

**République Algérienne démocratique et populaire**  
**Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche**  
**scientifique**

**Université de Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou**

**Faculté du Génie de la Construction**  
**Département Génie mécanique**



## **Mémoire De Fin D'études**

**EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME MASTER EN**  
**GENIE MECANIQUE**

**Spécialité : FABRICATIION MECANIQUE ET PRODUCTIQU**

### **Thème**

**Conception et réalisation d'un appareil**  
**d'essai de gonflement sur les élastomères**

**Proposé et dirigé par :**

**Mr. HACHOUR Kamel**

**Réalisé par :**

**CHABANE CHAUCHE Karim**

**BENFEDDA Walid**

**Promotion : 2022/2023**

## **REMERCIEMENTS**

*Tout d'abord, nous devons remercier « ALLAH » le tout puissant de nous avoir donné tout le courage et la santé pour achever ce travail.*

*Nous remercions particulièrement notre promoteur M. HACHOUR qui nous a encadré pendant la période de la réalisation de ce mémoire.*

*Nous souhaitons exprimer notre gratitude envers les membres du jury qui ont eu la gentillesse d'évaluer et d'approuver notre travail.*

*Je tiens enfin à exprimer ma reconnaissance envers ma famille, ma belle-famille, mes amis, pour leur soutien moral et leur aide précieuse, ainsi qu'à tous ceux qui m'ont soutenu et assisté tout au long de ce projet.*

## ***Dédicaces***

*Ce modeste travail est dédié à :*

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

*A mes très chers parents que dieu les  
protège.*

*A ma très chère sœur Kenza.*

*A mes tantes et leurs filles et fils.*

*A tout mes amis Oussama, idir, samir, belaid,  
assoudas, massi.*

**CHABANE CHAUCHE Karim**



## **Dédicaces**

*Je souhaite dédier ce travail à mes chers parents en premier lieu, pour tous les sacrifices qu'ils ont faits, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études.*

*Je souhaite également remercier mes sœurs et mon frère pour leurs encouragements constants et leur soutien moral.*

*A mes chers amis qui ont toujours cru en moi, pour leurs appuis et leurs encouragements,*

*Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit de votre soutien infaillible,*

*Merci d'être toujours là pour moi.*

**BENFEDDA Walid**

Remerciements.....	<b>i</b>
Dédicace.....	<b>ii</b>
Sommaire.....	<b>iv</b>
Table des illustrations figures.....	<b>vii</b>
Liste des symboles.....	<b>viii</b>
Introduction générale.....	<b>1</b>

## ***Chapitre I : Généralités sur les polymères***

<b>I.1 Introduction.....</b>	<b>3</b>
I.2. Définition.....	3
I.3. Molécules et macromolécules.....	4
I.3.1. Définition.....	4
I.3.1.1. Molécule.....	4
I.3.1.2. Monomères.....	5
I.3.1.3. Polymères.....	5
I.4. Elaboration des polymères.....	5
I.4.1. La polymérisation par étape(polycondensation).....	5
I.4.2. La polymérisation en chaîne(polyaddition).....	6
I.4.3. Degré de polymérisation et masse moléculaire.....	7
I.5. Classifications des polymères.....	7
I.5.1. Selon leurs origines.....	8
I.5.1.1. Polymères naturels.....	8
I.5.1.2. Polymères artificiels : (dérivée des polymères naturels).....	8
I.5.1.3. Polymères synthétiques.....	8
I.5.2. Selon leur nature chimique.....	8
I.5.2.1. Polymères minéraux.....	8
I.5.2.2. Polymères organiques.....	9
I.5.2.3. Polymères mixtes.....	9
I.5.3. Selon leur échelle moléculaire.....	9
I.5.3.1 Homopolymères.....	9
I.5.3.2. Copolymères.....	10
I.5.4. Selon leur structures.....	11
I.5.4.1. Polymère amorphe.....	11
I.5.4.2. Polymère semi-cristallin.....	12
I.5.5. Classification Selon leur comportement thermique.....	15

I.5.5.1. Les thermoplastiques .....	15
I.5.5.2. Les thermodurcissables .....	16
I.5.5.3. Les élastomères.....	16
I.5.5.3.1. Propriétés mécaniques des élastomères .....	16
I.5.5.4. Les élastomères thermoplastiques .....	20
I.6. Selon leur domaine d'application .....	21
I.6.1. Les polymères de grande diffusion .....	21
I.6.2. Les polymères techniques .....	21
I.6.3. Selon leur structure des chaînes : (dimensionnalité) .....	21
I.6.3.1. Les polymères linéaires ou monodimensionnels.....	21
I.6.3.2. Les polymères bidimensionnels .....	22
I.6.3.3. Polymères tridimensionnels .....	22
I.7. Utilisation des polymères .....	23
I.8. Les caractéristiques des polymères .....	25
I.8.1. Propriétés thermiques .....	25
I.8.2. Propriétés mécaniques.....	25
I.8.3. Propriétés physiques.....	26
I.8.4. Propriétés optiques .....	26
I.8.5. Propriétés chimiques .....	26
I.9. Transition vitreuse .....	27
I.10. Le comportement mécanique des polymères .....	29
I.10.1 Introduction .....	29
I.10.2 Présentation générale du comportement mécanique des polymères.....	29
I.10.3. Comportement Contrainte-Déformation .....	31
I.10.4. Facteurs influencent sur les propriétés mécaniques des polymères .....	33
I.10.4.1. La mise en œuvre .....	33
I.10.4.2 Le traitement thermique .....	34

## ***Chapitre II : Généralités sur les essais mécaniques***

II.1 Introduction .....	35
II.2. Les essais mécaniques uniaxiaux .....	35
II.2.1.1. Description générale d'une machine de traction .....	36
II.2.1.2. L'éprouvette .....	36
II.2.1.3. Exploitations de l'essai.....	38

II.2.1.3.a- Interprétation .....	38
II.2.1.3.b. Définitions des paramètres .....	39
II.2.2. Essai de compression simple .....	41
II.2.3. Essai de flexion .....	43
II.2.4. Essai de cisaillement .....	44
II.2.5. Essai de torsion.....	44
II.2.6. Essai de résilience(CHOCS) .....	45
II.2.7. Essai de fatigue.....	45
II.2.8. Essai de dureté.....	46
II.3. Les essais mécaniques multiaxiaux .....	47
II.3.1. Traction biaxiale.....	47
II.3.3. Essai de traction-cisaillement.....	50
II.3.3.1. Essai Arcan.....	50
II.3.3.1.2. Principe de l'essai Arcan.....	50
II.3.3.1.3. Objectif.....	50
II.4. Conclusion.....	51

**Chapitre III : conception et réalisation d'un dispositif d'essai de gonflement sur les élastomères**

III.1 Introduction.....	52
III.2. But de l'appareil.....	52
III.2.1. Cahier de charge .....	52
III.2.2. Diagramme « bête à cornes ».....	52
III.2.3. Diagramme « pieuvre ».....	53
III.2.3.1. Diagramme de « pieuvre » pour le besoin .....	53
III.2.3.2. Contraintes et fonctions principales de besoin.....	54
III.3. Choix de l'appareil.....	54
III.3.1. Les différentes sollicitations possibles.....	54
III.4. Fonction de l'appareil .....	55
III.5. Les solutions proposées .....	55
III.5.1. La première solution .....	55
III.5.1.1. Système de de gonflement sur des élastomères plans .....	55
III.5.2. La deuxième solution.....	56
III.5.2.1. Système de gonflement sur des élastomères cylindriques .....	56
III.6. Dispositif à réaliser .....	56

III.6.1. Contraintes techniques .....	56
III.6.2. Vue du dispositif à réaliser .....	56
III.6.3. Description du dispositif .....	57
III .6.3.1. Principaux éléments constitutifs .....	57
III.6.3.2. Principe de fonctionnement .....	57
III.6.3.3. Description des principaux éléments du dispositif .....	58
a) Disque .....	58
b) Couronne .....	58
c) Support .....	59
d) Support verticale.....	59
e) Glissière cylindrique .....	59
f) Tige de maintien .....	60
g) plaque supérieure .....	60
h) plaque de fixation .....	61
i) Réglette.....	61
III.7. Dimensionnement du dispositif .....	62
III.7.1. Choix des matériaux .....	62
III.8. Simulation numérique du dispositif par le logiciel SolidWorks.....	62
III.9. Fabrication du dispositif de gonflement .....	65
1)Disque.....	65
2)Couronne .....	66
3)Support verticale .....	67
5)Tige de guidage .....	67
6)Plaque supérieure .....	68
7)Plaque de fixation.....	68
8)Glissière cylindrique .....	69
9)Support .....	70
III.10. Vue réel de dispositif à réaliser.....	70
III.10. Conclusion .....	71
<b>Conclusion générale</b> .....	<b>72</b>



## Table des illustrations figures

### Chapitre I : Généralités sur les polymères

Figure I .1 : <i>structure d'un polymère semi cristallin</i> .....	4
Figure I .2 : <i>polymérisation d'un polyéthylène</i> .....	6
Figure I. 3 : <i>structure d'un polymère amorphe</i> .....	11
Figure I .4 : <i>structure d'un polymère semi cristallin</i> .....	12
Figure I .5 : <i>polymère linéaire</i> .....	13
Figure I .6 : <i>polymère ramifié</i> .....	14
Figure I .7 : <i>polymère a liaisons transversale</i> .....	14
Figure I .8 : <i>polymère réticulé</i> .....	15
Figure I .9 : <i>structure des thermoplastiques</i> .....	15
Figure I .10 : <i>polymérisation de thermodurcissable</i> .....	16
Figure I .11 : <i>Variation du module d'élasticité des polymères en fonction de la température (d'après Brantley, Eliades)</i> .....	17
Figure I .12 : <i>Charge et décharge d'un matériau viscoélastique</i> .....	19
Figure I .13 : <i>Courbe charge/allongement (d'après Ebailon, Dorlot)]</i> .....	20
Figure I.14 : <i>polymère monodimensionnels</i> .....	22
Figure I .15 : <i>polymère bidimensionnels</i> .....	22
Figure I .16 : <i>polymère tridimensionnels</i> .....	23
Figure I.17: <i>les différentes zones de transition</i> .....	29
Figure I.18 : <i>comportement typique des polymères à faible déformation</i> .....	31
Figure I.19 : <i>Comportement Contrainte –Déformation des polymères</i> .....	32
Figure I.20 : <i>Courbe Contrainte -Déformation d'un polymère plastique</i> .....	32

### Chapitre II : Généralités sur les essais mécaniques *Erreur ! Signet non défini.*

Figure II.1 : <i>Description d'une machine de traction</i> .....	36
Figure II.2 : <i>Réponse mécanique charge-allongement d'un acier</i> .....	39
Figure. II.3 : <i>Déformation de l'éprouvette lors de l'essai</i> .....	41
Figure II.4 : <i>essai de compression sur éprouvette cylindrique</i> .....	42
Figure II.5 : <i>essai de compression sur éprouvette cubique</i> .....	42
Figure II.6: <i>Essai de flexion</i> .....	43
Figure II.7: <i>essai de cisaillement</i> .....	44

<i>Figure II.8 : essai de torsion</i> .....	45
<i>Figure II.9: Essai de résilience Charpy</i> .....	45
<i>Figure II.10: machine d'essai de fatigue</i> .....	46
<i>Figure II.11 : essai de traction biaxiale</i> .....	48
<i>Figure II.12 : exemple d'éprouvette cruciforme</i> .....	49
<i>Figure II.13: essai de traction-torsion</i> .....	49
<i>Figure II.14: dispositif de l'essai arcan</i> .....	50

### **Chapitre III : conception et réalisation d'un dispositif d'essai de gonflement sur les élastomères**

<i>Figure III.1 : diagramme « bête à cornes »</i> .....	53
<i>Figure III.2 : diagramme de pieuvre</i> .....	53
<i>Figure III.3 : une membrane gonflée au centre</i> .....	54
<i>Figure. III.4 : Schéma représente la fonction de l'appareil</i> .....	55
<i>Figure III.5 : Schéma de principe de la première solution</i> .....	55
<i>Figure III.6 : Schéma de principe de la deuxième solution</i> .....	56
<i>Figure. III.7 : Schéma du dispositif a réalisé</i> .....	56
<i>Figure III.8 : disque</i> .....	58
<i>Figure III.9 : Couronne</i> .....	58
<i>Figure III.10 : Support</i> .....	59
<i>Figure III.11 : Support verticale</i> .....	59
<i>Figure III.12 : glissière porte tige</i> .....	60
<i>Figure III.13 : tige de guidage</i> .....	60
<i>Figure III.14 : Plaque supérieure</i> .....	61
<i>Figure III.15 : plaque de fixation</i> .....	61
<i>Figure III.16 : réglette</i> .....	62
<i>Figure III.17 : Déplacements imposés sur le support du dispositif</i> .....	63
<i>Figure III.18 : chargements imposés sur l'éprouvette</i> .....	63
<i>Figure III.19 : Maillage du dispositif par SolidWorks simulation</i> .....	64
<i>Figure III.20 : Distribution des contraintes dans la membrane</i> .....	64
<i>Figure III.21 : Distribution des déformations dans la membrane</i> .....	65
<i>Figure III.22 : Opération de dressage</i> .....	66
<i>Figure III.23 : opération de dressage</i> .....	66
<i>Figure III.24 : opération de perçage avec l'utilisation d'un plateau diviseur</i> .....	66

<i>Figure III.25:Opèration de surfaçage</i> .....	<b>67</b>
<i>Figure III.26 opoèration de perçage</i> .....	<b>67</b>
<i>Figure III.27 : opération de chariotage</i> .....	<b>68</b>
<i>Figure III.28 : opération de perçage</i> .....	<b>68</b>
<i>Figure III.29 : plaque supérieur</i> .....	<b>68</b>
<i>Figure III.30 plaque de fixation:</i> .....	<b>69</b>
<i>Figure III.31 : glissière cylindrique</i> .....	<b>69</b>
<i>Figure III.32 : support</i> .....	<b>70</b>
<i>Figure III.33 :Appareil réalisé</i> .....	<b>70</b>

## Liste des symboles

**T<sub>g</sub>** : La température de transition vitreuse

**T<sub>f</sub>** : la température de fusion

**L** : Longueur totale .....(mm)

**L<sub>0</sub>** : Longueur entre repère ..... (mm)

**F** : La force de traction ..... (N)

**A%** : l'allongement à la rupture ..... (%)

**ε%** : Allongement relatif .....(%)

**Re** : Résistance à la traction ..... (MPa)

**σ** : Résistance élastique à la traction ..... (MPa)

**Rm** : Résistance à la rupture ..... (MPa)

**Z%** : Coefficient de striction ..... (%)

**Az** : Allongement localisé de striction ..... (mm)

**Ar** : Allongement jusqu'au maximum de la charge ..... (mm)

**Lu** : Longueur de l'éprouvette après rupture ..... (mm)

**Su** : Diamètre après rupture ..... (mm)

**E** : Module d'Young..... (MPa)

**S<sub>0</sub>** : Dimension de l'éprouvette initiale ..... (mm)

**Sr** : Section de la vis et la goupille ..... (mm<sup>2</sup>)

# **Introduction générale**

## Introduction générale

L'occupation d'ingénieur remonte aux premières réalisations humaines de l'Antiquité et se poursuit à travers le Moyen Âge. Les premiers érudits, inventeurs et architectes étaient tous considérés comme les premiers ingénieurs que l'histoire ait connus. Parmi les illustres ingénieurs mécaniciens de l'histoire, nous pouvons mentionner des figures telles qu'Archimède, renommé pour ses contributions à la physique appliquée. De même, Gutenberg et Léonard de Vinci ont laissé leur empreinte en mettant au point des systèmes mécaniques qui ont été fabriqués par la suite et qui suscitent encore aujourd'hui l'intérêt.

Le concepteur mécanicien est décrit comme un professionnel chargé de résoudre des problèmes de nature mécanique liés à la conception, à la réalisation et à la mise en œuvre de produits ou de systèmes mécaniques.

Les polymères sont au cœur de l'évolution actuelle, occupant une place essentielle dans notre vie quotidienne. Ils sont omniprésents dans quasiment tous les domaines, que ce soit l'industrie automobile, l'électroménager, les télécommunications, et bien d'autres. Au cours des deux dernières décennies, le domaine des plastiques, des composites et de leurs dérivés a connu des avancées considérables, parvenant de plus en plus fréquemment à remplacer les métaux en raison de leur rapport qualité-prix favorable.

Les concepteurs n'interrogent plus sur le choix du métal, mais se posent désormais la question de la sélection du matériau, une évolution encouragée par les avancées constantes de la puissance de calcul des ordinateurs et les progrès de la Conception et Fabrication Assistée par Ordinateur (CFAO), qui leur permettent d'examiner une multitude de solutions.

Ce présent travail est consacré à la conception d'un dispositif d'essai de gonflement et sa fabrication. Ce dernier sera destiné à réaliser des essais de gonflement sur des membranes en élastomères par une pression d'air comprimé.

Dans le premier chapitre, nous avons abordé les bases relatives aux polymères, comprenant une discussion sur les diverses catégories de ces matériaux, leurs caractéristiques, et leurs réactions.

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté et mis en lumière divers essais mécaniques, ainsi que le rôle de chaque essai dans l'évaluation des propriétés d'un matériau donné.

Dans le troisième chapitre, la conception du dispositif de gonflement a été réalisée par le logiciel Solidworks, et on a présenté les différents composants constituant ce dispositif. De même, la

fabrication de ce dispositif effectuée dans le hall de technologie est développée pour chaque composant qui sera destiné aux élastomères en général.

On termine notre travail par une conclusion générale.

# ***Chapitre I : Généralités sur les polymères***

**I.1. Introduction**

Ce n'est que dans les années 1920 que la notion de macromolécule a commencé à être largement acceptée par la communauté scientifique. Hermann Staudinger, professeur de chimie à l'école polytechnique fédérale de Zurich entre 1912 et 1926, ensuite professeur à Fribourg-en-Brisgau et notamment Prix Nobel de chimie en 1953, en a été l'un des principaux artisans [01,02].

Il a démontré que les matières polymères comme la cellulose, la soie et le caoutchouc étaient formées de longues chaînes moléculaires, qualifiées des macromolécules. Cette idée a ouvert la voie à une recherche plus systématique, tant chimique que physique, sur la synthèse, la structure et le comportement des polymères solides [03].

**I.2. Définition**

Les polymères sont des substances organiques de masses moléculaires élevées (macromolécules), obtenus par l'association d'unités structurales répétitives. Chaque unité pouvant être considérée comme dérivant d'un composé spécifique appelé monomère.

(L'unité récurrente n'est pas le monomère car il y a une réaction chimique)

Les polymères - du grec 'poly' (beaucoup) et 'meros' (parties) - sont un groupe de produits chimiques qui partagent un même principe de formation. Ils consistent en de longues chaînes de molécules appelées macromolécule, qui comportent un grand nombre d'unités de répétition pro-métabolique.

Les macromolécules qui constituent les polymères sont obtenues par adjonction de petites molécules appelées monomères. Lors d'une réaction de polymérisation, les monomères forment en général de longues chaînes qui peuvent se replier sur elles-mêmes et /ou s'enchevêtrer avec les macromolécules voisines (Figure I.1). [4]

Les longues chaînes de polymères peuvent présenter des domaines cristallins et /ou amorphes selon les cas.

Le plus souvent synthétiques, quelquefois naturels, ils doivent cet essor à leur large gamme de caractéristiques, durs, mous ou élastiques, transparents ou opaques, isolants et quelquefois conducteurs, plus ou moins résistants aux conditions agressives de leur usage, toujours légers.

Il existe différents types de polymères : les polymères naturels (par exemple la laine, la soie, le bois, le coton), les polymères semi-synthétiques (des polymères naturels chimiquement modifiés, comme par exemple les matières plastiques à base de caséine, les plastiques à base de cellulose) et les polymères synthétiques.

Aujourd'hui, les monomères appartenant majoritairement au groupe des composés organiques fabriqués en grand volume sont habituellement issus d'intermédiaires pétrochimiques (pétrole brut ou gaz), exception faite des matériaux cellulosiques produits à partir de fibres de coton, de fibres de bois.

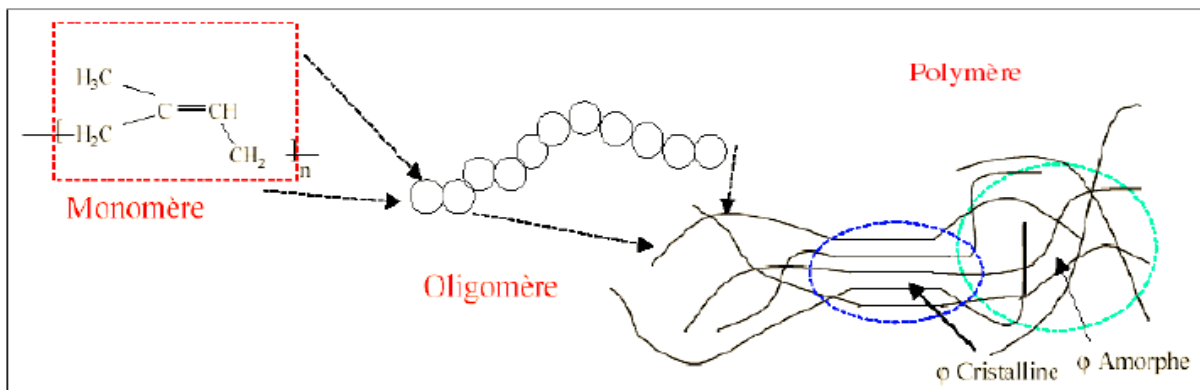


Figure I.1 : structure d'un polymère semi cristallin

### I.3. Molécules et macromolécules

#### I.3.1. Définition

##### I.3.1.1. Molécule

Une molécule est l'unité la plus petite qu'il est possible d'obtenir en divisant un corps pur en fractions de plus en plus petites, tout en conservant les propriétés chimiques et physiques du corps. Une molécule peut renfermer un atome (H, par ex), deux atomes (O<sub>2</sub>), plusieurs atomes (alcool éthylique de formule CH<sub>3</sub>CH<sub>2</sub>OH, par ex.) et même des millions d'atomes (ADN, par ex.) ...

Les plastiques, ou "polymères", sont élaborés par synthèse chimique (construits chimiquement) à partir de molécules de base, appelées monomères [5]

### **I.3.1.2. Monomères**

Ce sont les unités chimiques de base, ou molécules, des métiers plastiques. Ils sont construits autour des atomes de carbone (C), et contiennent des atomes d'hydrogène (H), d'oxygène(O), d'azote(N), chlore(Cl), soufre(S), fluor(F)... [5]

### **I.3.1.3. Polymères**

Les plastiques désignent une famille de produits constitués de polymères (ou macromolécules) caractérisées par la répétition, un très grand nombre de fois, du même groupe d'atomes appelé motif constitutif.

Sous l'action de la pression, de la chaleur et d'un catalyseur, les molécules, ou monomères, se regroupent entre elles pour former de longues chaînes appelées polymères, ou macromolécules. Une macromolécule peut contenir plusieurs centaines à plusieurs millions de monomères. [5]

## **I.4. Elaboration des polymères**

Les polymères sont parmi les produits chimiques ayant le plus d'applications industrielles. Les polymères ont une masse molaire très importante.

Le monomère est le nom donné à la petite molécule à partir de laquelle est formée la macromolécule. La réaction est une polymérisation.

On a divisé en deux catégories l'ensemble des polymères :

- La polymérisation par étape ou polycondensation.
- La polymérisation en chaîne ou polyaddition.

### **I.4.1. La polymérisation par étape(polycondensation)**

La formation de macromolécules par la polycondensation, également appelée "polymérisation par étapes", implique des réactions successives de condensation entre les fonctions chimiques des monomères di- ou polyfonctionnels. Ces réactions entraînent généralement la libération de petites molécules telles que l'eau, en fonction des polymères utilisés. Cette technique est couramment employée pour la production d'adhésifs, de revêtements, de plastiques techniques, de fibres, de films et de nombreux polymères à hautes performances. Au cours de la réaction de polycondensation, les monomères volatils sont

éliminés et les pré-polymères de poids moléculaire inférieur se lient pour former des polymères de poids moléculaire plus élevé. [6]

#### I.4.2. La polymérisation en chaîne (polyaddition)

Dans la polymérisation en chaîne ; les monomères s'associent sans réaction d'élimination simultanée, la réaction par addition ne génère que des polymères de longueurs spécifiques sans aucun sous-produit, c'est le procédé le plus utilisé dans l'industrie : le polyéthylène (PE), le polypropylène (PP), les polyesters (PS), et les chlorures de polyvinyle (PVC) ; sont des polymères obtenus par polyaddition. Comme toute réaction en chaîne, cette polymérisation comporte les étapes suivantes :

- L'amorçage (formation des centres actifs à partir des monomères)
- La propagation (croissance des chaînes de polymères par addition successive)
- La terminaison (destruction du centre actif et interruption de la croissance des chaînes).

La polymérisation peut être radicalaire, cationique ou anionique selon la nature de l'espèce active. Dans les cas des polymérisations radicalaires les plus courants, l'amorçage s'effectue sous l'action de la chaleur, par irradiation ou par des molécules spécifiques. Les espèces actives sont des radicaux libres. Le polymère ainsi obtenu est dit tactique : il a une structure totalement désorganisée ou amorphe.

