

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de L'enseignement supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou

Faculté du génie de la construction

Département de génie mécanique



Mémoire de fin d'étude

En vue de l'obtention du diplôme

MASTER ACADIMIQUE EN GENIE MECANIQUE

spécialité : Construction MECANIQUE

Theme

Conception, étude et réalisation d'un dispositif d'essai

Biaxial en vue de l'étude du thermoformage

du polystyrène choc

Proposé par :

M^{elle}: SADOUDI Taous ENIEM

Dirigé par:

Mr: OULD OUALI Mohand

Réalisé par:

Mr : BELLIL Fayçal

M^{elle}: BENAMEUR Souad

Promotion 2018/2019

Remerciement

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

Ne tenons à remercier énormément notre promoteur M. OULD OUALI Mohand et notre Co-promotrice M^{elle} SADOUDI Taous qui ont accepté de diriger ce travail et qui nous ont été d'une grande aide. Ils nous ont soutenus vraiment par leur disponibilité, et par leur encadrement efficaces le long de ce mémoire, un encadrement qui ma permet d'acquérir les bases rassurantes et nécessaires pour s'avancer dans mon travail.

Nos remerciements également aux ingénieurs de l'entreprise ENIEM (département technique de l'unité froid) pour la confiance qu'ils nous ont accordée en proposant ce sujet.

En parallèle, nos remerciements vont également aux enseignant-chercheurs du laboratoire de recherche LEC2M qui nous ont partagé beaucoup de temps de travail avec nous ainsi que pour les discussions scientifiques et conseils éclairés. La qualité et la pertinence de leurs points de vue et de leurs conseils ont été d'une grande richesse pour nous et ont permis d'orienter l'étude au mieux afin que nous puissions mener à terme cette étude.

Il nous est agréable aussi de remercier les membres de jury, pour nous avoir fait l'honneur d'examiner notre mémoire de fin d'études.

De plus nos sincères remerciements vont à toutes nos familles au sens large du terme, parents, frères, sœurs, amis qui par leurs prières et leurs encouragements ont été permanents, trouvent dans ces quelques lignes l'expression de nos profondes reconnaissances.

Enfin nous remercions tous ceux qui, d'une manière ou d'une autre, ont contribué à la réussite de ce travail et qui n'ont pas pu être cités ici.

Dédicace

*Ce modeste travail est dédié à eux qui ont cru en moi, aidé et soutenue
tout au long de mon cursus universitaire :*

Mes chers parents

Mes deux frères

Ma sœur et son mari

Mes bons amis

À tous les étudiants de la promotion 2019

Fayçal
Fayçal

Dédicace

*Ce modeste travail est dédié à eux qui ont cru en moi, aidé et soutenue
tout au long de mon cursus universitaire :*

Mes chers parents et mon grand père

Mon petit frère

Ma sœur

Mes bons amis

À tous les étudiants de la promotion 2019

Souad
Souad

Liste des symboles

ABS	Acrylonitrile butadiène styrène
EPS	Polystyrène expansé
PMMA	Poly (méthacrylate de méthyle), Plexiglas
PS	Polystyrène
HIPS	High Impact Polystyrene
PP	Polypropylène
PET	Téréphtalat
GPPS	General Purpose Polystyrene
PSR	Le polystyrène rigide
DVD	Digital Versatile Disc
PSE	Polystyrène expansé
PSE-M	Les polystyrènes expansés moulés
PSE-E	Polystyrènes expansés extrudés
N_{cr}	Charge critique d'Euler
E	Module d'élasticité du matériau de la colonne
I	Moment d'inertie minimal de la section de la colonne
L	Longueur de colonne non prise en charge
K	Facteur de longueur effective de colonne
mm	Millimètre
d	Diamètre (mm)
t	Temps (s)
S	Section (mm ²)
P	Pression (Pa ou bar)

Liste des symboles

F	Force (N)
T	Température (°C ou K)
T _g	Température de transition vitreuse (°C ou K)
T _f	Température de fusion (°C ou K)
Σ _y	Contrainte au seuil d'écoulement (MPa)
ε _y	Allongement au seuil d'écoulement
σ	La contrainte à rupture (MPa)
ε _r	Allongement à la rupture
σ _m	La contrainte maximale (MPa)
σ	Contrainte (MPa)
E	Le module d'Young ou module élastique (MPa)

Chapitre I : Etat de L'art

Figure I- 1 : La constitution d'un polymère	3
Figure I- 2 : Classification des architectures macromoléculaires selon Tamolia	5
Figure I- 3: polymères linéaires	5
Figure I- 4 : Homopolymère ramifié (a) et copolymère ramifié (b).....	6
Figure I- 5 : polymère réticulé avec ponts disulfure reliant deux chaînes	6
Figure I- 6 : Copolymère et homopolymère.....	7
Figure I- 7: Représentation de la chaîne d'un polymère linéaire	9
Figure I- 8 : Représentation schématique d'un polymère Bidimensionnel : le carbone graphite.	10
Figure I- 9 : Représentation schématique d'un polymère Tridimensionnel.	10
Figure I- 10 : Variation du module d'Young d'un polymère en fonction de la température ...	11
Figure I- 11 : Variation du volume spécifique en fonction de la température pour des polymères	12
Figure I- 12: Polystyrène sous sa forme commerciale	15
Figure I- 13 : Modèle pelote bâtonnet de Polystyrène	15
Figure I- 14: Polymérisation du monomère de styrène en polystyrène (tiré de : Technique de l'Ingénieur, s. d.).....	16
Figure I- 15: Micrographie du microscope électronique à transmission du polystyrène choc (MET)	18
Figure I- 16 : Unités isométriques microstructurales du polybutadiène.	18
Figure I- 17: Représentation semi-développée de la chaîne macromoléculaire du polystyrène	19

