de la surface très lisse et brillant
- Excellente résistance aux agents atmosphériques
- Excellente tenue aux rayons ultraviolets et à la corrosion
- Légèreté : masse volumique de  $1,19\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$  (beaucoup plus léger que le verre)
- Coefficient de dilatation thermique :  $70\text{-}77\cdot 10^{-6}\text{K}^{-1}$
- Usage dentaire : sensible à long terme (plusieurs mois) à la présence de la salive (le matériau devient cassant), de chlorhexidine (désinfectant buccal) ou de certains colorants alimentaires (colorations)
- Conductivité thermique à  $23^{\circ}\text{C}$  :  $0,17\text{-}0,19\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
- Coefficient élevé de dissolution en solution aqueuse

### I.9.2. Les Propriétés thermique :

Le PMMA est combustible et brule sans fumée excessive UL 94 HB. Son retrait au moulage est faible (0,4 a 0,7 %) comme pour les polymères amorphes. Son coefficient de dilatation linéaire étant très différent de celui des métaux et son élasticité faible, il sera déconseillé de prévoir des inserts métalliques dans une pièce en PMMA injecté. La température maximale d'utilisation est faible  $< 80^{\circ} \text{C}$ . [10]

### I.9.3. Les propriétés chimiques :

Propriétés chimiques : Le PMMA est insipide et sans odeur et peut, dans certains cas, être reconnu de qualité alimentaire. Jusqu'à  $60^{\circ}\text{C}$ , le PMMA résiste assez bien aux acides organiques et minéraux dilués ainsi qu'aux solutions alcalines diluées mais il est attaqué par les produits courants de la liste du tableau. Sa résistance au vieillissement lumière est très bonne.

-acétone	-chloroforme	-méthanol à 30%
-alcool	-cyclohexane	-naphta
-alcool éthylique	-eau oxygénée	-nitrobenzène
-ammoniaque (liquide)	-essence de térébenthine	-pétrole
-benzène	-hydrocarbure	-phénol
-carburant d'avion	-tétrachlorure de carbone	
-chlore liquide	-trichloréthylène	

[10]

### I.9.4. Les propriétés électriques :

Les propriétés électriques peuvent être nettement affectées par la reprise d'humidité. Sa résistance à l'arc est excellente. Le PMMA est électrostatique, ce qui peut nuire à sa présentation (attraction de poussière) ; on peut pallier cet inconvénient en utilisant des produits antistatiques.

[10]

## I.10. caractéristique des PMMA :

### I.10.1. Les caractéristiques mécaniques :

Coefficient de poisson	0.35 -0.4
Dureté-Rockwell	M92-100
Élongation a la rupture (%)	2.5-4
Module de tension (Gpa)	2.4-3.3
Résistance à la traction (Mpa)	80
Resistance aux chocs – IZOD ( $\text{j m}^{-1}$ )	16-32

### I.10.2. Caractéristique physique :

Absorption d'eau-sur24heures (%)	0.2
Coefficient d'Abbe	57.2
Densité (g cm <sup>-3</sup> )	1.19
Indice de réfraction	1.49
Indice limite d'oxygène (%)	17-20
Inflammabilité	HB
Résistance à la radiation	passable
Résistance aux ultra-violets	bonne

### I.10.3. Caractéristique thermiques

Chaleur spécifique (j k <sup>-1</sup> kg <sup>-1</sup> )	
Coefficient d'expansion thermique (x 10 <sup>-6</sup> k <sup>-1</sup> )	70-77
Conductivité thermique à 23 c (Wm <sup>-1</sup> k <sup>-1</sup> )	0.17-0.19
temp.de déflexion à la chaleur -0.45 MPa (c)	105
temp.de déflexion à la chaleur-1.8MPa (c)	95
Temp. Maximale d'exploitation (c)	50à90
Temp. Minimale d'exploitation (c)	-40

### I.10.4. Caractéristique électrique

Constantes diélectriques a 1 MHz	2.6
Facteur de dissipation à 1 MHz	0.014
Résistance diélectrique (KV mm <sup>-1</sup> )	15
Résistivité de surface (ohm/carré)	10 <sup>4</sup>
Résistivité volumique (ohmcm)	2.14*10 <sup>15</sup>

### I.10.5. Caractéristique chimique

Acides – concentrés	bonne-mauvaise
Acides-dilués	bonne-mauvaise
Alcalins	bonne
Alcools	bonne-mauvaise
Cétones	mauvaise
Graisses et huiles	bonne
Halogènes	mauvaise
Hydro-carbones halogènes	mauvaise
Hydrocarbures aromatique	mauvaise

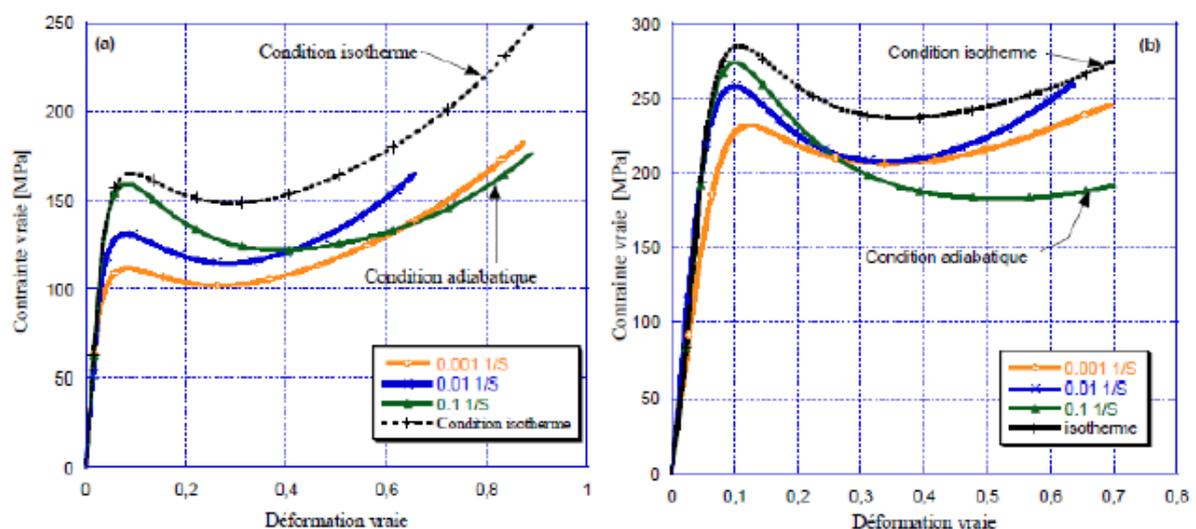
## I.11.comportement mécanique de polyméthacrylat de méthyle

Le comportement mécanique du PMMA amorphe dépend fortement de la température et de la vitesse de déformation. En effet une augmentation de la température entraîne une diminution du module d'Young et la contrainte seuil d'écoulement alors que l'élévation de la vitesse de déformation augment ces deux quantités [30]

### I.11.1. Effet de la vitesse de déformation

L'effet de la vitesse de déformation peut être déterminé par un ensemble d'essais Mécaniques à différentes vitesses de déformations.

Les courbes contrainte-déformation de la figure I.11 sont obtenues en traction uni axiale effectuée pour une température constante  $T = 25^{\circ} \text{C}$  et différentes vitesses de déformation. On observe que la contrainte d'écoulement augmente lorsque la vitesse de déformation augmente et particulièrement pour les vitesses de déformation les plus élevées. [31]

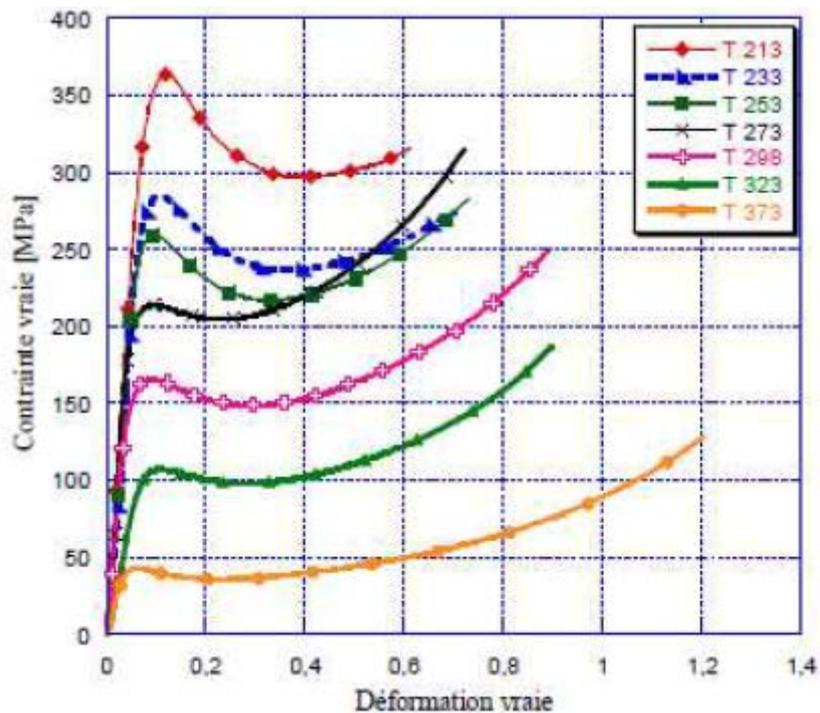


**Figure I.11 :** Contrainte vraie-déformations vraie de PMMA pour trois vitesses de déformation a)  $T = 298 \text{ K}$ , b)  $T = 233 \text{ K}$ . La correction isotherme est appliquée à l'essai à  $0.1 \text{ s}^{-1}$  uniquement. [33]

### I.11.2. Effet de la température

La plupart des polymères présentent de multiples propriétés mécaniques fragiles à la basse température, ils deviennent plastique, plus viscoélastique, ou encore caoutchoutiques et enfin visqueux au fur et à mesure que la température imposée augmente. Il est bien connu que les relaxations caractéristiques d'un matériau traduisent l'activation de mécanisme moléculaire différent suivant la température.

Les courbes expérimentales contraintes-déformation de la figure I.12 [33] ,montrent l'influence de la température sur le comportement mécanique du PMMA. On y relève que la limite élastique, le module d'YOUNG et le durcissement diminuent lorsque la température augment.



**Figure I.12** Contrainte vraie vraie-déformation vraie du PMMA a  $\nu = 0.1$  différentes températures. [32]

Le comportement mécanique du PMMA amorphe dépend fortement de la température et de la vitesse de déformation. En effet une augmentation de la température entraîne une diminution du module d'Young et la contrainte seuil d'écoulement alors que l'élévation de la vitesse de déformation augmente ces deux quantités. [30]

## I.12. Mise en œuvre

Le PMMA est livré sous différentes formes : plaques coulées, joncs, disques, bâtons, poudres et granulés à mouler par injection et extrusion, poudres pour peintures et vernis, émulsions, sirops, demi-produits extrudés.

Pour catalyser les opérations de polymérisation, des peroxydes organiques peuvent être ajoutés en très petites quantités. [11]

---

- **Propriétés de mise en œuvre :**

Injection : L'importante viscosité à l'état fondu du PMMA impose des pressions d'injection élevées (jusqu'à 1 500 bars) Usinage : L'usinage du PMMA est facile à condition d'éviter les chocs et surchauffes. Collage : Les colles à solvants libérant les contraintes, il faudra faire subir un recuit aux pièces (2 à 3 h à 80° C).

Le PMMA se colle facilement soit avec des solvants purs (chloroforme) ou avec du PMMA dissous dans un solvant. Soudage : Le PMMA se soude bien mais l'aspect et la solidité sont moins bons que le collage. Le soudage se limite au soudage haut fréquence, gaz chaud et ultrasons. Le PVC présente une bonne stabilité dimensionnelle et un retrait limité dû à sa structure amorphe [10]

### ❖ Utilisation

On distingue :

- Enseigne, bandeaux lumineux, panneaux signalétiques et publicitaires
- PLV, présentoir, gravure, ameublement, agencement de magasin, décoration
- Pièces industrielles
- Accessoires de sécurité
- Balle de contact
- Prothèse dentaire
- Implant en ophtalmologie
- Membranes pour hémodialyseurs
- Fibre optiques
- Art (objets de design, sculpture)
- Lentilles d'appareils photographiques économiques (jetables) –la polymérisation en masse permet l'obtention de pièces sans contraintes internes, possédant donc un indice de réfraction constant et isotrope
- Support d'impression directe avec encres UV pour les tableaux photographiques
- Instruments de musique : certains modèles de batteries (Ludwing et Tamburo, entre autres)
- Réservoir de cigarettes électroniques

---

### ❖ Les avantages

Le PMMA possède de nombreux avantages dont deux principaux : il est transparent et résistant

Il peut remplacer le verre dans la fabrication de vitres car il permet une excellente transmission de la lumière. Il transmet jusqu'à 92 pour cent de la lumière visible, soit plus que le verre. Pour sa résistance aux ultraviolets, il est utilisé pour les vitrages, les protections des tuiles ou certains éléments de voiture (feux arrière)

C'est le seul polymère transparent aux ultraviolets. Contrairement au polycarbonate, polystyrène et autres polymères et autres polymères transparents, il n'offre pas de coloration jaunâtre qui impose l'addition d'azurants optiques. On obtient alors un polymère d'une transparence exceptionnelle

Les surfaces de PMMA montrent une grande rigidité, ainsi qu'une bonne résistance aux produits chimiques. C'est ainsi le matériau idéal pour les parois transparentes des grands aquariums

### ❖ Les inconvénients

Le PMMA est assez fragile et brûle facilement. Ce polymère exige également une trempe (recuisson) pour relâcher les tensions internes du polymère. Il a une faible résistance aux solvants, particulièrement aux carburants. Le matériau semble bien résister à l'essence, au méthanal et à l'acide chlorhydrique mais ne résiste pas à l'acétone. Il réagit très mal au contact de cyanoacrylate, qui fait blanchir le PMMA comme s'il avait été sablé

Le PMMA a une assez faible résistance à l'abrasion. Si nécessaire, on lui préfère le copolymère styrène-acrylonitrile (feux arrière d'automobile) ou la transparence est moins importante

Le PMMA ne peut pas être utilisé comme écran de protection de machines industrielles, il est nécessaire d'utiliser du polycarbonate qui ne présente de danger lorsqu'il se brise

---

## Généralités sur les essais mécaniques

Parmi tous les essais mécaniques, l'essai de traction est certainement le plus fondamental. Il sert à déterminer les principales caractéristiques mécaniques telles que le module d'élasticité longitudinal, le coefficient de Poisson, la limite d'élasticité, la résistance à la rupture, l'allongement après rupture et le coefficient de striction. Son exécution est facile et les résultats obtenus servent à dimensionner toutes sortes de pièces mécanique allant d'un pignon microscopique jusqu'à la structure métallique d'un grand hall. Dans la recherche, on l'applique pour la caractérisation de nouveaux matériaux et dans l'industrie pour les contrôles périodiques servant à surveiller la qualité des alliages, des polymères et des céramiques.