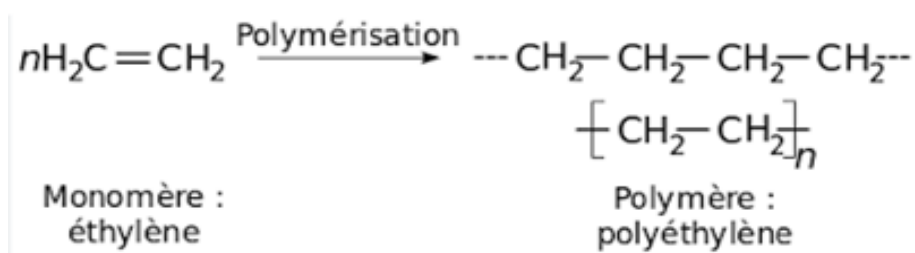


Figure I .2 : polymérisation d'un polyéthylène

### I.4.3. Degré de polymérisation et masse moléculaire

Un polymère peut être caractérisé par son degré de polymérisation ou sa masse moléculaire. Le degré de polymérisation est le nombre 'n' de molécules de monomères formant la macromolécule de polymère. Par exemple dans le cas de polythène :  $[\text{CH}_2\text{-CH}_2]$  n fois, ce nombre 'n' peut varier entre 500 et 50 000 unités. Il faut remarquer qu'en ce qui concerne la macromolécule ou chaîne, les liaisons intramoléculaires sont covalentes, et donc très résistantes et très rigides.

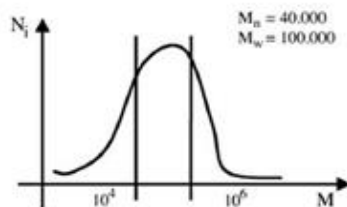
Lorsque ce degré de polymérisation (DP) est inférieur à 30, on parle d'oligomère et lorsqu'il est supérieur à 30, c'est un polymère.

La masse moléculaire M d'un matériau polymère est calculée de deux façons :

**M<sub>w</sub>** : est la masse moléculaire moyenne de toutes les macromolécules présentes dans le matériau.

**M<sub>n</sub>** : est la masse moléculaire majoritaire dans le mélange.

**N<sub>i</sub>** : est le nombre de chaînes et M la masse moléculaire



$$M_n = \frac{\sum N_i M_i}{\sum N_i}$$

$$M_w = \frac{\sum N_i M_i^2}{\sum N_i M_i}$$

(N<sub>i</sub> est le nombre de chaînes et M la masse moléculaire)

Lorsque M<sub>n</sub> est égale à M<sub>w</sub>, toutes les chaînes macromoléculaires du polymère ont la même masse moléculaire et le même degré de polymérisation.

Un copolymère résulte de l'union, régulière ou non de plusieurs motifs monomères différentes.

### I.5. Classifications des polymères

Il y a différentes façons de regrouper les polymères et de les classer :

**I.5.1. Selon leurs origines [4] ; [5]**

On peut diviser les polymères en trois familles distinctes : les polymères naturels, les polymères synthétiques et les polymères composites provenant de mélanges des polymères des deux autres familles.

**I.5.1.1. Polymères naturels**

Issues des règnes digitale, animale ou minérale leur économique est le rôle qu'ils jouent dans les mécanismes vitaux leur assure une place de premier choix depuis une trentaine d'années. [07]

Exemples :

- ❖ Les polysaccharides (cellulose, amidon...)
- ❖ Les protéines (la laine, la soie...)
- ❖ Le caoutchouc...

**I.5.1.2. Polymères artificiels : (dérivée des polymères naturels)**

Sont obtenue par modification chimique de polymères naturels de façon à transformer certaines de leurs propriétés.

Exemples :

- ❖ Les esters cellulosiques (nitrocellulose, acétate de cellulose...etc.).
- ❖ Ébonite (caoutchouc fortement réticulé par le soufre). [08,09]

**I.5.1.3. Polymères synthétiques**

Ils ont actuellement une importance pratique plus grande que les précédentes. Ils sont synthétisés en vue d'application variées.

**I.5.2. Selon leur nature chimique****I.5.2.1. Polymères minéraux**

Ils sont constitués soit des chaînes renferment un seul corps simple : diamant, graphites phosphore, soufre...ou de chaînes renferment plusieurs hétéroatomes : (silicates, acides polyphosphoriques, chlorure de polyphosphonitrile). [10]

### I.5.2.2. Polymères organiques

C'est le type le plus riche comme : les polydiènes, les polyacryliques, les polyamides, les polyvinyliques. [11]

### I.5.2.3. Polymères mixtes

Doués de propriétés intéressantes dont une bonne résistance thermique comme les silicones. [12]

## I.5.3. Selon leur échelle moléculaire

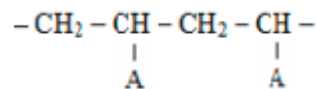
La macromolécule du polymère peut être constituée d'une seule sorte de motif ou de motifs différents.

### I.5.3.1 Homopolymères

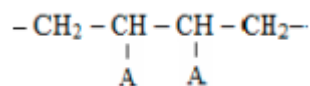
Les homopolymères sont des polymères qui ne possèdent qu'une seule unité. Parmi les homopolymères, on peut citer le polyéthylène. Il existe, au sein des homopolymères, différentes familles.

Les réactions de polymérisation qui conduisent à de telles structures procèdent par addition, sur une molécule monomère, d'un centre actif porté par la chaîne polymère en cours de croissance. Il en résulte deux structures possibles pour le nouveau centre actif formé, ce qui correspond à quatre isomères différentes pour la séquence formée de deux motifs successifs.

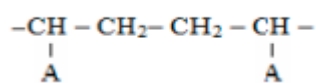
- Enchaînement tête à queue :



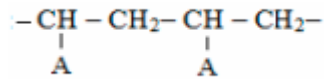
- Enchaînement queue à queue :



- Enchaînement tête à tête :



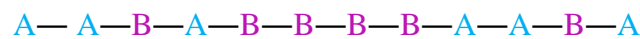
- Enchaînement queue a tête :



### I.5.3.2. Copolymères

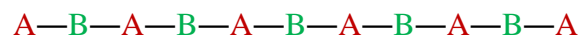
Les copolymères sont des polymères qui possèdent plusieurs unités. Comme pour les homopolymères, les copolymères peuvent se classer dans différentes familles.

#### Les copolymères statistiques



Pour lesquels, on obtient une répartition aléatoire des motifs A et B le long de la chaîne.

#### Les copolymères alternés



Qui présentent une alternance régulière des motifs A et B.

#### Les copolymères à bloc ou séquences

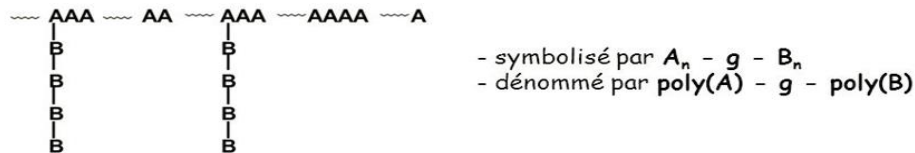
Correspondant à l'alternance de blocs de polymère (ou séquence) a motif A et de polymère a motif B.



### Les polymères greffés (PS choc)

Correspondant à la fixation de greffons de polymère a motif B sur un tronc de polymère a un motif A.

- copolymères séquencés greffés (ou « branchés »)



#### I.5.4. Selon leur structure

Pour les polymères, l'agencement des molécules est un facteur prépondérant quant au comportement du matériau. Cette partie traite donc des différentes façons de disposer les molécules afin d'obtenir des polymères de propriétés et caractéristiques données. [13] ; [14]

D'un point de vue physique, les polymères peuvent être classés en plusieurs catégories. [13] ; [14]

##### I.5.4.1. Polymère amorphe

Les polymères des masses molaires élevées, sont souvent des solides amorphes. On ne détecte aucun ordre à l'aide des rayons X, on observe un (halo amorphe).

Les thermoplastiques amorphes sont des solides au-dessous d'une certaine température que l'on désignera par  $T_g$ . Dans un intervalle de température d'une dizaine de degrés autour de  $T_g$  leur module de rigidité subit une diminution importante. Ils se comportent alors comme des liquides très visqueux. Ce changement de comportement est appelé (transition vitreuse), elle se traduit par une variation rapide de nombreuses propriétés des matériaux (capacité calorifique ; module d'élasticité ; viscosité...etc.).

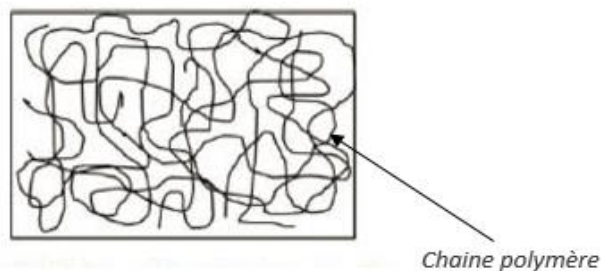


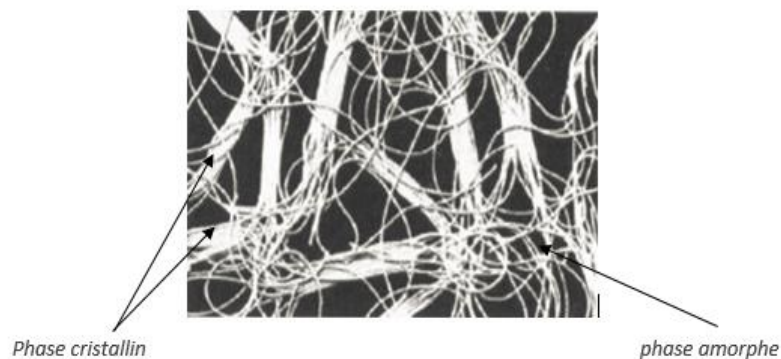
Figure I. 3 : structure d'un polymère amorphe

Les thermodurcissables sont généralement amorphes ; par exemple les résines époxydes.

Une autre catégorie d'amorphes est constituée par les élastomères. Ce sont des caoutchoucs tels que le poly isoprène (caoutchouc naturel et synthétique) et le polybutadiène. Lorsqu'on tire sur un élastomère, les molécules se déplient et s'allongent, le rôle des nœuds est de les empêcher de glisser et de les ramener dans leur position initiale lorsqu'on relâche la tension.

#### I.5.4.2. Polymère semi-cristallin

Les matières semi-cristallines ont une structure moléculaire hautement ordonnée, avec des points de fusion très précis. Elles ne ramollissent pas à mesure que la température augmente, mais restent dures jusqu'à ce qu'une certaine quantité de chaleur soit absorbée, puis se transforment rapidement en un liquide à basse résistance et de rigidité au-delà de leur température de transition vitreuse(Tg).



**Figure I .4 :** structure d'un polymère semi cristallin

$$X = \frac{\text{Nombre de monomeres dans la phase cristalline}}{\text{Nombre total de monomeres}}$$

#### I.5.4.3. Structure moléculaire

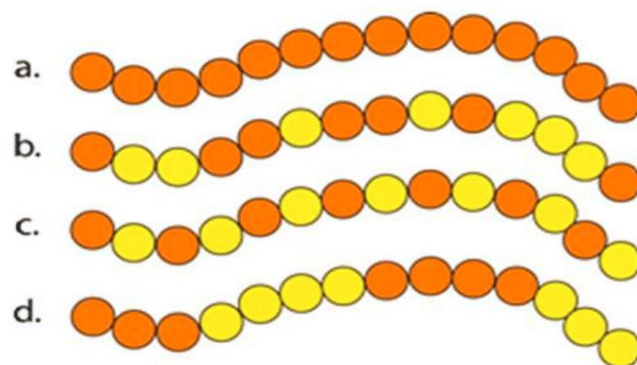
Les caractéristiques physiques d'un polymère sont liées non seulement à sa masse et à sa forme moléculaire, mais aussi à la structure des chaînes moléculaires. Les procédés modernes utilisées pour la synthèse des polymères permettent de leur conférer des structures variées.

Selon le type d'enchaînement des unités répétitives, les polymères peuvent être classés en :

### a) Polymères linéaires

Les polymères linéaires sont constitués de grandes chaînes de monomères reliés entre eux par des liaisons covalentes. Ces macromolécules sont liées entre elles par des liaisons secondaires qui assurent la stabilité du polymère. Ces liaisons secondaires sont des liaisons ou ponts hydrogène ou des liaisons de Van der Waals. Lorsque ces liaisons existent, le matériau devient rigide et présente un comportement de solide. Si la température s'élève, l'agitation moléculaire qui en résulte va rompre progressivement ces liaisons secondaires. Le matériau va pouvoir s'écouler sous son propre poids : il présente alors le comportement d'un liquide visqueux.

Les propriétés mécaniques des copolymères varient en fonction du type et de la disposition des monomères. Les rotations de la chaîne sont facilitées ou au contraire rendues plus difficiles en fonction de la nature, de la disposition et de l'encombrement de chacun des monomères.



*a : homopolymère*

*b : copolymère statistique*

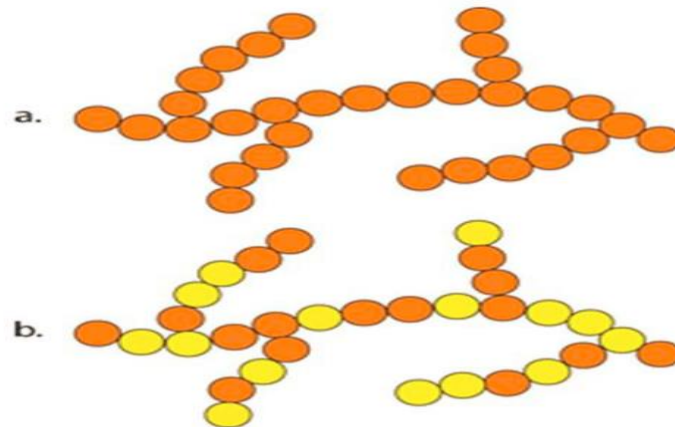
*c : copolymère alterné*

*d : copolymère séquencé*

**Figure I.5 :** polymère linéaire

### B) Polymères ramifiés

Des chaînes homopolymériques ou copolymériques peuvent se greffer sur d'autres chaînes au cours de la polymérisation. Au-dessus de la température de transition vitreuse, ces matériaux présenteront un comportement visqueux plus marqué que les polymères linéaires.



a : Homopolymère ramifié

b : copolymère ramifié

**Figure I .6 :** polymère ramifié**c) Polymères à liaisons transversales**

Dans les polymères à liaisons transversales, des liaisons covalentes joignent en divers points des chaînes linéaires adjacentes (Figure I .7). Ces liaisons transversales apparaissent lors de la synthèse d'un polymère ou à la suite d'une réaction chimique irréversible, de nombreux matériaux élastique en caoutchouc comportent des liaisons transversales.

**Figure I .7 :** polymère a liaisons transversale**d) polymères réticulés**

Les monomères trifonctionnels, à trois liaisons covalentes actives, forment des réseaux tridimensionnels (figure I .8) appelés polymères réticulés. Par ailleurs, les polymères comportant de très nombreuses liaisons transversales sont aussi des polymères réticulés.

La réticulation correspond à la formation de liaisons chimiques suivant les différentes directions de l'espace au cours d'une polymérisation, d'une polycondensation ou d'une polyaddition.

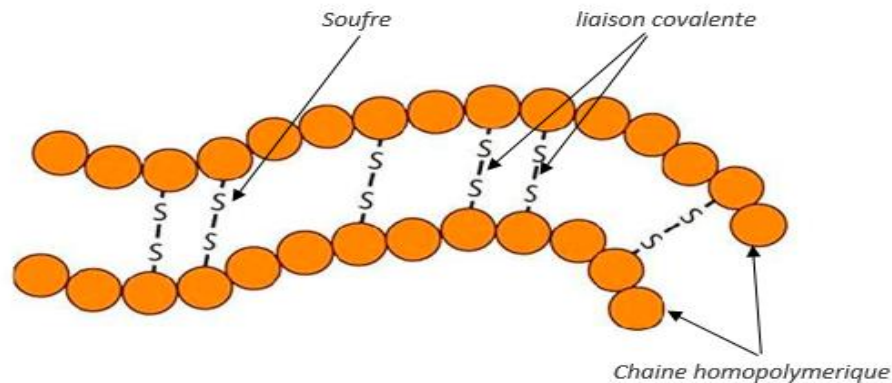


Figure I.8 : polymère réticulé

### I.5.5. Classification Selon leur comportement thermique :

On distingue trois grandes classes :

- \*les thermoplastique
- \*les thermodurcissable
- \*les élastomères

#### I.5.5.1. Les thermoplastiques

Le thermoplastique est un polymère linéaire ou ramifié pouvant être ramolli par chauffage et durci par refroidissement dans un intervalle de température spécifique. Ces polymères peuvent cristalliser thermoplastes amorphes ou thermoplastes semi-cristallins comme le polyéthylène (PE), le poly (chlorure de vinyle) (PVC) ou le polystyrène (PS) sont mis en forme par diverses techniques comme l'injection, l'injection-soufflage, l'extrusion ou le rotomoulage (Voir Figure I.9). Dans la majorité des cas, le polymère ayant la forme désirée récupère son état partiellement cristallin ou amorphe après refroidissement. [01,10].

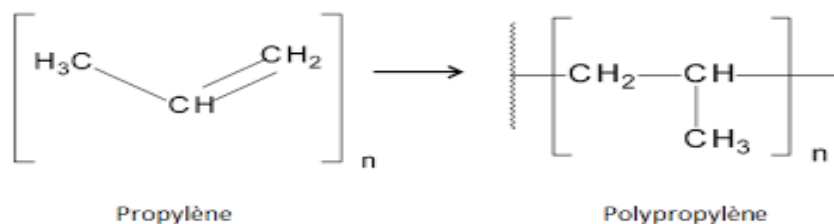


Figure I.9 : structure des thermoplastiques

### I.5.5.2. Les thermodurcissables

Un produit, sous forme de poudre solide pour moulage ou de résine liquide, peut subir une transformation irréversible par polymérisation pour former un réseau tridimensionnel infusible et insoluble appelé thermo-durci, également connu sous le nom de thermodurcissable. [15]

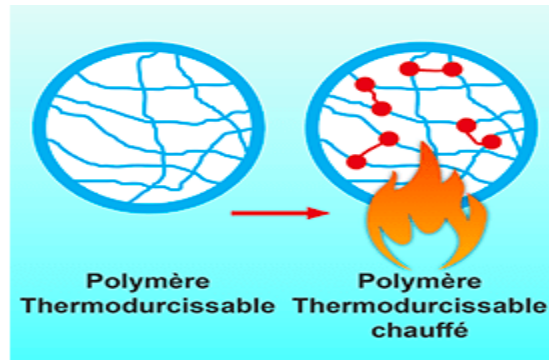


Figure I .10 : polymérisation de thermodurcissable

### I.5.5.3. Les élastomères

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

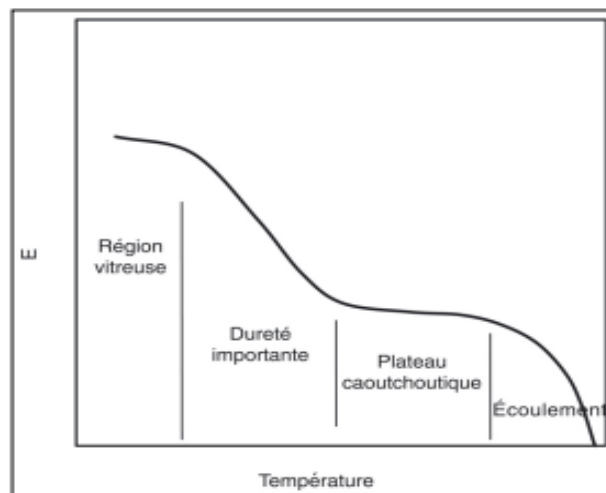
Les élastomères se différencient des thermodurcissables par leur propriété d'élasticité caoutchoutique, c'est-à-dire la capacité à subir de très grandes déformations réversibles sous l'action de contrainte mécaniques. Ils peuvent atteindre de très grandes allongements (jusqu'à 500%) tout en étant capables de retrouver leur géométrie initiale en restituant au milieu l'énergie qui leur a été fournie lors de la déformation. [16].

#### I.5.5.3.1. Propriétés mécaniques des élastomères

##### a) Déformation et élasticité

Toute force appliquée à un matériau se traduit par une déformation. Cette déformation à l'échelle microscopique entraîne l'apparition d'une force de rétraction qui tend à restituer à l'échantillon sa forme originale. Si la force de rétraction est constante dans le temps, le matériau a un comportement élastique [17]. Presque tous les matériaux ont une réponse élastique mais seulement pour de petites déformations (environ 0,1 %) et cette déformation ( $\epsilon$ ) est proportionnelle à la contrainte  $\sigma$  appliquée (loi de Hooke) :  $\sigma = E \epsilon$ . La loi de Hooke décrit que,

pour de petites déformations, la déformation ( $\varepsilon$ ) est quasiment proportionnelle à la contrainte appliquée dans de nombreux matériaux ( $E =$  module de Young). Au-delà,



**Figure I .11** : Variation du module d'élasticité des polymères en fonction de la température (d'après Brantley, Eliades [18]).

Ils subissent un phénomène irréversible : la plupart d'entre eux gardent une déformation plastique qui change leur forme de manière permanente. Les élastomères présentent un faible module d'élasticité ou module de Young : 0,01 à 0,1 GPa (diamant : 1000 GPa). La rigidité des polymères varie en fonction des forces intermoléculaires entre les chaînes. Le module d'élasticité des polymères dépend également de la température (Fig. I .11). Ce qui rend les élastomères particuliers, c'est leur capacité de collisions élastiques (conservation de l'énergie cinétique totale des corps qui se heurtent, et conservation de la quantité de mouvement si absence de frottement) tels le rebond et l'étirement élastique, qui leur permet de reprendre leur forme initiale après étirement. Cette caractéristique spéciale est acquise par l'enchevêtrement de longues chaînes polymériques. Les propriétés des élastomères dépendent de leur degré de réticulation ; c'est ainsi que les propriétés du caoutchouc varient en fonction de la quantité de soufre utilisée lors de la vulcanisation, en vue de lier les chaînes les unes aux autres [19].

### b) Allongement et module de rigidité

Les élastomères subissent une transition vitreuse en dessous de la température ambiante (de  $-50\text{ °C}$  à  $-80\text{ °C}$  pour les polyuréthanes). En dessous de la température de transition vitreuse, ils sont relativement rigides, alors qu'au-dessus de cette température, ces matériaux deviennent hautement flexibles avec une activation thermique. Plus la température de transition vitreuse

est élevée, plus le polymère est rigide, et la formation d'un polymère plus rigide est associée avec une force délivrée plus importante, ou en d'autres termes, avec un module élastique plus élevé. Ils contiennent aussi très souvent une seconde phase de polymère cristallin qui subit une fusion au-dessus de la température de transition vitreuse [18]. La déformation qui résulte de l'application d'une force de traction est l'allongement. L'allongement de l'élastomère est instantané sous l'effet d'une tension et atteint des proportions importantes en relation avec un faible module de rigidité initial. Ils sont capables de s'allonger élastiquement de 300 % ou même plus, allongement qui disparaît à la décharge. Cependant, l'allongement devient de plus en plus difficile au fur et à mesure que la contrainte augmente d'intensité. Le module de rigidité, initialement faible, augmente pour atteindre son maximum au moment de la rupture de l'échantillon. L'élastomère étiré, observé aux rayons X, présente un arrangement spécifique comparable à un état cristallin et c'est cette cristallisation du matériau qui entraînerait un renforcement et l'augmentation du module de rigidité [20]. La rigidité du réseau dépend de la longueur et de la nature chimique des chaînes polyols entre les ponts « uréthanes ». Pour des chaînes de même nature chimique, plus les chaînes sont courtes, plus les ponts sont rapprochés, et plus le système est rigide [21]. A contrario, les élastomères sont des matériaux incompressibles (ou très peu compressibles) : coefficient de Poisson de 0,5.

### **c) Force de rupture**

Elle correspond à la force qui va provoquer la rupture de l'élément élastique. L'allongement de rupture est de l'ordre de 1000 % et peut être porté à 10000 % après quelques étirements – relâchements. Ce phénomène appelé « rackage » est dû à l'apparition d'une structure fibreuse au sein de l'élastomère. En orthodontie, cette notion est peu retenue, car l'étirement initial des chaînettes est très en deçà de ce seuil de rupture [22]. Les élastomères sont donc caractérisés par une grande résistance mécanique : capacité élevée à éviter l'effondrement par déformation plastique ou par rupture. Le caoutchouc naturel présente une faible résistance à la traction ( $R_m$ ) : 30 MPa (acier : 760–1280 MPa).

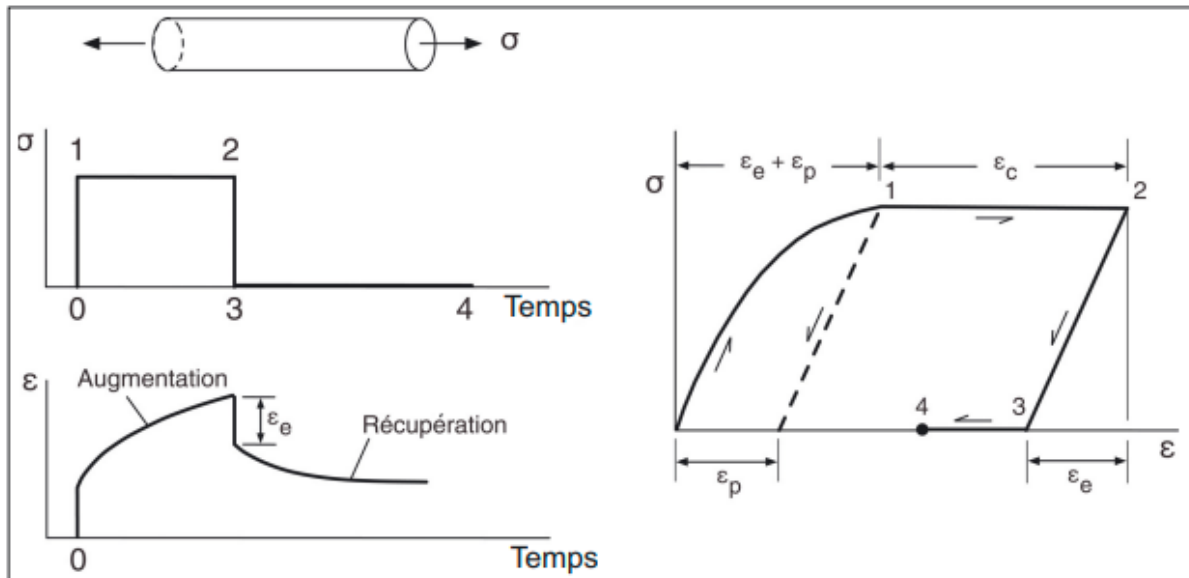


Figure I .12 : Charge et décharge d'un matériau viscoélastique.