Liste des Figures

Figure I- 18: Image de PSE expansé en différents états.....	20
Figure I- 20 : Polystyrène expansé extrudé (PSE-X).....	21
Figure I- 19 : Polystyrène expansé moulé (PSE-M).....	21
Figure I- 21: Principe du thermoformage : moule négatif	24
Figure I- 22 : principe de thermoformage : moule positif.....	24
Figure I- 23 : Variation des épaisseurs au cours du thermoformage : moule négatif	25
Figure I- 24: Fixation de moule sur plateau porte-moule.....	27
Figure I- 25 : Resserrage	27
Figure I- 26 : Le cycle de chauffage.....	28
Figure I- 27 : les étapes de formage	29
Figure I- 28 : thermoformage par sous pression.....	31
Figure I- 29: Drapage	32
Figure I- 30: Thermoformage par moule et contre-moule	33
Figure I- 31: Thermoformage en bulle sous pression avec poinçon de pré-étirage	34
Figure I- 32: Thermoformage sous pression avec poinçon de pré-étirage.....	35
Figure I- 33: Thermoformage sous vide avec poinçon de pré-étirage	36
Figure I- 34: Thermoformage en relief profond sous vide.....	37
Figure I- 35 : Thermoformage en relief profond sous vide avec bulle sous pression	38
Figure I- 36 : Thermoformage sous pression en moule ferme	39
Figure I- 37 : thermoformage libre.....	40
Figure I- 38 : Thermoformage mécanique	40
Figure I- 39 : image de gauche : éprouvette de traction biaxiale montée. Image de droite : dispositif de traction biaxiale de laboratoire 3s à Grenoble.	43

Figure I- 40 : Schéma des biellettes constituant le dispositif.....	44
Figure I- 41: Dispositif d'essais biaxiaux	44
Figure I- 42: Eprouvette cruciforme	45

Chapitre II : Conception et réalisation d'un banc d'essai biaxial

Figure II- 1: banc d'essai traction-compression Biaxial	48
Figure II- 2: montage traction-traction.....	49
Figure II- 3: montage traction-compression.....	50
Figure II- 4: niveau à bulle	51
Figure II- 5: fil a plan toupie	52
Figure II- 6: Niveau laser	52
Figure II- 7: Mécanisme biaxial	53
Figure II-8: Bâti du banc d'essai biaxial	54
Figure II-9: Tirant.....	56
Figure II-10: Mors articulé.....	56
Figure II-11: Tige a double méplat	57
Figure II-12: Méplats	57
Figure II-13 : Goupille cannelé	58
Figure II-14 : Circlips externe	58
Figure II-15 : Mors	58
Figure II-16: Vis de pression.....	59
Figure II- 17: Vis de fixation.....	59
Figure II-18: vis de blocage.....	59

Figure II-19: Glissière horizontale	60
Figure II-20: Glissière verticale	60
Figure II-21: pièce de guidage 90°	61
Figure II- 22: Rondelle et écrou	61
Figure II- 23: Tige filetée	61
Figure II-24: plaque porte vérin	62
Figure II-25: Plexi glace.....	62
Figure II-26: Triangle d'équerrage.....	63
Figure II-27: Elément d'équerrage	63
Figure II-28: support du travail	64
Figure II-29: Eléments de renforts	64
Figure II- 30: Le bâti	65
Figure II-31: IPE80 (NF EN 10034 - S235 JR)	66
Figure II-32: UPN80 (NF EN 10279 - S235 JR)	66
Figure II-33: HEB100 (NF EN 10025- S235 JR)	66
Figure II-34: profile creux carré de norme NF EN 10219 – S235JR.....	67
Figure II-35: Vérin hydraulique simple effet	68
Figure II- 36: l'opération de présage et taraudage sur la tête du piston pour mettre en place les vise de pression et la vise de fixation.	68
Figure II-37: pompe hydraulique manuelle.....	69
Figure II-38: principe de corrélation d'image	70
Figure II-39: Exemple d'utilisation de la caméra CCD projeté sur une éprouvette biaxiale (1)	70

Figure II-40: Deux images de mouchetis, f avant de formation (a gauche) et g après de formation (a droite).	71
Figure II-41: Facettes d'analyses caractérisées par leur niveau de gris dans l'état initial et l'état déformé	72
Figure II-42: La technique de corrélation d'images	72
Figure II-43: La direction de la charge sur le pilier centrale en HEB 100.	73
Figure II-44: Traverses centrale du bâti en IPE 80	76
Figure II-45: la colonne du bâti en IPE80	78
Figure II-46: plaque porte vérin	80
Figure II-47: Représentation du filetage métrique ISO à filet triangulaire.	81
Figure II-48: Schéma des efforts appliqués sur les vis de pression	83
Figure II- 49: Représentation des efforts appliqués sur les vis de pression.	83
Figure II-50: Représentation du mécanisme sous forme d'un schéma cinématique.	84
Figure II-51: Schéma des efforts appliqués sur la goupille.....	86
Figure II-52: Représentation des efforts appliqués sur les goupilles.	86
Figure II-53: insertion de menu SolidWorks simulation a la barre d'outils.....	88
Figure II-54: la répartition des déplacements appliqués en traction pour l'éprouvette Selon l'axe OX.	94
Figure II- 55: Le coefficient de sécurité du modèle lors d'un essai de traction sur une éprouvette cruciforme en HIPS	95

Chapitre III : Résultats et discussions

Figure III- 1: Fiche technique pour feuille	98
Figure III- 2: Géométrie de l'éprouvette de traction	99

Liste des Figures

Figure III- 3: Montage poinçon-matrice sur presse (atelier centrale ENIEM).....	100
Figure III- 4: Eprouvette axiale de norme (ASTM D-790) en HIPS.	100
Figure III- 5: désignation des éprouvettes.....	100
Figure III- 6: Enceinte thermique.....	103
Figure III- 7: Régulateur de température	104
Figure III- 8: machine de traction RM 100.	105
Figure III- 9: éprouvette en traction	106
Figure III- 10: Diagramme Effort-Allongement du comportement de l'éprouvette pendant l'essai.	107
Figure III- 11: Différentes zones de traction uniaxiale avec la représentation schématique de l'éprouvette d'essai.	107
Figure III- 12: Eprouvette en HIPS après l'essai de traction.....	108
Figure III- 13: l'évolution de contrainte-déformation à température ambiante (25c°)	108
Figure III- 14: l'évolution de contrainte-déformation à température T=40c°	108
Figure III- 15: l'évolution de contrainte-déformation a température T= 60c°	109
Figure III- 16: l'évolution contrainte-déformation de l'essai de traction pour une vitesse....	110
Figure III- 17: l'évolution contrainte-déformation de l'essai de traction pour une vitesse....	110
Figure III- 18: l'évolution contrainte-déformation de l'essai de traction pour une vitesse de 480 mm/min en fonction des températures.	111
Figure III- 19: la représentation des tensions de Von Misses sur l'éprouvette en HIPS sollicité en traction Biaxiale.....	112
Figure III- 20: Répartition de la déformation équivalente spécifique.....	113
Figure III- 21 : Comparaison des résultats	114