### I.13. Les essais mécaniques uniaxiaux :

Les essais mécaniques sont des expériences dont le but est de caractériser les lois de comportement des matériaux (mécanique des milieux continus). La loi de comportement établit une relation entre les contraintes (pression=force/surface) et les déformations (allongement unitaire adimensionnel). Il ne faut pas confondre une déformation ou une dilatation .cependant, la déformation d'une pièce dépend de la géométrie de la pièce et de la manière dont sont exercés les efforts extérieurs sur cette pièce. Il faut donc normaliser les essais. Des normes définissent donc :

- la forme de la pièce d'essai dont on teste le matériau parle alors d'éprouvette normalisée
- comment sont exercés les efforts sur l'éprouvette, on parle alors d'essai normalisé
- Les essais uniaxiaux sont des essais ou la charge appliquée est dans une seule direction

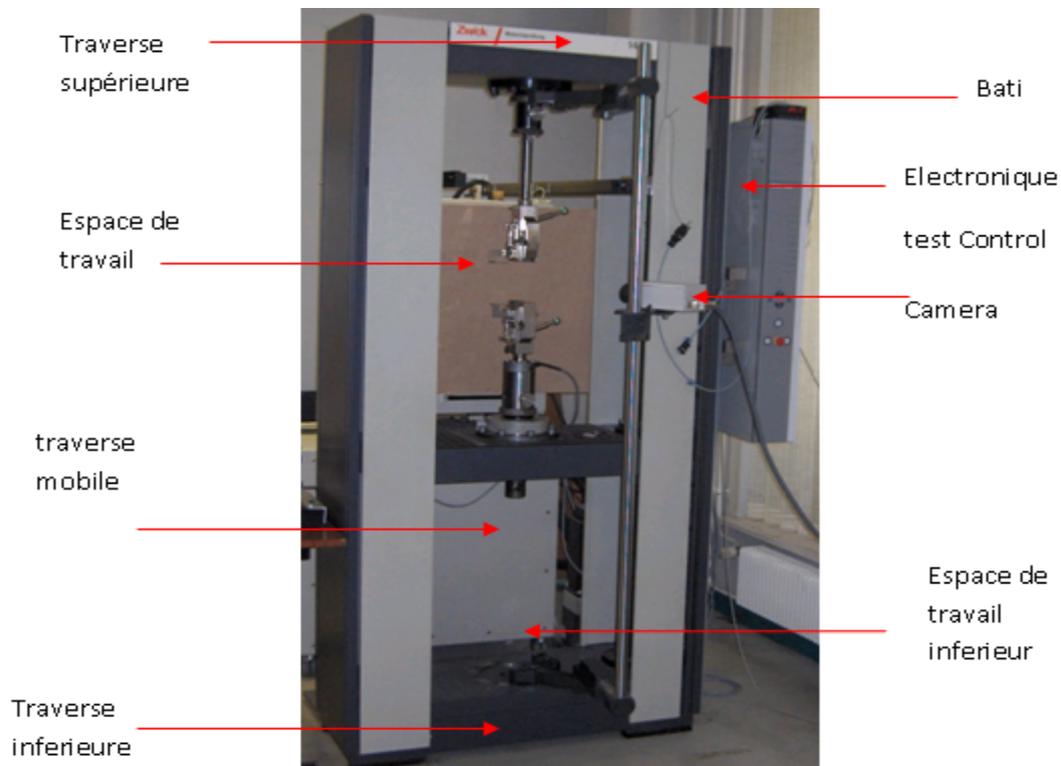
#### I.13.1. Essai de traction :

##### I.13.1.1. définition :

L'essai de traction est l'un des plus utilisé pour caractériser le comportement mécanique statique d'un matériau. Il est simple de mise en œuvre et il permet d'accéder à des paramètres particulièrement importants, très largement utilisés dans la communauté académique et industrielle pour qualifier les matériaux. de manière plus précise cette expérience de physique permet de :

- déterminer le comportement élastique d'un matériau
- mesurer le degré de résistance à la rupture d'un matériau

### I.13.1.2. Description générale d'une machine de traction :



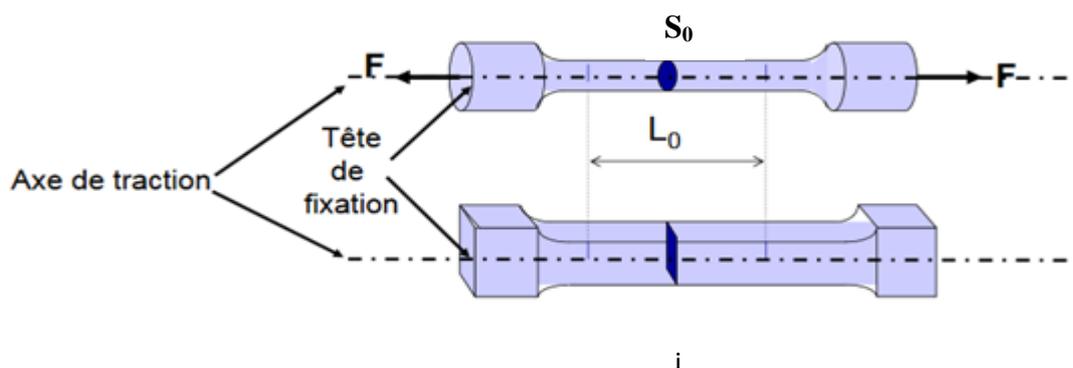
*Figure I.13 : Photo de la machine de traction ZWICK*

Une machine de traction est constituée d'un bâti portant une traverse mobile. L'éprouvette de traction, vissée ou enserrée entre des mors, selon sa géométrie, est amarrée à sa partie inférieure à la base de la machine et sa partie supérieure à la traverse mobile (dans le cas d'une machine mécanique) ou au vérin de traction (dans le cas d'une machine hydraulique). Le déplacement de la traverse vers le haut réalise la traction. Une machine de traction comporte une cellule de charge, qui permet de mesurer l'effort appliqué à l'éprouvette et le déplacement de l'éprouvette peut être suivi de diverses façons. Les dispositifs expérimentaux sont généralement asservis et peuvent être pilotés à vitesse de montée en charge constante, à vitesse de déformation constante, etc. selon ce qui peut être proposé par le système de pilotage [12]

### I.13.1.3. L'éprouvette :

En physique des matériaux, une éprouvette est une pièce de fabrication et de dimension normalisées destinée à être soumise à un essai thermomécanique, conçu pour connaître le comportement d'un matériau quand il est soumis à une contrainte telle que la traction, le cisaillement, traction-cisaillement (TC), la compression, la torsion, la flexion, le pliage, le clivage, un choc ou le fluage.

La section doit être constante sur une longueur suffisante pour obtenir un état de contrainte homogène pendant l'essai. Aux deux extrémités sont usinées des têtes d'amarrage avec des rayons de courbure suffisamment grands pour éviter des concentrations de contrainte excessives. Dans le cas des éprouvettes plates, le centrage de l'éprouvette peut devenir problématique si des trous calibrés ne sont pas percés dans les têtes.



*Figure I.14 : éprouvette de traction*

### I.13.1.4. Exploitation de l'essai :

Un exemple d'une réponse mécanique d'un matériau en traction et donné dans la figure 1.15

- **interprétation :**

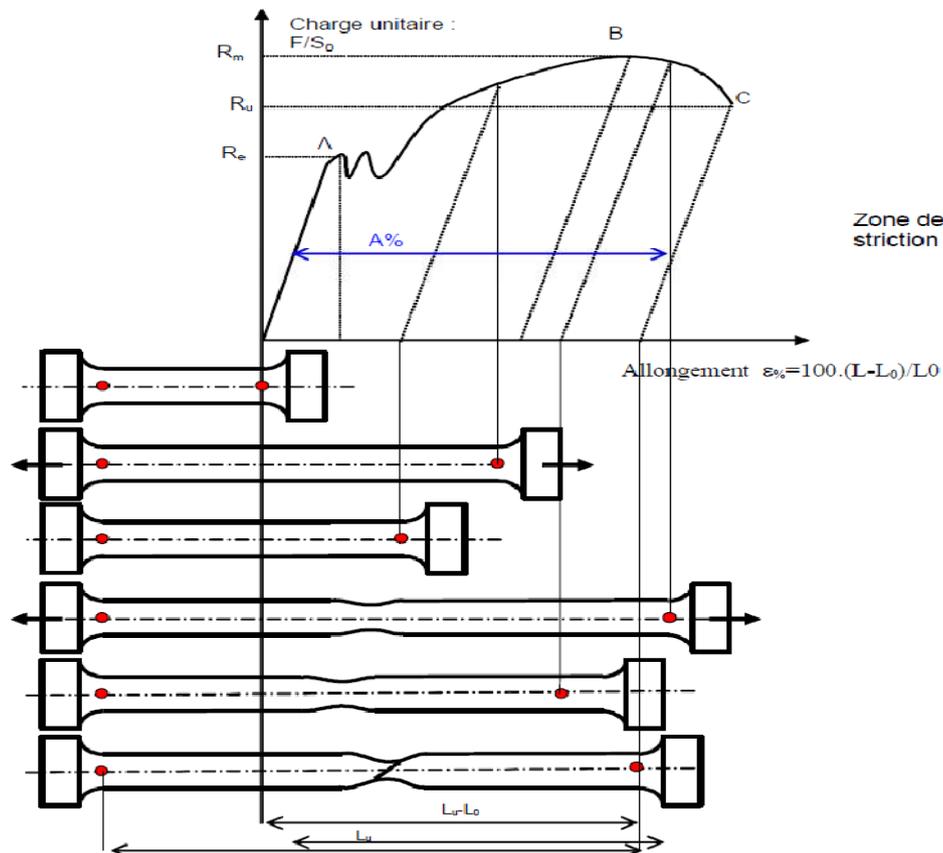


Figure I.15 : Diagramme effort-déformation de la traction simple.

Sur un diagramme effort-déformation, on observe pour les matériaux métalliques par exemple les phases successives suivantes :

**Zone OA :** domaine des déformations élastiques ou réversibles (zone parfois linéaire) si l'on cesse la charge, l'éprouvette retrouve ses dimensions initiales.

**Zone AB :** la déformation n'est plus complètement réversible. La déformation est plastique (ou permanente) homogène, appelée aussi déformation plastique répartie. Les allongements croissent plus vite que les charges. L'allongement a lieu avec une diminution régulière de la section tout au long de l'éprouvette.

**Zone BC :** la déformation plastique se localise dans une petite portion de l'éprouvette et n'est plus homogène, c'est la striction (on aboutit à la rupture en C). Les allongements croissent avec une diminution de la charge [13]

### • Définitions des paramètres

Sur le diagramme charge allongement, qui peut être enregistré ou tracé par pointe, on utilise les coordonnées suivantes en abscisse, l'allongement relatif  $L/L_0$  de l'éprouvette ou plutôt d'une certaine base de mesure  $L_0$  ( $L_0$  est la longueur initiale de l'éprouvette) :

$$\varepsilon\% = 100. \frac{L - L_0}{L_0}$$

En ordonnée : la charge unitaire, définie à tout instant de l'essai, c'est le quotient de la charge par la section initiale de l'éprouvette  $S_0$

$$\sigma = \frac{F}{S_0}$$

Le point A est la limite d'élasticité (ou résistance élastique à la traction) :

$$R_e = \frac{F_e}{S_0}$$

Le point B correspond à la charge maximale ; il est appelé résistance à la traction ou résistance à la rupture (bien qu'il n'y ait pas encore rupture) :

$$R_m = \frac{F_r}{S_0}$$

C'est la charge maximale atteinte durant l'essai de traction. A partir de ce point, la déformation commence à se localiser sous forme de striction, ce qui explique la décroissance de l'effort nécessaire aux déformations au delà du point B.

Un processus de mise en forme qui conduirait à franchir ce point se traduirait par des risques difficiles à contrôler de rupture ou de non conformité géométrique. Le point C correspondant, lui, à la charge ultime. [13]

Après rupture de l'éprouvette et reconstitution de celle-ci, on mesure  $L_u$  et  $S_u$  respectivement longueur entre repères et section minimale ultimes.

L'allongement relatif total ou  $A\%$  de l'éprouvette est l'allongement de rupture :

$$A\% = 100. \frac{L_u - L_0}{L_0}$$

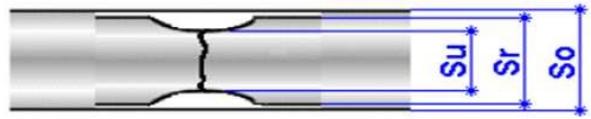
Où " $L_u$ " est la longueur de l'éprouvette après rupture. Il caractérise la ductilité du matériau. Cet allongement est la somme de l'allongement réparti " $A_r$ " jusqu'au maximum de la charge et de l'allongement localisé de striction  $A_z$

$$A\% = A_r + A_z$$

La striction est la réduction de section maximale de l'éprouvette rompue c'est-à-dire dans la section de rupture (fig.1.4). Le coefficient de striction traduit l'aptitude à la déformation à froid.

$$Z\% = 100. \frac{S_0 S_u}{S_0}$$

Avec  $S_0$  : section initiale et  $S_u$  : section après rupture.



**Figure I.16** : Caractéristiques de l'essai de traction uniaxiale [14]

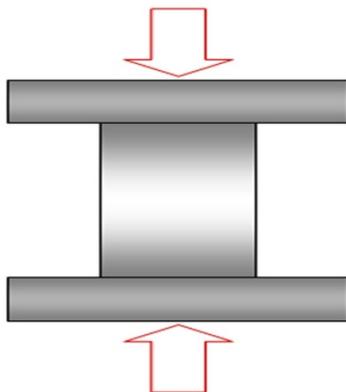
- $S_0$  : dimension d'éprouvette initiale.
- $S_r$  : dimension d'éprouvette après la rupture.
- $S_u$  : dimension de la striction après rupture.

### I.13.2.essai de compression :

Un essai de compression mesure la résistance à la compression d'un matériau sur une machine d'essais mécaniques suivant un protocole normalisé. Les essais de compression se font souvent sur le même appareil que l'essai de traction mais en appliquant la charge en compression au lieu de l'appliquer en traction.

L'essai de compression comporte un raccourcissement élastique d'une éprouvette généralement cylindrique et son écrasement au delà de la limite d'élasticité du matériau.

Les éprouvettes en forme de courts cylindres sont préférables, pour ces essais, aux éprouvettes trop longues ou de section rectangulaire.



**Figure I.17** : Test de compression simple

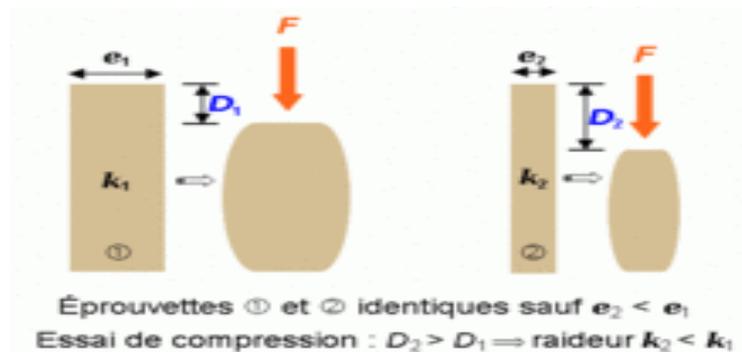


**figure I.18**: compression d'une éprouvette cylindrique

- **Principe de l'essai**

L'essai consiste à compresser l'éprouvette dans un but d'étude de la force de rupture. Si le matériau est ductile cette rupture n'aura pas lieu.

- **Éprouvette de compression**

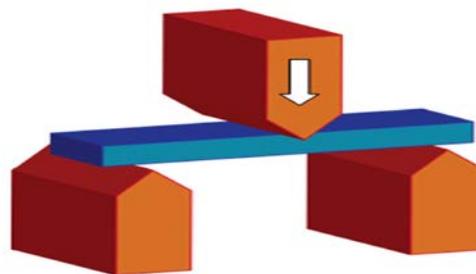


*Figure I.19 : éprouvette de comprissions*

### I.13..3. Essai de flexion :

La flexion est la déformation d'un objet qui se traduit par une courbure. Dans le cas d'une poutre, elle tend à rapprocher les deux extrémités de la poutre. Dans le cas d'une plaque, elle tend à rapprocher deux points diamétralement opposés sous l'action.

L'essai de flexion d'une poutre est un essai mécanique utilisé pour tester la résistance en flexion. On utilise la flexion dite « trois points » et la flexion dite « quatre points ».



*Figure I.20 : Essai de flexion « trois points » d'une poutre.*

La résistance à la flexion d'un matériau, sous forme de poutre principalement, peut être mesurée par une machine sous différents types de mises en charge. Les mesures des déformations et des contraintes sont réalisées à partir de jauges d'extensomètre et affichées sur un banc de mesure.

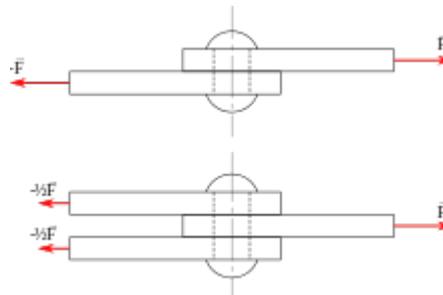
### I.13.4. Essai de cisaillement :

- l'essai de cisaillement consiste à appliquer à une éprouvette deux efforts opposés dans un plan de section droite.
- Par définition, un système est soumis à cisaillement lorsque les contraintes prépondérantes sont dues à l'effort tranchant

A la différence d'un essai de traction ou de compression, un essai de cisaillement implique que toutes les sollicitations soient tangentielles à la surface d'application et qu'elles soient parfaitement égales en tous points de cette surface. Il ne doit y avoir aucune sollicitation perpendiculaire à cette surface.