La déformation élastique initiale instantanée correspond à 1, et la région entre 1 et 2 est une combinaison de la déformation retardée et de la déformation permanente. La première portion de la courbe de décharge entre 2 et 3 est la récupération de la déformation élastique instantanée. La déformation plastique permanente est désignée en 4. (D'après Brantley, Eliades [18].)

#### d) Viscoélasticité : comportement élastique non linéaire

D'autres comportements existent où le domaine élastique peut ne pas être linéaire. C'est le cas des élastomères ou caoutchoucs pour lesquels charge et contrainte ne restent pas proportionnelles. Les chaînes de polymères sont d'abord, sous l'effet de la contrainte, alignées, ce qui donne une appréciable déformation élastique sous faible contrainte. Ensuite, les chaînes sont étirées, toujours dans le domaine élastique, et les distances inter-atomiques allongées : c'est la déformation élastique retardée ou déformation viscoélastique [18, 19]. L'effet global conduit à une élasticité non linéaire (**Figure I .12**). Si la contrainte se poursuit, une déformation plastique apparaît. Le matériau est toujours élastique : en relâchant la contrainte, on décrit la même courbe que lorsque la courbe croissait, et toute l'énergie stockée pendant la mise en charge est récupérée à la décharge [23]. Les modules élastomériques composés d'uréthane présentent une élasticité dite caoutchoutique : la courbe charge / allongement n'est pas linéaire (comme pour les métaux et les céramiques) mais incurvée. La limite élastique se situe au changement d'inflexion [18]. La déformation élastique n'est donc pas proportionnelle à la charge qui la provoque (**Figure I .13**). La proportionnalité entre la contrainte et la déformation n'est pas constante, comme l'exprime la loi de Hooke. Lorsque la contrainte est nulle, ces

matériaux sont amorphes ; leurs chaînes tendant toutefois à s'aligner au cours de la déformation, il se produit une augmentation de la rigidité [19]. L'étude de comportement viscoélastique nécessite de préciser la durée d'application de la contrainte [19]. De plus, l'environnement des polymères est un paramètre très important dans leur comportement à long terme et en particulier la présence d'eau, d'électrolytes ou d'autres composés [24]. La vitesse de la contrainte joue également un rôle : il est recommandé d'activer doucement in vivo pour obtenir un minimum de dégradation de la force [18].

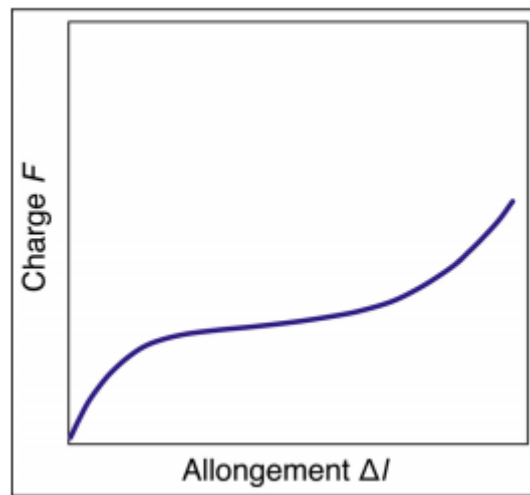


Figure I .13 : Courbe charge/allongement (d'après Ebaïlon, Dorlot [19]).

#### e) Mémoire évanescence

Dans les matériaux viscoélastiques, les déformations déterminées au moment de référence dépendent de toute l'histoire des contraintes mécaniques subies par le matériau auparavant. Ce type de matériau est appelé « matériau à mémoire évanescence », car il garde en mémoire les déformations subies au cours de sa fabrication et durant son utilisation mais l'effet de ces contraintes s'estompe au cours du temps. C'est pourquoi certains auteurs recommandent de préétirer les chaînettes [20].

#### I.5.5.4. Les élastomères thermoplastiques

Un élastomère thermoplastique est un polymère linéaire ou ramifié présentant les propriétés d'élasticité caoutchoutique d'un élastomère et de facilité de mise en œuvre d'un thermoplastique.

Les élastomères thermoplastiques sont le souvent des copolymères à blocs (ou des mélanges d'homopolymères et /ou copolymère) dont la structure à l'état solide résulte toujours de l'association d'au moins deux phases distinctes non miscibles : Une phase souple (température de transition vitreuse comprise entre 90 °C et 40 °C) associée à une phase rigide (température de transition vitreuse ou température de fusion supérieure à 90 °C). C'est donc un matériau multiphasé ou la phase rigide est dispersée dans la phase souple. [25].

### **I.6.7. Selon leur domaine d'application**

#### **I.6.7.1. Les polymères de grande diffusion**

Encore appelés polymère de commodité, dont la production annuelle s'évalue par des millions de tonnes, sont devenus d'un emploi quotidien pour tous. Le polyéthylène, le polystyrène, le poly (chlorure de vinyle) et quelques autres sont à classer dans cette catégorie d'une importance économique considérable. [26].

#### **I.6.7.2. Les polymères techniques**

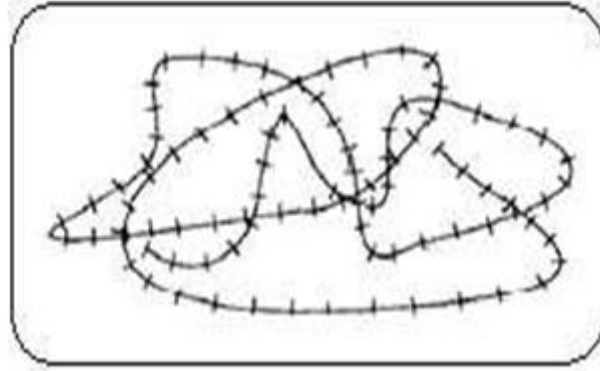
Ont des caractéristiques qui leur permettent de se substituer, de plus en plus aux matériaux traditionnels (métaux, céramique ...) pour nombreuses application ; les polyamides, les polyacétales ... font partie de cette famille. [27].

Les polymères spéciaux : ou polymère de fonction présentent généralement une propriété qui induit leur utilisation pour une application particulière. C'est dans cette catégorie que se trouvent les polymères conducteurs, photos actifs, thermostables, adhésifs, etc. [08]

### **I.6.8. Selon leur structure des chaînes : (dimensionnalité)**

#### **I.6.8.1. Les polymères linéaires ou monodimensionnels**

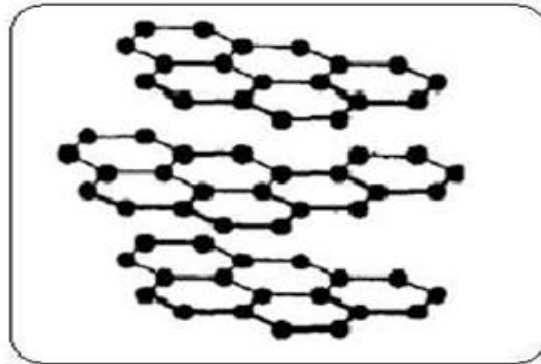
Pour lesquels, chaque chaîne macromoléculaire est constituée d'un nombre (éventuellement) élevé mais fini d'unités monomères ; de tels système correspondant à la polymérisation de monomères bivalents et une macromolécule linéaire peut-être très schématiquement représenté par un trait continu divisée en intervalles figurant chacun une unité monomère (Fig. I.14) chaîne polymères est constitué de longueur variable, propriétés désignée par le terme poly molécularité [08].



**Figure I.14** : polymère monodimensionnels

### I.6.8.2. Les polymères bidimensionnels

Dont certaines peuvent être produites par la nature (carbone, graphite, kératine...) ; dans le domaine des polymères synthétiques ce sont encore des curiosités de laboratoire. Ils se présentent sous la forme de feuillets bidimensionnels, d'épaisseur comparable à celle des molécules simples (Fig.I.15). [28]



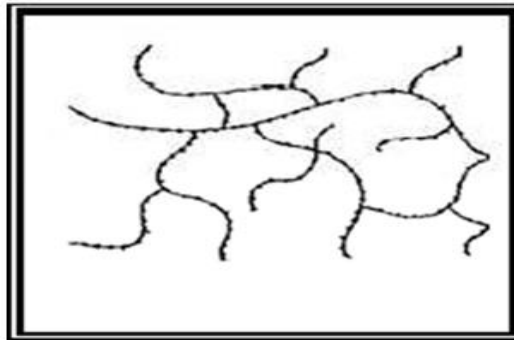
**Figure I.15** : polymère bidimensionnels [28]

### I.6.8.3. Polymères tridimensionnels

Qui résultent de la polymérisation de monomères dont la valence moyenne est supérieure à deux ou encore de la réticulation (formation d'un réseau tridimensionnel), par voie physique ou chimique, de polymères linéaires. [29].

Leur dimension moléculaire peut être considérée comme infinie puisque toutes les unités monomères constituées d'un objet sont liées de façon covalente pour former une seule macromolécule.

Les liaisons se développent dans les trois dimensions et un élément de volume d'un tel peut être représenté sur la (**Figure I .16**). [29].



**Figure I .16** : polymère tridimensionnels [29]

### **I.7. Utilisation des polymères**

Les polymères constituent une des principales révolutions techniques du XXème siècle. Ceux-ci sont utilisés pour un nombre extraordinaires d'applications à tous les échelons de la vie. (Voir Tableau I.1). [30].

<b>Chapitre I</b> <b>Domaines</b>	Exemples <i>Généralités sur les polymères</i>
<b>Le secteur de la construction</b>	Les portes, conduites d'eau et l'assainissement, peinture des murs des plan chaires et des plafonds, revêtement du sol.
<b>Industrie de l'emballage</b>	Bouteilles, pots de yaourt, boîtes aux lettres, problème thermique, gainage films vidéo.
<b>Médecine et santé</b>	Poches de sang, gants, lentilles, verres de lunettes, les organes artificiels, Seringues, industrie dentaire, prothèses, outils de chirurgie
<b>Articles ménagers</b>	Tupperware, poubelles, seaux, vaisselle
<b>Matériel électrique et électronique et les communications</b>	Tension d'isolement, isolation, laveuses, ordinateurs et les caméras, Radio et télévision, téléphone.
<b>Industrie automobile</b>	Système vitre claire, Tapie, carrosserie, optiques, planches de bord, habillage intérieur, Façades de téléviseurs, gainage de câbles.
<b>Industrie textile</b>	Vêtement, fibres textiles naturelles et synthétiques, sacs, skaï, similicuir, non tissés.
<b>Dans le domaine agricole</b>	Colles, vernis, mousses.
<b>Sports-loisirs</b>	Certaines parties des bâtiments, des avions et des bateaux, DVD, bandes magnétiques, Files de pêche et les cordons utilisés, piscines, coques de bateaux.
<b>Industrie chimique</b>	Tuyauterie, cuves, revêtements.
<b>Le domaine alimentaire</b>	Procédés de fabrication d'aliments, emballages (bouteilles, pots de yaourt, briques de lait, boîtes à œufs) ou industriel (flacons de détergent, sachets et sacs, casiers)...
<b>Le matériel de maison</b>	Meuble, vaisselle, accessoires... ; Utilisés en industrie pour maintenir le matériel d'une violente collision.

**Tableau I. 1 : domaine d'utilisation des polymères**

## **I.8. Les caractéristiques des polymères**

Les caractéristiques d'un matériau se réfèrent aux propriétés physiques, chimiques, mécaniques, thermiques, optiques, électriques, magnétiques ou autres qui le définissent et le distinguent des autres matériaux. Les caractéristiques d'un matériau peuvent être utilisées pour déterminer son comportement dans différentes conditions, pour évaluer sa qualité ou sa performance, ou pour comparer différentes options de matériaux pour une application donnée.

### **I.8.1. Propriétés thermiques**

#### **\*La température**

Les deux températures fondamentales nécessaires dans l'étude des matériaux polymères sont la température de transition vitreuse ( $T_g$ ) et la température de fusion ( $T_f$ ).

La transition vitreuse  $T_g$  est particulièrement importante pour les polymères amorphes, tels que les thermoplastiques amorphes, qui ne possèdent pas de forces de cohésion significatives autres que l'enchevêtrement. [31].

Les températures caractéristiques d'un même matériau peuvent être classées comme suit :  $T_g < \text{température de cristallisation} < T_f < \text{température de décomposition thermique}$ . [31].

Les polymères semi-cristallins peuvent présenter différents comportements mécaniques dans une plage de températures restreinte. [31].

### **I.8.2. Propriétés mécaniques**

Les polymères thermodurcissables ont tendance à être rigides et cassants, alors que les polymères thermoplastiques et les élastomères présentent généralement une résistance mécanique médiocre qui est fortement influencée par la température.

Les propriétés thermomécaniques des polymères sont liées à leur structure. Par exemple, lors de la mise en œuvre par injection, les plastiques amorphes sont plus tolérants et leur processus est plus aisé, avec un retrait (ou "shrinkage" en anglais) plus faible lors du refroidissement, que les semi-cristallins qui ont une tendance à cristalliser.

Les propriétés mécaniques d'un polymère sont influencées par son taux de cristallinité. En effet, le module de Young augmente avec l'augmentation du taux de cristallinité, tandis que la limite de déformation élastique diminue proportionnellement.

### **I.8.3. Propriétés physiques**

Ces propriétés comprennent diverses caractéristiques telles que l'imperméabilité aux liquides et aux gaz, la résistance chimique aux solvants, et la résistance aux rayons ultraviolets. En ce qui concerne la masse volumique ou la reprise d'humidité, ces propriétés sont une moyenne des caractéristiques des composants. Cependant, ces matériaux sont souvent inhomogènes, et il n'existe pas de règle d'addition pour prédire leurs propriétés à partir de celles de leurs composants.

### **I.8.4. Propriétés optiques**

#### **Coloration**

Les polymères de haute pureté sont généralement incolores en raison de la présence de structures conjuguées dans le motif structural régulier, ou suite à un début de dégradation thermique. Cependant, l'utilisation de colorants bleus ou d'azurants optiques peut absorber et annuler la coloration jaune ou brun qui apparaît.

#### **Transparence**

C'est l'une des plus essentielles des propriétés optiques et elle est liée à la morphologie, l'existence de morphologie entraîne l'existence de domaine ayant des indices de réfractant et diffusant la lumière, l'intensité des émerges diminue par rapport au trajet des rayons lumineux reçu.

### **I.8.5. Propriétés chimiques**

Le comportement chimique du matériau dépend en grande partie de la nature chimique de la partie polymère, mais aussi de son accessibilité aux agents extérieurs telles les actions chimiques sur les matériaux solides et le comportement au feu qui est une attaque chimique à température élevée par l'air.

On notera que la distinction entre mise en solution et attaque chimique est théoriquement claire ; une solution devant laisser intacte la structure chimique et les agents d'attaques chimiques peuvent être des réactifs utilisés comme solvant. Ainsi les polyoléfines et les élastomères de dioléfines ne contiennent que du carbone et de l'hydrogène ne sont pas susceptibles d'attaque chimique par les acides et les bases, les polyamides par la fonction amide sont sensibles à l'hydrolyse par les alcalis et les amines, les acides forts HCl sont aussi à éviter.

A la chaleur les thermoplastiques fondent, les thermodurcissables peuvent se décomposer sans fondre mais en émettant des vapeurs ou liquides inflammable. Les charges incombustibles peuvent rendre plus difficile la combustion moins il y a d'oxygène dans l'atmosphère moins la combustion est aisé.

Les polymères brûlent de façon incomplète en émettant des fumées grasses. [32]

### **I.9. Transition vitreuse**

Les polymères sont constitués de macromolécules liées entre elles par des liaisons secondaires qui assurent leur stabilité. Ces liaisons secondaires sont des liaisons sou ponts hydrogène ou des liaisons de VanderWaals. En fonction de la température, ces polymères passent d'un état vitreux à un état caoutchouteux puis à un état liquide à des températures caractéristiques : de transition vitreuse et de fusion respectivement.

#### **• Etat vitreux**

Lorsqu'un polymère est à l'état vitreux à basse température, les mouvements moléculaires le long de la chaîne polymérique ne peuvent pas initier de manière coopérative. Par conséquent, les déformations possibles sont limitées et le module de Young est élevé. La déformation élastique est principalement contrôlée par l'enthalpie de son énergie interne, tout comme dans le cas des métaux. Malgré son caractère vitreux, le polymère n'est pas complètement figé. Des fluctuations de conformation, à la fois temporelles et spatiales, persistent. Lorsque des contraintes élevées sont appliquées, le processus de déformation plastique peut être activé à une température inférieure à la température de transition vitreuse, appelée température de transition ductile/fragile. A l'état vitreux, le comportement du polymère est viscoélastique, viscoplastique, et sa ductilité macroscopique varie en fonction de la température et de la vitesse.

#### **• Zone de transition**

La zone de transition, liée à la relaxation vitreuse ou à la zone viscoélastique, correspond au moment où des changements de conformation globale, c'est-à-dire des mouvements coopératifs le long du squelette de la chaîne, deviennent possibles. Cela entraîne une diminution rapide du module de Young et un comportement très évolutif.

**• Zone caoutchoutique**

Dans la zone caoutchouteuse, la température est suffisamment élevée pour que les chaînes puissent rapidement adopter toutes leurs conformations possibles, bien plus rapidement que le temps caractéristique de la sollicitation. Cependant, la température est trop basse pour permettre le désenchevêtrement des chaînes à grande échelle. Ainsi, macroscopiquement, les chaînes semblent flexibles mais l'écoulement est interdit. Le matériau devient progressivement hyper-élastique, voire visco-hyper-élastique s'il n'est pas réticulé. Les processus plastiques cèdent leur place à l'élasticité entropique lors de fortes déformations. La zone caoutchouteuse d'un polymère semi-cristallin est plus étendue et durable que celle d'un polymère amorphe. C'est pourquoi un polymère semi-cristallin tel que le PP ou le PE peut être utilisé en dessous de sa température de transition vitreuse s'il est réticulé, ce qui en fait des élastomères. Ainsi, un polymère semi-cristallin reste visco-plastique avec un durcissement structurel et/ou des dommages sur sa zone caoutchouteuse. Il est également important de noter, comme le montre la Figure I.17, que le PC et le PP ont des comportements macroscopiques très similaires, bien que leurs processus internes soient très différents : l'un étant amorphe et vitreux, tandis que l'autre est semi-cristallin.

**• Zone fluide**

La zone fluide émerge lorsque les enchevêtrements deviennent probables, ce qui conduit à une apparence statistiquement indépendante des chaînes les unes par rapport aux autres. Par conséquent, l'application de contrainte peut facilement les déplacer les unes par rapport aux autres. Le comportement devient principalement visqueux, mais conserve néanmoins des aspects viscoplastiques.

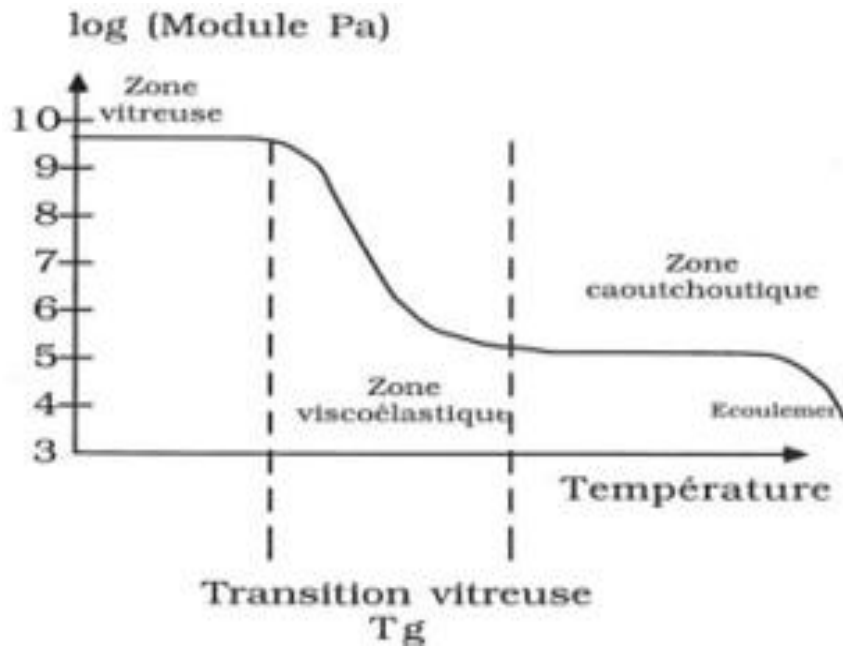


Figure I.17: les différentes zones de transition [33]

## I.10. Le comportement mécanique des polymères

### I.10.1 Introduction

Le comportement mécanique des polymères est caractérisé par une très grande diversité apparente. En effet, pour les mêmes conditions d'utilisation, et d'un point de vue technologique, on peut trouver des polymères qui sont, soit rigides fragiles, soit ductiles, soit caoutchoutiques. Ainsi, dans la famille des polymères, on peut retrouver un grand nombre de types de comportement : viscoélastique, visco plastique, hyper élastique, durcissant, endommageable. Cette diversité se retrouve, pour un même polymère, si l'on fait varier certaines de ses caractéristiques, ou simplement ses conditions d'utilisation. Il peut être rigide fragile, ductile ou élastique etc.

Ceci ne veut pas dire que le comportement d'un polymère est variable, voire incontrôlé. Ce sont les paramètres contrôlant son comportement et les processus élémentaires envisageables qui sont nombreux. [34]

### I.10.2 Présentation générale du comportement mécanique des polymères

Les matériaux polymères sont formés d'unités structurales qui sont les motifs monomères liés entre eux par des liaisons intermoléculaires faibles appelées liaisons de "Van Der Waals". Ces liaisons assurent la cohésion d'un polymère surtout aux basses températures. De plus, dans la

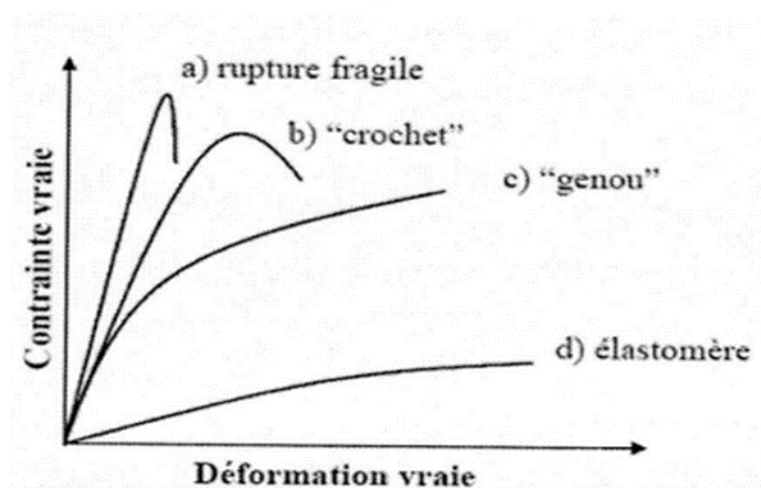
plupart des polymères, principalement les thermoplastiques, qui nous intéressent dans cette étude, les mouvements relatifs de segments macromoléculaires devenant possibles dans un certain domaine d'état lié à la température (manifestations thermiquement activées), font naître des phénomènes dissipatifs traduits globalement par la viscoplasticité. Par conséquent, d'un point de vue mécanique, un matériau polymère se caractérise par un comportement possédant simultanément trois composantes :

- Une composante élastique réversible, qui prédomine dans les basses températures, notamment en deçà de la température de transition vitreuse  $T_g$ , pour des vitesses de sollicitation élevées, ou pour des chargements très faibles, avec un module et une loi de comportement de Hooke
- Une composante viscoplastique irréversible dépendant du temps, qui prévaut aux températures élevées et aux grandes vitesses de sollicitation. Dans ce cas, la contrainte est liée à la vitesse de déformation par la loi de Newton
- Une composante visqueuse ou élastoviscoplastique combinant les deux caractères précédents à un domaine de températures intermédiaires supérieures à la température de transition vitreuse. La déformation est non seulement fonction de la température, mais aussi du temps (ou de la vitesse de déformation). Lorsque la contrainte est supprimée, il subsiste une déformation rémanente qui disparaît au cours du temps parfois lentement (viscoélasticité linéaire) ou tend vers une faible composante irréversible (élastoviscoplasticité). Il est primordial de noter que parmi les différentes catégories de matériaux polymères, la viscoélasticité donne sa nature au comportement mécanique essentiellement chez les matières thermoplastiques. Ainsi, pour cette classe de polymères, l'effet viscoélastique peut être très prononcé et se caractérise par sa forte dépendance de la température et du temps.

Le comportement mécanique des polymères à l'échelle macroscopique présente une grande diversité apparente. En effet, pour les mêmes conditions d'utilisation et du point de vue technologique, on peut trouver des polymères qui se comportent de manière rigide, fragile, ductile ou caoutchouteuse. La détermination de la limite élastique de certains polymères, tels que les polymères fragiles qui se brisent lors de l'étape viscoélastique, ou les élastomères qui présentent un comportement hyperélastique, n'est pas évidente. Cette limite élastique est généralement sujette à discussion et peut être identifiée par :

-Lorsqu'il y a une brusque variation de la pente de la courbe contrainte vraie - déformation vraie, on observe ce que l'on appelle un "genou". Ce phénomène se produit dans la plupart des polymères semi-cristallins et quelques polymères amorphes.