Figure III- 22:Superposition des courbes expérimentales et numériques de la contrainte-déformation pour la température ambiante en fonction de la vitesse V_1	115
Figure III- 23 : Superposition des courbes expérimentales et numériques de la contrainte-déformation pour la température ambiante en fonction de la vitesse V_2	115
Figure III- 24:La superposition de courbes expérimentales et numériques de la contrainte déformation pour la température ambiante en fonction de la vitesse V_3	116
Figure III- 25: La charge appliquée sur la partie utile de l'éprouvette soumis en traction. ...	118
Figure III- 26: Les résultats d'essai de traction sur la partie utile de l'éprouvette.....	119
Figure III- 27 : l'évolution de force-déplacement mineur à trois rapports différents.	121
Figure III- 28 : l'évolution de force-déplacement majeur à trois rapports différents.....	121
Figure III- 29 : la superposition des courbes de déplacement majeur et mineur à trois rapports différents.....	121
Figure III- 30: la contrainte de von mises pour un rapport de déplacement $R = 1$	123
Figure III- 31 : déformation plastique pour un rapport de déplacement $R = 1$	124
Figure III- 32 : la contrainte de von mises pour un rapport de déplacement $R = -1$	125
Figure III- 33: la déformation plastique pour un rapport de déplacement $R = -1$	126
Figure III- 34 : la contrainte de von mises pour un rapport de déplacement $R = 0$	127
Figure III- 35: la déformation plastique pour un rapport de déplacement $R = 0$	128
Figure III- 36: le maillage des outils et de la plaque.	130
Figure III- 37: Vue éclatée des éléments en perspective.....	130
Figure III- 38: l'évolution Force déplacement du poinçon	131
Figure III- 39: la superposition des courbes force déplacement des trois directions.	131
Figure III- 40: la distribution des contraintes sur la feuille en HIPS	132
Figure III- 41: la distribution de la déformation sur la feuille en HIPS	132

Liste des Figures

Figure III- 42: la distribution des déplacements sur la feuille en HIPS	133
Figure III- 43: la distribution des rotations sur la feuille en HIPS	133

Chapitre I : Etat de L'art

Tableau I- 1: Thermoplastique et leur caractéristique.....	8
Tableau I- 2 : Propriétés du HIPS	19
Tableau I- 3 : La différence entre moule positif et négatif.....	26
Tableau I- 4 : Eprouvettes cruciformes de différents types	47

Chapitre II : Conception et réalisation d'un banc d'essai biaxial

Tableau II- 1: Différents éléments principales	55
Tableau II- 2: Caractéristique des profilés	66
Tableau II- 3: Paramètres du profilé creux carré 50×50	67
Tableau II- 4:Les caractéristiques du vérin hydraulique.....	69
Tableau II- 5: La résistance des boulons ISO	82

Chapitre III : Résultats et discussions

Tableau III- 1: Dimensions des éprouvettes de traction.....	99
Tableau III- 2 : Tableau des classifications.....	102

INTRODUCTION GENERALE..... 1**CHAPITRE I : ETAT DE L'ART**

I-1 Introduction	3
I-2 les polymeres	3
I-2-1 définition du polymère	3
I-2-2 différentes classes de polymères	4
I-2-3 comportement thermique	11
I-3 polystyrène	14
I-3-1 introduction	14
I-3-2 historique	14
I-3-3 origine	16
I-3-3-1 styrène	16
I-3-4 différents types de polystyrène	16
I-3-5 avantages et inconvénients des polymères	22
I- 4 thermoformage	22
I-4-1 introductions	22
I-4-2 présentations du thermoformage	23
I-4-3 principe	24
I-4-4 les étapes de thermoformage	26
I-4-5 technique de thermoformage	30
I-4-6 avantages du thermoformage des thermoplastiques	41
I-4-7 limites et désavantages du thermoformage	42
I-5 essai biaxial	43

I-5-1 essai de traction biaxial	43
I-5-2 but de l'essai	43
I-5-3 principe de l'essai traction biaxiale	43
I-5-4 les dispositifs de traction biaxiale	44
I-5-5 les éprouvettes de traction biaxiale	45
I-6 conclusion	47

CHAPITRE II : CONCEPTION ET REALISATION D'UN BANC D'ESSAI BIAXIAL

II-1- introduction	48
II-2- description du banc d'essai	48
II-3- répartition des forces d'application	49
II-4- outillages utilisés	50
II-5- définition des éléments du banc	53
II-6- les éléments constituant le dispositif	56
II-7- calcul de résistance du bâti	73
II-8- solidworks simulation	88
II-8-1- le but de l'utilisation de solidworks simulation	88
II-8-2- comment ouvrir une étude sur solidworks simulation	88
II-9- conclusion	96

CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSIONS

III-1 introduction	97
III-2 traction uniaxial	97

III-2-1 introduction	97
III-2-2 fiche technique du matériau	97
III-2-3 l'essai de traction	99
III-2-4 résultats des essais de traction	108
III-2-5- simulation avec solidworks de l'essai biaxial sur le dispositif.....	112
III-3- comparaison expérimentale et numérique	115
III-4- rappel sur le logiciel abaqus	117
III-4-1- simulations avec abaqus	117
III-4-2- etapes de la simulation sur abaqus.....	117
III-4-3- conduite de la simulation	118
III-5- simulation numérique des éprouvettes cruciformes (abaqus).....	120
III-6- simulation du thermoformage	130
III-7- Conclusion	134
CONCLUSION GENERALE.....	135

Références bibliographique.

Annexes.