C'est un essai très intéressant pour évaluer un collage ou une liaison céramo-métallique.

Un essai de cisaillement est très difficile à réaliser sans qu'il apparaisse des forces parasites qui faussent les résultats.



*Figure I.21 : Illustration d'un essai de cisaillement*

#### • Le Concept de Cisaillement :

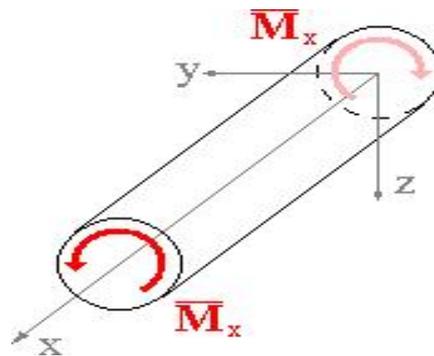
Le concept de cisaillement est utilisé par plusieurs domaines :

- En sciences de l'ingénierie, le cisaillement est un type de déformation appliquée à un matériau : voir
  - Déformation élastique
  - Théorie de poutres
  - Contrainte de cisaillement
  - Module de cisaillement
- En météorologie, pour désigner le phénomène des vents cisaillements
- En géologie, un cisaillement est un décrochement qui implique un volume important de roches sur plusieurs plans
- En mathématiques : voir théorème de Pythagore
- En chemin de fer, un cisaillement est le fait pour un train de couper l'itinéraire d'autres trains. Cela oblige ces derniers à attendre le passage du premier
- En soins, pour désigner une conjonction de deux forces de surface opposées, parallèles à la peau. Le cisaillement résulte du frottement de la peau lorsque patient glisse sur un support.

### I.13.5. Essai de torsion :

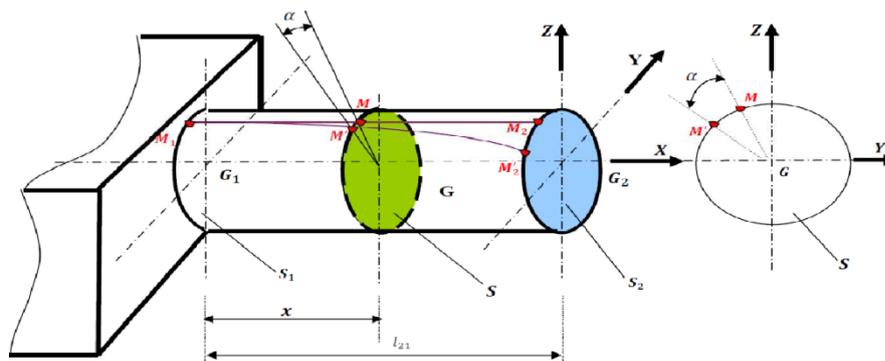
La torsion est le fait de vriller une pièce, comme lorsque l'on essore une serpillère-note que dans le langage courant, « tordre » désigne plutôt ce que l'on appelle la flexion en mécanique.

Pour être Plus précis, la torsion est la sollicitation subie par un corps soumis à l'action d'un couple de forces opposées agissant dans des plans parallèles et dont l'élément de réduction est un moment de force agissant dans l'axe de la poutre.



*Figure I.22 : Essai de torsion poutre soumise à deux moments opposés*

Le dispositif expérimental peut être schématisé de la manière suivante :



*Figure I.23: Essais de torsion expérimentale. [15]*

---

- **But de l'essai de torsion**

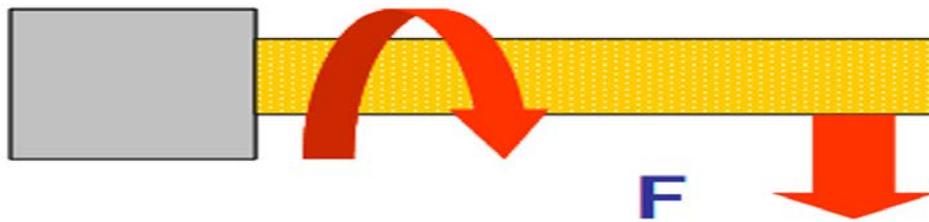
Cet essai a pour but de déterminer la variation de l'angle de torsion due à la charge qui s'applique en extrémité qui développe un moment de torsion.

En variant les nuances de la poutre et leur dimension pour mesurer expérimentalement de la déterminer théoriquement

### I.13.6.Essai de Fatigue :

L'essai de fatigue consiste à appliquer sur une pièce une charge variable alternée (la moyenne des contraintes appliquées est nulle) ou répétée (la moyenne des contraintes appliquées est non nulle). Il va essayer de reproduire au mieux les conditions d'exploitation de la pièce.

Les ruptures par fatigue sont associées essentiellement au nombre total d'applications d'une charge et non au temps de service ou à l'âge de la pièce. La rupture par fatigue ne donne aucun signe préalable avant de casser, c'est pourquoi elle peut très souvent surprendre l'expérimentateur.



*Figure I.24 : principe de l'essai de fatigue par flexion rotative ou charge axiale*

### I.14.Les essais mécaniques multiaxiaux :

Les essais mécanique multiaxiaux apportant une information précieuse pour tester les modèles de déformations, mais ils sont malheureusement peu pratiqués en raison des difficultés expérimentales. Les essais possibles, classiquement, sont les essais de traction (ou compression)-torsion, les essais de traction biaxiale et les essais de compression triaxiale. L'essai de traction cisaillement est le plus riche pour tester les aspects d'anisotropie. Nous présenterons ici les essais de traction biaxiale et les essais de traction-torsion [16]

Les essais multiaxiaux peuvent être effectués suivent deux modes : en phase ou hors phase, selon que l'éprouvette subit simultanément ou non les différentes sollicitations. Les déplacements et les surfaces appliquées peuvent enregistrées de la même façon que dans le cas des essais traction uniaxiale. [17]

Ces essais sont utilisés soit dans des conditions quasi statiques soit dans le cadre d'essais de fatigue multiaxiale

## I.14.1. Les essais mécaniques biaxiale

### I.14.1.1. Traction biaxiale

Les essais de traction biaxiale consistent à exercer une contrainte dans deux directions perpendiculaires sur une même éprouvette. Ceci impose d'utiliser des éprouvettes cruciformes, comme celle présentées sur la figure I.25. Pour réaliser des états de contrainte uniformes, il faut que les bras de la croix aient des rigidités transversales assez faibles, ce que l'on peut obtenir en les évidant. Les directions principales des contraintes sont fixées et on peut effectuer des chargements dans l'espace de contrainte tels que celui présenté la figure I.25. [18]



*Figure I.25 : image de gauche : éprouvette de traction biaxiale montée .image de droite : dispositif de traction biaxial de laboratoire 3s à Grenoble.*

- **But de l'essai**

Ces essais ont pour but d'élargir les capacités d'identification du comportement plastique sous sollicitation biaxiale. Ils nécessitent de disposer d'une machine ou d'un dispositif appliquant un système de déplacements orthogonaux sur une éprouvette forme de croix. [20]

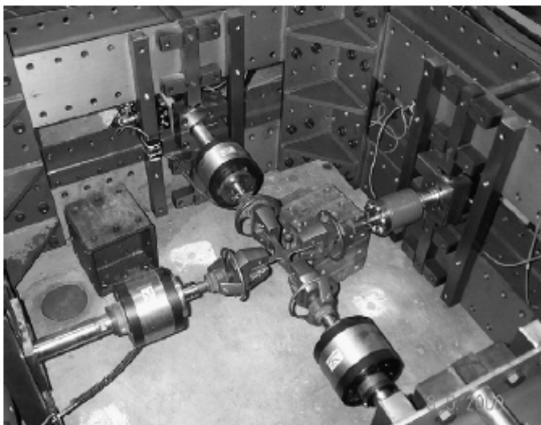
- **Principe de l'essai traction biaxial**

Les essais de traction biaxiaux consistent à exercer une contrainte dans deux directions perpendiculaires sur une même éprouvette. Ceci impose d'utiliser des éprouvettes cruciformes. Pour réaliser des états de contrainte uniformes, il faut que les bras de la croix aient des rigidités transversales assez faibles. Les directions principales des contraintes sont fixées et on peut effectuer des chargements dans leur l'espace.

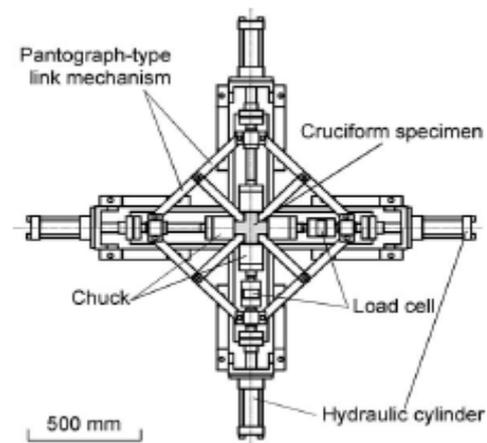
## • Les dispositifs de traction biaxiale

Il existe un grand nombre de machines pour réaliser des essais de traction biaxiale, dont les avantages et les inconvénients sont liés à chaque type de réalisation. Le dispositif le plus simple dans son concept est un dispositif à 4 vérins ou actionneurs, tel que celui développé à l'Université de Bruxelles [21], (figure I.26). Dans ce dispositif le système de chargement est hydraulique, avec une capacité de 100 kN. Le champ de déformation de l'éprouvette est déterminé par corrélation d'images numériques. La (figure I.27) montre le dispositif utilisé à l'Université de Tokyo [22]. Un système de type pantographe reliant les mors opposés est associé au dispositif, de sorte que les actionneurs ont des déplacements opposés deux à deux. Le suivi de la déformation se fait par mesure optique.

Le système développé par l'IFW Darmstadt et la société INSTRON [23] se compose d'un support de grande rigidité et intègre quatre actionneurs servohydrauliques avec une force maximale de 250 kN (figure I.28). Le dispositif proposé par [24] combine l'utilisation d'une machine classique de traction pour une direction de chargement et de vérins hydrauliques pour l'autre direction (figure I.29). [25] ont utilisé un dispositif électromécanique triaxial pour étudier le comportement de matériaux composites (figure I.30).



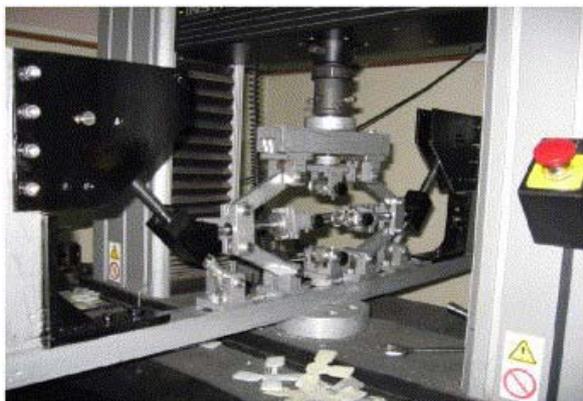
**Figure I.27 :** Dispositif d'essais biaxiaux [22]



**Figure I.26 :** Dispositif d'essais biaxiaux [21]



*Figure I.28: Système de traction biaxiale, [23]*

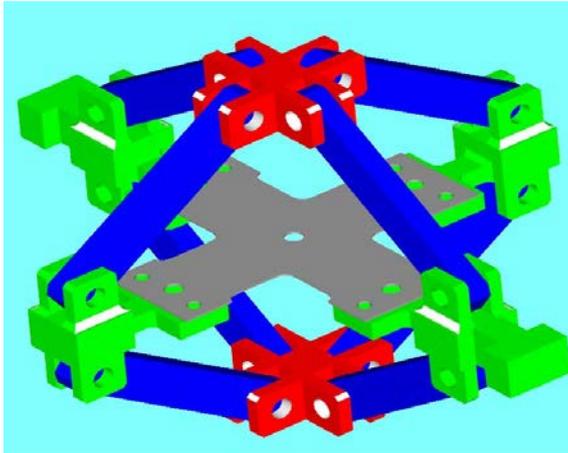


*Figure I.29 : Montage pour essais [24]*



*Figure I.30 : dispositif biaxiaux [25]*

Le principal inconvénient des dispositifs précédents est la nécessité de concevoir une machine spécifique, et donc leur coût élevé, incluant les vérins hydrauliques et la réalisation d'importants ensembles mécaniques. On peut citer deux dispositifs cinématiques simples, qui permettent de transformer un déplacement dans une seule direction en un système de deux déplacements orthogonaux. Makinde et Ferron (1988) ont conçu un dispositif permettant, à l'aide d'un système de biellettes, de convertir le déplacement vertical obtenu en compression avec une machine d'essais conventionnelle en déplacements horizontaux dans deux directions perpendiculaires, conduisant à un allongement biaxial de l'éprouvette (figure I.31). Un autre dispositif développé à l'Institut Fraunhofer en Allemagne assure également la transformation d'un mouvement vertical en mouvements horizontaux dans deux directions perpendiculaires (figure I.32).



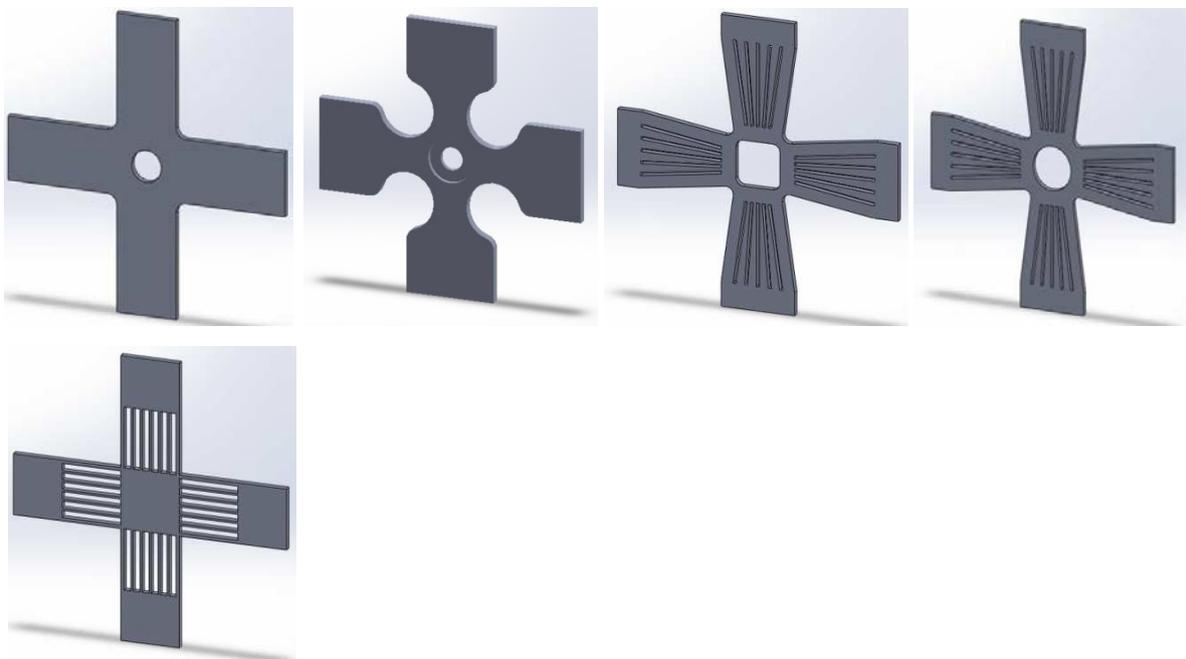
*Figure I.31 : Dispositif de traction biaxiale, [26]*



*Figure I.32: Dispositif de traction biaxiale, [27]*

- **les éprouvettes biaxiales**

Les éprouvettes de traction biaxiale sont des éprouvettes cruciformes de forme de croix



*Figure I.33 : éprouvettes cruciformes de différents types(8)*

### I.14.1.2. Traction-torsion

Ce type d'essais permet d'étudier des trajets de chargement avec modification des directions principales des contraintes. La machine est constituée d'un vérin linéaire et d'un vérin torique avec dispositif de découpage. [18]

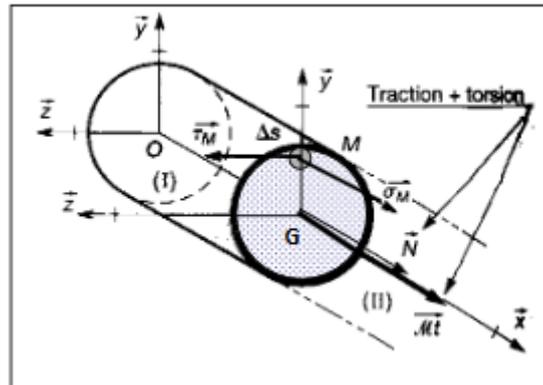


Figure I.34: sollicitation en traction-torsion

- **Principe de l'essai**

Pour déterminer la loi de comportement en contraintes biaxiaux, l'essai le plus utilisé consiste à solliciter un tube mince à la fois en torsion. Ce type d'essai permet d'étudier les trajets de chargement avec des modifications des directions principales des contraintes de découpage [29]

### I.14.1.3. Essai de traction-cisaillement

- **Essai Arcan**

L'essai Arcan a été développé pour l'étude et la caractérisation du comportement et l'endommagement des matériaux composites. Elle est également utilisée pour étudier d'autres problèmes tels que l'ouverture et la propagation des fis sures. [28]

Cette procédure expérimentale permet de combiner et de contrôler parfaitement des sollicitations de traction perpendiculaire et de cisaillement transverse dans une éprouvette.