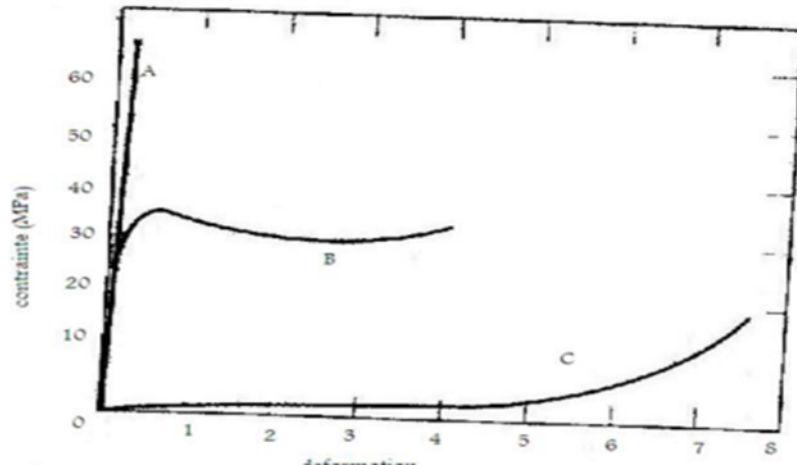
-Lorsqu'il y a un pic local sur la courbe contrainte vraie - déformation vraie, on parle de "crochet". Ce phénomène est typique de la plupart des polymères amorphes.



**Figure I.18 :** comportement typique des polymères à faible déformation [35]

### I.10.3. Comportement Contrainte-Déformation

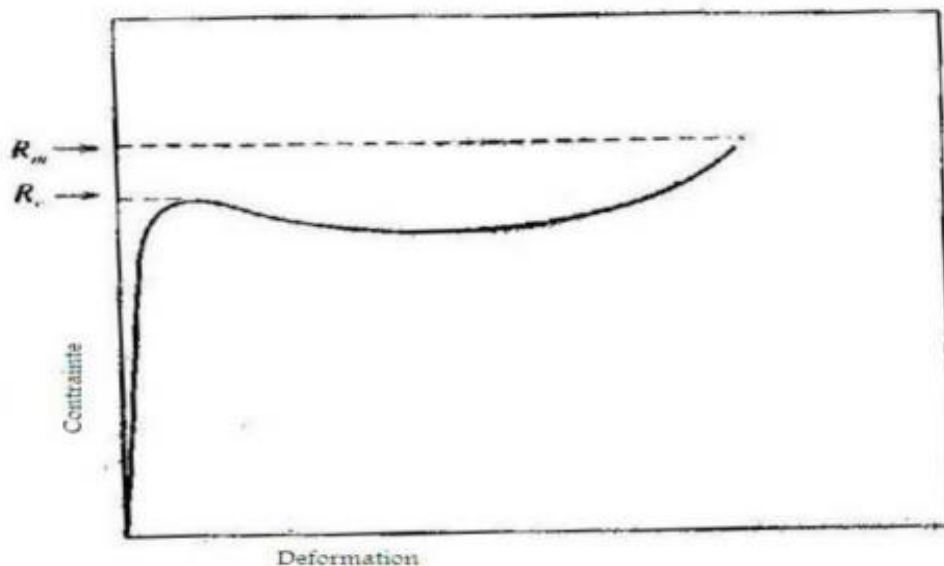
Un grand nombre des paramètres utilisés pour caractériser les métaux, tel que le module d'élasticité, la résistance à la traction la résistance au choc et la limite d'endurance, servent à décrire les propriétés des polymères .un simple essai de traction permet de faire ressortir certain des paramètres mécaniques de nombreux polymères [36] la plupart des caractéristiques mécaniques des polymères varient beaucoup en fonction de la vitesse de déformation ,de la température et de la nature chimique de milieu (présence d'eau, d'oxygène des solvant organiques, etc...).certaines modifications doivent être apportées aux méthodes d'essai et aux configurations d'éprouvette propres aux métaux lorsqu'elle sont appliquées aux polymères, notamment aux matériaux fortement élastique tels que les caoutchoucs. La figure I.8 présente trois type de comportement contrainte -déformation des matériaux polymères, la courbe (A) illustre le caractère en contrainte- déformation d'un polymère fragile dont la rupture s'accompagne d'une déformation élastique. La courbe (B) montre que le comportement des matériaux plastiques semblable à celui de nombreux matériaux maliques ; la déformation élastique est toujours suivie par un écoulement plastique. Pour ça part, la courbe (C) correspondent à un matériau entièrement élastique, analogue à celle des caoutchoucs (déformation réversibles prononcées résultant d'une contrainte faible), que manifeste un élastomère.



**Figure I.19 :** Comportement Contrainte –Déformation des polymères

a) fragiles, b) élastique, c) élastomères.

Le module d'élasticité (aussi appelé module de traction dans le cas des polymères) et l'allongement à la rupture des polymères se déterminent de la même façon que ceux des métaux [23] la limite d'élasticité ( $R_e$ ) des polymères plastique (courbe B) équivaut à la valeur maximale de la courbe, qui se situe à la toute fin de la région d'élasticité linéaire. De plus, la résistance à la traction ( $R_m$ ) correspond à la contrainte entraînant une rupture (Figure I.20) et peut prendre une valeur supérieure ou inférieure à  $R_e$



**Figure I.20:** Courbe Contrainte -Déformation d'un polymère plastique

En ce qui concerne ces polymères plastique, la résistance évoquée renvoie généralement à la résistance à la traction.

Le tableau I.3. Présente les propriétés mécaniques de plusieurs polymères. [Modern plastics encyclopedia'96©1995, the McGraw-hillcompanies.] [37]

matériau	Masse Spécifique (g/cm <sup>3</sup> )	Module d'élasticité (GPa)	Résistance a la traction (MPa)	Limite d'élasticité (MPa)	Allongement a la rupture (%)
Polyéthylène (faible densité)	0.917-0.932	0.17-0.28	8.3-31.4	9.0-14.5	100-650
Polyéthylène (haute densité)	0.952-0.965	1.06-1.09	22.1-31.0	26.2-33.1	10-1200
Polychlorure de vinyle	1.30-1.58	2.4-4.1	40.7-51.7	40.7-44.8	40-80
Polytetrafluoroéthylène	2.14-2.20	0.40-0.55	20.7-34.5	-	200-400
Polypropylène	0.90-0.91	1.14-1.55	31.0-41.4	31.0-37.2	10-600
Polystyrène	1.04-1.05	2.28-3.28	35.9-51.7	-	1.2-2.5
Polyméthacrylate de méthyle	1.17-1.20	2.24-3.24	48.3-72.4	53.8-73.1	2.0-5.5
Phénol- formaldéhyde	1.24-1.32	2.76-4.83	34.5-62.4	-	1.5-2.0
Nylon 6.6	1.13-1.15	1.58-3.80	75.9-94.5	44.8-82.8	15-300
Polyester(polytétréptalate d'éthylène)	1.29-1.40	2.8-4.1	48.3-72.4	59.3	30-300
Polycarbonate	1.20	2.38	62.8-72.4	62.1	110-150

Les propriétés mécaniques des polymères se distinguent à maints égards de celles des métaux. ainsi, le module d'élasticité de certains polymères fortement élastique ne dépasse pas 7 MPa, tandis que celui de certains polymères très rigides atteint 4 GPa. Par contre, le module d'élasticité des métaux est beaucoup plus élevé et peut prendre des valeurs allant de 48GPa à 410 GPa. Quand la résistance à la traction maximale, elle est de l'ordre de 100MPa pour les polymères, alors qu'elle atteint 4100MPa dans certain alliage métallique .de plus, si, pour les métaux en atteint rarement un allongement plastique supérieur à 100%, certain polymère fortement élastique subissent parfois un allongement pouvant atteint quelque 1000% !

Il faut également souligné que les caractéristiques mécaniques des polymères se modifient sensiblement en fonction des variations de température de part et d'autre de la température ambiante.

#### I.10.4. Facteurs influencent sur les propriétés mécaniques des polymères

##### I.10.4.1. La mise en œuvre

La mise en œuvre peut modifier :

\*La structure du matériau peut être modifiée lors de sa mise en œuvre, notamment au niveau de la nature des chaînes qui peut entraîner des ramifications ou des réticulations, ainsi que de la longueur des chaînes due à la dégradation. De manière simplifiée, les propriétés des polymères évoluent de manière seuillée en fonction de leur masse molaire. En deçà d'un certain seuil, la propriété n'est pas garantie, tandis qu'au-dessus, elle évolue lentement. La masse molaire initiale du polymère est déterminée par un compromis en raison de considérations liées à la synthèse ou à la mise en œuvre à l'état fluide, ce qui fait qu'elle peut souvent rester proche de l'un de ces seuils. Par conséquent, lors de la mise en œuvre, la réduction de la masse molaire peut sérieusement détériorer l'une ou l'autre des propriétés du polymère.

\*La formulation implique l'utilisation d'additifs dans le processus.

\*L'organisation des chaînes se produit en générant une microstructure qui comprend l'extension et l'orientation moléculaire, ainsi que la cristallisation et la texturation cristalline.

\*La disposition spatiale des composants implique la répartition et l'orientation des charges, ainsi que la présence de phases hétérogènes.

#### **I.10.4.2 Le traitement thermique**

Le traitement thermique (ou recuit) des polymères semi- cristallins modifie la taille et le degré de pureté des cristallites ainsi que la structure sphérolitique. L'augmentation de la température de recuit des matériaux non étirés qui sont soumis à des traitements thermiques isopériodiques aux conséquences suivantes :

- 1) un accroissement du module d'élasticité.
- 2) une augmentation au module d'élasticité.
- 3) une diminution de la ductilité. Il faut noter ici que les effets imputables au recuit sont contraires à ceux généralement observés dans les matériaux métalliques [McCrum1997] [38], soit un affaiblissement, un adoucissement et une augmentation de la ductilité.

En ce qui a trait à certaines fibres polymères étirées, le recuit a des effets inverses sur le module d'élasticité à ceux qu'il a sur les matériaux non étirés ; le module d'élasticité décroît avec la hausse de la température de recuit en raison de l'orientation des moins prononcé de la chaîne et de la cristallinité induite par la déformation.

**Chapitre II :**  
**Généralités sur les essais mécaniques**

## **II.1-Introduction**

L'objectif des essais sur les matériaux est d'étudier leur réponse à des sollicitations extérieures variées. Cela implique principalement l'analyse de la relation entre les forces appliquées et la déformation résultante, ainsi que l'étude des sollicitations limites qui peuvent conduire à une défaillance des composants. Les valeurs caractéristiques obtenues à partir des essais mécaniques sont utilisées pour le développement des matériaux, la conception des composants et l'assurance qualité. Pour caractériser les propriétés des matériaux de manière précise, une série de méthodes d'essai normalisées est disponible.

Les essais mécaniques sont essentiels pour déterminer les caractéristiques des matériaux, allant du module d'Young à la limite d'élasticité en passant par la ténacité ou la résistance à la fatigue. Différents types d'essais mécaniques existent en fonction des matériaux et de leurs utilisations, les plus couramment utilisés étant l'essai de traction et l'essai de compression.

## **II.2. Les essais mécaniques uniaxiaux**

Les essais mécaniques ont pour objectif de caractériser les lois de comportement des matériaux en mécanique des milieux continus. La loi de comportement établit une relation entre les contraintes (force appliquée par unité de surface) et les déformations (variation de longueur unitaire sans dimension). Il est important de ne pas confondre la déformation ou la dilatation d'une pièce, qui dépendent de la géométrie et des forces appliquées sur celle-ci. Pour normaliser les essais, des normes ont été établies pour définir la forme de l'éprouvette normalisée testant le matériau, la manière dont les forces sont appliquées sur celle-ci, ainsi que les essais uniaxiaux où la charge appliquée est dans une seule direction.

### **II.2.1- Essais de traction**

L'essai de traction est l'un des essais les plus couramment utilisés pour caractériser les propriétés mécaniques des matériaux. Étant purement uniaxial, du moins tant qu'il n'y a pas de striction (une diminution catastrophique de la section de l'éprouvette au centre), il permet de s'affranchir des méthodes de calcul inverse et conduit directement à une loi de comportement uniaxial. De nombreuses grandeurs normalisées telles que la contrainte à la rupture, la contrainte maximale, la limite d'élasticité, etc. peuvent être déterminées à l'aide de cet essai et sont nécessaires dans les calculs de structure.

Tout d'abord, nous présentons une description générale d'une machine de traction, suivie d'informations sur les éprouvettes, les mesures de déformation et les charges appliquées.

### II.2.1.1. Description générale d'une machine de traction

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 démontée en charge constante, à vitesse de déformation constante, etc. selon ce qui peut être proposé par le système de pilotage [39]

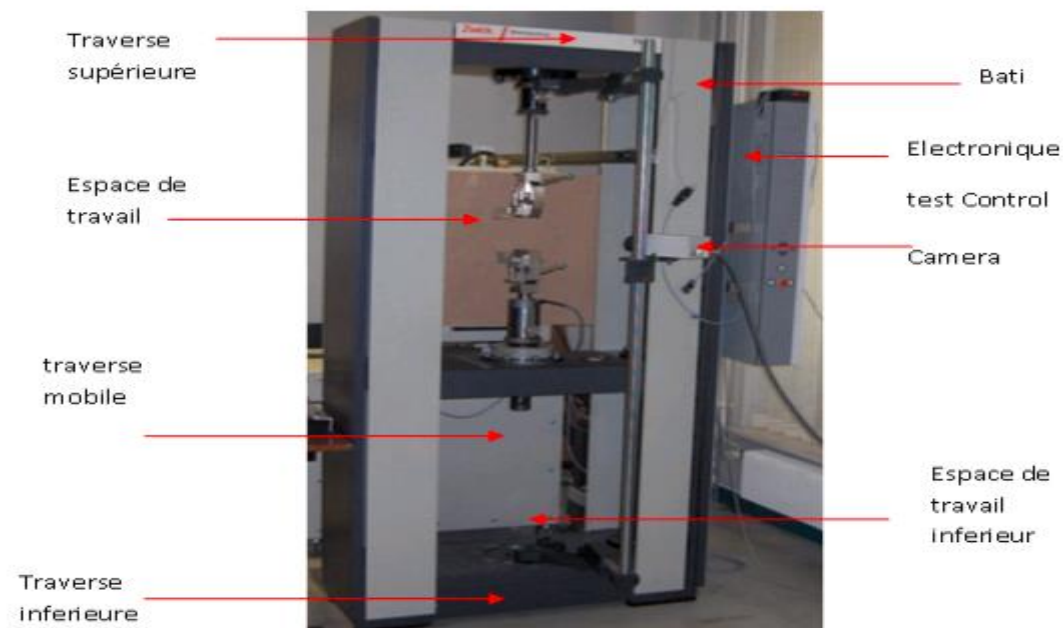


Figure II.1 : Description d'une machine de traction

### II.2.1.2. L'éprouvette

Les éprouvettes de traction peuvent avoir une géométrie cylindrique ou plate, avec une section constante sur une longueur suffisante pour garantir un état de contrainte homogène

pendant l'essai. Des têtes de fixation sont usinées aux extrémités avec des rayons de courbure suffisamment grands pour éviter des concentrations de contrainte excessives. Dans le cas des éprouvettes plates, le centrage peut poser problème si les trous calibrés ne sont pas percés dans les têtes.

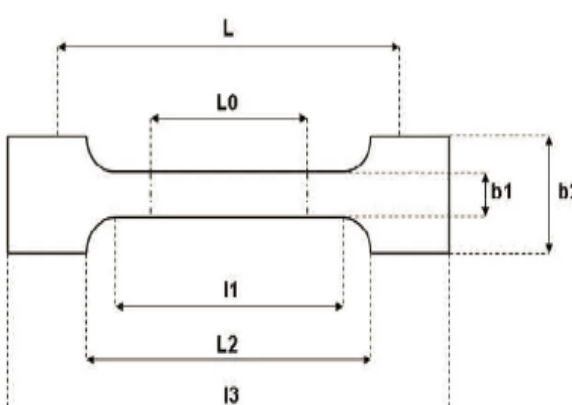
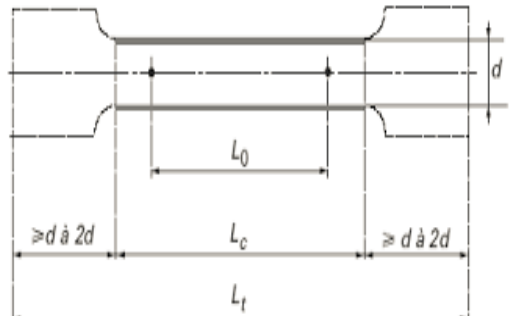
L'essai de traction est exécuté soit sur des barres de section constante, soit sur des éprouvettes cylindriques ou prismatiques prolongées de part et d'autre par des têtes d'attache de forme appropriée pour la fixation. Ces têtes d'attache ont typiquement une section nettement plus grande que la partie centrale de l'éprouvette dite « section réduite ». Ceci est pour s'assurer que la contrainte dans les têtes d'attache (contrainte nominale + concentration de contrainte engendrée par le système de fixation) reste toujours inférieure à la limite d'écoulement du matériau. Ainsi la déformation plastique est essentiellement limitée à la partie de l'éprouvette à section réduite. En outre, il est à veiller que les forces transmises par le système de fixation soient colinéaires pour minimiser les effets des forces latéraux.

Ceci n'est pas qu'un détail que l'on doit respecter seulement lorsqu'on effectue l'essai de traction. Dans la pratique aussi, on doit garder à l'esprit que la limite d'écoulement plastique déterminée dans un essai de traction ne tient compte que d'un état de contrainte uniaxiale.

Deux exemples typiques de géométrie d'éprouvettes sont montrés en **Figure II.2**, d'une part, une éprouvette plate (typique pour la caractérisation de tôles) et, d'autre part, une éprouvette à symétrie rotationnelle (préférable si l'éprouvette peut être coupée dans la masse).

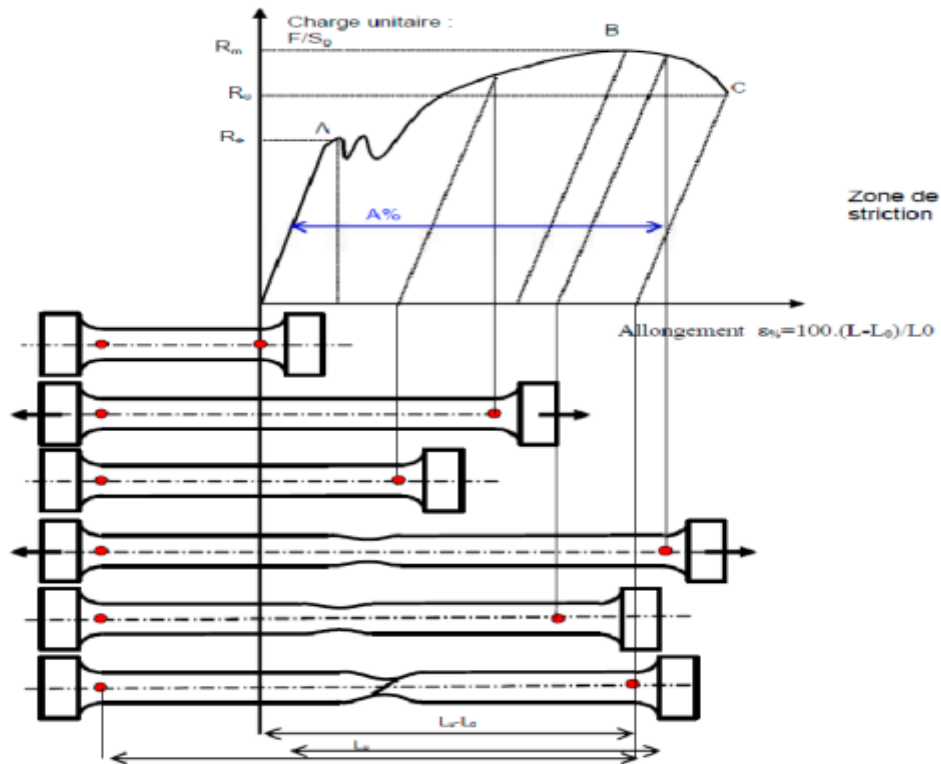
Cette dernière peut être conçue avec des têtes filetées. Ce type est très souvent utilisé en raison de sa fixation simple et sûre, en particulier lorsqu'il s'agit d'effectuer des essais de traction avec des extensomètres de précision. Les éprouvettes filetées présentent en plus l'avantage de se prêter parfaitement à des essais cycliques, changeant d'un état de compression à un état de traction. Le jeu lors du passage reste minimal, notamment si on utilise des contre-écrous.

II.2.1.3- Exploitations de l'essai

<p style="text-align: center;"><b>Eprouvette plate</b></p> 	<p style="text-align: center;"><b>Eprouvette cylindrique</b></p> 
<p>L0 = longueur de référence                      L = Ecartement entre outillages                      l1 = longueur de la partie calibrée étroite                      L2 = Ecartement entre les partie parallèles larges                      l3 = longueur totale                      b1 = largeur dans la zone d'épaulement                      b2 = la largeur dans la zone de la longueur de référence                      h = épaisseur de l'éprouvette</p>	<p>L0 = longueur initiale entre repères                      Lc = longueur de la partie calibrée                      Lt = longueur totale                      d = diamètre de la section calibré circulaire d'une éprouvette circulaire</p>

II.2.1.3.a- Interprétation

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



**Figure II.2 :** Réponse mécanique charge-allongement d'un acier

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 [40]

### II.2.1.3.b- Définitions des paramètres [41]

Lorsqu'on enregistre ou trace un diagramme charge-allongement à l'aide d'un dispositif de mesure, on utilise les coordonnées suivantes : l'allongement relatif  $L/L_0$  de l'éprouvette ou d'une base de mesure définie comme  $L_0$ , qui représente sa longueur initiale, est représenté sur l'axe des abscisses.

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

La charge unitaire en ordonnée est définie à chaque instant de l'essai comme le résultat de la division 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 est désigné comme la résistance à la traction ou la résistance à la rupture (même si aucune rupture ne s'est encore produite), car il représente la charge maximale.

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

La charge maximale atteinte pendant l'essai de traction est représentée par le point B. À partir de ce point, la déformation commence à se concentrer sous forme de striction, ce qui explique la diminution de l'effort requis pour des déformations au-delà du point B. Si un processus de mise en forme impliquait de franchir ce point, cela présenterait des risques difficiles à contrôler tels que la rupture ou la non-conformité géométrique. Le point C, quant à lui, correspond à la charge ultime. Après la rupture de l'éprouvette et sa reconstitution, on mesure  $LU$  et  $SU$ , qui représentent respectivement la longueur entre repères et la section minimale ultime. L'allongement relatif total ou  $A\%$  de l'éprouvette est égal à l'allongement de rupture ;

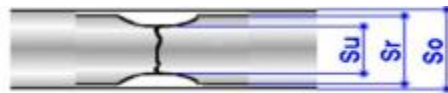
$$A\% = 100 \cdot \frac{Lu-L_0}{L_0}$$

La longueur de l'éprouvette après rupture, notée " $L_u$ ", est un indicateur de 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 correspond à la réduction maximale de section de l'éprouvette rompue, c'est-à-dire dans la section où la rupture s'est produite (fig I.3). Le coefficient de striction est un indicateur de la capacité à se déformer à froid.

$$Z\% = 100 \cdot \frac{S_0 - S_u}{S_0}$$



\$S\_0\$ : section initiale

\$S\_u\$ : section après rupture.

\$S\_r\$ : dimension d'éprouvette après la rupture.

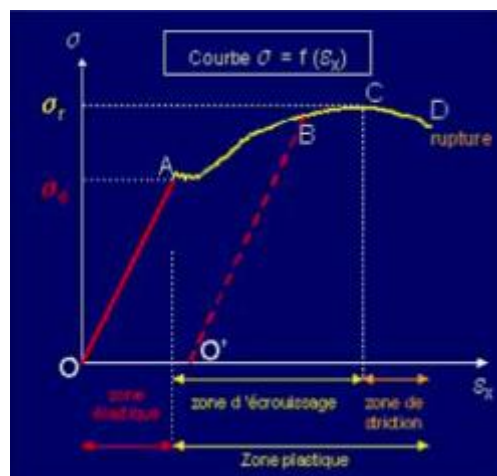
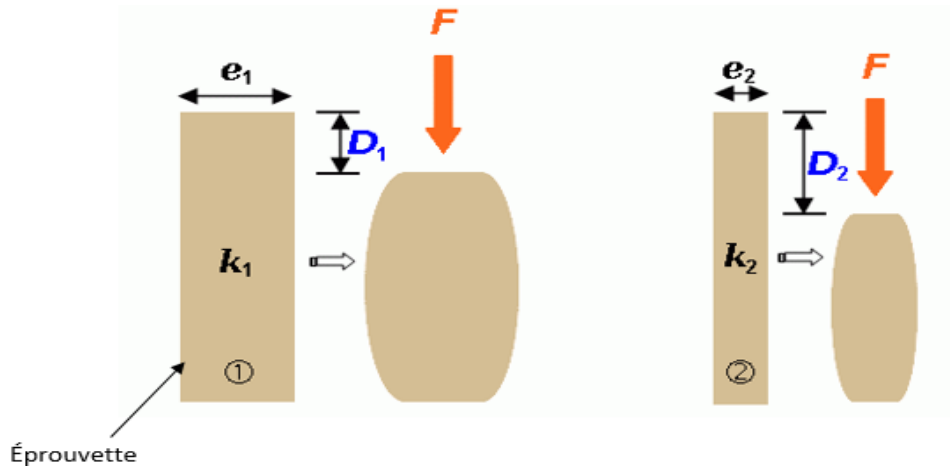


Fig. I.3 : Déformation de l'éprouvette lors de l'essai [42].