Introduction Générale

Le polystyrène choc dit HIPS (High Impact Polystyrène) est un polystyrène spécifique en raison de son opacité et surtout, de sa résistance aux chocs. Le HIPS est un matériau plastique bon marché, facile à produire et à mettre en forme. Ainsi, il possède une large plage de température de mise en forme et est particulièrement adapté au thermoformage, des caractéristiques qui font que le polystyrène-choc est largement employé dans différents domaines. Dans ce travail, on s'intéresse aux dispositifs d'essai de traction-compression biaxiale. Une description de l'importance scientifique des travaux et des implications industrielles découlant des résultats des tests biaxiaux est également présentée. Les procédés de formage de structures minces et assimilées invoquent souvent des comportements nécessitant une caractérisation par des essais biaxiaux. A l'opposé de l'essai de traction uniaxial qui détermine les propriétés mécaniques dans une direction, donc souvent inapplicable directement aux processus de formage multidirectionnels, les essais biaxiaux peuvent être utilisés pour la détermination des courbes de formage limites, par exemple. Les tests biaxiaux deviennent également de plus en plus importants pour tester les métaux utilisés dans les machines et les composants structurels qui peuvent généralement être chargés dans plus d'une direction pendant le service. En effet, il a été démontré qu'une charge biaxiale peut provoquer une défaillance du matériau à des niveaux de sollicitations bien inférieures à celles déterminées par les méthodes d'essai de traction conventionnelles.

Dans ce travail, on s'est intéressé à la conception, étude et réalisation d'un dispositif de traction-compression biaxiale qui sera destiné aux essais biaxiaux sur les polymères. Ainsi une conception a été établie pour assurer une traction-compression biaxiale sur les éprouvettes cruciformes, en tenant en compte les moyens techniques disponibles.

Le présent mémoire est organisé comme suit :

- **Le Chapitre I** présente une vue générale sur les polymères pour des raisons évidentes de leur abondance dans notre vie quotidienne, bien que la liste des matériaux destinés au thermoformage est loin d'être exhaustive, puis une projection sur l'objectif des essais de traction biaxiale est donnée.
- **Le Chapitre II** est consacré, dans un premier temps, à la conception dans le souci de réalisation d'un dispositif de traction biaxiale sur des éprouvettes cruciformes. Dans la deuxième partie, nous réalisons la conception de notre dispositif à l'aide d'un logiciel

de conception assisté par ordinateur (SolidWorks 2018) puis nous effectuons le dimensionnement en utilisant le module SolidWorks-Simulation. A la fin, nous effectuons des calculs de vérification à la résistance.

- **Le Chapitre III** présente une étude expérimentale de l'effet de la température et des vitesses de déformations sur le comportement du PS choc (HIPS). Par la suite, nous avons mené une simulation en biaxial avec SolidWorks-Simulation. N'ayant pas pu aboutir à des résultats satisfaisants, nous avons réalisé une comparaison simulation numérique avec Abaqus et les résultats expérimentaux uniaxiaux. Fort de la qualité des résultats obtenus en uniaxial, nous avons mené des simulations numériques en biaxiales afin d'étudier les mécanismes de déformation en biaxial.

Chapitre I : Etat de l'art

I-1 INTRODUCTION

Depuis l'aube de la civilisation, l'homme a utilisé des polymères naturels comme matière première à partir de laquelle il pourrait produire des armes, des outils, des vêtements et un abri. Aujourd'hui, les polymères naturels (le bois, le caoutchouc, la laine, le coton, la soie, le cuir et le papier) ont été complétés par des centaines de polymères synthétiques, communément connu sous le nom de plastique.

Les Polymères ont trouvé ces dernières années une utilisation dans une variété d'applications. Certains sont aussi utilisés dans des applications dentaires et médicales. Leur excellente isolation les rend bien adaptés aux applications électriques. En outre, ils ont un usage intensif comme matériaux d'emballage. En ce qui concerne les applications mécaniques, on les retrouve dans les roulements, les pignons et les joints. En remplacement des métaux, ils sont maintenant largement utilisés pour la fabrication des tubes pour le transport de fluides. (1)

I-2 LES POLYMERES

I-2-1 Définition du polymère

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 macromolécules, qui comportent un grand nombre d'unités de répétition pro métaboliques. 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) (2).

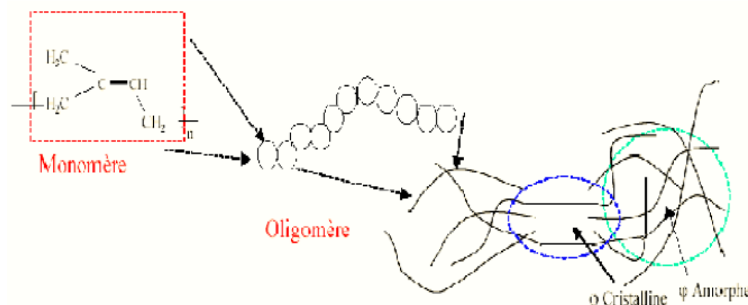


Figure I- 1 : La constitution d'un polymère

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)

I-2-2 Différentes classes de polymères

Plusieurs classifications des composés macromoléculaires peuvent être proposées selon qu'on choisit l'origine, le type d'architecture, la structure chimique des motifs ou le type de polymérisation, comme base de la classification.

I-2-2-1 Classification selon l'origine

Les polymères classés selon l'origine peuvent être : (3)

❖ *Des polymères naturels*

Ce sont des composés organiques formant la matière vivante, comme les protéines, les acides nucléiques, la cellulose, la chitine...

❖ *Polymères artificiels (ou régénérés)*

Des polymères obtenus par modification chimique d'un polymère naturel, exemple : méthylcellulose.

❖ *Des polymères synthétiques*

Ce sont les matières plastiques, les élastomères, Les fibres, les adhésifs. Les molécules monomères qui permettent de les obtenir n'existent pas dans la nature.

Cependant, on peut remarquer que les structures réalisées par la synthèse sont souvent proches de celles des polymères naturels.

I-2-2-2 Classification selon l'architecture (4)

Selon Tomalia (5), les architectures macromoléculaires peuvent être divisées en quatre grandes familles : les polymères linéaires, ramifiés, réticulés et plus récemment, les polymères dendritiques.