### • Principe de l'essai Arcan

Deux supports angulaires sont liés à deux embases au milieu desquelles se trouve l'échantillon à tester. L'orientation de ces deux secteurs par rapport à l'axe de chargement d'une machine d'essai uniaxiale définit exactement la répartition de (traction perpendiculaire /cisaillement transverse) dans l'axe du chargement. La variation de cette orientation permet d'obtenir plusieurs combinaisons de sollicitation.(Figure I.35)

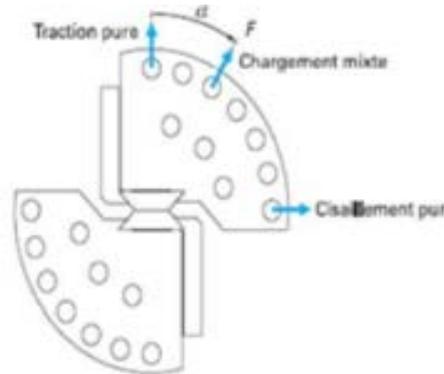


Figure I.35 : principe de l'essai Arcan

### • Objectif

L'objectif du dispositif est développé dans la section centrale d'une éprouvette appelée éprouvette papillon sur la Figure. Une contrainte normale  $\sigma_{xx}$  et  $\sigma_{yy}$ , et une contrainte tangentielle  $\sigma_{xy}$ , en appliquant un effort vertical F. L'orientation de la section centrale par rapport à la direction de la charge verticale s'effectue par le réglage de l'angle  $\alpha$ .

Le sens de l'effort F et la valeur de l'angle permettent de développer différents états de contraintes planes de traction-compression combinée ou cisaillement et cisaillement simple.

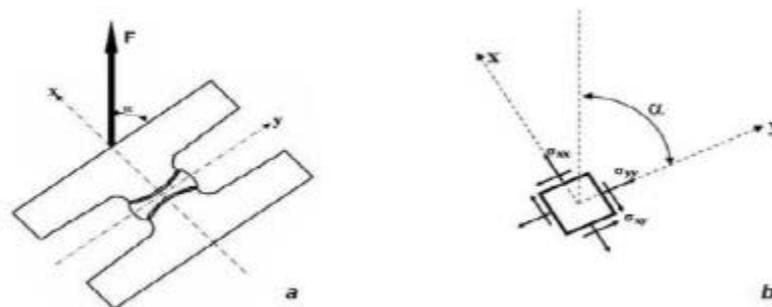


Figure I.36 : a) Éprouvette papillon en chargement biaxial  
b) État de contrainte plane développé au centre de l'éprouvette

---

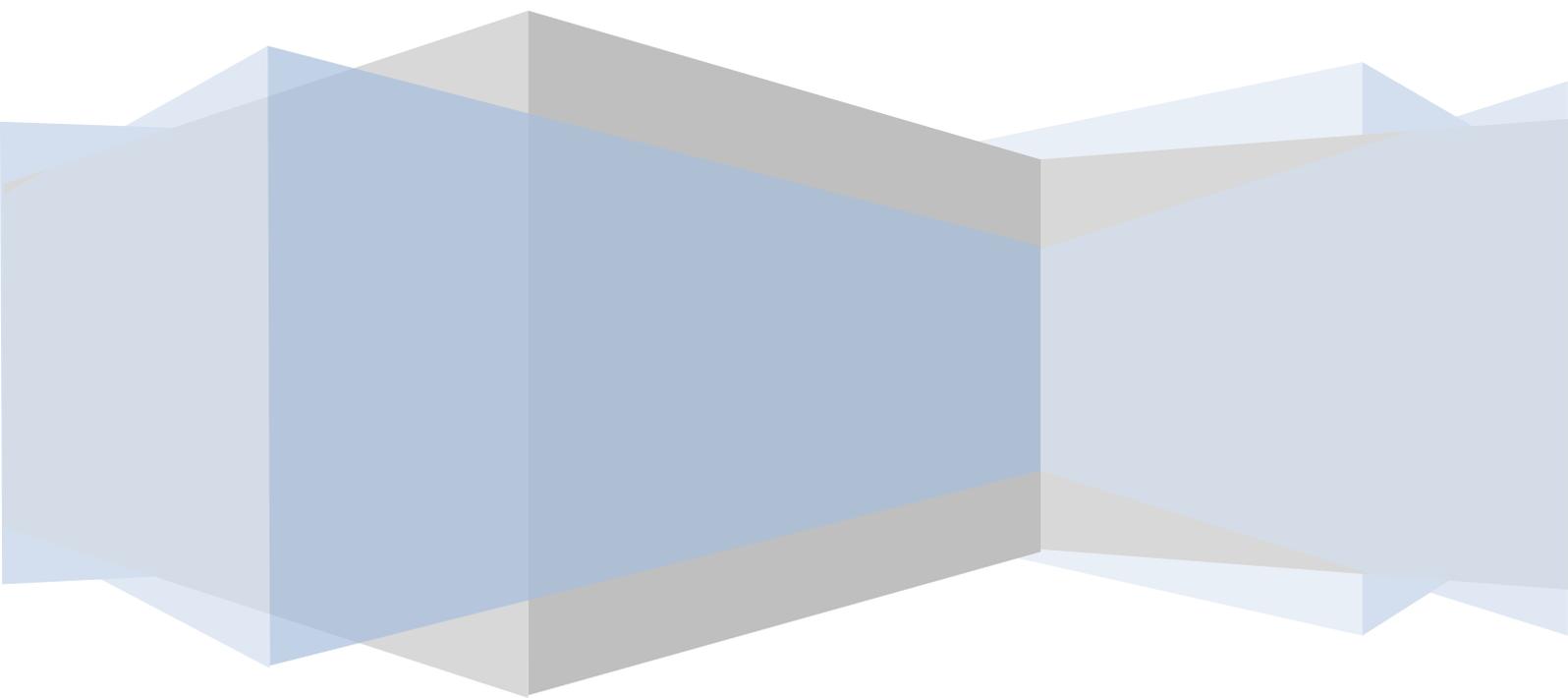
## I.15. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons fait une partie bibliographique associée aux généralités sur les polymères, en particulier sur le PMMA aux essais mécaniques.

Nous avons présenté les différents types d'essais mécaniques uniaxiaux et multiaxiaux et leurs dispositifs que nous avons rencontrés lors de nos recherches bibliographiques et bien sûr sur ces éprouvettes simples et cruciformes.

# Chapitre II

## Méthodes expérimentales





---

## II.1 Introduction

Dans ce chapitre on présente les différents essais de traction biaxiale sur des éprouvettes cruciforme d'un matériau d'étude poly méthacrylate de méthyle (PMMA) sur un dispositif d'essai avec des modifications apportées sur ce dispositif.

## II.2 Le matériau d'étude

Le matériau de l'étude est un PMMA procuré dans les commerces sous forme des plaques d'épaisseur 2mm de surface 1m<sup>2</sup>

Ces principales caractéristiques du PMMA sont :

- Propriétés optiques exceptionnelles.
- Transparence et fini brillant.
- Rigidité et stabilité dimensionnelle.
- Dureté et résistance aux rayures.
- Excellente résistance aux rayons solaires (rayonnement ultraviolet) et au vieillissement par les intempéries.

## II.3 Géométrie des éprouvettes

### II.3.1 Éprouvettes de traction uniaxiale

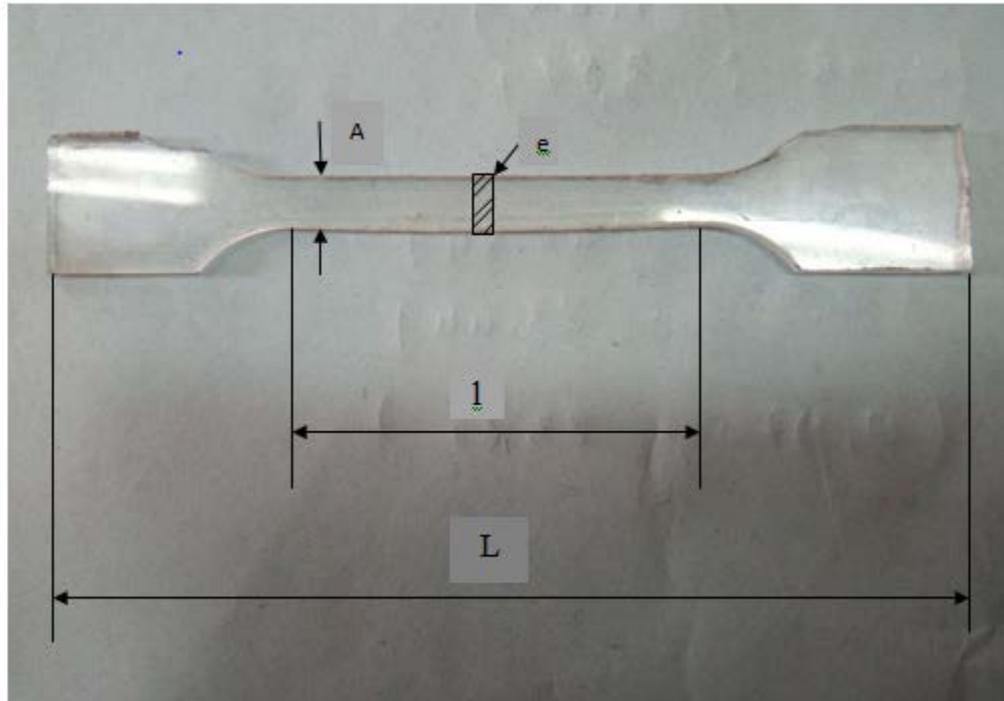
Après avoir monté les deux morts (supérieure et inférieure) sur la machine de traction IBERTES et monté l'éprouvette sur la machine

Nous étions enfin prêts à réaliser un essai complètement assisté par un mécrue de la machine

L'Essai réalisé est l'essai de traction, les éprouvettes sont plates, en PMMA, usiné à l'atelier, et de dimensions suivantes :

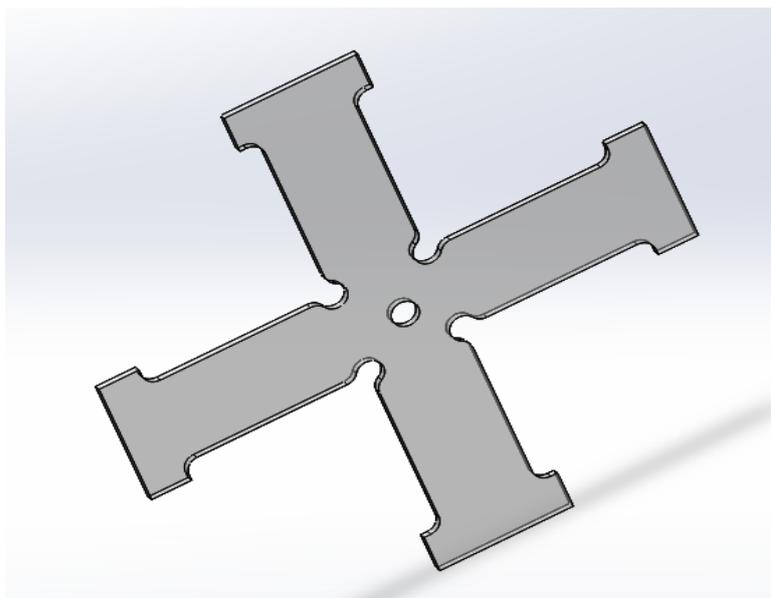
- Largeur totale ;  $L=11.5\text{mm}$
- Largeur utile (entre repères) ;  $l=5.5\text{mm}$
- Largeur ;  $A=8\text{mm}$
- Épaisseur ;  $e=2\text{mm}$

L'essai est réalisé par plusieurs vitesses



### II.3.2 Éprouvette cruciformes

Les éprouvettes cruciformes utilisées, sont découpées sur des plaques de PMMA par découpage figure II.1 leurs dimensions sont résumées dans le tableau II.1



*Figure II.2 : éprouvette cruciforme*

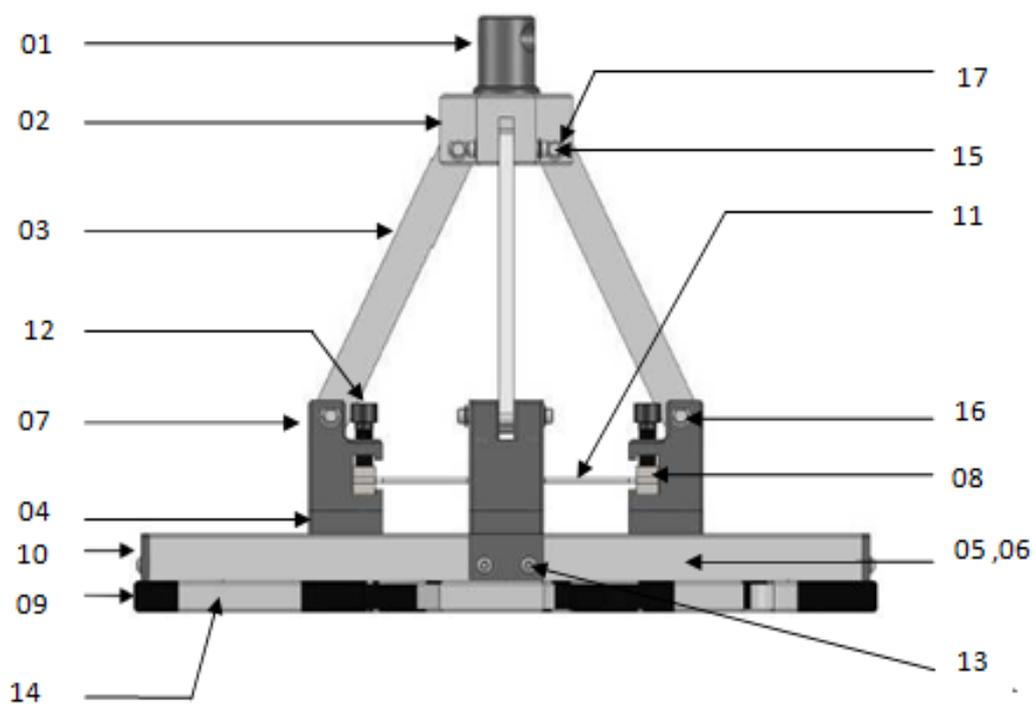
Symboles	Dimensions en (mm)	Le schéma de l'éprouvette
A	15	<p>The diagram shows a cross-shaped specimen with a central hole. The dimensions are defined as follows: A is the width of the horizontal arm; B is the height of the vertical arm; C is the length of the horizontal arm from the center to the end; R1 is the radius of the fillet at the intersection of the arms; and R2 is the radius of the fillet at the end of the horizontal arm.</p>
B	50	
C	56.34	
R <sub>1</sub>	10	
R <sub>2</sub>	5	
E	2	

**Tableau II.1 : dimensions de l'éprouvette cruciforme[34]**

## II.4 Dispositif de l'essai

Afin d'effectuer les essais de traction biaxiale sur les éprouvettes cruciforme, le dispositif expérimentale réalisé au laboratoire LEC2M est utilisé (figure II .3)

Les éléments constituant ce dispositif sont donnés par le tableau II.2



*Figure II.3 : Différents éléments principaux.*

<b>Numérotations</b>	<b>Nombre de Pièce</b>	<b>désignation</b>
01	01	Teton de guidage
02	01	Tête supérieure
03	04	Bras
04	04	Glissière
05	01	Porte-glissière A
06	01	Porte-glissière B
07	04	bride
08	08	Mors de fixation
09	01	Bâti
10	04	Calle
11	01	Eprouvette
12	08	Vis de pression
13	08	Vis FS M8
14	20	Vic CHC M8
15	04	Goupille 10x50
16	04	Goupille 10x60
17	16	Circlips 10x1.5

*Tableau II.2 : Différents éléments principale.*

### II.4.1 Principe de fonctionnement

Le dispositif est positionné sur une machine électromécanique de marque IBERTEST avec un bâti qui est fixé sur les deux portes glissières avec des vis. Quatre brides sont fixées sur les quatre glissières qui se déplacent sur les portes glissières et leur déplacement est assuré par les bras assemblés avec des goupilles.