## II.2.2- Essai de compression simple

Pour mesurer la résistance à la compression d'un matériau selon une méthode normalisée, on réalise un essai de compression en utilisant une machine d'essais mécaniques. Les essais de compression sont souvent effectués sur le même équipement que les essais de traction, mais la charge est appliquée en compression plutôt qu'en traction. Pendant l'essai de compression, une

éprouvette cylindrique courte est généralement utilisée, subissant un raccourcissement élastique et un écrasement au-delà de la limite d'élasticité du matériau. Les éprouvettes courtes en forme de cylindre sont préférables aux éprouvettes rectangulaires ou trop longues pour ces types d'essais.



Éprouvette 1 et 2 identiques sauf  $e_2 < e_1$

Essai de compression :  $D_2 > D_1 \rightarrow$  raideur  $K_2 < K_1$

Figure II.4 : essai de compression sur éprouvette cylindrique

**Principe de l'essai**

Lorsqu'une poutre est soumise à deux forces directement opposées qui sont appliquées au centre de sa surface extrême et qui ont tendance à la raccourcir, on parle alors de compression simple. (Figure II.5)

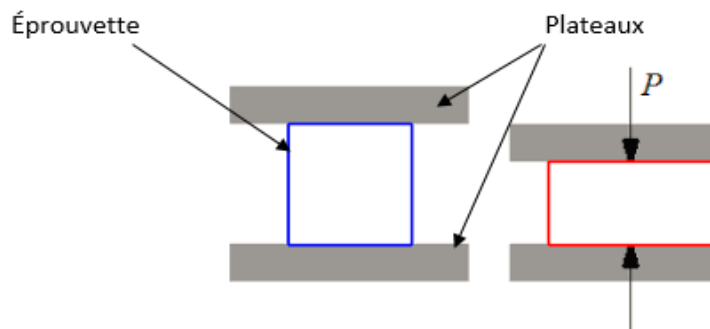


Figure II.5 : essai de compression sur éprouvette cubique

**Le but de l'essai**

Le but de l'essai est l'étude du comportement des matériaux plastique, fragile, isotrope et anisotrope (béton, bois, métaux) au cours de la compression et la détermination de leurs caractéristiques mécaniques.

La contrainte de compression est déterminée par :

$$\sigma_c = \frac{F}{A_0} \text{ (N/mm}^2 \text{ )}$$

Avec :

F : la force mesurée pendant l'essai

$A_0$ : section initiale

**II.2.3- Essai de flexion**

La flexion est une déformation qui se manifeste par une courbure d'un objet, et qui a tendance à rapprocher les deux extrémités de la poutre dans le cas d'une poutre, ou deux points diamétralement opposés dans le cas d'une plaque, sous l'effet d'une force appliquée. Pour tester la résistance d'un matériau à la flexion, on utilise un essai mécanique appelé « essai de flexion ». Il existe deux types d'essais de flexion, à savoir la flexion dite « trois points » et la flexion dite « quatre points ».

Pour mesurer la résistance à la flexion d'un matériau, notamment sous forme de poutre, on peut utiliser une machine de test qui applique différents types de charges. Les déformations et les contraintes sont ensuite mesurées à l'aide de jauges d'extensomètre et affichées sur un banc de mesure. [43]

**Principe de l'essai**

Si nous examinons une poutre supportée par deux appuis et soumise à une charge verticale concentrée (figure I.6), elle fléchit après déformation. Pendant ce processus, les fibres situées dans la partie supérieure subissent une contrainte de compression tandis que celles situées dans la partie inférieure subissent une contrainte de traction. Entre ces deux régions, il existe une fibre qui n'est ni tendue ni comprimée, connue sous le nom de fibre neutre. Les allongements ou raccourcissements relatifs de la fibre neutre sont proportionnels à la distance  $y$  de la fibre

considérée. Les déformations peuvent être mesurées en utilisant des jauges d'extensomètre et affichées sur un banc de mesure.

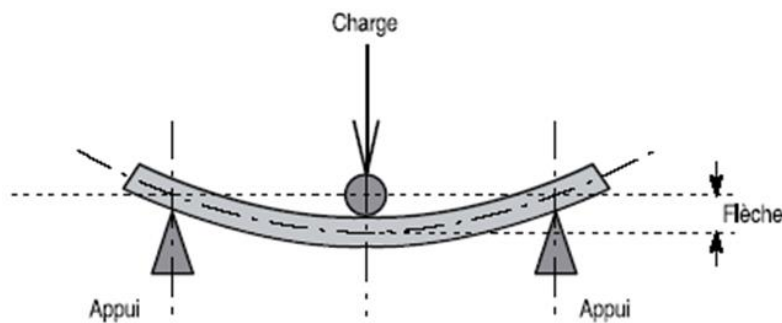


Figure II.6: Essai de flexion

#### II.2.4- Essai de cisaillement [43]

L'essai de cisaillement implique l'application de deux forces opposées sur une éprouvette dans un plan de section droite, avec toutes les sollicitations étant tangentes à la surface d'application et uniformes en tous points de cette surface. Cela diffère des essais de traction ou de compression, où les contraintes prédominantes sont dues à l'effort axial. Par conséquent, un système est considéré comme soumis à un cisaillement lorsque les contraintes prédominantes sont causées par l'effort tranchant et non par une sollicitation perpendiculaire à la surface.

L'essai de cisaillement est un moyen intéressant d'évaluer la qualité d'un collage ou d'une liaison céramo-métallique. Toutefois, il est difficile de réaliser cet essai sans qu'il y ait des Si

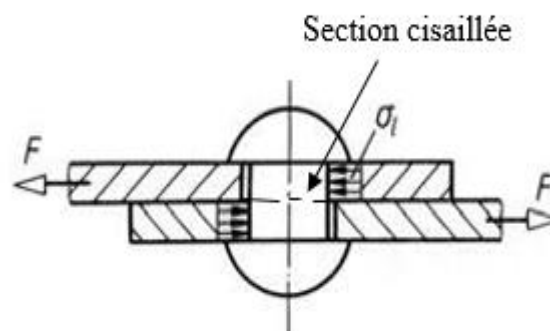


Figure II.7: essai de cisaillement

### II.2.5- Essai de torsion

L'essai de torsion a une importance secondaire relativement aux essais déjà envisagés. Il est destiné pour l'examen des matériaux constituant les arbres et les fils, ainsi que le comportement de la résistance et de ténacité des aciers durs.

#### Principe de l'essai :

On fixe une des extrémités d'une éprouvette cylindrique et on applique à l'autre extrémité un couple de force dans un plan perpendiculaire à l'axe de la barre figure dans ce cas se forme un moment de torsion  $M_t$ .

$$M_t = F \cdot d$$

F : force appliquée

d : diamètre de l'éprouvette

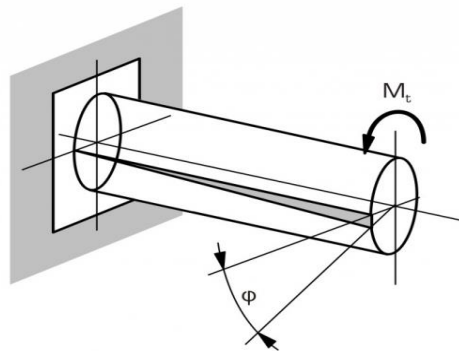


Figure II.8 : essai de torsion

### II.2.6- Essai de résilience(CHOCS) [43]

La résilience caractérise la résistance à la rupture par choc d'un matériau. Un métal résistant bien au choc a une grande résilience symbole K. le plus souvent l'essai de résilience est réalisé à l'aide de l'appareil appelé (**mouton pendule de Charpy**), avec des éprouvettes standardisés.

L'essai de résilience est un essai de rupture fragile effectuée surtout sur des matériaux ductiles. Utilisation d'une éprouvette entaillée (échoué) concentre la déformation sur la plus petite section (entaille). Ce qui conduit à sa rupture après le choc.

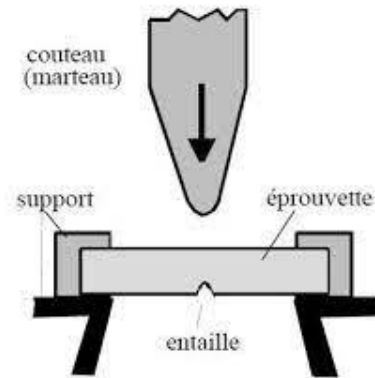


Figure II.9: Essai de résilience Charpy

### II.2.7- 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.

Le nombre minimum d'alternance, qui doit être enregistré avant rupture pour la détermination de la limite de fatigue est généralement de 30 millions pour les alliages ferreux et 100 millions pour les alliages d'aluminium.

Les facteurs pouvant avoir une influence sur la fatigue sont :

- Le nombre de cycle
- État de surface
- Forme de la pièce
- Et dimension de la pièce

L'essai est assez long, si le moteur tourne à 3000tr/min, il faut 167heures, soit à peu près 7jours pour effectuer le nombre minimum d'alternance (30 millions).



Figure II.10: machine d'essai de fatigue

### II.2.8- Essai de dureté

La définition valable pour la dureté est la résistance qu'oppose un corps à la pénétration d'un autre corps plus dur.

La dureté est un complément indispensable de l'examen métallographique, qui donne une première impression sur les caractéristiques mécaniques et corrobore souvent l'interprétation des textures.

Selon le type de charge du corps d'essai lors de la pénétration dans le matériau, on distingue deux procédés :

- Procédé avec action statique (par pénétration)
- Procédé par action dynamique (par rebondissement)

### II.3. Les essais mécaniques multiaxiaux

Les essais mécaniques multiaxiaux sont une source précieuse d'informations pour tester les modèles de déformation. Malheureusement, leur utilisation est limitée en raison des difficultés expérimentales qu'ils présentent. Les essais couramment pratiqués comprennent 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 utile pour tester les aspects d'anisotropie. Dans cette présentation, nous nous concentrerons sur les essais de traction biaxiale et de traction-torsion. [44]

Les essais multiaxiaux peuvent être réalisés selon deux modes : en phase ou hors phase, en fonction du fait que l'éprouvette subisse ou non simultanément différentes sollicitations. Les déplacements et les surfaces appliquées peuvent être mesurés de la même manière que pour les essais de traction uniaxiale. [45]

Les essais peuvent être utilisés soit dans des conditions quasi statiques, soit pour des essais de fatigue multiaxiale.

### **II.3.1. Traction biaxiale**

Les essais de traction biaxiale consistent à soumettre une éprouvette à une contrainte dans deux directions perpendiculaires. Pour réaliser cet essai, des éprouvettes cruciformes doivent être utilisées. Afin d'obtenir des états de contrainte uniformes, les bras de la croix doivent avoir une rigidité transversale suffisamment faible, ce qui peut être réalisé en les évidant. Les directions principales des contraintes sont prédéfinies, et il est possible d'appliquer des charges dans l'espace de contrainte. [46]

- **But de l'essai**

L'objectif de ces essais est d'élargir les capacités d'identification du comportement plastique lorsqu'une éprouvette est soumise à une sollicitation biaxiale. Pour réaliser ces essais, il est nécessaire de disposer d'une machine ou d'un dispositif qui applique un système de déplacements orthogonaux sur une éprouvette en forme de croix. [47]

- **Principe d'utilisation**

Les tests de traction biaxiale impliquent l'application de contraintes dans deux directions perpendiculaires sur une éprouvette cruciforme pour créer des états de contrainte uniformes. Afin d'assurer l'uniformité des contraintes, il est nécessaire d'avoir des bras de croix avec une faible rigidité transversale. Les directions principales des contraintes étant fixées, il est possible d'effectuer des chargements dans l'espace qui leur est associé.

- **Les dispositifs de traction biaxiale**

Le dispositif de traction biaxiale est constitué d'un ensemble articulé, sans forme propre en l'absence d'éprouvette. La mise en place de l'éprouvette nécessite l'utilisation d'un dispositif annexe qui sert d'appui pour les mors de fixation de l'éprouvette. Il est important que le serrage soit le même sur les quatre bras de l'éprouvette [48].

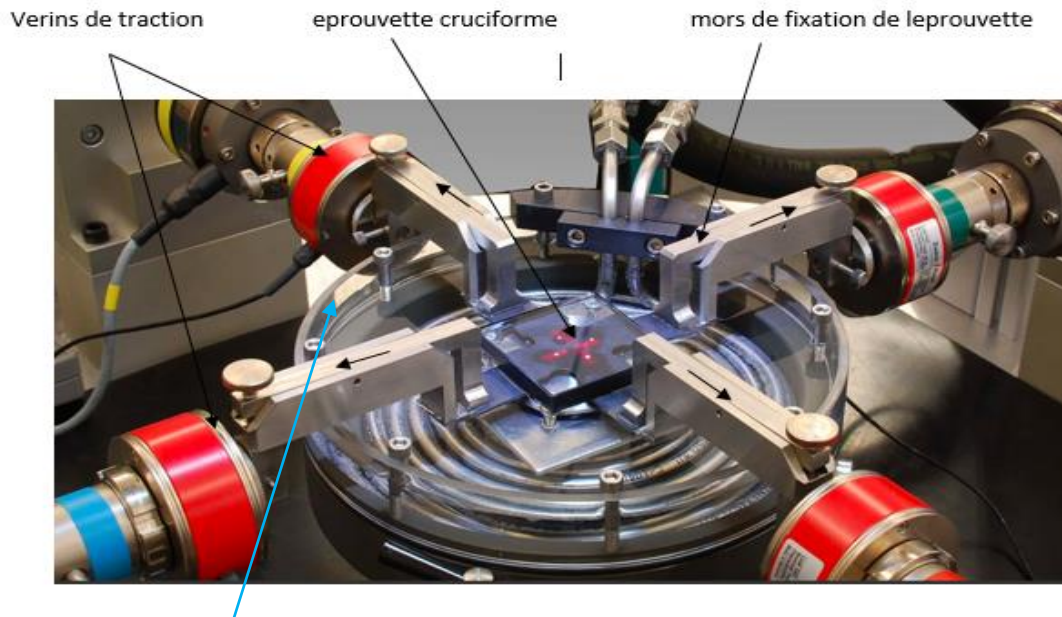


Figure II.11 : essai de traction biaxiale

#### • les éprouvettes cruciformes

Les éprouvettes en traction biaxiale sont des pièces cruciformes ayant une forme en croix.

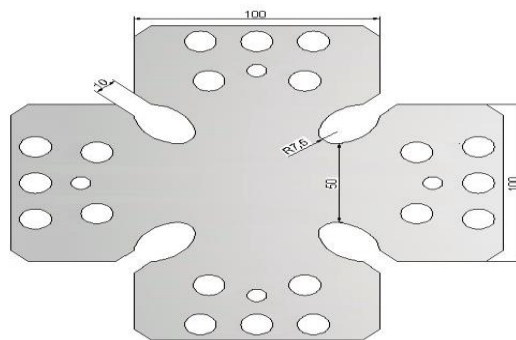


Figure II.12 : exemple d'éprouvette cruciforme [48]

### II.3.2. Traction-torsion

Grâce à ce type d'essais, il est possible d'analyser des trajectoires de charge impliquant des altérations dans les directions primaires des contraintes. La machine utilisée est composée d'un vérin linéaire et d'un vérin torique munis d'un système de découpe. [46]

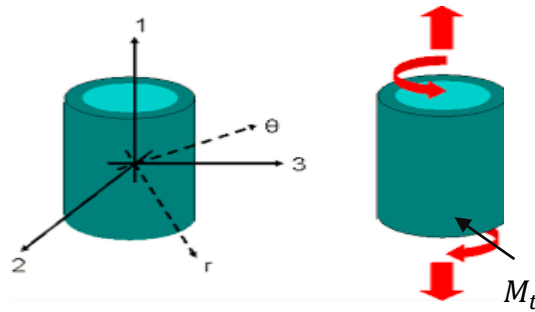


Figure II.13: essai de traction-torsion

#### • Principe de l'essai

L'essai couramment utilisé pour établir la loi de comportement en contraintes biaxiales consiste à soumettre un tube mince à la torsion, afin d'analyser les trajectoires de charge impliquant des altérations dans les directions primaires des contraintes de découpe.

### II.3.3. Essai de traction-cisaillement

#### II.3.3.1. Essai Arcan

L'essai Arcan a été conçu pour étudier et décrire le comportement ainsi que l'endommagement des matériaux composites. Il est également employé pour examiner des problématiques telles que la propagation et l'ouverture de fissures. [49]

Cette méthode expérimentale permet de contrôler et de combiner avec précision des sollicitations de traction perpendiculaire et de cisaillement transverse au sein d'une éprouvette.

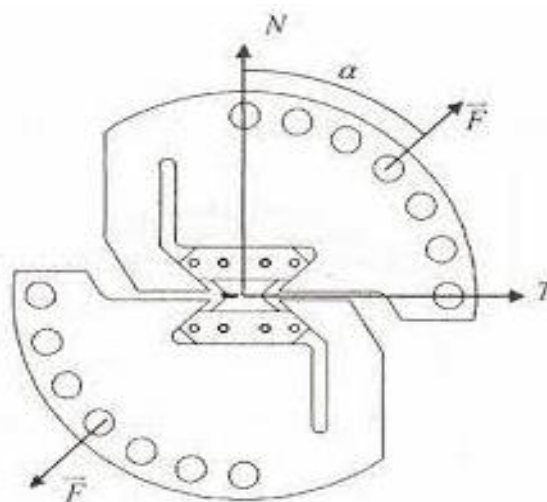


Figure II.14: dispositif de l'essai arcan

**II.3.3.1.2. Principe de l'essai Arcan**

Deux supports angulaires sont connectés à deux bases qui encadrent l'échantillon à tester. La répartition de la (traction perpendiculaire / cisaillement transverse) le long de l'axe de chargement dans une machine d'essai uniaxiale est déterminée par l'orientation de ces deux supports angulaires par rapport à l'axe de chargement. En faisant varier cette orientation, plusieurs combinaisons de sollicitations peuvent être obtenues.

**II.3.3.1.3. Objectif**

Le dispositif est placé au centre de l'éprouvette papillon, comme indiqué sur la figure, dans le but d'appliquer une contrainte normale  $\sigma_{xx}$  et  $\sigma_{yy}$  ainsi qu'une contrainte tangentielle  $\sigma_{xy}$  en utilisant une force verticale  $F$ . L'orientation de la section centrale est ajustée en modifiant l'angle  $\alpha$  par rapport à la direction de la charge verticale. Le sens de l'effort  $F$  et la valeur de l'angle permettent de créer divers états de contraintes planes, tels que la traction-compression combinée ou le cisaillement simple.

**II.4. Conclusion**

Le chapitre a exposé les divers types d'essais mécaniques ainsi que les différentes éprouvettes requises pour chaque essai. Les essais uniaxiaux ont été détaillés, leur utilisation permettant de mesurer les propriétés mécaniques des matériaux telles que la limite d'élasticité, la résistance, le module de Young et l'allongement.

***Chapitre III : conception et fabrication de  
l'appareil de gonflement sur les élastomères***

### **III.1. Introduction**

Dans ce travail, l'intérêt est porté sur l'étude du comportement mécanique des élastomères par l'essai de gonflement. Pour ce faire une conception d'un appareil de gonflement a été réalisé en utilisant le logiciel SolidWorks.

### **III.2. But de l'appareil**

L'objectif de dispositif est déformer une plaque en élastomère par gonflement à l'aide d'une pression d'air et de mesurer le champ de déformation engendrée par cette pression.

#### **III.2.1. Cahier de charge**

La réalisation de dispositif de gonflement doit permettre l'application d'une pression d'air et de mesurer les déformations dans le centre d'une éprouvettes plane sous forme d'une membrane.

#### **III.2.2. Diagramme « bête à cornes »**

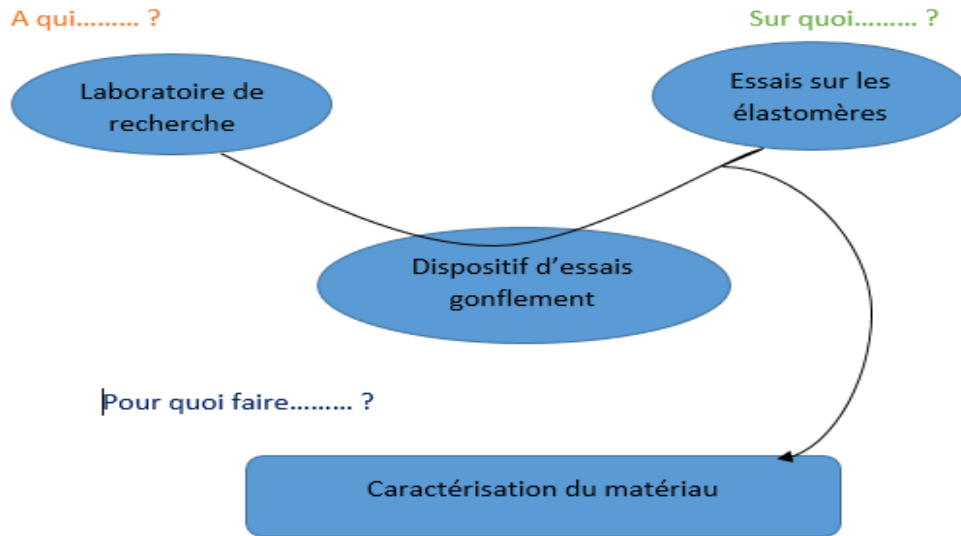
La bête à cornes est un outil d'analyse fonctionnaire du besoin. En matière d'innovation, il est tout d'abord nécessaire de formuler le besoin sous forme de fonction simples (dans le sens de « fonctions de bases ») que devra remplir produit ou le service.

L'expression du besoin permet d'isoler l'objet étudié afin d'identifier le principal destinataire, sa matière d'œuvre, et d'exprimer sa fonction globale.

Pour établir la bête à corne, il est essentiel de se poser les trois questions suivantes :

- A qui, à quoi le produit rend-il service ?
- Sur qui, sur quoi agit-il ?
- Dans quel but ?

L'expression du besoin est un outil de ces questions fondamentales.

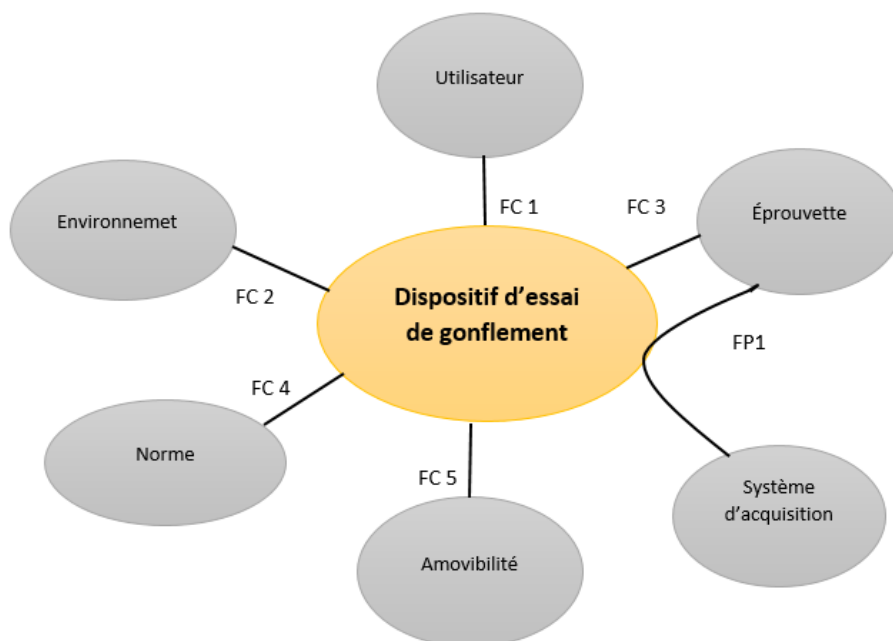


**Figure III.1** : diagramme « bête à cornes »

### III.2.3. Diagramme « pieuvre »

Le diagramme « pieuvre » met en évidence les relations entre les différents éléments du milieu environnant et le produit. Ces différentes relations sont appelées les fonctions de service qui conduisent à la satisfaction de besoin.

#### III.2.3.1. Diagramme de « pieuvre » pour le besoin



**Figure III.2** : diagramme de pieuvre

**III.2.3.2. Contraintes et fonctions principales de besoin**

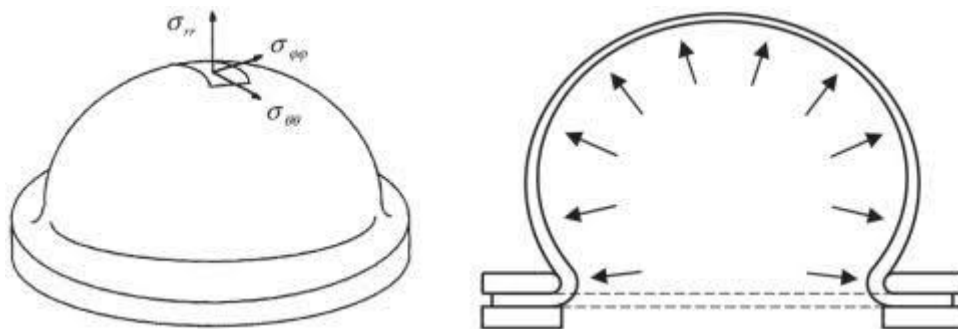
	Fonctions	Critères	Niveaux
<b>FP 1</b>	-Respecter les contraintes dimensionnelles et géométrique	-serrage, jeu .... -Coaxialité , perpendicularité,	/
<b>FC 1</b>	-Etre simple d'utilisation et de maintenance	-poids, encombrement -Entretien	...Kg -Graissage
<b>FC 2</b>	-Résister à l'environnement	-Milieu extérieure	-poussière, Humidité, ....
<b>FC 3</b>	-Transmettre les effort de traction biaxaile aux éprouvettes	-adaptation des efforts	/
<b>FC 4</b>	-Respecter les normes des éprouvettes	-Normes	-Normes européenne
<b>FC 5</b>	-Etre amovible	-Montage et démontage faciles	/

**Tableau.II.1** : contraintes et fonction principales

**III.3. Choix de l'appareil**

**III.3.1. Les différentes sollicitations possibles**

La membrane en élastomère de forme circulaire de faible épaisseur est fixée sur sa périphérie, subie une pression d'air à son centre en générant son gonflement (Figure III.3).