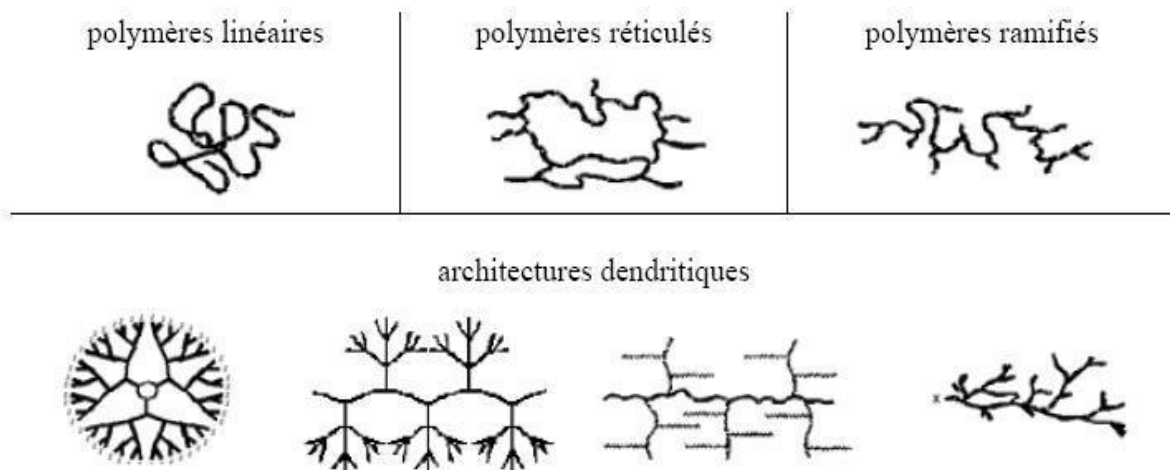


Figure I- 2 : Classification des architectures macromoléculaires selon Tamolia.

I-2-2-3 Structures du squelette macromoléculaire :

I-2-2-3-1 Polymères linaires (6) :

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 Waal. Lorsque ces liaisons existent, le matériau devient rigide et présente un comportement de solide.

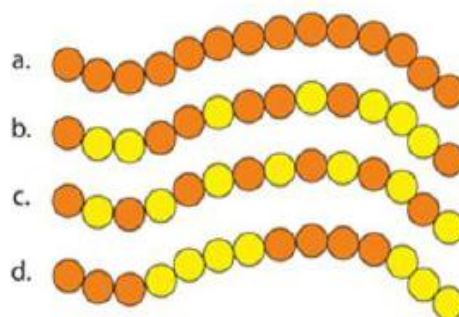


Figure I- 3: Polymères linaires

I-2-2-3-2 Les architectures ramifiées :

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.

(7)

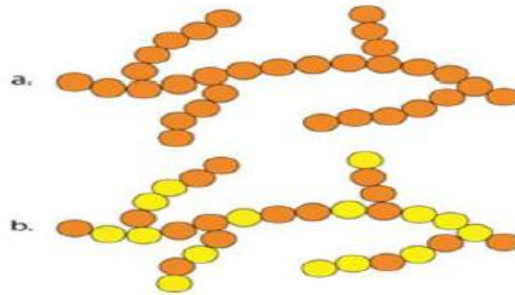


Figure I- 4 : Homopolymère ramifié (a) et copolymère ramifié (b)

I-2-2-3-3 Polymère réticulé :

La réticulation correspond à la formation de liaisons chimiques suivant les différentes directions de l'espace au cours de la polymérisation, et qui conduit à la formation d'un réseau.

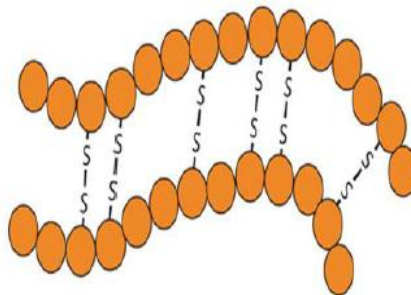


Figure I- 5 : Polymère réticulé avec ponts disulfure reliant deux chaînes

I-2-2-4 Classification selon la structure chimique (8) :

La structure chimique des motifs permet une classification des composés macromoléculaires en homopolymères et copolymères.

a) Les homopolymères :

Sont des polymères qui ne possèdent qu'une seule unité, ces homopolymères sont des longues chaînes formées par la répétition d'un monomère, leurs propriétés mécaniques, écoulement à l'état fondu, optique, sont dues à la structure chimique des monomères et à la longueur des chaînes. Il existe au sein des homopolymères différentes familles, on trouve : les homopolymères linéaires, branchés et étoilés.

b) Les copolymères :

Sont des polymères qui possèdent plusieurs unités, comme pour les homopolymères, les copolymères peuvent se classer dans différentes familles, citons : le mode statistique, alterné, séquencé et greffé.

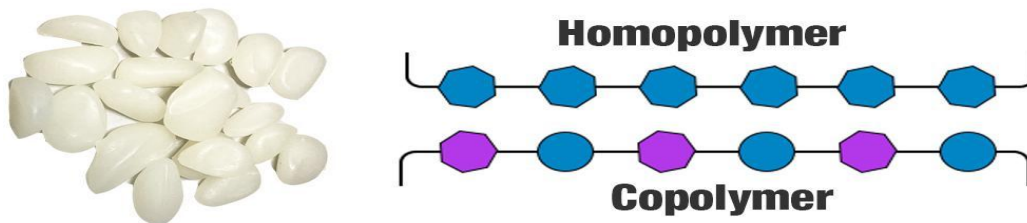


Figure I- 6 : Copolymère et homopolymère.

I-2-2-5 Classification selon le comportement thermique :

Les plastiques sont des matériaux déformables ; ils peuvent être moulés ou modelés facilement, en général à chaud ou et sous pression. Leurs facilités de mise en forme, résistance aux chocs, aux variations de températures, à l'humidité, aux détergent...etc. Les rendent utiles dans plusieurs domaines : emballage, bâtiment, automobile, électricité, etc.

Il existe un grand nombre de plastique aux propriétés différentes, on les classe en trois grandes catégories : les thermoplastiques, les thermodurcissables, les élastomères. (9)

a) Les thermoplastiques :

Les thermoplastiques ramollissent sous l'effet de la chaleur. Ils deviennent souples ; malléables et durcissent à nouveau quand on les refroidit. Comme cette transformation est réversible, ces matériaux conservent leurs propriétés et ils sont facilement recyclables. Leurs

polymères de base sont constitués par des macromolécules linéaires, reliées par des liaisons faibles qui peuvent être rompues sous l'effet de la chaleur ou de fortes contraintes.

On trouve principalement :

Tableau I- 1: Thermoplastique et leur caractéristique

Thermoplastique	Caractéristique
PMMA (polyméthacrylate de méthyle)	Lisse, brillant, transparent
PP (polypropylène)	Se plis à froid, souple
Polystyrène choc	Pour le thermoformage
PET (téréphtalate...)	Dont on fait des bouteilles

b) Les thermodurcissables :

Les thermodurcissables sont des plastiques qui prennent une forme définitive au premier refroidissement. La réversibilité de forme est impossible car ils ne se ramollissent plus une fois moulés. Sous de très hautes températures, ils se dégradent et brûlent (carbonisation). Les molécules de ces polymères sont organisées de longues chaînes dans lesquelles un grand nombre de liaisons chimiques solides et tridimensionnelles ne peuvent pas être rompues et se renforcent quand le plastique est chauffé.