Le téton de guidage est fixé sur le vérin de la machine avec la tête supérieure qui est assemblée avec les bras qui sont fixés sur le vérin.

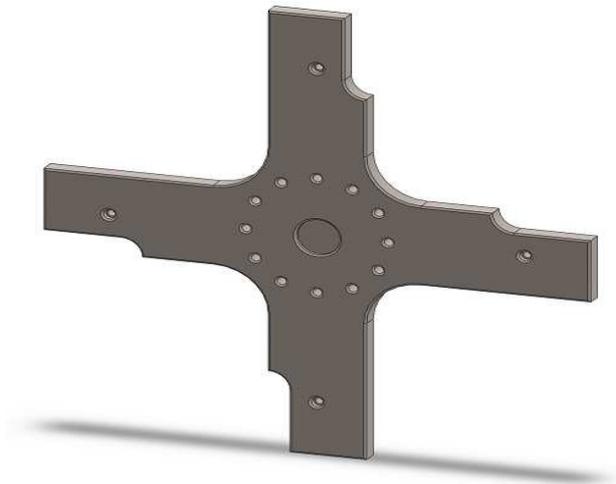
Les calles et les vis sont faites pour la fixation et d'empêcher la translation suivant les goupilles est les rainures des portes glissières, les éprouvettes sont fixées avec les mors par les vis de pression.

#### ❖ Les éléments constituant le dispositif sont donnés comme suit :

- **Bâti cruciforme**

La base du dispositif est cruciforme (pour minimiser la flexion) de dimensions  $500 \times 500 \times 20$ , elle sert à fixer le dispositif sur la machine de traction uniaxiale avec 12 vis de  $M10 \times 1,5$  et 04 vis de  $M8 \times 1,25$ .

La base contient aussi un chambrage au centre, de diamètre 40mm et une profondeur de 4mm dans le but de centrer le système (figure II.4)



*Figure II.4.* : Bâti cruciforme

- **Porte glissière**

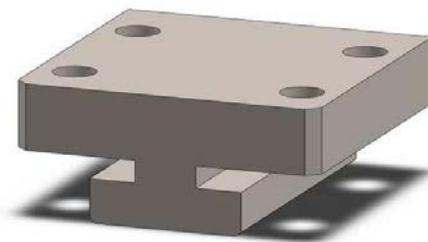
La pièce est sous forme prismatique de dimensions  $470 \times 50 \times 30$  contenant une rainure en T de dimensions  $210 \times 25 \times 8$  avec huit (8) trous taraudés de diamètre  $M8 \times 1,25$  (Figure II.5)



*Figure. II.5 : Porte-glissière.*

- **Glissière**

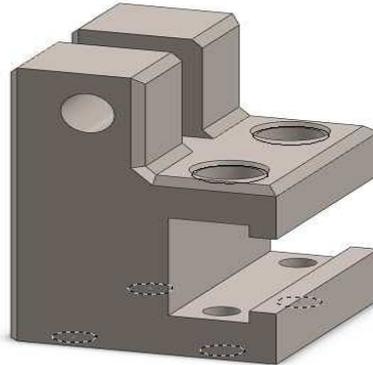
Sous forme de T de dimensions  $50 \times 50 \times 30$  fixée à la bride par quatre (4) vis de  $M8 \times 1,25$ . La pièce glisse sur la rainure en T lubrifiée afin d'annuler les frottements sur une course de 160mm (Figure II.6)



*Figure. II.6 : Glissière*

- **. Bride**

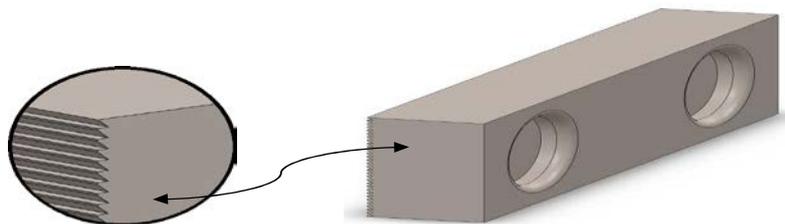
Bride de dimensions  $70 \times 50 \times 50$ , sert à maintenir l'éprouvette cruciforme avec deux (2) vis de pression  $M10 \times 1,5$  en CHC et assure un déplacement biaxial suivant les portes glissières (Figure II.7)



*Figure II.7 : Bride.*

- **Mors**

Une pièce prismatique de dimensions  $50 \times 15 \times 10$  qui contient des dentures d'une profondeur de 2mm et de deux (2) trous bornés dans lesquels les vis de pression sont guidés à l'intérieur afin d'éviter le détachement de la pièce. Les dentures servent à éviter le glissement de l'éprouvette (Figure II.8)

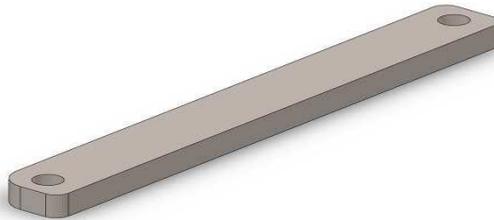


*Figure II.8 : Mors.*

- **Bras**

Barre de dimensions  $210 \times 25 \times 10$ , contenant deux perçages de diamètre 10mm, elle reçoit un effort axial et le transforme en un effort combiné. L'inclinaison de la barre est variée suivant l'angle  $\alpha$  compris entre  $0^\circ$  et  $45^\circ$ .

L'effort suivant l'axe y est négligeable (figure II.9)

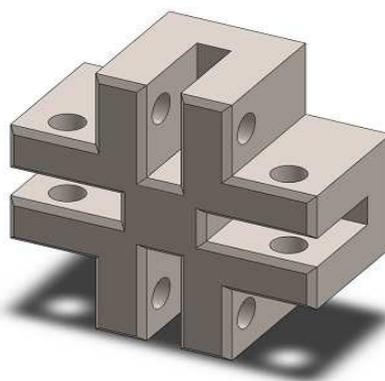


*Figure II.9 : Bras.*

- **Tête supérieure**

Partie supérieure du dispositif contenant quatre (4) perçages de diamètre 10mm et un chambrage de diamètre 40mm et de profondeur 5mm. C'est la partie la plus importante du mécanisme car elle reçoit une force axiale pour la répartir en une force biaxiale

(Figure II.10)



*Figure II.10 : Tête supérieure.*

---

- **Téton de guidage**

Pièce cylindrique de dimensions 50×70, sert à orienter et centrer le mécanisme afin d'empêcher le décalage suivant l'axe de la machine traction uniaxiale (Figure II.11)



*Figure II.11 : Téton de guidage.*

- **Goupille cannelée**

La goupille cylindrique de diamètre 10mm, assure le maintien du mécanisme entre la tête supérieure, les bras et les brides (Figure II.12)



*Figure II.12 : Goupille.*

#### II.4.2 Fixation de l'appareil traction biaxiale sur la machine de traction

Le montage du dispositif traction biaxial sur la machine de traction a été fait de telle manière que l'axe de symétrie de l'appareil coïncide avec l'axe de la force appliquée lors du déplacement de la traverse mobile. (Figure II.13).

La base de l'appareil est fixée sur la traverse inférieure de la machine et le téton de guidage sur la traverse supérieure mobile.

Le dispositif de traction biaxiale doit être adaptable sur une machine de traction-compression.

L'éprouvette cruciforme subit une déformation biaxiale dans le même plan horizontal à cause de l'effort vertical de compression qui s'applique sur le téton de guidage. Donc les quatre bras écartent les brides d'une manière symétrique. Cette dernière glisse sur des glissières mais à certaine distance les brides inclinées, ce qui laisse pas l'essai marche sur les bonnes conditions.



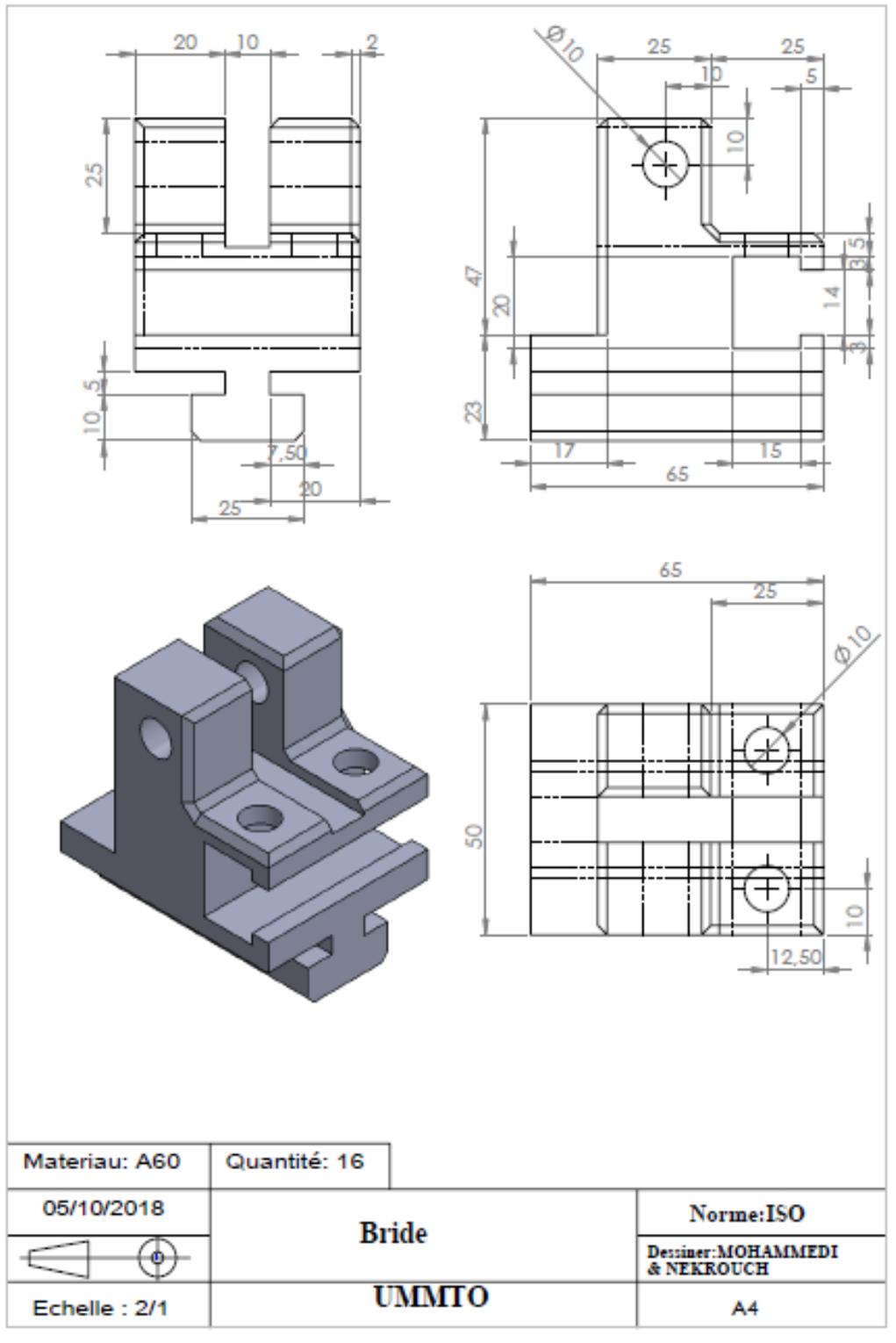
*Figure II.13 : fixation de l'appareil sur la machine de traction.*

---

Lors des essais on a constaté un dysfonctionnement du dispositif par blocage des glissières lors des premières phases de ces essais.

Après analyse, on a déduit que l'effort dans le bras, produit un moment de force sur la bride-glissière avec un bras de levier élevé, par rapport aux portes glissière. En effet, ce moment provoque un basculement de la bride-glissière dans le sens de leur déplacement, ce qui induit leur coincement. La solution qu'on a apporté, en fonction des moyens disponibles, est de réduire la valeur du bras de levier de la bride-glissière et d'augmenter la surface de contact de la bride avec les portes glissière et les dimensions de cette bride sont données dans la figure II.14

Lors de la fabrication, on a remplacé la bride-glissière par une seule pièce donnée dans la figure II.14



Figur II.14 : bride modifiée

### II.4.3 Procédés de fabrication de la bride

Les brides de dispositifs c'est des pièces fabriqués en Acier A60 par les procédés de fraisage sur une fraiseuse verticale à l'atelier de hall technologie de Ouad-Aissi. Le utilisé brut est de dimension de 70.55.75. mm<sup>3</sup>.



*Figure II.15 : usinage de bride*

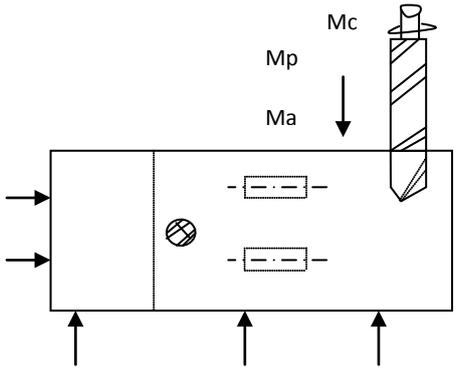
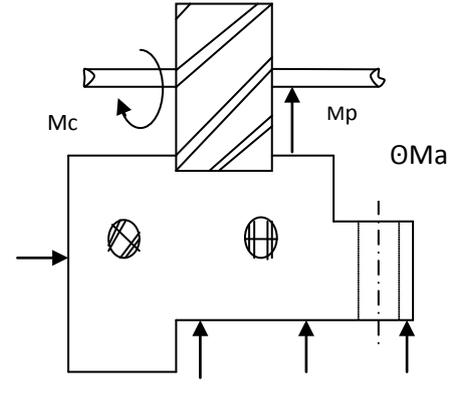
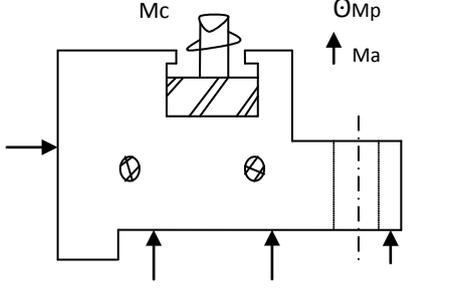
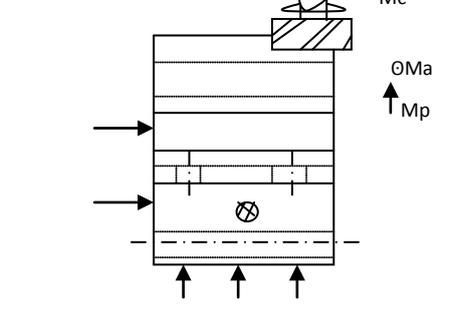
Les étapes d'usinage exécutées pour la réalisation de la pièce finale se résument comme suit :

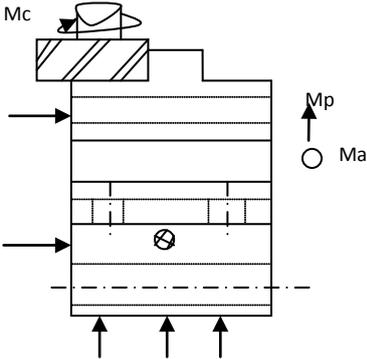
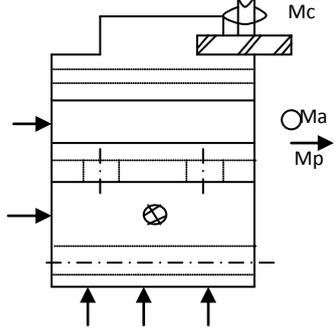
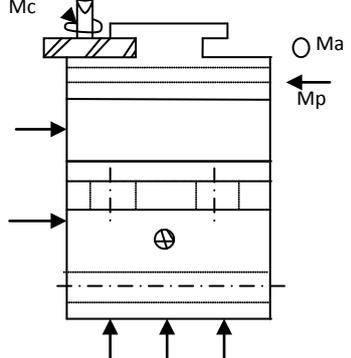
1. surfacage du brute pour avoir les côtes 65\*50\*70 avec une fraise Ø50mm en carbure métallique.
2. perçage au Ø10mm.
3. rainurage en forme U.
4. Rainurage en forme T.