**Figure III.3** : une membrane gonflée au centre

### **III.4. Fonction de l'appareil**



*Figure. III.4 : Schéma représente la fonction de l'appareil*

La pression d'air est générée par un compresseur ou à l'aide d'une bouteille sous pression, est introduite au-dessous de la membrane en élastomère fixée entre un disque et une couronne provoquant son gonflement.

### **III.5. Les solutions proposées**

#### **III.5.1. La première solution :**

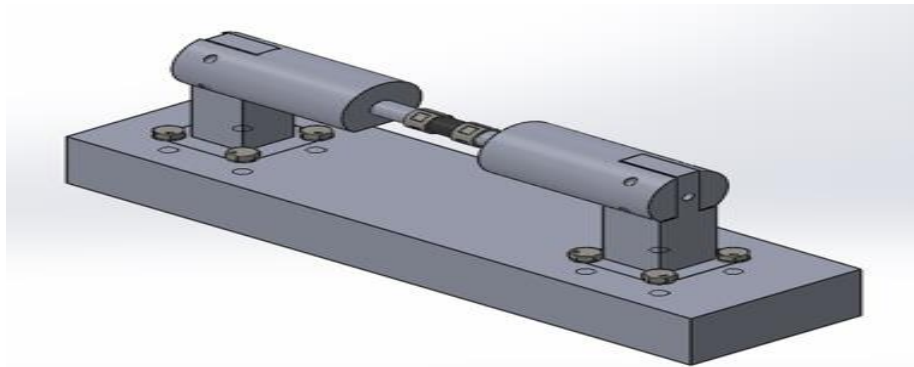
##### **III.5.1.1. Système de de gonflement sur des élastomères plans**



**Figure III.5 :** Schéma de principe de la première solution

### **III.5.2. La deuxième solution**

#### **III.5.2.1. Système de gonflement sur des élastomères cylindriques**



**Figure III.6 :** Schéma de principe de la deuxième solution

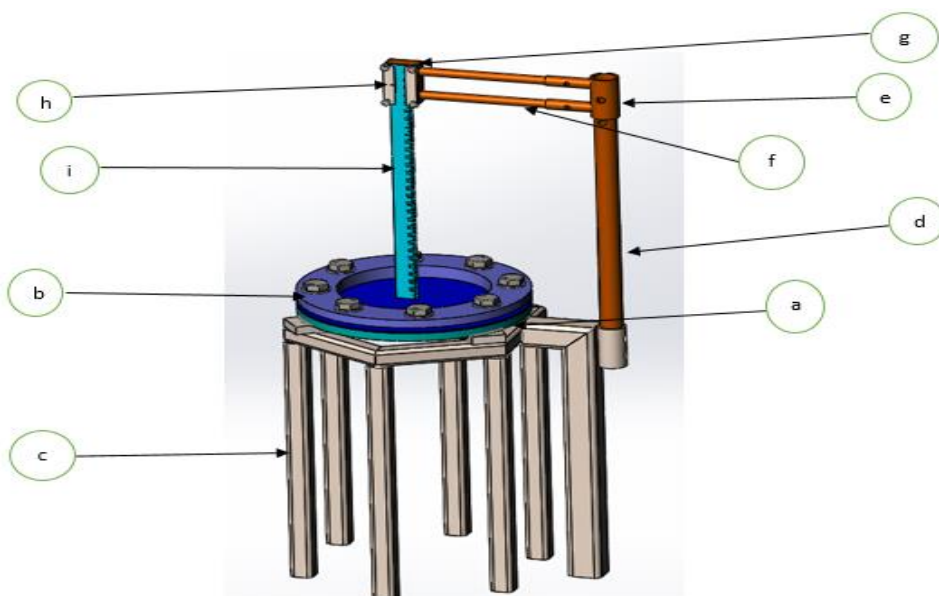
### **III.6. Dispositif à réaliser**

On a opté pour la réalisation de l'appareil proposé dans la première solution qui présente un système de mesure de déformation par réglette graduée coulissante.

#### **III.6.1. Contraintes techniques :**

Les formes et les dimensions de l'ensemble des éléments constitutifs de cet appareil sont liés à la géométrie de la membrane.

#### **III.6.2. Vue du dispositif à réaliser**



**Figure. III.7 :** Schéma du dispositif à réaliser

Le dispositif de gonflement doit assurer :

- Une fixation optimale de la plaque de l'élastomère afin d'assurer l'étanchéité et d'éviter toute perte de pression lors des essais.
- Une mesure de déformation à l'aide d'une réglette guidée en translation verticalement au cours de l'essai.

Le dispositif est constitué des éléments suivants (figure III.3) :

- Disque
- Couronne
- Support
- Support verticale
- Glissière porte tige
- Tige de guidage
- Maintien de glissière
- Glissière de réglage
- Réglette

### **III.6.3. Description du dispositif**

#### **III .6.3.1. Principaux éléments constitutifs**

Le dispositif d'essai de gonflement sur des élastomères plane est constitué essentiellement : D'un disque inférieur (a), d'une couronne (partie supérieure) (b), d'un support(c), d'un support vertical(d), d'une glissière porte tige(e), d'une tige de guidage(f), d'un maintien de glissière(g), d'une glissière de réglage(h), d'une réglette(i).

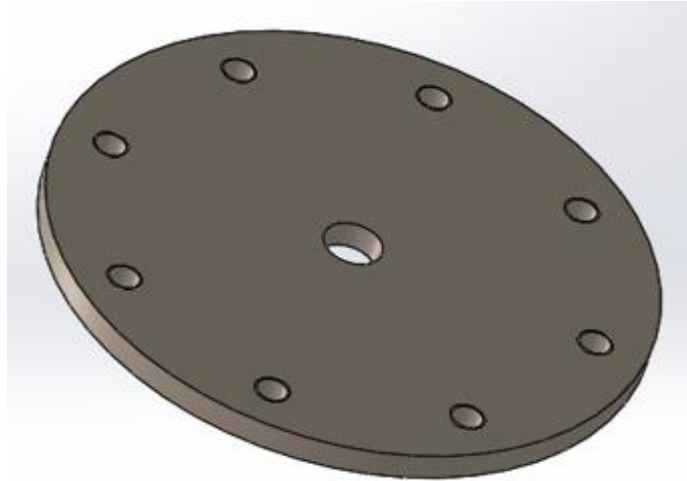
#### **III.6.3.2. Principe de fonctionnement**

L'éprouvette est placée sur l'appareil du gonflement entre un disque et une couronne en acier puis fixée par serrage à l'aide des vis. La pression d'air introduite par un orifice latéral provoque le gonflement de cette éprouvette. Les déformations sont mesurées par une réglette coulissante positionnée verticalement e tangente à l'éprouvette à son centre.

**III.6.3.3. Description des principaux éléments du dispositif :**

**a) Disque**

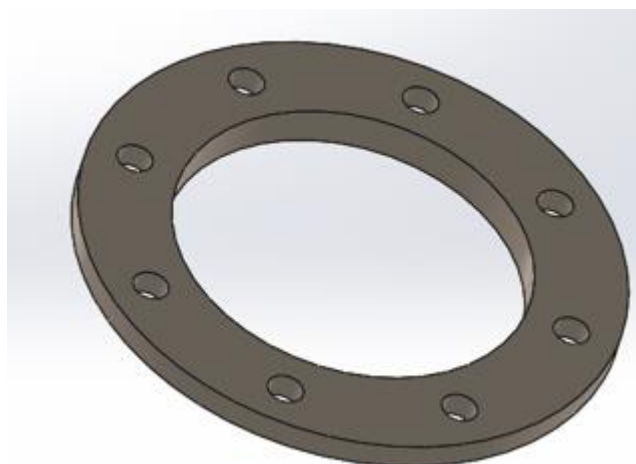
C'est un disque de diamètre 205mm et une épaisseur de 10mm, contenu dans sa périphérie 8 trous taraudés M 12 × 1.5 . Au milieu un orifice taraudés M4 est réalisé afin de fixer le flexible d'admission de l'air.



**Figure III.8 :** disque

**b) Couronne**

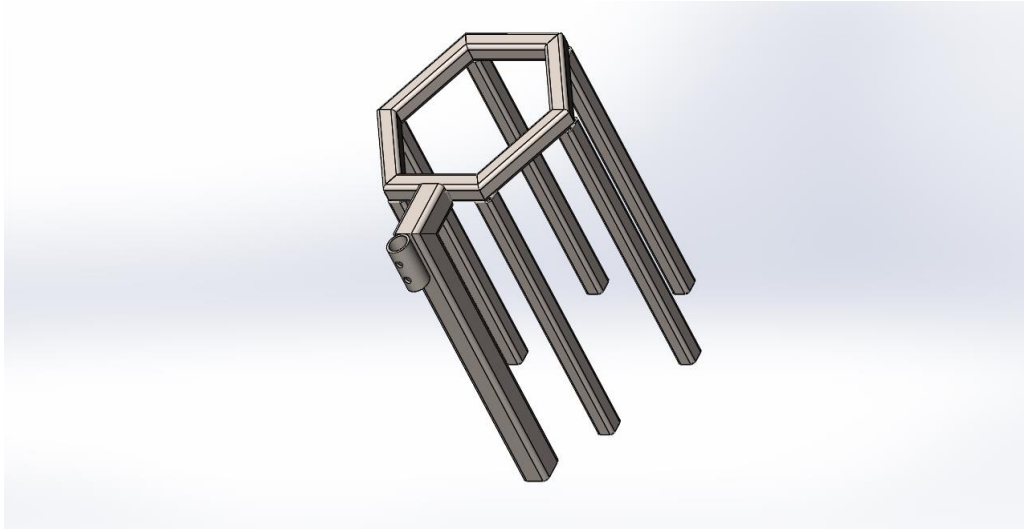
C'est une couronne de diamètre extérieur et intérieur 205mm et 135mm respectivement et d'une épaisseur de 10mm. Sur sa périphérie 8 trous de diamètre 12mm Sont réaliser. Cette dernière doit fixer la plaque en élastomère et d'assurer l'étanchéité de celle-ci par rapport au disque.



**Figure III.9 :** Couronne

**c) Support**

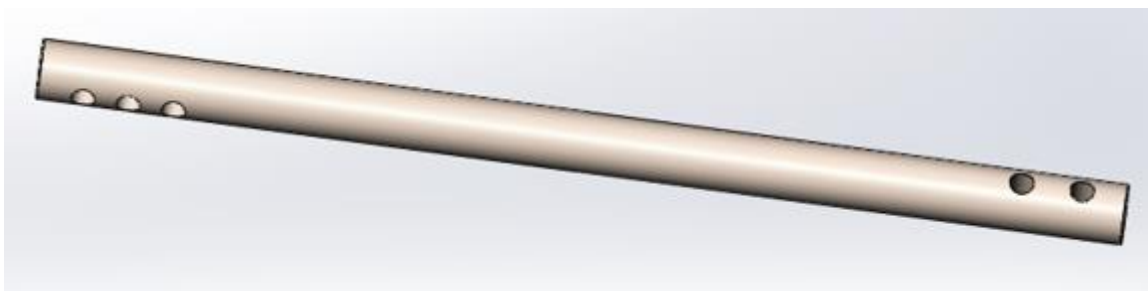
C'est un support de  $230 \times 200 \times 500$ mm qui sert à maintenir le disque, couronne et la plaque de fixation .



**Figure III.10 : Support**

**d) Support verticale**

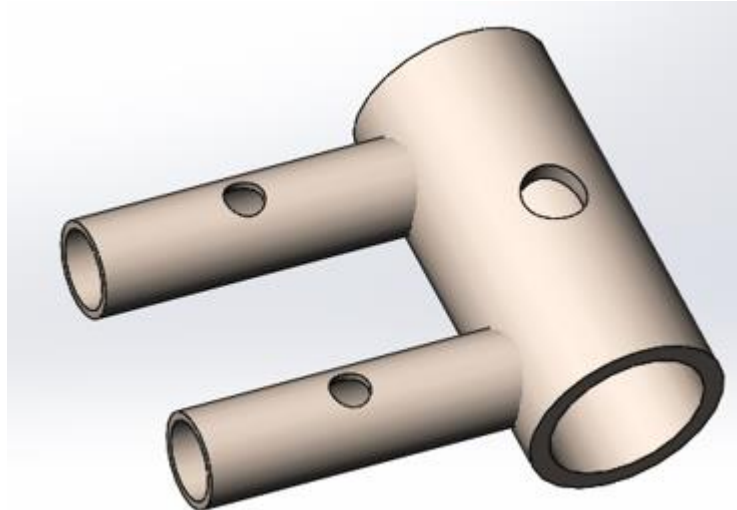
C'est une pièce cylindrique de dimension  $360 \times 20$  sert à maintenir la glissière porte tige ,avec cinq trous de diametre M8.



**Figure III.11 : Support verticale**

**e) Glissière porte tige :**

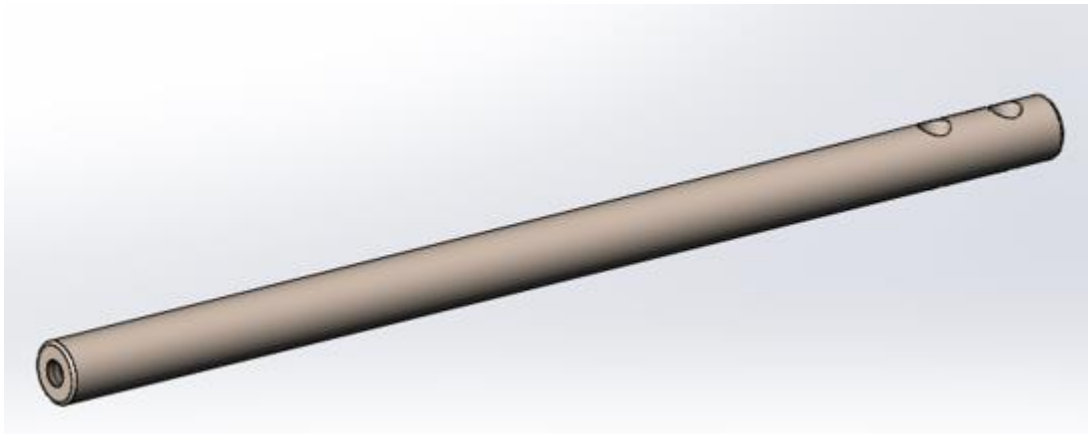
C'est une pièce cylindrique de dimension  $50 \times 25$  mm avec un trou de 20mm et 2 cylindre de dimension  $40 \times 15$ mm pour le maintien des tiges de guidage(figure III.9).



**Figure III.12 :** glissière porte tige

**f) Tige de guidage :**

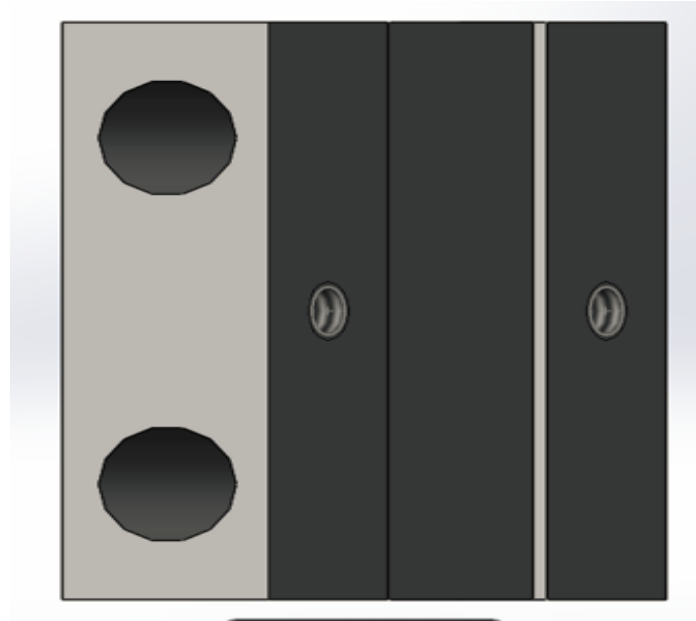
C'est une tige de dimension  $170 \times 10 \text{ mm}$  avec deux trous de diamètre M5.



**Figure III.13 :** tige de guidage

**g) Plaque supérieure :**

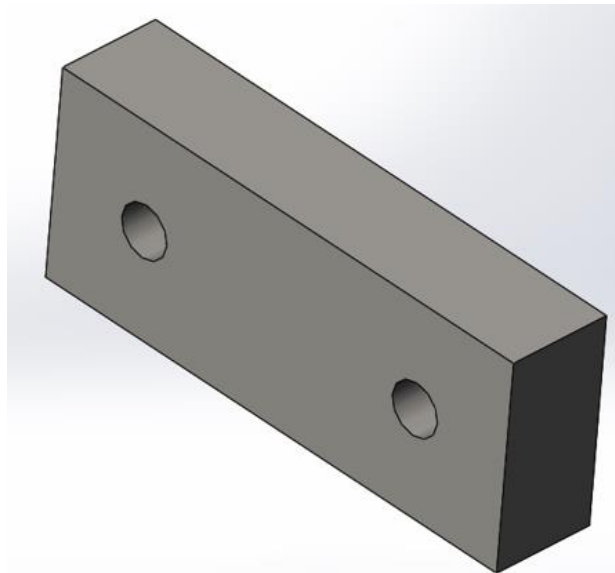
C'est une pièce prismatique de dimension  $50 \times 50 \times 15 \text{ mm}$ , avec une rainure de dimension  $20 \times 1 \text{ mm}$ . Les trous de dimension M5 réalisés pour le maintien de la plaque de fixation.



**Figure III .14 : Plaque supérieure**

**h) plaque de fixation :**

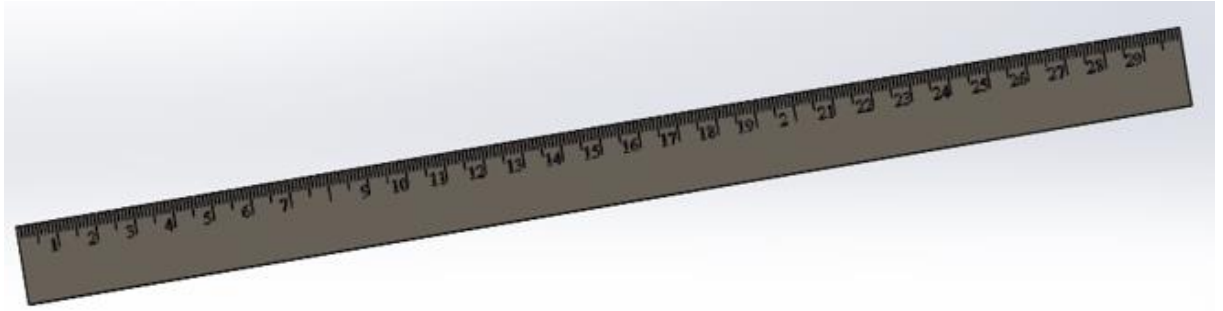
c'est une pièce de dimension  $50 \times 30 \times 10$  mm, réaliser pour fixer la réglette sur la renieur de la plaque supérieure.



**Figure III.15 : plaque de fixation**

**i) Réglette :**

Une réglette de dimension  $300 \times 20 \times 1$ mm .



**Figure III.16 :** réglette

### **III.7. Dimensionnement du dispositif :**

Dans cette section, nous nous concentrerons sur la vérification de la résistance de certains composants du dispositif et sur le calcul des dimensions nécessaires pour la transmission.

#### **III.7.1. Choix des matériaux**

Les matières premières sont des substances initialement dépourvues de forme, nécessitant une mise en forme. Chaque matière première présente des caractéristiques spécifiques qui influencent leur utilisation potentielle. Dans le cadre de la sélection des matériaux pour notre dispositif, nous avons principalement basé nos choix sur les stocks disponibles dans nos ateliers. Les critères pour lesquelles nous avons optés du choix de la matière sont :

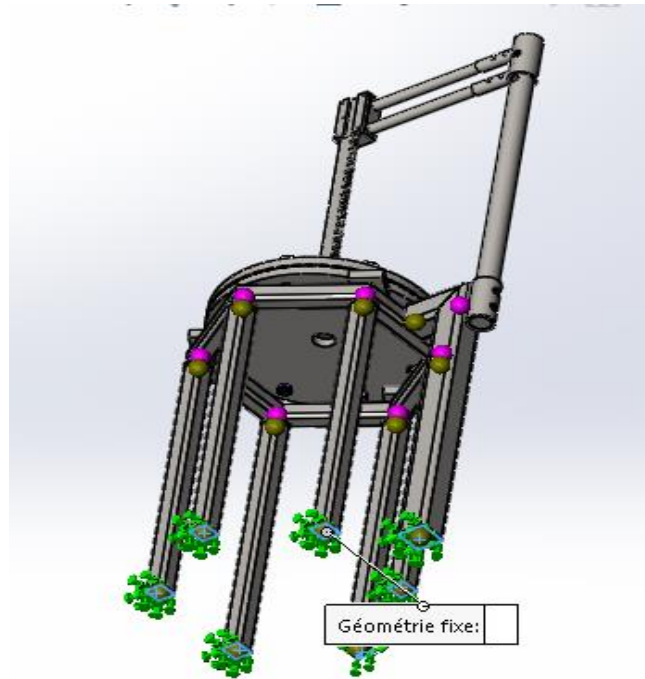
- \* Critères de poids.
- \* Critères d'aptitude à l'usage

On a surtout employé les aciers non alliés telles que le XC48.

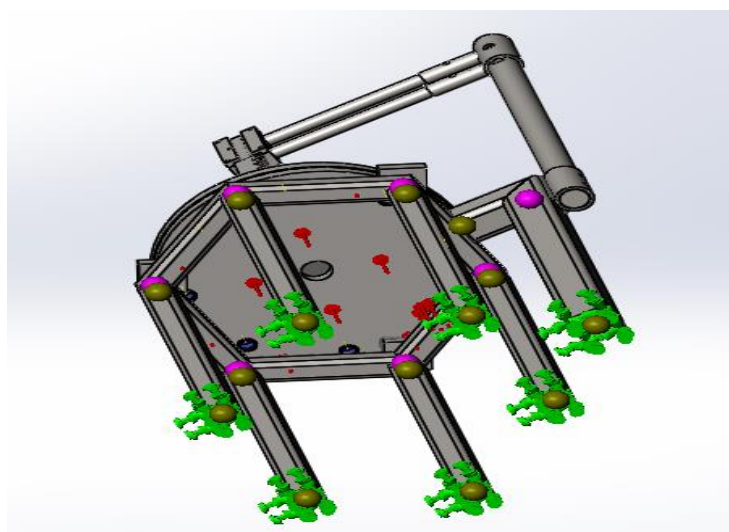
### **III.8. Simulation numérique du dispositif par le logiciel SolidWorks**

Le dispositif d'essai de gonflement conçu, a été optimisé pour les essais sur les polymères, en particulier sur les élastomères qui ont une ductilité importante. La vérification de la rigidité du dispositif, a été donc faite en utilisant une éprouvette sous forme de membrane en élastomère d'épaisseur de 2 mm. La simulation par le logiciel « Solidworks simulation » repose comme toute autre technique numérique d'analyse des structures, sur la méthode des éléments finis. Pour tout projet d'analyse pièce mécanique à l'assemblage complexe elle passe par des étapes principales en commençant par le modèle SolidWorks de la pièce ou de

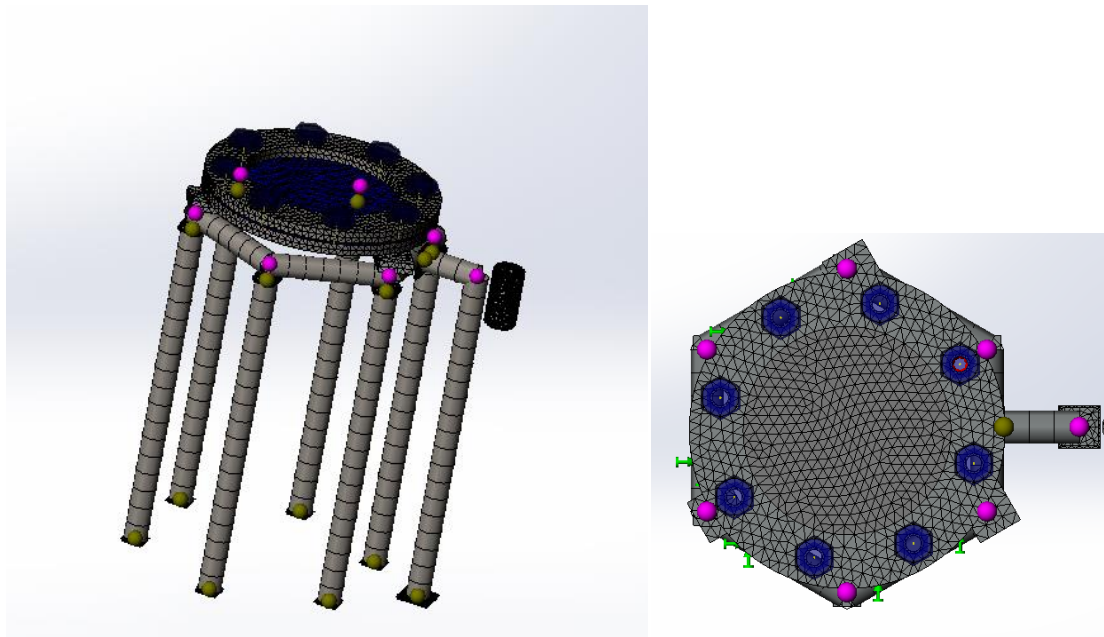
l'assemblage. A ce dispositif, nous avons appliqué des propriétés du matériau et nous avons définissons des déplacements imposés sur les appuis du support (**Figure III.17**). En deuxième étapes nous avons appliqué le chargement imposé qui est une pression sur la face inférieure de la membrane (**Figure III.18**). Le maillage triangulaire est utilisé pour discrétiser tous les composants du dispositif (**Figure III.19**).