La matière thermodurcissable garde toujours sa forme en raison de ces liaisons croisées et des pontages très résistants qui empêchent tout glissement entre les chaînes. (10)

Par exemple :

- Polyuréthannes ;
- Les polyesters insaturés ;
- Les phénoplastes ;
- Les résines époxydes et phénoliques
-

c) Les élastomères :

Ces polymères présentent les mêmes qualités élastiques que le caoutchouc. Un élastomère au repos est constitué de longues chaînes moléculaires repliées sur elles-mêmes.

Sous l'action d'une contrainte, les molécules peuvent glisser les unes par rapport aux autres et se déformer. Pour que le matériau de base présente une bonne élasticité ; il subit une

vulcanisation. C'est un procédé de cuisson et de durcissement qui permet de créer un réseau tridimensionnel plus ou moins rigide sans supprimer la flexibilité des chaînes moléculaires.

On introduit dans l'élastomère au cours de la vulcanisation du soufre, du carbone et différents agents chimiques.

Différentes formulations permettent de produire des caoutchoucs de synthèse en vue d'utilisations spécifiques.

Les élastomères sont employés dans la fabrication des coussins, de certains isolants, des pneus. (11)

Exemples :

- Polybutadiène ;
- Poly (butadiène/styrène) ;
- Polyéthylène chloré ;

I-2-2-6 Selon leur structure (dimensionnalité) :

Les polymères peuvent encore être classés en trois catégories) (12)

a) Les polymères linéaires (ou monodimensionnels) :

Pour lesquels chaque chaîne macromoléculaire est constituée d'un nombre (éventuellement) élevé mais fini d'unités monomères ; de tels systèmes correspondent à la polymérisation de monomères bivalents et une macromolécule linéaire peut être très schématiquement représentée par un trait continu divisé en intervalles figurant chacun une unité monomère (figure I-7).

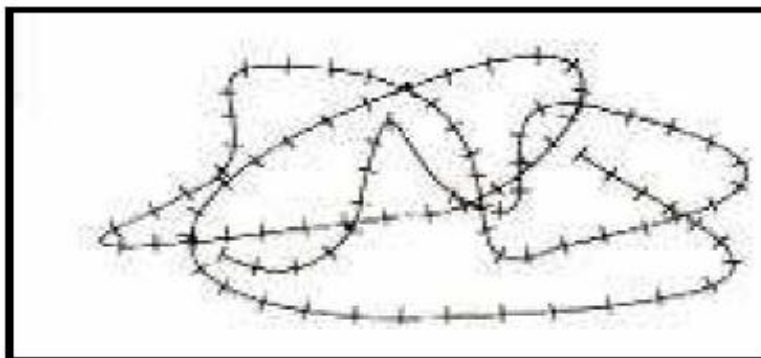


Figure I- 7: Représentation de la chaîne d'un polymère linéaire (13)

b) Des polymères bidimensionnels :

Dont certains peuvent être produits 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 (figure-8). (14)

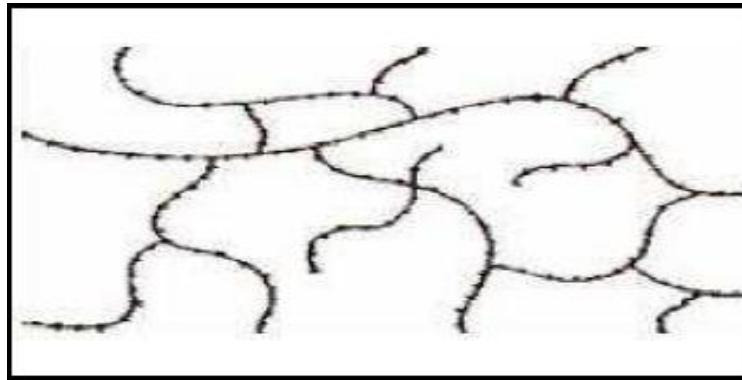


Figure I- 8 : Représentation schématique d'un polymère Bidimensionnel : le carbone graphite.

c) Les 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.

Leur dimension moléculaire peut être considérée comme infinie puisque toutes les unités monomères constitutives 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 système peut être représenté sur la figure (I-9).

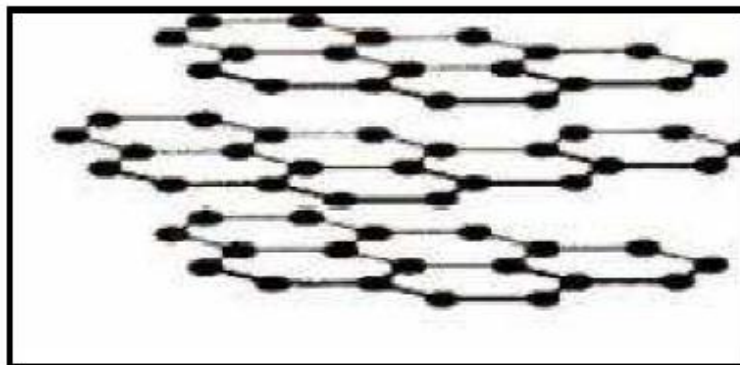


Figure I- 9 : Représentation schématique d'un polymère Tridimensionnel. (15)

I-2-3 Comportement thermique

Les propriétés mécaniques des polymères dépendent fortement de la température. À basse température, la plupart des polymères présentent un état vitreux : ils sont rigides. Lorsque la température augmente, ils passent par un état de transition : pour une plage de températures spécifiques du polymère, les chaînes macromoléculaires glissent les unes par rapport aux autres et le polymère se ramollit. Cette plage de températures est appelée température de transition vitreuse, notée T_g . À une température plus élevée, le polymère passe par un plateau caoutchouteux : son comportement est viscoélastique. À cet état, les forces de Van der Waals et la réticulation entre chaînes servent de force de rappel lorsque l'on déforme le matériau. Enfin, lorsque l'on élève la température de polymères peu réticulés, on peut assister à une phase d'écoulement visqueux, correspondant au désenchevêtrement des chaînes. Ce dernier comportement est utilisé pour mettre en forme les matières plastiques.