Le croquis de phase correspondante est donné par le tableau II.3

❖ Croque des phases

Phase	Nom d'opération	Condition de coup	Outil	Schéma de l'opération
05	Surfaçage	$N=500\text{tr/min}$ $A=125\text{mm/min}$ $P=1\text{mm}$	Fraise à Surfacer plaquette en carbure métallique $\text{Ø}50\text{mm}$	
10	Surfaçage	$N=500\text{tr/min}$ $A=125\text{mm/min}$ $ap=1\text{mm}$	Fraise 2t $\text{Ø}50\text{mm}$	
15	Surfaçage	$N=500\text{tr/min}$ $A=125\text{mm/min}$ $Ap=1\text{mm}$	Fraise 2 T $\text{Ø}30\text{mm}$	
20	1 <sup>er</sup> sous phase Perçage	$N=500\text{tr/min}$ $A=500\text{mm/min}$	Foreten ARS $\text{Ø}10\text{mm}$	

<p>20</p>	<p>2<sup>eme</sup> sous phase <b>Perçage</b></p>	<p><math>N=500\text{tr}/\text{min}</math> <math>A=500\text{mm}/\text{min}</math></p>	<p>Foreten ARS <math>\text{Ø}10\text{mm}</math></p>	
<p>25</p>	<p>Rainure</p>	<p><math>N=125\text{tr}/\text{min}</math> <math>A=80\text{mm}/\text{min}</math> <math>P=1\text{mm}</math></p>	<p>Fraise 3taille <math>\text{Ø}15*5\text{mm}</math></p>	
<p>30</p>	<p>Rainure</p>	<p><math>N=125\text{tr}/\text{min}</math> <math>A=80\text{mm}/\text{min}</math> <math>P=1\text{mm}</math></p>	<p>Fraise en T <math>\text{Ø}20\text{mm}</math></p>	
<p>35</p>	<p>1eme sous phase Epoulement</p>	<p><math>N=125\text{tr}/\text{min}</math> <math>A=80\text{mm}/\text{min}</math> <math>P=1\text{mm}</math></p>	<p>Fraise 2 taille <math>\text{Ø}15\text{mm}</math></p>	

<p>35</p>	<p>2eme sous phase <b>Epoulement</b></p>	<p><math>V=125\text{tr/min}</math> <math>A=80\text{mm/min}</math> <math>P=1\text{mm}</math></p>	<p>Fraise 2 taille <math>\text{Ø}15\text{mm}</math></p>	
<p>40</p>	<p>1<sup>er</sup> sous phase <b>Rainure</b></p>	<p><math>N=125\text{tr/min}</math> <math>A=80\text{mm/min}</math> <math>P=1\text{mm}</math></p>	<p>Fraiseuse 3 taille <math>\text{Ø}30\text{mm}</math></p>	
<p>40</p>	<p>2<sup>er</sup> sous phase <b>Rainure</b></p>	<p><math>N=125\text{tr/min}</math> <math>A=80\text{mm/min}</math> <math>P=1\text{mm}</math></p>	<p>Fraiseuse 3 taille <math>\text{Ø}30\text{mm}</math></p>	

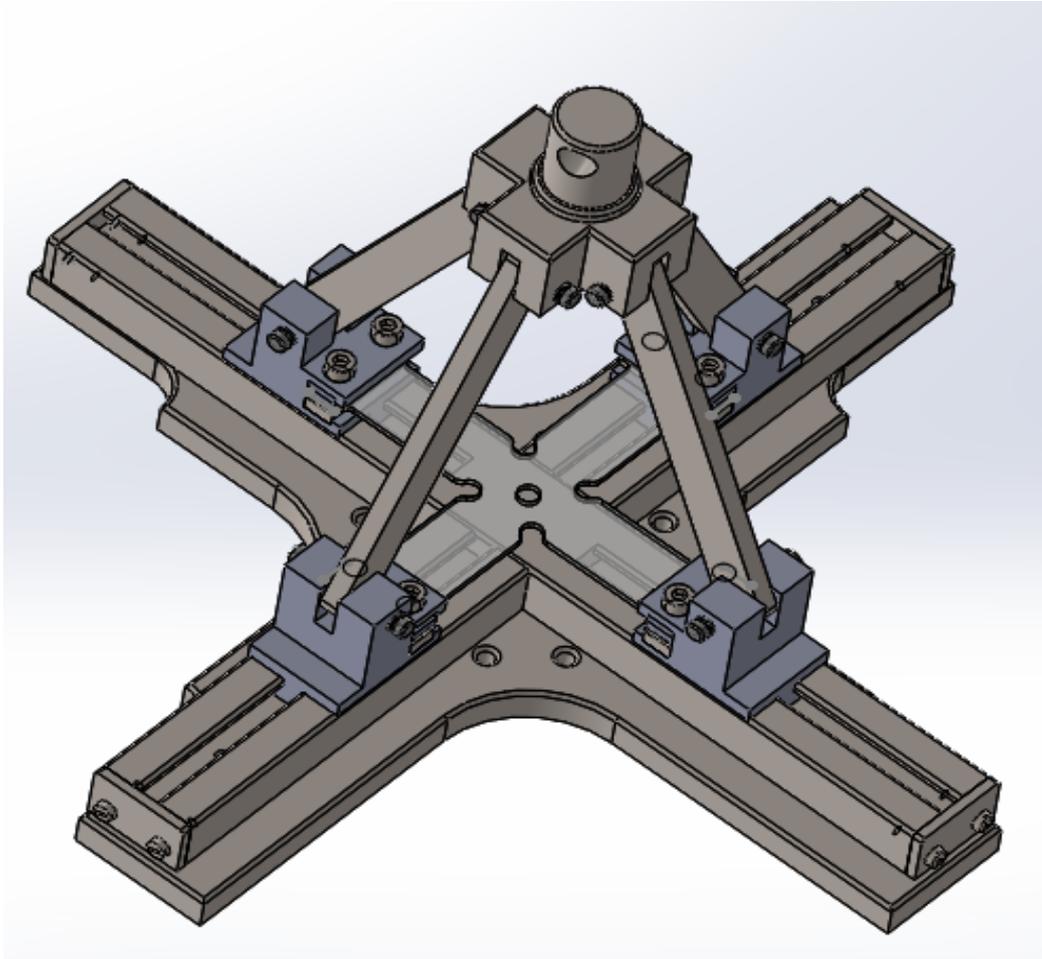
**Tableux II.3 :méthode dusinage de bride**

**NB :**les serrage est oppose aux appuis

---

**❖ Le dispositif après la modification :**

Après la fabrication des brides le montage du dispositif de traction biaxiale est présenté sur la figure II.15



*Figure II.16 : Le dispositif après les modifications*

---

## II.5 L'essai de traction

### II.5.1 Essai de traction uniaxial :

L'éprouvette plane est fixée avec serrage par les mors de la machine, à l'aide de système de fixation méplat.

### II.5.2 Essai de traction biaxiale :

Les essais sont menés sur la machine de traction électromécanique de marque IBERTEST mode UIB.100/W L'éprouvette cruciforme est montée sur l'appareil de traction biaxiale et fixée avec serrage par les quatre mors de dispositif.

Pour chaque essai on effectue deux (2) testes pour chaque vitesse ; et vérifier la reproductibilité des résultats.

. Le déroulement des essais est mené selon les étapes suivantes :

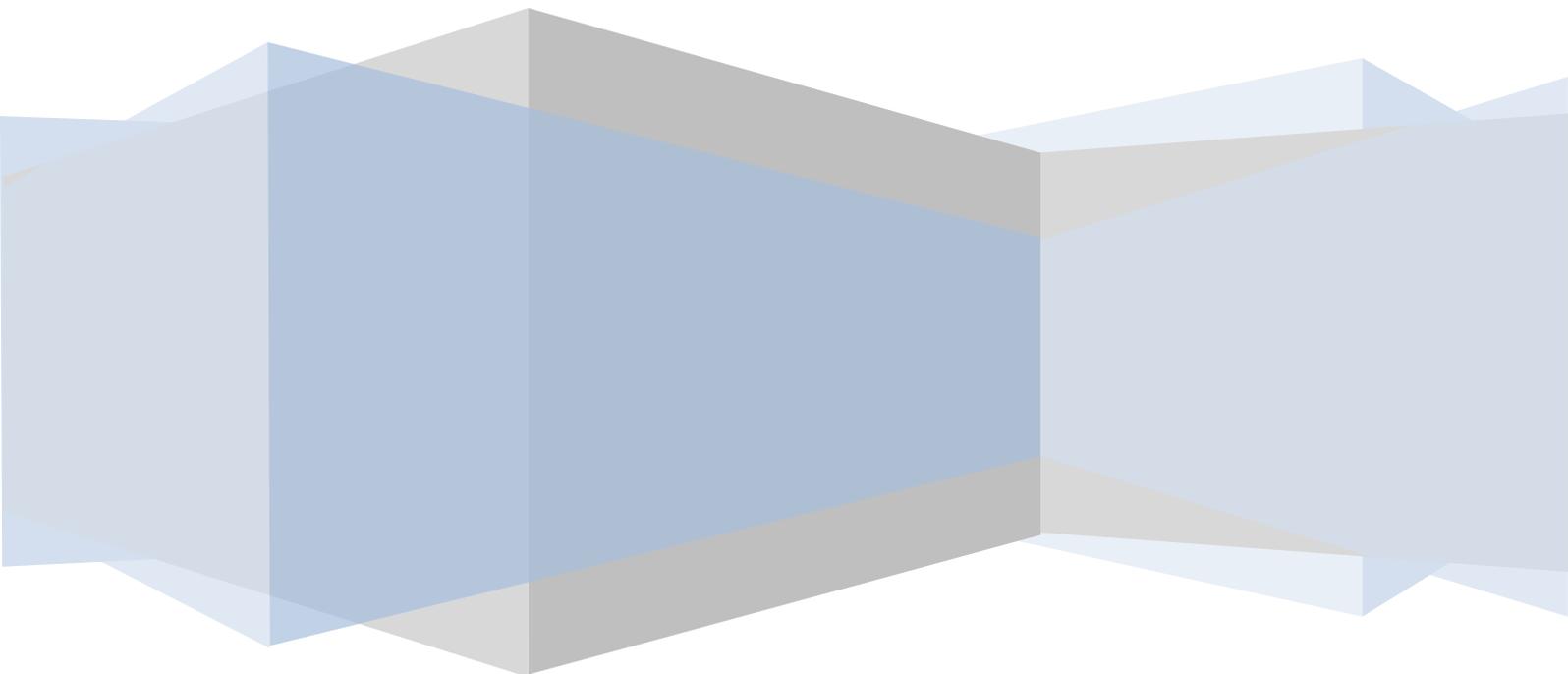
- Mise en marche de la machine de traction.
- Réglage de la machine selon le matériau à tester.
- Réglage du cadran du dispositif traction biaxiale.
- Serrage de l'éprouvette par les mors de la machine.

## II.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les solutions adoptées pour éviter le blocage des brides lors des essais. Ainsi les modifications d'usinage des éprouvettes et les bride, et la fixation de dispositif sur la machine de traction biaxiale.

# Chapitre III

## Résultats et discussions





---

### III.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à l'étude du comportement mécanique du PMMA par des essais sur des éprouvettes altère et des essais de traction biaxial sur des éprouvettes cruciformes.

On présentera alors les résultats obtenus des différents essais effectués qui seront discutés par la détermination des différentes caractéristiques mécanique du matériau.

De même la sensibilité du matériau à la vitesse de déformation sera traitée dans ce chapitre

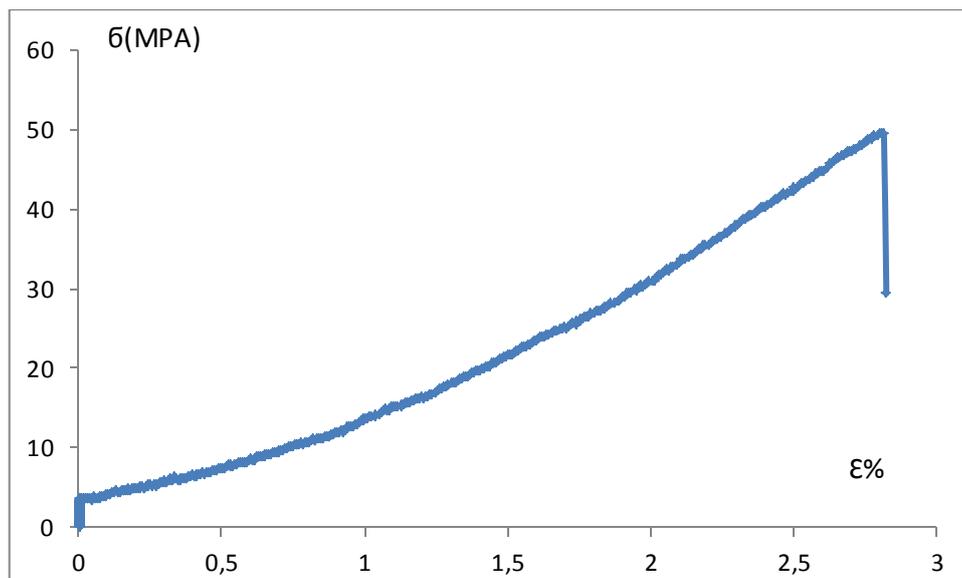
### III.2 Étude du comportement mécanique du PMMA en traction uniaxiale :

Des essais de traction uniaxiale sont mené sur des éprouvette altères à différentes vitesse de déplacement de la traverse mobile  $v= 0.2, 0.4, 0.6, 0.8,$  et  $1\text{mm/min}$ .

A fine de vérifier la reproductibilité des résultats, pour chaque vitesse, on a effectué trois (03) teste. Les résultats obtenus ont montré une bonne reproductibilité.

L'allure générale des courbe contraint-déformation est semblable pour tous les essais comme montré sur les figures III.1, III.2, III.3, III4, III5.

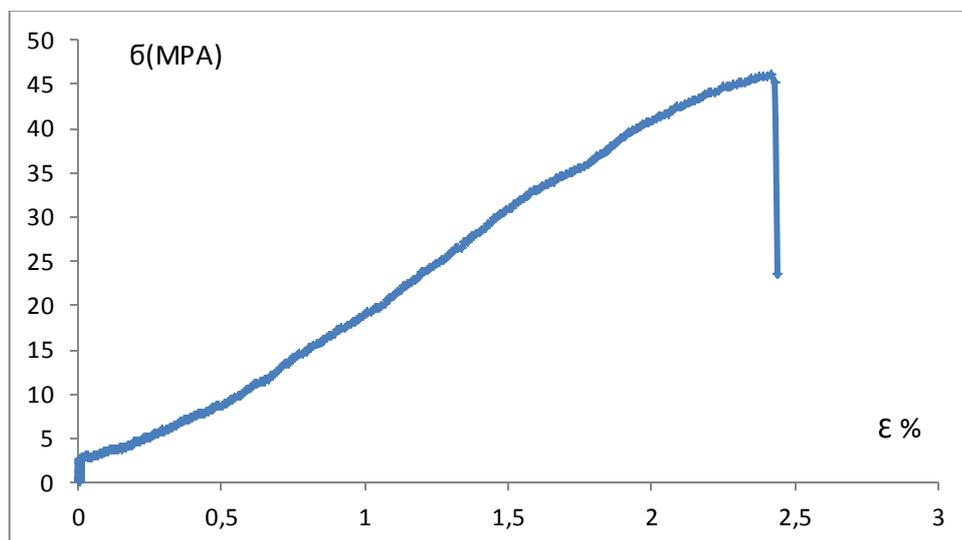
On peut bien observer que ces courbes sont marques au comportement fragile des matériaux. Elles sont marquées par une courbe élasticité suivie d'un infléchissement décrivant la détérioration du matériau puis rupture de l'éprouvette. la résistance mécanique  $R_p$  est alors égale à la contrainte maximal  $R_m$  supportée par l'éprouvette avant la rupture.