**Figure III.17** : Déplacements imposés sur le support du dispositif

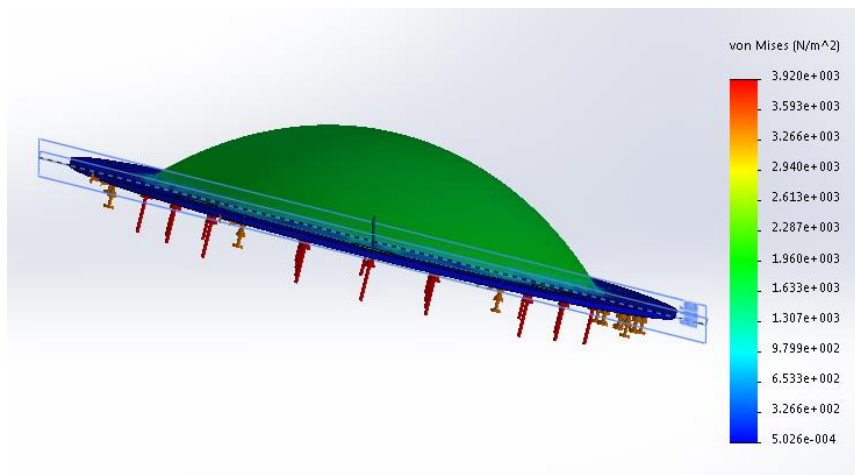


**Figure III.18** : chargements imposés sur l'éprouvette



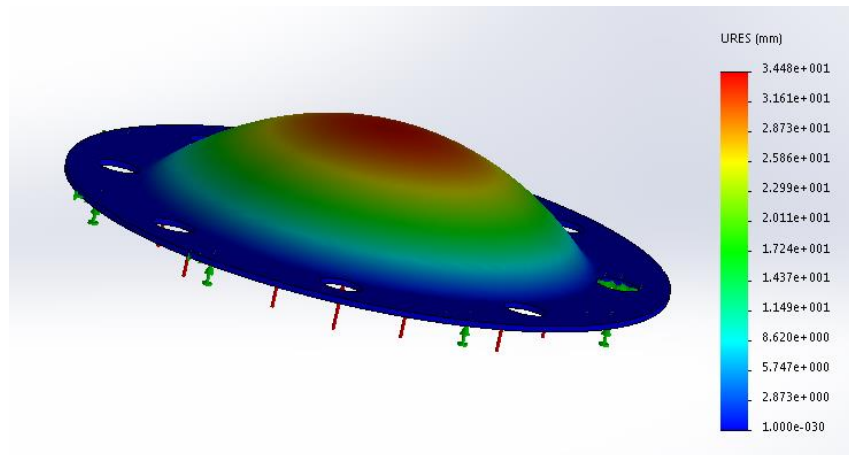
**Figure III.19 :** Maillage du dispositif par SolidWorks simulation

Sur **Figure III.20**, nous montrons la distribution des contraintes dans la membrane. La distribution de ces contraintes est uniforme dans la toute la zone libre de la membrane délimitée par le diamètre intérieur de la couronne du dispositif.



**Figure III.20 :** Distribution des contraintes dans la membrane

La distribution des déformations dans la membrane est montrée par la **Figure III.21**. Le centre de cette membrane est caractérisé par la maximum de déformation qui peut être mesuré par la règle fixée verticalement dans le dispositif d'essai de gonflement et tangente au centre de cette membrane.



**Figure III.21** : Distribution des déformations dans la membrane

Les résultats de la simulation montrent l'effet de la pression de l'air sur la membrane fixée sur le dispositif de gonflement. Ainsi, la membrane subit une déformation localisée dans la zone centrale de celle-ci. Le dispositif conçu peut être alors utilisé dans les essais de gonflement des élastomères.

### **III.9. Fabrication du dispositif de gonflement**

Les composants du dispositif ont été fabriqués en utilisant des techniques d'usinage conventionnelles, notamment le tournage et le fraisage, ainsi que l'utilisation d'autres équipements tels qu'un diviseur universel et un plateau diviseur, afin de respecter les tolérances dimensionnelles et géométriques nécessaires pour assurer le bon fonctionnement du dispositif.

#### **1)Disque :**

C'est une pièce cylindrique réalisée sur un tour parallèle. La pièce est fixée entre les mors de mandrin, le mouvement de coupe est obtenu par rotation de la pièce tandis que le mouvement d'avance est obtenu par déplacement de l'outil coupant. Les différentes opérations exploitées pour réaliser cette pièce sont : le chariotage, le dressage, le perçage et le filetage. Les 8 trous de diamètre M12 ont été percés sur la fraiseuse à l'aide d'un plateau diviseur.



**Figure III.22 :** Opération de dressage

### **2) Couronne :**

C'est une pièce cylindrique de matière XC48 réalisée sur un tour parallèle, avec le même procédé que le disque. Les 8 passages de vis réalisés par un plateau diviseur sur une fraiseuse verticale.



**Figure III.23 :** opération de dressage



**Figure III.24 :** opération de perçage avec l'utilisation d'un plateau diviseur

### **3) plaque de séparation :**

C'est des plaques prismatiques réalisées sur une fraiseuse verticale avec une seule opération qui est le surfacage.



**Figure III.25 :** opération de surfacage

#### **4)Support verticale :**

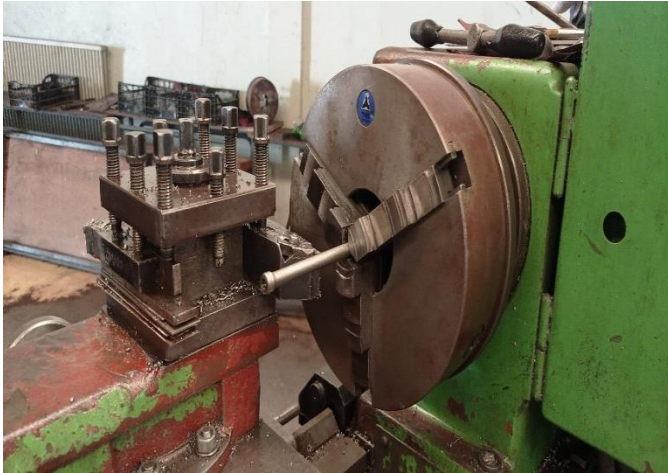
Une tige cylindrique réalisée sur un tour parallèle. Les différentes opérations exploitées pour réaliser cette pièce sont : le chariotage, le dressage, le perçage des trous et le filetage.



**Figure III.26:** opération de perçage

#### **5)Tige de guidage :**

La tige de guidage est une pièce cylindrique réalisée sur un tour parallèle avec le même procédé que le support vertical.



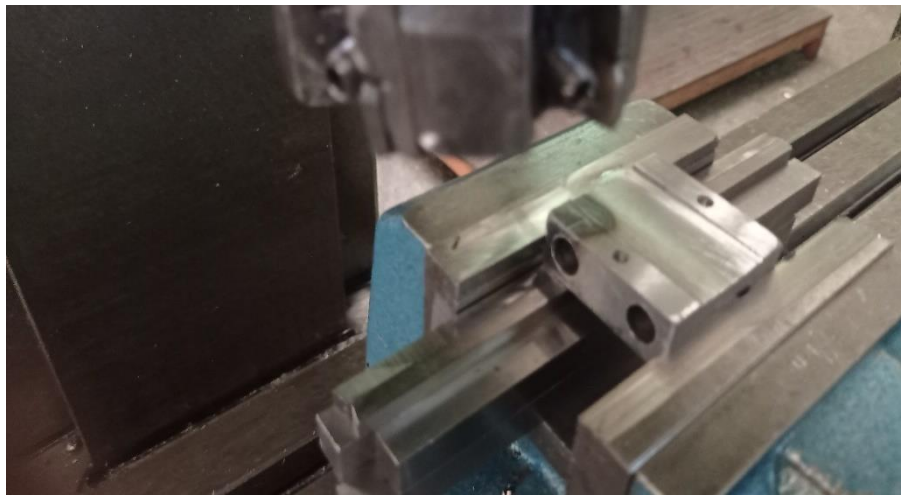
**Figure III.27:** opération de chariotage



**Figure III.28:** opération de perçage

#### **6)Plaque supérieure :**

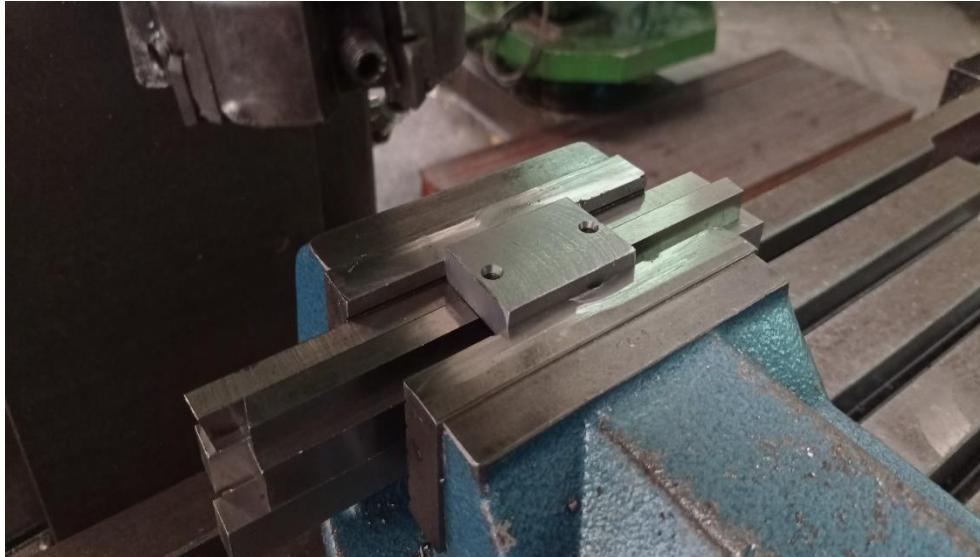
Une pièce prismatique réaliser sur une fraiseuse verticale. Les procédés suivie pour réaliser cette pièce sont : le fraisage et le perçage.



**Figure III.29:** plaque supérieur

#### **7)Plaque de fixation :**

Une pièce prismatique réaliser sur une fraiseuse verticale, avec les procédés que la plaque supérieure.



**Figure III.30:** plaque de fixation

**8) Glissière cylindrique :**

Cette pièce se divise en trois cylindres réalisés sur un tour parallèle. Ces derniers sont réalisés avec les mêmes procédés qui sont : le chariotage, le dressage, le perçage des trois et le soudage pour avoir la forme finale de la pièce.



**Figure III.31:** glissière cylindrique

**9)Support :**

C'est un ensemble de tubes carrés obtenue par tôlerie. Ces derniers sont assemblés avec des soudures de 2mm sur un poste à souder.



**Figure III.32:** support

**III.10. Vue réel de dispositif à réaliser :**



**Figure III.33:** appareil réaliser

### **III.11. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons exposé des solutions en adéquation avec les exigences fonctionnelles spécifiées dans le cahier des charges. Ensuite, nous avons approfondi la solution choisie pour ce projet en la détaillant à travers une étude et une conception assistées par ordinateur (CAO), ainsi qu'une simulation effectuée avec le logiciel SolidWorks Simulation. De plus, nous avons également présenté divers procédés d'usinage pour la fabrication des composants du dispositif."

# **Conclusion générale**

## Conclusion générale

L'objectif principal de ce travail consiste à concevoir un dispositif de gonflement sur les élastomères puis sa fabrication. Afin de mener à bien cette tâche, nous avons décidé de réaliser notre projet de fin d'études dans le hall de technologie, ce qui revêt une importance cruciale tant sur le plan pratique que théorique. Cette démarche nous a permis d'acquérir des compétences élargies dans le domaine de l'usinage, notamment en ce qui concerne le tournage, le fraisage, le perçage, et bien d'autres techniques.

Au cours de notre projet de fin d'études, nous avons pu constater les défis associés à l'application des connaissances théoriques dans un environnement industriel.

Par ailleurs, il convient de souligner que cette étude nous a offert l'opportunité de nous familiariser avec SolidWorks, un logiciel largement employé dans l'industrie pour la conception assistée par ordinateur.

Ce pendant, ce travail a abouti à la conception et à la réalisation d'un dispositif d'essai de gonflement destiné aux essais sur les élastomères. Ce dispositif permet d'appliquer une pression d'air sur une membrane circulaire en élastomère fixée entre une couronne et un disque en acier, provoquant son gonflement. La mesure de la déformation de la membrane à l'aide d'une réglette coulissante permet de déterminer les caractéristiques mécaniques de l'élastomère étudié.

Ainsi, après la conception des différents composants de ce dispositif par le logiciel Solidworks, leur fabrication a été réalisée au niveau du Hall de technologie de l'UMMTO avec les moyens techniques disponibles. L'assemblage de ces composants a été achevé après certaines corrections en donnant le dispositif d'essai de gonflement prêt à l'utilisation. Les divers composants et le dispositif sont représentés à travers des schémas et des illustrations, permettant de détailler leurs caractéristiques dimensionnelles et géométriques.

En fin, des travaux de caractérisations des élastomères par gonflement peuvent être réalisés en utilisant ce dispositif. Des améliorations peuvent être apportées si des anomalies seront constatées.

## Références Bibliographiques

- [01]. **J.-M. Berthelot**, Matériaux composites : comportement mécanique et anaf.vse des structures. MASSON ed. Vol. 2 erne édition. 1996. 620.
- [02]. **Gahleitner, M., et al.**, Post-Ciystallization and physical aging of pof. vpropylene:  
Material and processing effects. Journal of Macromolecular Science - Physics,  
2002.41 8(4-6)
- [03] **J,perez**,physique et mécanique des polymère ,Lavoisier ed.
- [04] -Internet  
« Commission européenne-Ministère de L'écologie, de L'énergie, du durable et de la Mer ».
- [05] -Internet  
« IUT TROYES -Génie Mécanique Et Productique-\* Module Plasturgie  
D. GRIDAINE 2009-2010 \*».
- [06] : **Nathalie MAYER**, définition PMMA-Polyméthacrylat de Méthyle, article FUTURA  
SCIENCES 2001
- [07]. **Guy Lv** (contribution au recyclage des polypropylene par une thermolise Ménagée en solution. Thèse d'état de l'Université Claude Bernard –Lyon.
- [08]. **M.Avrani**, Kinetics of phase change. i. Journal of Chemical Physics, 1939.
- [09] **I.H. Hall**, structure of crystalline polymer, Elsevier Applied Science ed.
- [10]. **Dudic, D., V. Djokovic, and D. Kostoski**, The high temperature secondary crystallisation of aged isotactic polypropylene. Polymer Testing, 2004.
- [11]. **Elmajdoubi, M. and T. Vu-Khanh**, Effect of cooling rate on fracture behavior of polypropylene. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2003.
- [12]. **Msuya, W.F. and C.Y. Yue**, Correlation betvveen the! amel/ar thickness and the degree of crystallinity in semi crystalline polymers. Journal of Materials Science Letters, 1989.
- [13] - **Marc Cerrega et all** ; “Matériel industriel matériaux polymères”. 2eme édition

[14] - **J P trotignon** ; “ Matière plastique”, édition Nathan ,2006 Paris

[15] : **GOTFRIED W. Ehrenstein**, Fabienne Montagne matériau polymérisée : structures.

Propriétés et application ; Hermès, science publication, 2000.

[16] **Marisa C.G. Rocha, Antonio H.M.F.T. Silva, Fernanda M.B. Coutinho and**

**Ana Lucia N. Silva.** Study of composites based on polypropylene and calcium carbonate by experimental design. Polymer Testing, 2005, vol 24,

[17] **Mercier JP, Zambelli G, Kurz W.** Introduction à la science des matériaux. Lausanne : Presses Polytechniques et Uni-versitaires romandes, 1999.

[18] **Brantley WA, Eliades T.** Orthodontic Materials. Scientific and Clinical Aspects. Stuttgart, New York: Thymes, 2001, 310 p.

[19] **Ebailon JP, Dorlot JM.** Des matériaux. 3e édition. Paris : Ed. Presses Internationales Polytechnique, 2000, 736 p.

[20] **Lagache S.** Etude in vitro du fluage et de la relaxation des chaînettes élastomériques en Orthodontie. Mémoire CECSMO. Lille : Université de Lille 2, 2006.

[21] **Ashby MF, Jones DRH.** Matériaux. Tome 1 : Microstruc-ture et mise en œuvre. Tome 2 : Propriétés et applications. Paris : Ed. Dunod, 1998.

[22] **Amar-Mamou I.** Comportement colorimétrique des aux-iliaires élastomériques esthétiques en fonction du temps en orthodontie (étude in vitro). Mémoire CECSMO. Paris : Université Diderot, 2004

[23] **Chassaing-Wolton I.** Mesures des variations des forces délivrées par les chaînettes élastomériques en fonction de leurs altérations dans le temps (étude in vitro et in vivo). Mémoire CECSMO. Paris : Université D. Diderot, 1996.

[24] **Huet A, Montandreau E.** Étude des chaînettes élastomériques et de leur relaxation. Orthod Fr 1993;64:619–633.

[25] **Zebarjad S.M., Tahani M. and Sajjadi S.A.** Influence of filler particles on deformation and fracture mechanism of isotactic polypropylene. Journal of Materials Processing Technology, 2004, vol 155,

[26].**Adrien BOUTEILLE** GSM06 MPI Mini---mémoire  
DD01\_Janvier 2015

[27] **par Gbeuli Guero** (étude du vieillissement physique et chimique du polypropylène)

[28] **Wang X., Sun J. and Huang R.** Influence of the compounding route on the

properties of polypropylene/nano-CaCO<sub>3</sub>/ethylene-propylene-diene terpolymer tercomponent composites.

**[29] 56J.S. Dupuy**, « identification des propriétés mécanique de matériaux Composite par analyse vibratoire. Université Montpellier II-Science et technique du Languedoc, 2008 »

**[30]. (Adamson 1980 ; Morgan, O'Neal et al. 1980; Ennis, Pearce et al. 1989).**

**[31]. [Tobolsky A.V., Metz D.J. et Merosbian A.B., J. Amer. Chem. Soc., 721942, 1959] et russes.**

**[32] - "Polymère"** Microsoft ® Encarta ® 2007. [CD]. Microsoft Corporation.

**[33]: I. Teraoka**, Polymer Solutions, An introduction to physical properties, Ed. Polytechnic University Brooklyn, New York, (2002).

**[34] matériaux d'ingénieur chapitre17 (comportement mécanique des polymères)**  
N.BILLON.

**[35] M. HACHOUR. KAMEL** "Contribution à l'élaboration d'un Critère de plasticité pour le PEHD" TH/DOC, UMMTO, Algérie.2014.

**[36]. - M.F. Ashby**, Materials Selection in Mechanical Design, pergamon press,1993.

**[37] - Modern plastics encyclopedia'96©1995, the McGraw-hill companies.**

**[38] -Mc Graw-Hill** Chemical Engineering Serie, Washington, (1997)

**[39] : méthode de caractérisation mécanique des matériaux (MARC Bletry 2006-2007)**

**[40]: 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

**[41] : JAN PAUL BAILLON, JEAN MARIZ DORLOT** « Des matériaux » 3eme Edition, polytechnique Montréal 2012.

**[42]:** [www.almohandiss.com](http://www.almohandiss.com)

**[43]: Horts Blumenauer**, werskstoffsprüfung, edition VEB deutscher verlag fur Grundstoffindustrie Leipzig 1976

**[44] : 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.

**[45] : M. HACHOUR. Kamel** « Contribution à l'élaboration d'un Critère de Plasticité pour le PEHD » TH/DOC, UMMTO, Algérie.

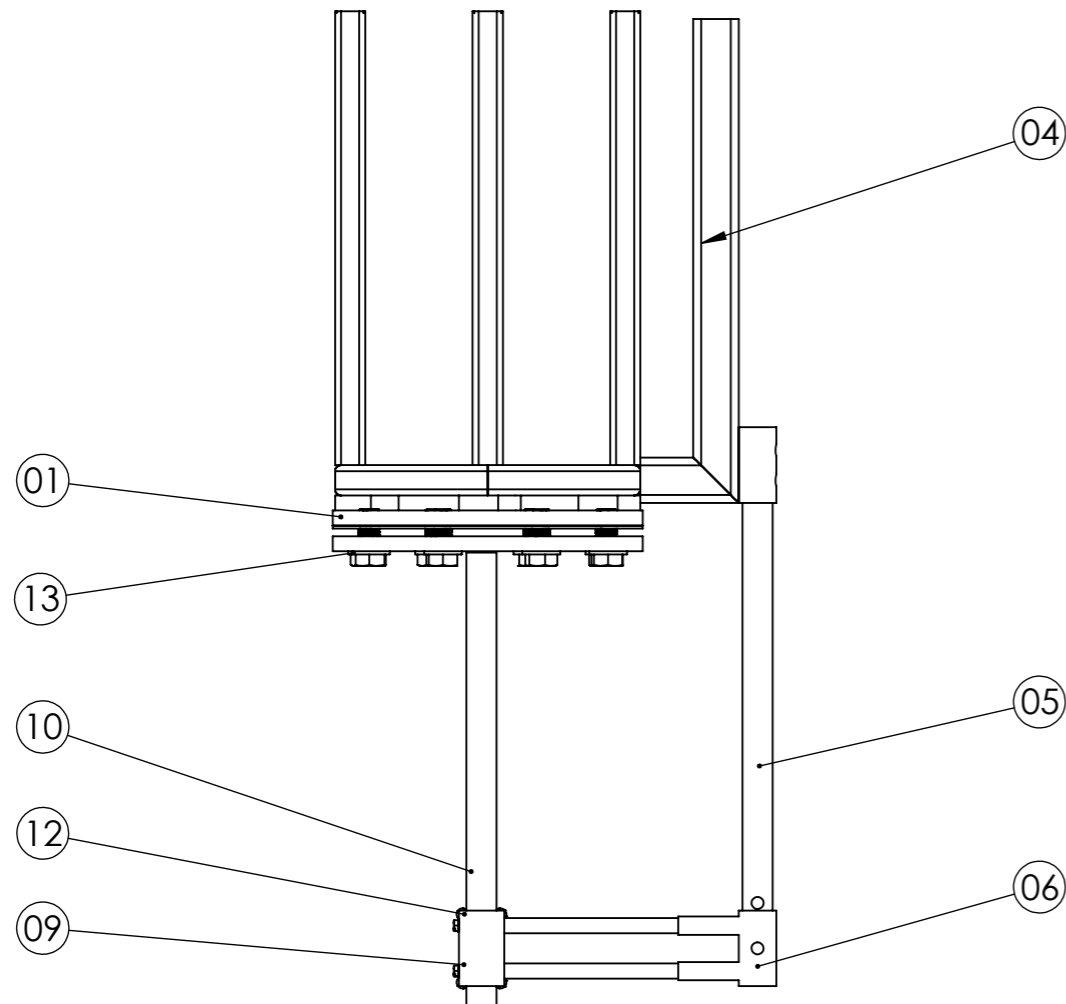
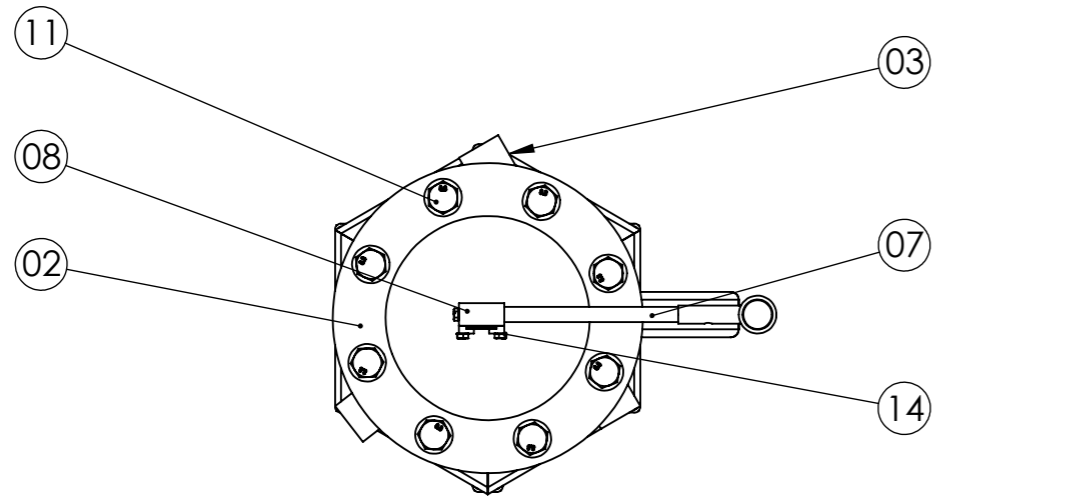
**[46]** : j. le maître and J.L. chaboche. Mécanique des matériaux solides- 2ème édition.  
Science sup. duno

**[47]** : Patrica Krawczak ; \_Essai plastique renforcé traité plastique et composite”, Technique d’ingénieurs, AM5405 année 1997.