Les polymères étant utilisés la plupart du temps à température ambiante, on dit qu'ils sont élastomères si leur température de transition vitreuse est inférieure à la température ambiante (Comportement caoutchouteux) (16); ils sont plastomères (comportement rigide) dans l'autre cas.

La nature du polymère, sa masse moléculaire moyenne, son degré de polymérisation, sa structure influent énormément sur la largeur de ces différents domaines et sur leur seuil d'apparition en fonction du temps ou de la température.

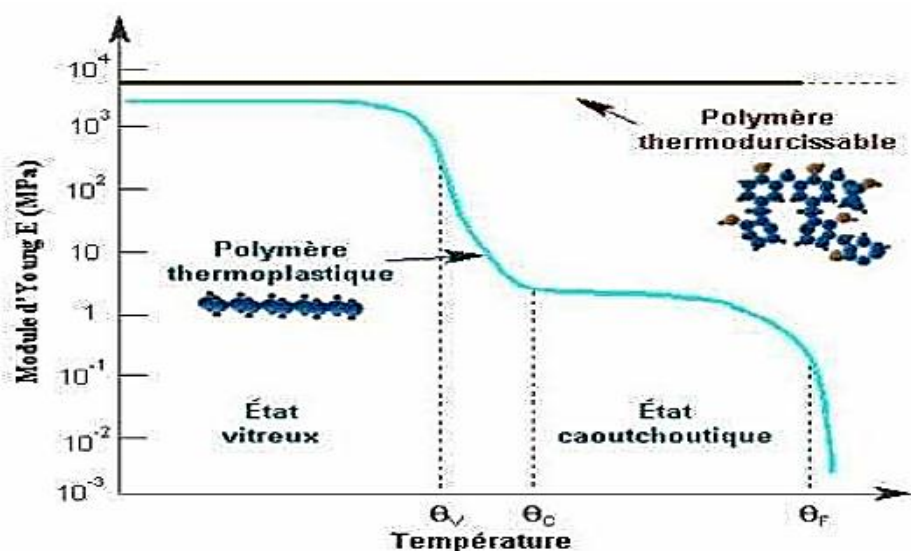


Figure I- 10 : Variation du module d'Young d'un polymère en fonction de la température

- À basse température, le mouvement des chaînes macromoléculaires est bloqué : le polymère est dans un état vitreux, dur et relativement fragile (zone I).
- À partir de la température de transition vitreuse θ_v , l'agitation thermique est suffisante pour que la chaîne se déforme. Le polymère, qui devient alors de plus en plus souple, se comporte comme un caoutchouc (zone II) : il se caractérise par un faible module d'élasticité et une très grande déformation élastique.
- À une température supérieure à celle du plateau caoutchoutique θ_c , la rigidité du polymère s'effondre et celui-ci se comporte comme un liquide visqueux (zone III) jusqu'à la température de fusion θ_f . Lorsqu'un tel polymère est refroidi, il reprend un comportement caoutchoutique puis vitreux d'où le terme de polymère thermoplastique.

I-2-3-1 Température de transition vitreuse

Pour la plupart des polymères il existe une température qui marque une frontière entre deux états fondamentaux : état vitreux et caoutchouteux. Ce phénomène de frontière a été observé pour la première fois sur des élastomères (caoutchouc naturel).

Très rapidement il a été aussi constaté sur l'ensemble des polymères thermoplastiques. La transition est d'autant plus apparente que le matériau est amorphe, car dans un polymère partiellement cristallin seule la partie amorphe est concernée par le phénomène. A titre d'exemple, ceci peut être illustré par les variations du volume spécifique en fonction de la température (figure I.11).

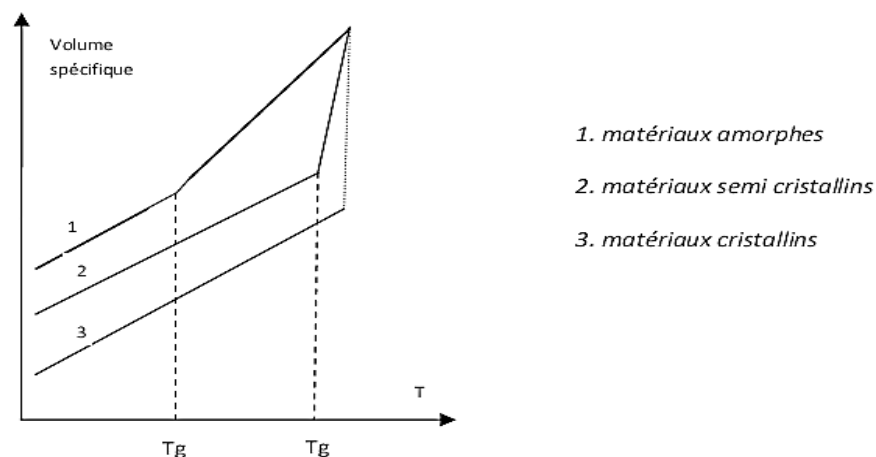


Figure I- 11 : Variation du volume spécifique en fonction de la température pour des polymères

Amorphes, partiellement cristallin et cristallin

Pour un polymère totalement amorphe on voit qu'il y a un changement de pente bien net. Par convention, la température de transition vitreuse correspond à l'intersection des deux pentes. En revanche, lorsque le polymère est totalement cristallin, on ne remarque aucune variation dans la pente de la courbe jusqu'au moment de la fusion. Il n'y a donc pas de T_g pour ce type de polymère.

❖ **Etat vitreux :**

À l'état vitreux (basse température) les mouvements moléculaires accessibles au polymère ne peuvent pas amorcer le coopératif le long du squelette de la chaîne. Les déformations accessibles sont donc faibles et le module de Young est élevé. Pour vitreux qu'il soit, le polymère n'est pas figé, il existe toujours des fluctuations temporelles et spatiales de conformation.

A de fortes contraintes le processus de déformation plastique peut être activé à température dite température de transition ductile/ fragile, inférieure à la température de transition vitreuse.

Le comportement apparent du polymère lorsqu'il est vitreux est viscoélastique, viscoplastique, avec une ductilité macroscopique plus ou moins développée en fonction de la température et de la vitesse

❖ **Zone de transition :**

La zone de transition, associée à la relaxation vitreuse, ou zone viscoélastique marque le moment ou des changements de conformation globale, c'est-à-dire des mouvements coopératifs le long de squelette de la chaîne, deviennent possible. Le module de Young décroît donc rapidement et le comportement est très évolutif.