**Figure.III.1** : comportement du PMMA en traction Uniaxiale  $v=0.2\text{mm/min}$

Nous avons un courbe contrainte-déformation obtenue lors des essais pour une vitesse de  $0.2\text{mm/min}$

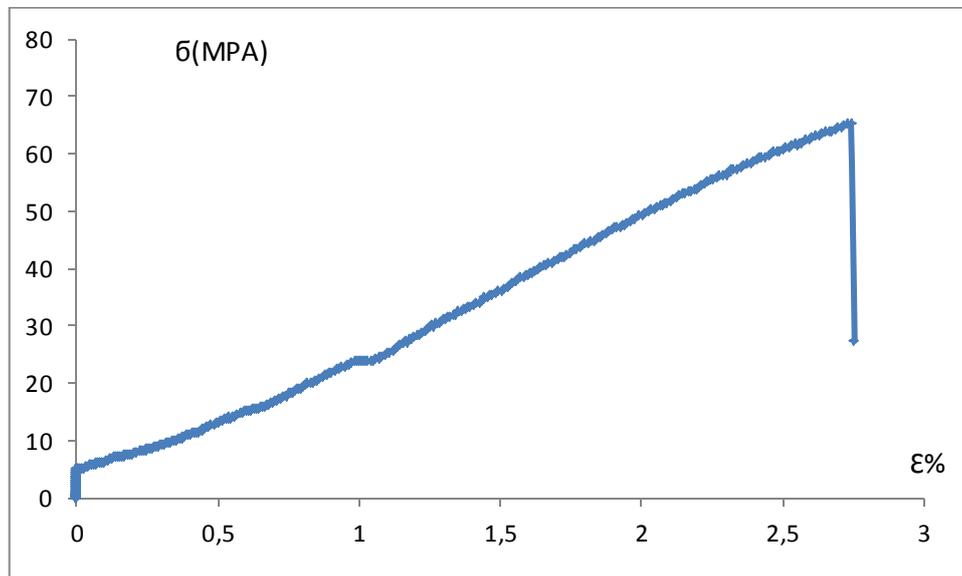
Afin de montrer l'effet de chargement sur le comportement de PMMA en traction uniaxiale.



**Figure.III.2** : comportement du PMMA en traction Uniaxiale  $v=0.4\text{mm/min}$

Nous avons un courbe contrainte-déformation obtenue lors des essais pour une vitesse de  $0.4\text{mm/min}$

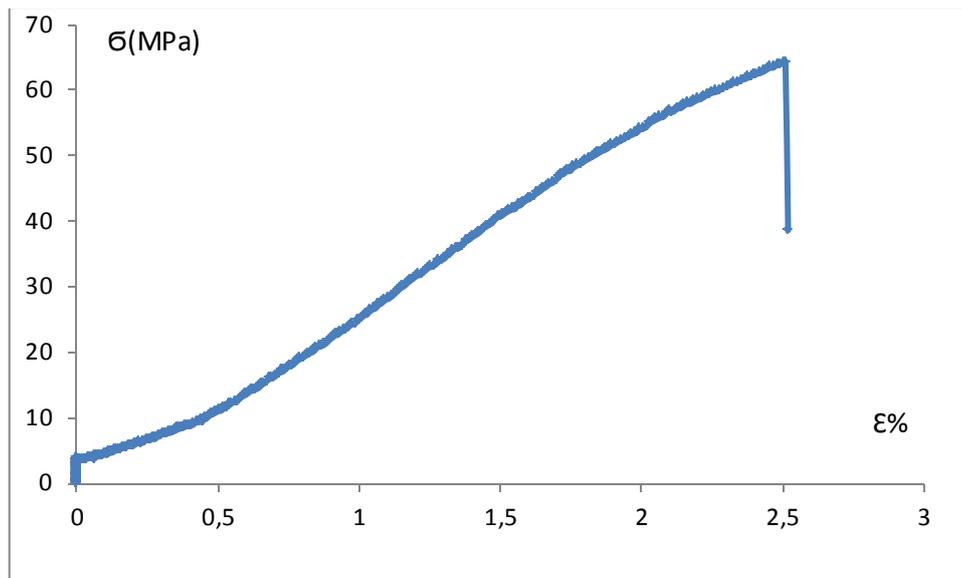
Afin de montrer l'effet de chargement sur le comportement de PMMA en traction uniaxiale.



**Figure.III.3** : comportement du PMMA en traction Uniaxiale  $v=0.6\text{mm/min}$

Nous avons un courbe contrainte-déformation obtenue lors des essais pour une vitesse de  $0.6\text{mm/min}$

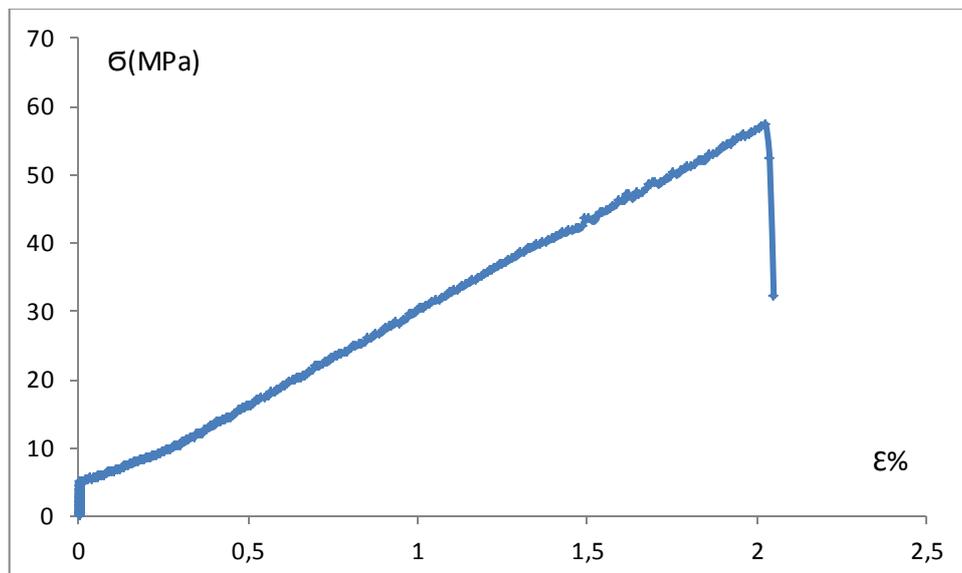
Afin de montrer l'effet de chargement sur le comportement de PMMA en traction uniaxiale.



**Figure.III.4 :** comportement du PMMA en traction uniaxiale  $v=0.8\text{mm/min}$

Nous avons un courbe contrainte-déformation obtenue lors des essais pour une vitesse de 0.8mm/min

Afin de montrer l'effet de chargement sur le comportement de PMMA en traction uniaxiale.



**Figure.III.5 :** comportement du PMMA en traction uniaxiale  $v=1\text{mm/min}$

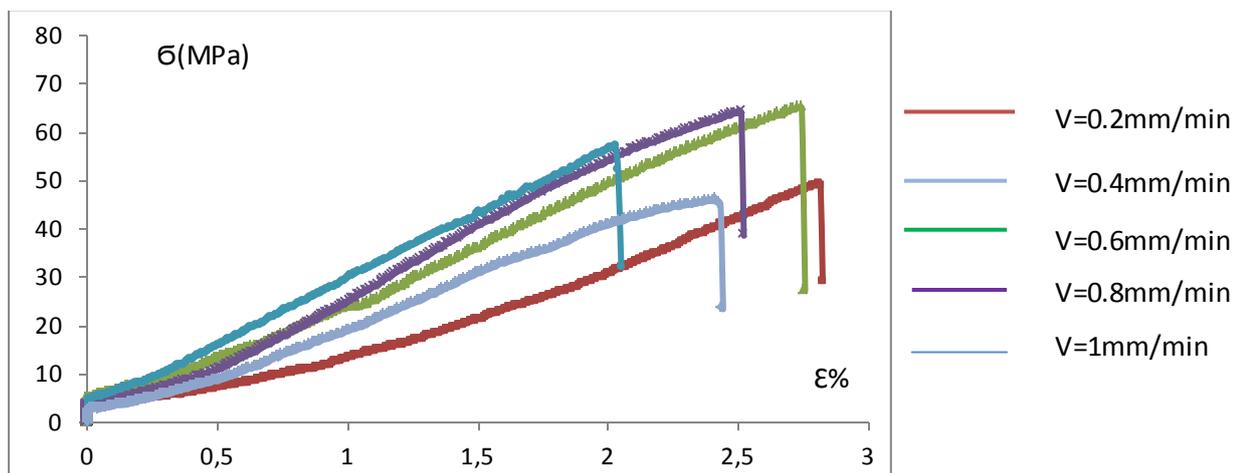
Nous avons une courbe contrainte-déformation obtenue lors des essais pour une vitesse de 1mm/min

Afin de montrer l'effet de chargement sur le comportement de PMMA en traction uniaxiale.

### III.3 Effet de la vitesse de chargement sur le comportement mécanique du PMMA en traction uniaxiale.

Afin de montrer l'effet de chargement sur le comportement de PMMA en traction uniaxiale.

Nous avons rassemblé les courbes contrainte-déformation obtenues lors des essais pour toutes les vitesses dans le même graphique comme montré dans la figure (III.6)



**Figure.III.6 :** comportement du PMMA en traction uniaxiale

L'effet de la vitesse est plus apparent sur la pente de la partie élastique, qui augmente en fonction de la vitesse.

En effet, le module d'élasticité croît considérablement en fonction de la vitesse de chargement. Sa valeur passe de 1300MPa pour  $v=0.2\text{mm/min}$  à 2700MPa pour  $v=1\text{mm/min}$  comme montré dans la figure III.6. De même la limite d'élasticité, subit une croissance importante en fonction de la vitesse vu que le matériau a un comportement fragile. La déformation du matériau, à cette limite élastique est aussi affectée par la vitesse de chargement III.8

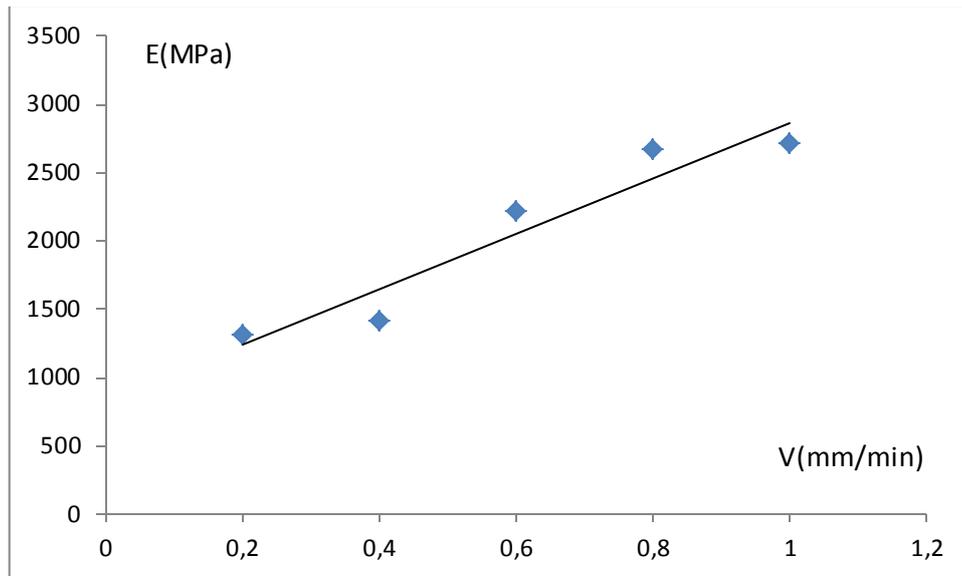
Cependant, sa variation est faible. Le même constat est tiré du tableau III.1 pour la variation de la contrainte à la rupture et la déformation correspondante.

Cette déformation est autour de 2% pour tous les essais.

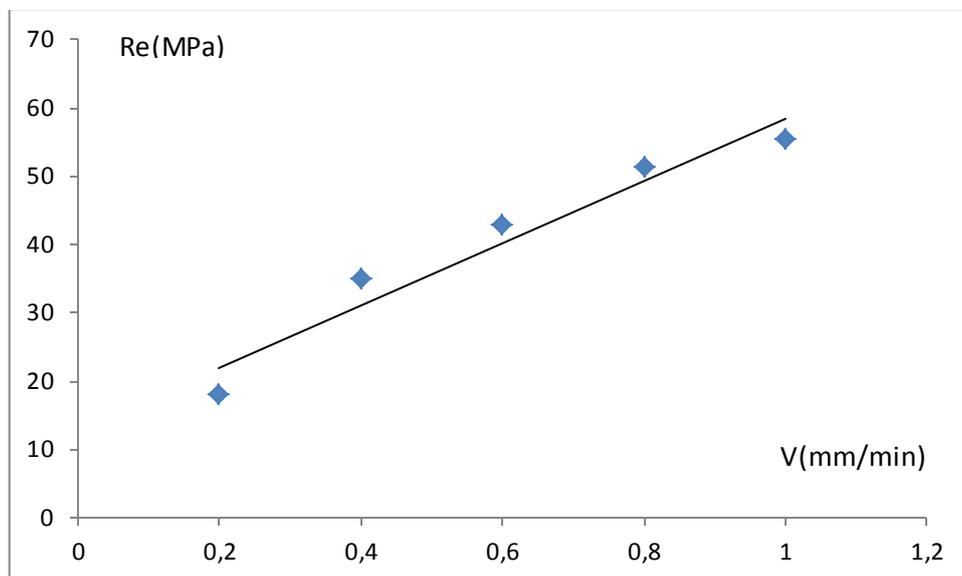
Vitesse	V1	V2	V3	V4	V5
Module de Young (E)	1300.95	1400.42	2200.55	2664.28	2700.36
Limite élastique (Re)	17.71	34.72	42.61	51	55.27
Déformation à Limite élastique	1.40	1.70	1.74	1.85	1.94
Contrainte maximal (Rmax)	49.9	52	66	65	59.1
Déformation Maximal	2.65	2.41	2.70	2.40	2.01

*Tableau III. 1 : caractéristique des contraintes de PMMA en traction simple*

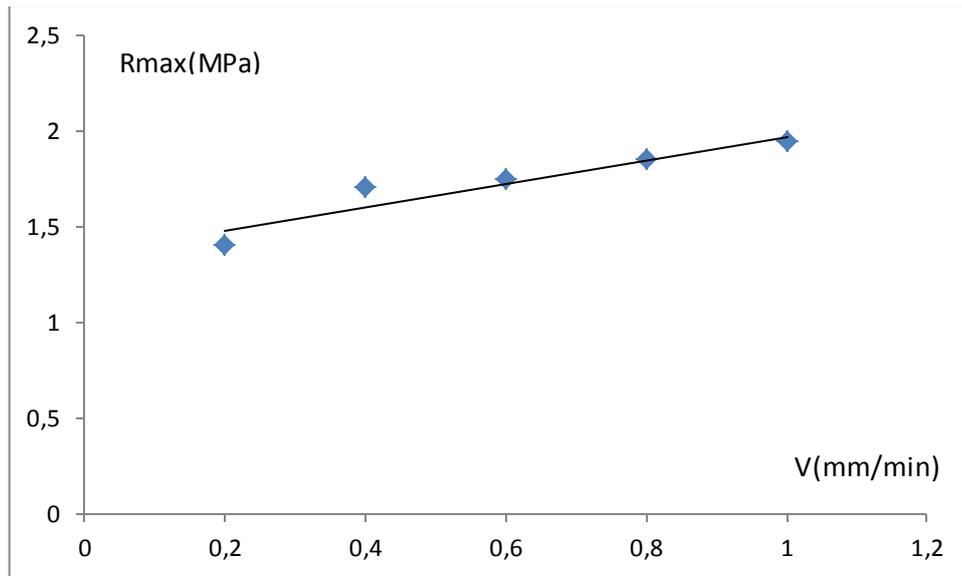
❖ **Courbe de (E, Re, Rm) en fonction de la vitesse**



*Figure III .7 : effet de la vitesse de chargement sur module de Young*



*Figure III .8 : effet de la vitesse de chargement sur la limite élastique du matériau*