**[48]**: Mark A. Iadicola, Adam A. Creuziger, and Tim Foecke « Advanced Biaxial Cruciform Testing at the NIST Center for Automotive Lightweighting» 2013.

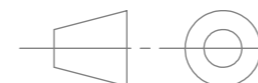
**[49]** : Bertrand LANGRAND « comportement et modélisation des assemblages ponctuels » Bm7805, 2005, technique de l’ingénieur

# ANNEXE



14	06	Rondelle	Acier allie	
13	08	Rondelle	Acier allie	
12	06	Vis CHC M5 - 15	Acier allie	
11	08	Vis CHC M12 - 30	Acier allie	
10	01	Règlette	Acier allie	
09	01	Porte règlette	XC 48	
08	01	Plaque superieure	XC 48	
07	02	Tige de maintien	XC 48	
06	01	Glissière cylindrique	XC 48	
05	01	support verticale	XC 48	
04	01	Support	Acier non allie	
03	03	plaque de separation	XC 48	
02	01	Courrone	XC 48	
01	01	Disque	XC 48	
RF	NBR	Désignation	Matière	Observation

Septembre 2023



## Dispositif d'Essai de gonflement

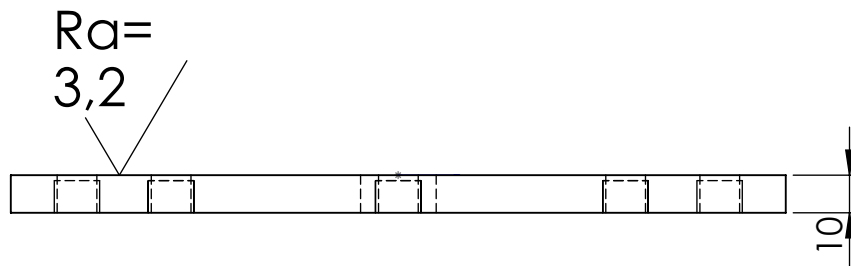
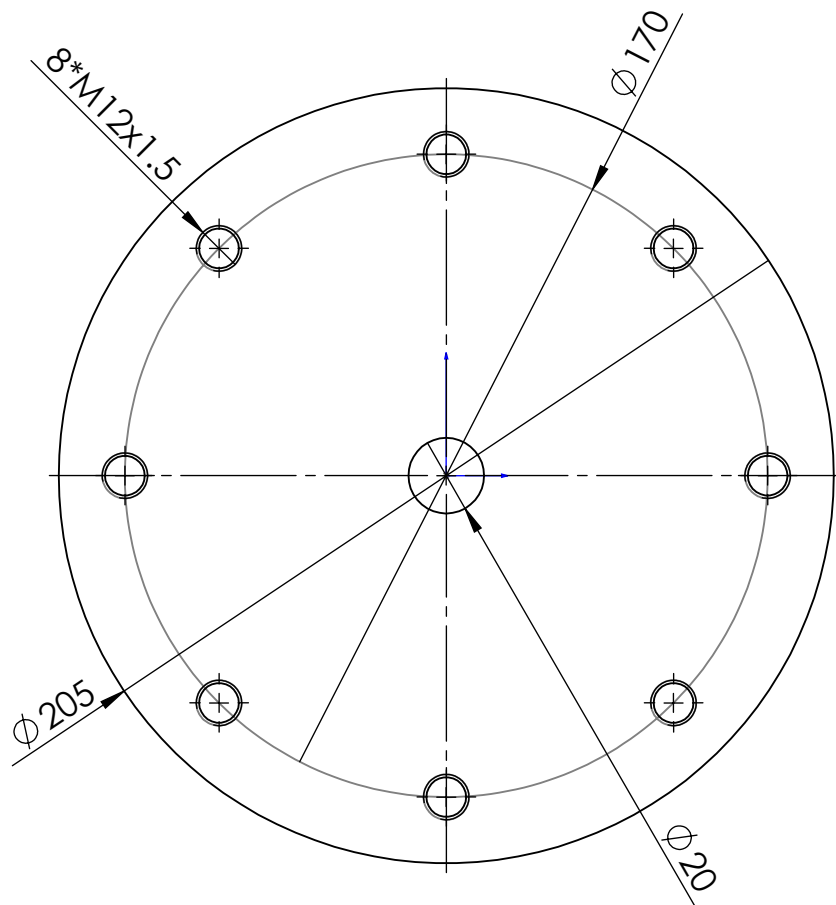
Norme: ISO


Benfedda Walid  
chabane  
chaouche karim

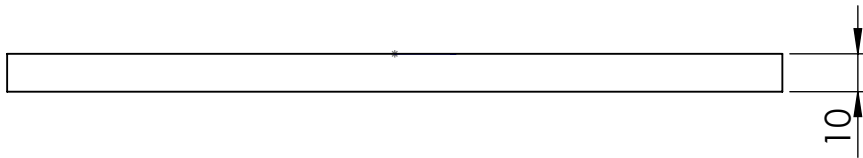
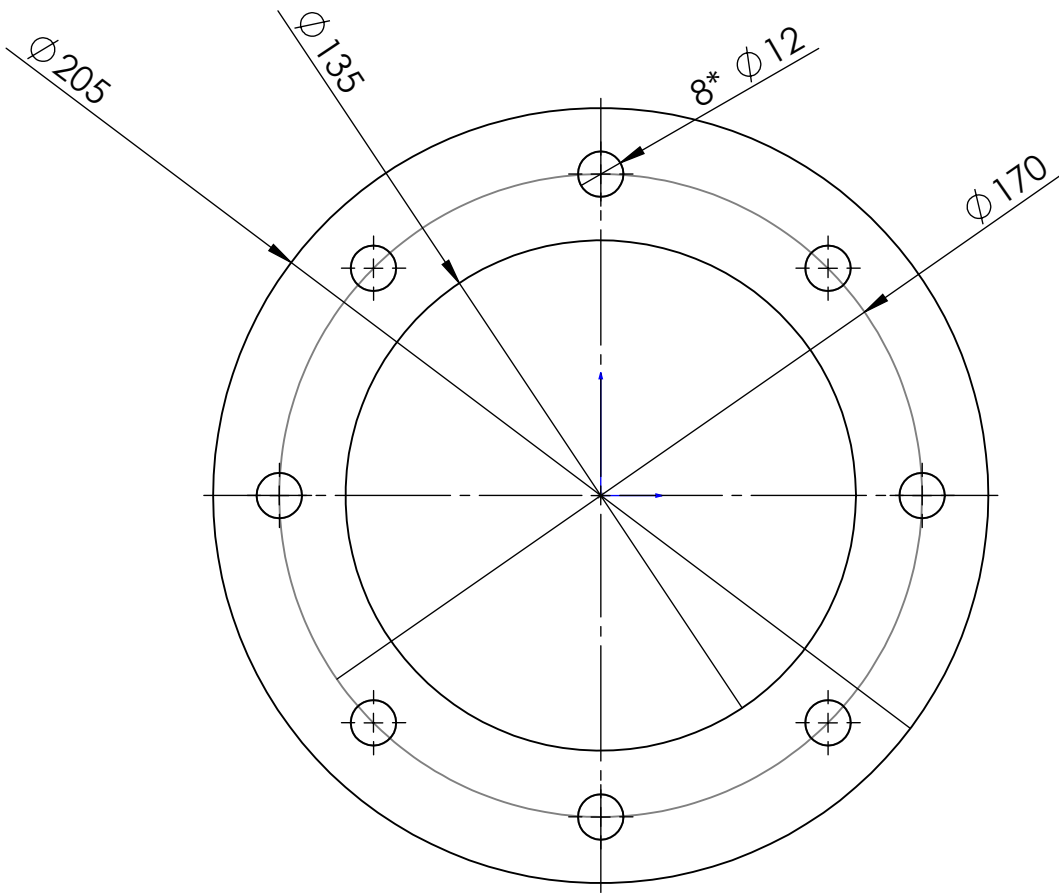
Echelle:1/5

UMMTO

A3



Materiaux: XC48	Quantité:01	Ra 3,2 ✓	
septembre 2023	Disque		Norme : ISO
			Benfedda Walid Chabane chaouche Karim
ECHELLE :1/ 2	UMMTO		A4



Ra= 3,2

Materiaux: XC48

Quantité: 01

septembre 2023

Norme : ISO



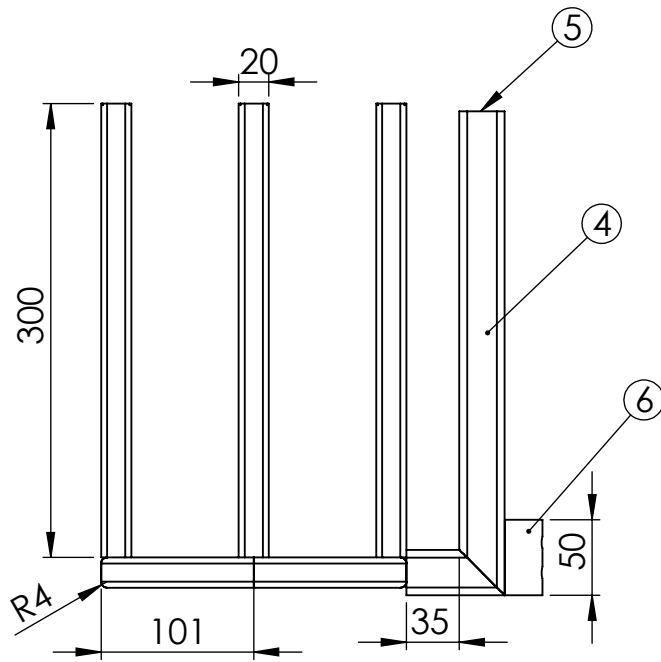
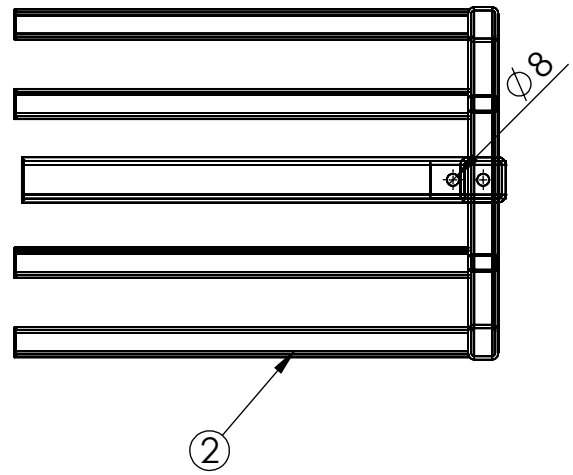
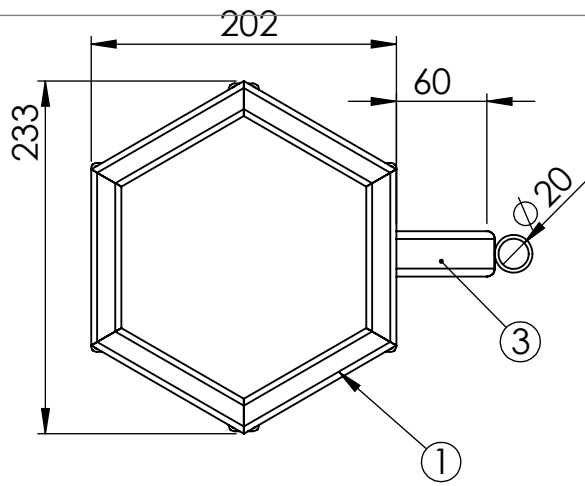
Courrone

Benfedda Walid  
Chabane  
chaouche karim


ECHELLE : 1/ 2

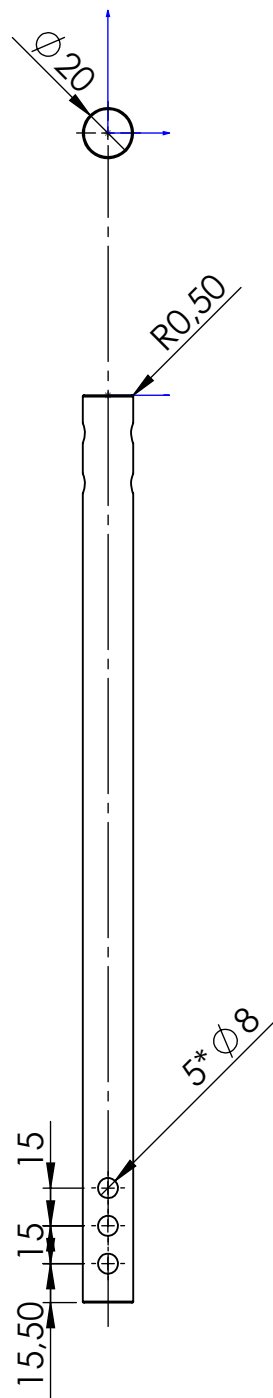
UMMTO

A4




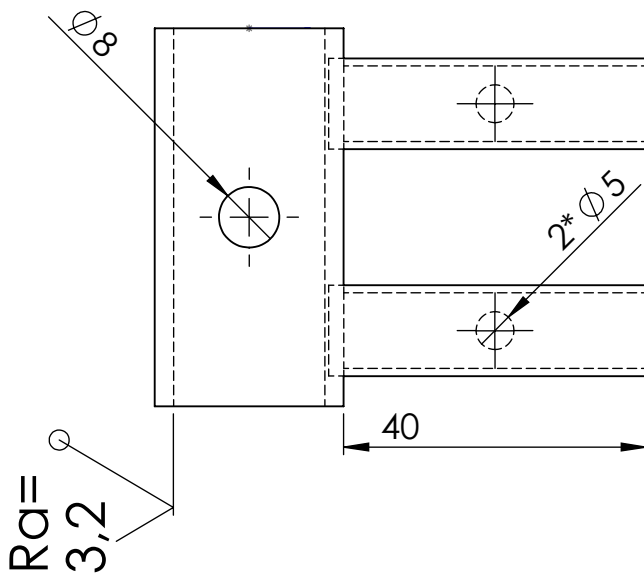
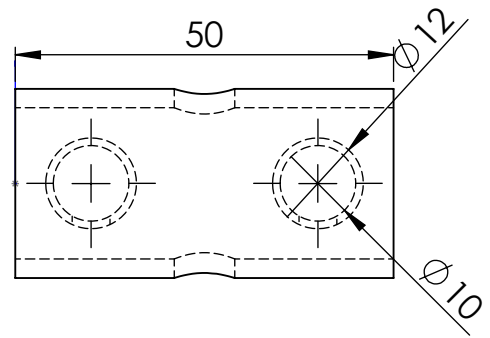
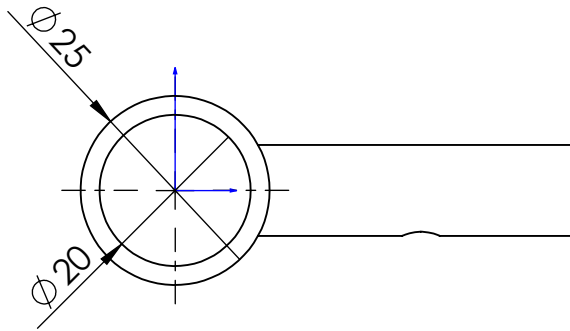
Nbr	Rep	Description	Largeur
1	6	TUBE, SQUARE 20 X 20 X 2	116.55
2	6	TUBE, SQUARE 20 X 20 X 2	300
3	1	TUBE, SQUARE 30 X 30 X 2,60	65
4	1	TUBE, SQUARE 30 X 30 X 2,60	320
5	6	Bouchons	20
6	1	cylindre	50
7			

Materiaux:	Quantité: 01	Ra 6,4 ✓
septembre 2023	<b>SUPPORT</b>	
	Norme : ISO Benfedda Walid Chabane Chaouche karim	
ECHELLE : /	<b>UMMTO</b>	A4



Ra 6,4

Materiaux: XC48	Quantité: 01		
septembre 2023	support verticale		Norme : ISO
			Benfedda Walid Chabane chaouche karim
EHELLE :1/3	UMMTO		A4



Ra 6,4

Materiaux: XC48

Quantité:01

septembre 2023

Glissière cylindrique

Norme : ISO

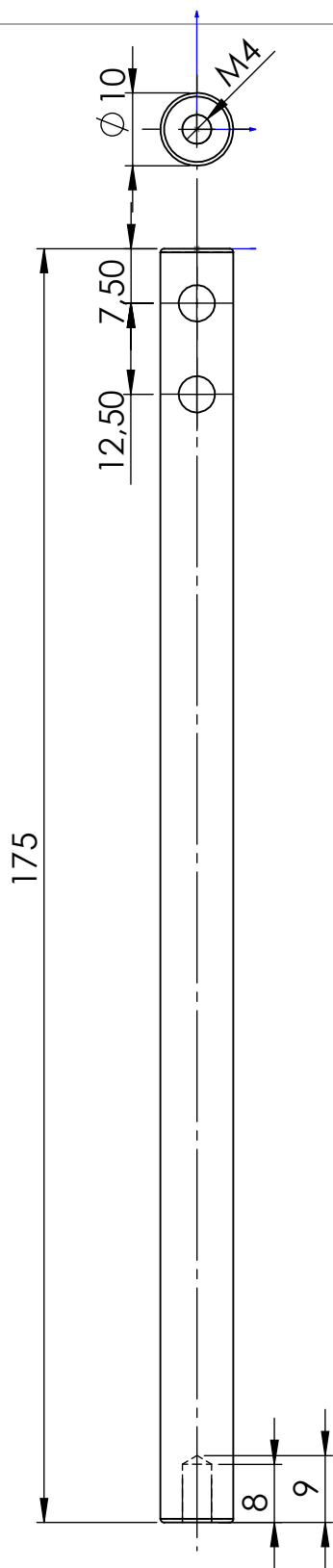


Benfedda Walid  
Chabane  
chaouche Karim

ECHELLE :1/1

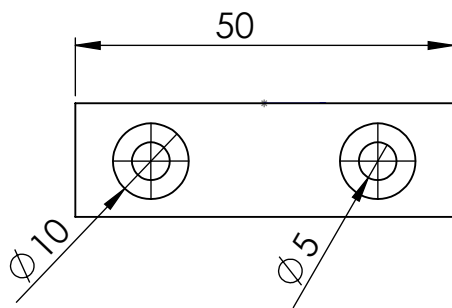
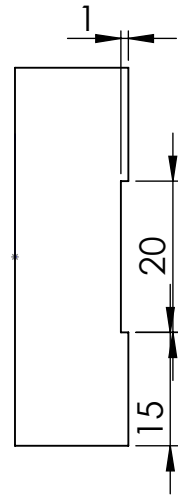
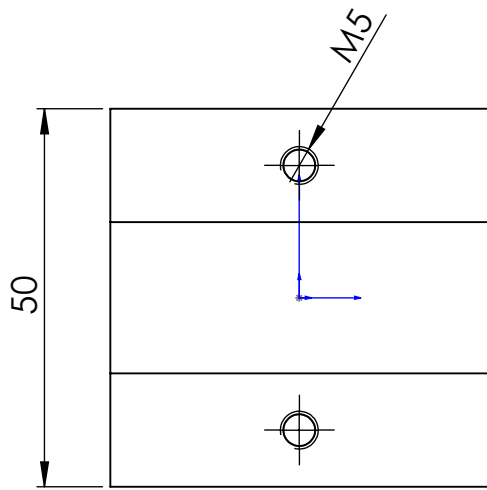
UMMTO

A4



Ra 3,2

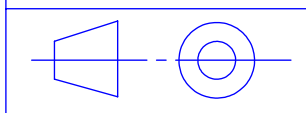
Materiaux: XC48	Quantité:02		
septembre 2023	<h1>Tige de maintien</h1>		Norme : ISO
			Benfedda Walid Chabane chaouche karim
ECHELLE :1/1	UMMTO		A4



Ra 6,4

Materiaux: XC48	Quantité:01
-----------------	-------------

septembre 2023	<h1>Plaque superieur</h1>
----------------	---------------------------

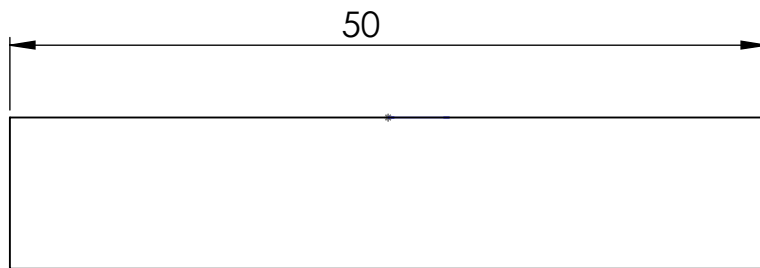
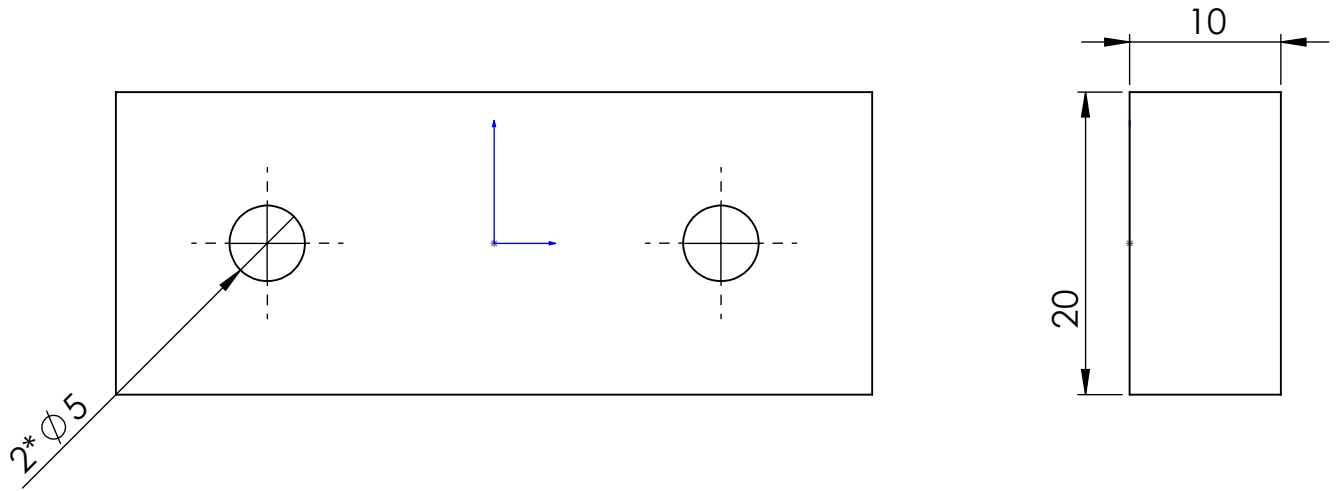


Norme : ISO
Benfedda Walid Chabane chaouche karim

ECHELLE : 1/1
---------------

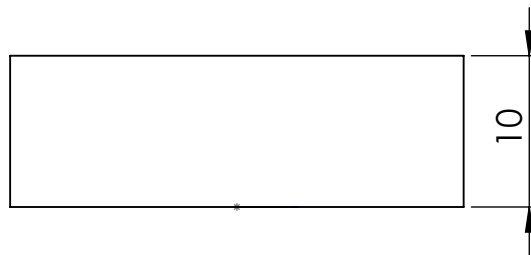
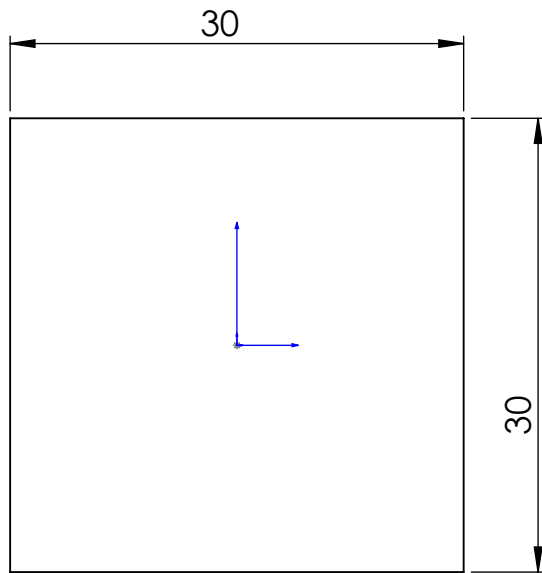
<h1>UMMTO</h1>
----------------

A4
----



Ra 6.4

Materiaux: XC48	Quantité: 01	<p style="text-align: center;">plaque de fixation</p>	
septembre 2023			
ECHELLE :2/ 1		<p style="font-size: 2em;">UMMTO</p>	<p style="font-size: 1.5em;">A4</p>



Ra 6,4

Materiaux: XC48	Quantité: 03
-----------------	--------------

septembre 2023

# plaque de sèparation

Norme : ISO

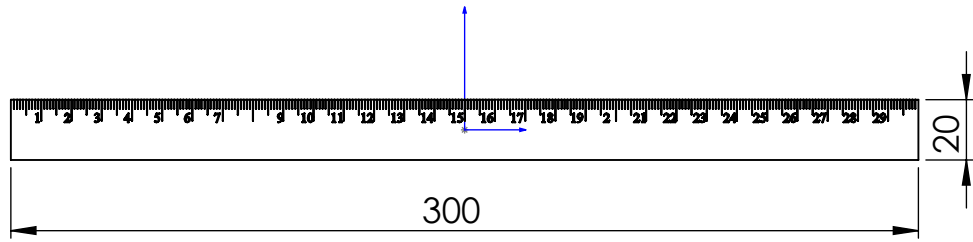


Benfedda Walid  
Chabane  
chaouche Karim


ECHELLE :2/ 1

UMMTO

A4



Ra 3,2

Materiaux: XC48	Quantité:01	<h1 style="text-align: center;">Règlette</h1>	
septembre 2023			
		Benfedda walid Chabane chaouche Karim	
ECHELLE :1 /2,5	UMMTO	A4	