*Figure III.9 : effet de la vitesse de chargement sur contrainte maximal*

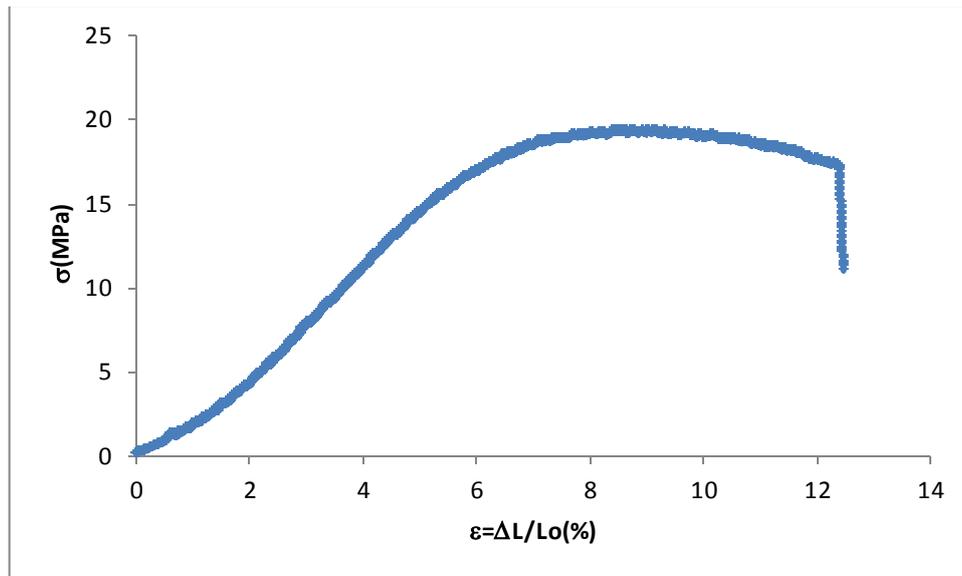
#### **III.4 Étude du comportement mécanique du PMMA en traction biaxiale :**

Dans cette partie du travail l'objectif était de réaliser des essais de traction biaxiale sur des éprouvettes cruciformes en PMMA comme décrit précédemment malheureusement le fonctionnement du dispositif d'essai se bloquait à cause d'une bride dont les côtes ne sont pas respectées de même à cause de l'usinage des éprouvette, la présence des fissure provoquant la rupture prématurée des éprouvette cependant, pour compléter l'étude du comportement du matériau de l'étude, nous avons utilisé des résultant brutes des essais biaxial obtenu dans le même cadre dans un projet de fin d'étude de master. [35].

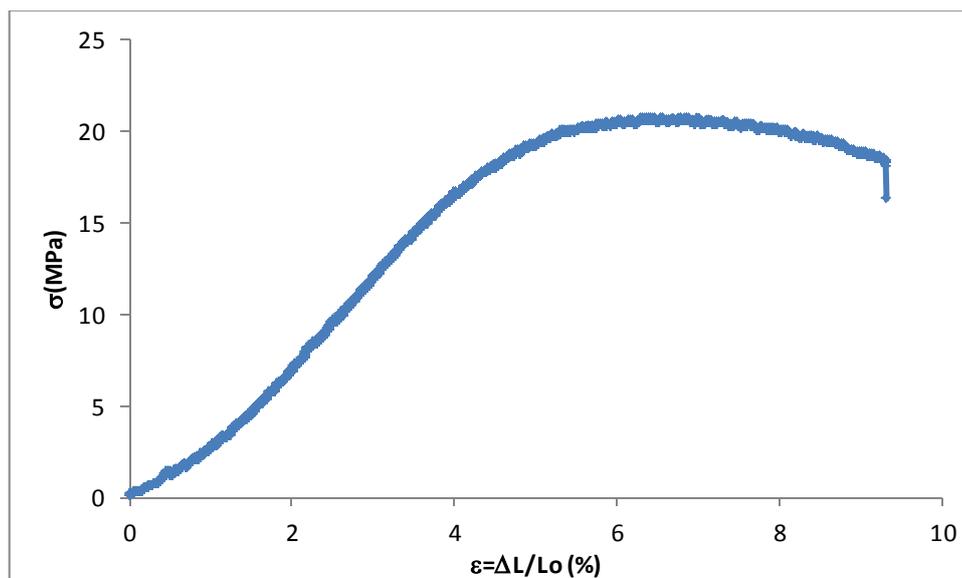
Les essais sont limité à deux essais, juste pour monter le fonctionnement du dispositif.

Sur les figures (III.10) et (III.11) Nous avons porté le courbe comportement du PMMA en traction biaxial pour les vitesses 0.5 et 1mm/mn respectivement. L'allure générale de ces courbes est semblable pour les deux vitesses de déplacement de la traverse mobile de la machine de traction.

Elles sont caractérisé par une partie linéaire qui définit l'élasticité du matériau suivie d'une phase de plasticité.



**Figure III.10** : comportement du PMMA en traction biaxial  $V=0.5\text{mm/min}$



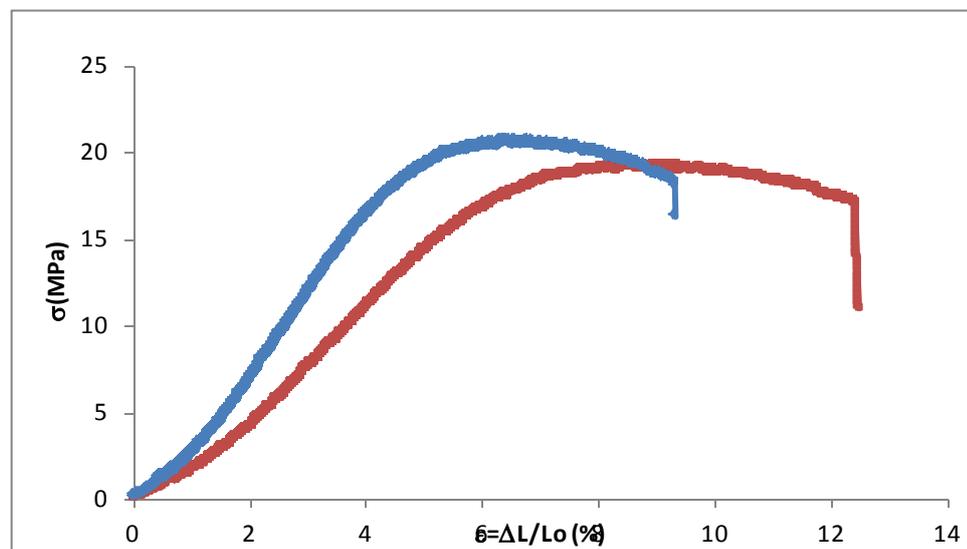
**Figure III.11** : comportement du PMMA en traction biaxial  $V=1\text{mm/min}$

#### III.4.1 : Effet de la vitesse sur le comportement du PMMA en charge biaxiale

Afin de bien montrer l'effet de la vitesse de chargement sur le comportement du PMMA, nous avons superposé les deux courbes obtenus pour les deux vitesses sur un même graphique.

Ainsi, on peut observer clairement que la courbe pour la vitesse de 1mm/min est décalée vers l'axe des contraintes par rapport à celle obtenue pour la vitesse de 0.5mm/min. Ce qui indique que la déformation du matériau est accélérée par la vitesse de la traverse. Ce joint, on peut dire qu'une partie du comportement mécanique de matériau est un comportement critiqueur. Ainsi, comme monte dans la partie bibliographique, ce matériau présente un comportement visco-élastique au début de la déformation qui dépend simultanément de la contrainte et de la vitesse de chargement.

Afin de comparer les deux courbes nous les avons portées sur le même graphique (figure III.12).



**Figure III.12 :** effet de la vitesse de déformation sur le comportement des PMMA

Dans les tableaux III.2, on présente les différentes caractéristiques mécaniques du matériau déterminées pour ces deux (02) essais.

On peut constater que les déformations correspondantes à la limite élastique, la contrainte maximale et la contrainte de la rupture sont largement affectées par l'effet de la vitesse et diminuent de 5.9% à 4.9% de 12.6% à 9.3% et de 12.6 à 9.3% respectivement par rapport à ces valeurs. Concernant la valeur du module de Young, la vitesse de chargement affecte élastiquement. En effet, le matériau est plus élastique à la faible vitesse 0.5mm/min. Ceci est expliqué par le fait que les chaînes moléculaires du matériau ont le temps de se déformer pour la faible vitesse.

### Caractéristique contraintes de PMMA à la traction biaxiale

Nous avons tiré des courbes les valeurs du module de Young, de la limite élastique ; de la contrainte maximale, de la contrainte à la rupture ainsi que les déformations correspondantes qui sont représentés respectivement dans les tableaux (III.2)

vitesse	V1 (0.5mm /mn)	V2 (1mm/mn)
module de Young (E) en MPa/mm <sup>2</sup>	330,21	474,64
limite élastique (Re)	16.4	19
Déformation limite élastique (Re)	5.9	4.9
contrainte maximale (Rmax)	19.5	20.9
déformation maximale	12.6	9.3
contrainte à la rupture(Rp)	16.8	18.1
déformation à la rupture	12.6	9.3

*Le tableau.III.2 : Caractéristique contraintes de PMMA a la traction biaxiale*

### III.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats expérimentaux des essais de traction uniaxiale. Nous avons alors déterminé les caractéristiques mécaniques ( $R_e$ ,  $R_{max}$ ,  $R_p$ ,  $E$ ,) pour les deux types d'essais et nous avons montré leurs sensibilités à la vitesse de chargement.

Cependant, nous avons constaté que l'allure de la courbe contrainte-déformation n'est pas la même pour les deux types d'essais.

Lors des essais uniaxiaux, l'allure des courbes obtenues montre un comportement fragile du matériau, alors que pour les essais biaxiaux, elle montre un comportement ductile.

En effet, après comparaison des valeurs des caractéristique mécaniques pour les deux types d'essais, nous avons constaté que le module de Young est largement différent dans les deux cas d'essais .ca valeur pour l'essai uniaxiale à la vitesse  $v_1=0.5\text{mm}$  est  $1300\text{Mpa}$  alors que pour l'essai biaxiale est de  $330\text{Mpa}$ .

Le même constat est obtenu par les valeurs des contrainte ( $R_e$ ,  $R_{max}$ ,  $R_p$ ) ce que nous a conduit a conclure que la striction de PMMA utilisé pour les essais biaxiaux n'est pas la même que celle pour le PMMA utilisé en traction uniaxiaux.

# Conclusion générale

A la lumière de ce travail, consacré à étudier le comportement mécanique du PMMA en traction Uniaxiale et biaxiale sur un dispositif de traction biaxiale, ce dernier permet d'appliquer une force de traction biaxiale sur des éprouvettes simple et cruciforme respectivement.

Dans la première partie, nous avons présenté des généralités sur les polymères, et en particulier le polymère de polyméthacrylate de méthyle (PMMA) et des généralités sur les essais mécaniques uniaxiaux et biaxiaux.

Nous avons traité en suite la réponse mécanique du PMMA en traction uniaxiale et étudié sa sensibilité à la vitesse de chargement. Nous avons alors déterminé les caractéristiques mécaniques de ce matériau

Afin d'effectuer des essais de traction biaxiale sur des éprouvettes cruciformes il a été nécessaire d'apporter des modifications sur le dispositif d'essais.

Ce pendant les essais biaxiaux ne se déroulaient pas correctement à cause du blocage d'un bride du dispositif et la présence de défauts (fissures) sur les éprouvettes cruciformes.

Nous avons alors utilisé des résultats bruts déjà obtenues pour les essais de traction biaxiale.

Nous avons alors étudié le comportement de PMMA en traction biaxiale par la même procédure que celle de l'étude en traction uniaxiale.

Après comparaison nous avons déduit que le PMMA utilisé en traction biaxiale n'a pas les mêmes caractéristiques mécaniques que celui utilisé en traction uniaxiale.

De ce fait, comme perspectives on propose de déterminer la structure exacte des deux matériaux par rayons X analyse chimique ou par d'autres techniques de caractérisation.

De même, pour remédier au problème de blocage de la bride, on propose d'utiliser un système de rouleaux pour faciliter son déplacement.

## ***REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES***

- [1] :M. Reyne. Technologie des plastiques, HERMES, Paris, 1998.
- [2] : Nathalie MAYER, définition PMMA-Polyméthacrylat de Méthyle, article FUTURA SCIENCES 2015
- [3] : Nathalie MAYER, définition PMMA-Polyméthacrylat de Méthyle, article FUTURA SCIENCES 2001
- [4] : Bertrand LANGRAND « comportement et modélisation des assemblages ponctuels » B m 7805.2005, technique de l'ingénieur.
- [5] : GOTFRIED W. Ehrenstein, Fabienne Montagne matériau polymérisée : structures. Propriétés et application ; Hermès, science publication, 2000.
- [6] : M. Reyne. Technologie des plastiques, HERMES , paris, 1998
- [7] : livre « voyage au cœur de la matière plastique.
- [8] : WWW.Resenex.fr
- [9] : Masse molaire calculé d'après « Atonnie Weights of the elements 2007 »
- [10] : synthèse fait par Gagio Sas. Informations issues du précis de « Matière plastiques Nathan-septembre 2007
- [11] :[http://www ; inrs. Fr/publication/bdd/fichetox/fiche htm/ ?refINRS=fichetox62](http://www.inrs.fr/publication/bdd/fichetox/fiche htm/?refINRS=fichetox62)
- [12] : méthode de caractérisation mécanique des matériaux (MARC Blétry 2006-2007)
- [13] : H.H. Kausch, R Gensler, C. Grein, C.JG Plummer, P. Scaramuzzino, "Crazing in Semi crystalline thermoplastics", Journal of macromolecules science, part B-Physics,1999
- [14]: R. Itterbeek Résistance des Matériaux - Introduction à la résistance des matériaux
- [15] : Marc Blétry-Méthodes de caractérisation mécanique des matériaux, 2006-2007
- [16] : M. CHERIFI. Karim « Etude, Conception et Fabrication d'un Dispositif d'essai en Biaxial Traction-Torsion », Mémoire de fin d'études ; UMMTO, Algérie, 2015/2016.
- [17] : M. HACHOUR. Kamel « Contribution à l'élaboration d'un Critère de Plasticité pour le PEHD » TH/DOC, UMMTO, Algérie.

- [18]: j. le maître and J.L. chaboche. Mécanique des matériaux solides- 2<sup>ème</sup> édition. Science sup. duno
- [19] : Dominique FRANÇOIS « Essais mécaniques des métaux- Détermination des lois de Comportement » M 120.
- [20] : Patrica Krawczak ; \_Essai plastique renforcé traité plastique et composite”,  
Technique d’ingénieurs, AM5405 année 1997.
- [21] : : Dispositif d’essais biaxiaux Lecompte et al., 2007
- [22] : Dispositif d’essais biaxiaux Kuwabara et al., 1998
- [23] : Système de traction biaxiale, Scholz et al., 2000
- [24] : Montage pour essais biaxiaux Bhatnagar et al., 2007.
- [25] : Dispositif triaxial Welsh et al., 2006.
- [26] : Dispositif de traction biaxiale, Makinde, 1986
- [27] : Dispositif de traction biaxiale, Institut Fraunhofer
- [28] : Bertrand LANGRAND « comportement et modélisation des assemblages ponctuels » Bm7805, 2005, technique de l’ingénieur
- [29] : [http://www.record-net.org/storage/etudes/00-0905-1A/rapport/Rapport\\_record00-0905\\_1A.pdf](http://www.record-net.org/storage/etudes/00-0905-1A/rapport/Rapport_record00-0905_1A.pdf)
- [30] : "Différents types de vieillissement chimique des plastiques." techniques de l’ingénieur (AM3152).
- [31] : "Vieillissement chimique des plastiques " techniques de l’ingénieur (A3151).
- [32] : O.W. Webster, D.Y. Sogah, *Comprehensive polymer science*, (1989).
- [33] :J. Richeton. Modeling and validation of the finite strain response of amorphous polymers for a wide range of temperature and strain rate. Ph. D dissertation, Université Louis Pasteur Strasbourg I. (2005)
- [34] : L. RASSOUL et M. FERHI « étude, conception et fabrication d’un dispositif d’essais en traction biaxiale sur des éprouvette cruciformes » UMMTO, Algérie, 2015/2016.