❖ **Zone caoutchouteuse :**

Sur la zone caoutchouteuse la température est suffisante pour que la chaîne balais spontanément toutes ses conformations possibles en un temps très court devant le temps représentatif de la sollicitation. Par contre, la température est trop faible pour autoriser le dés enchevêtrement des chaînes à grande échelle. Macroscopiquement, les chaînes apparaissent donc souples mais l'écoulement est interdit.

Le matériau devient progressivement hyper -élastique, en fait, visco hyper élastique, s'il n'est pas réticulé. Les processus plastiques cèdent le pas à l'élasticité entropique aux grandes déformations. Le plateau caoutchouteux d'un semi cristallin est plus haut et plus long que celui d'un amorphe. Ces deux points expliquent qu'un semi cristallin, tel le PP

ou le PE, peut être utilisé au-dessous de sa transition vitreuse, tandis qu'un amorphe, tel le PS, sera limité à son plateau vitreux. Pour utiliser un amorphe au-delà de sa transition vitreuse il faut le réticuler. Un polymère semi cristallin reste donc visco plastique, avec un durcissement structurel et/ou endommagement, sur son plateau caoutchouteux.

❖ **Zone fluide :**

La zone fluide apparaît quand le dés enchevêtrement devient probable. Les chaînes apparaissent statistiquement indépendantes les unes des autres. La sollicitation pourra donc très facilement les déplacer les unes par rapport aux autres. Le comportement devient majoritairement visqueux, mais reste viscoplastique.

I-3 Polystyrène :

I-3-1 Introduction :

Le polystyrène est une matière très largement utilisée dans le monde, pour différentes applications et dans différents secteurs. De ce fait, de grands volumes de polystyrène sont produits. Tous les produits élastomères à base de styrène sont des copolymères ou des mélanges de polymères. Il trouve son application dans plusieurs domaines, en particulier dans l'industrie des emballages, des plastifiants, des résines, des récipients, les vitres, les diffuseurs de lumière et les équipements électriques...etc.

Le polystyrène (PS) peut être moulé par injection pour donner un grand nombre de produits (gobelets, ustensiles de cuisine, poignée de peigne, jouets...etc.). Il peut être aussi utilisé dans la fabrication des carcasses de bobines, les transformateurs de fréquences de radio et dans l'emballage.

Cependant, il existe plusieurs qualités de polystyrène, qui sont fabriqués pour des usages spécifiques et divers, nous avons les polystyrènes à usage générale, les polystyrènes résistants à la chaleur, les polystyrènes durcis et enfin les polystyrènes expansés qui sont très répandus.

I-3-2 Historique :

La découverte du polystyrène remonte à 1839, mais son exploitation à grande échelle, en Allemagne et aux États-Unis, date des années 30. Sa première fabrication industrielle ayant eu lieu en 1933. Le premier procédé utilisé (suspension aqueuse) fonctionnait en "discontinu".

Dès les années 40 apparaissent des procédés de polymérisation "en masse", continus ou discontinus. Le procédé "masse continu" triomphe dans les années 60, grâce notamment aux progrès technologiques permettant d'évacuer la chaleur produite par la polymérisation (environ 710 kJ/kg).

Le polystyrène expansé a été inventé en 1944 par Ray Mc Intire (1919-1996) alors qu'il travaillait pour Dow Chemical sur les caoutchoucs flexibles. Cette découverte fût le fruit du hasard : l'idée de départ était de copolymériser du styrène et de l'isobutène sous pression. Le styrène fut le seul à polymériser et l'isobutène se vaporisa, s'immisçant dans la matrice du polymère. Commercialisé sous le nom de Styrofoam, ce matériau rigide de faible densité a d'abord été utilisé comme isolant thermique pour le bâtiment.



Figure I- 12: Polystyrène sous sa forme commerciale

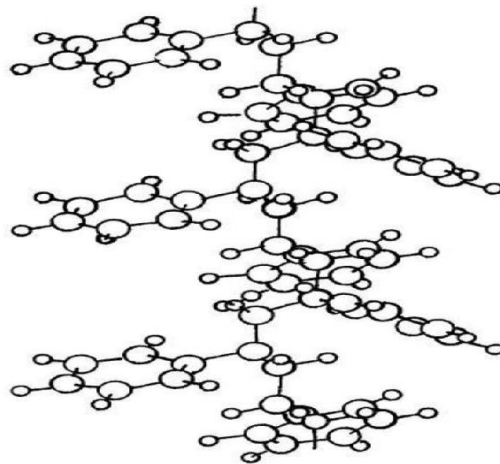


Figure I- 13 : Modèle pelote bâtonnet de Polystyrène

I-3-3 Origine

Le PS est obtenu par la polymérisation de styrène issu de la pétrochimie. Plus de 90% de la production de styrène provient de la déshydrogénation de l'éthylbenzène fabriqué à partir du benzène et de l'éthylène (Sfeir et Vignes, 2008). Sa formule chimique est C_8H_8 . Il ne contient que du carbone et de l'hydrogène comme éléments chimiques

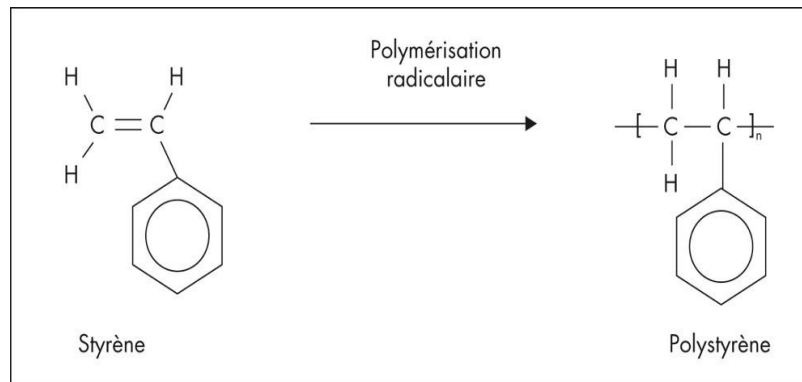


Figure I- 14: Polymérisation du monomère de styrène en polystyrène (tiré de : Technique de l'Ingénieur, s. d.)

I-3-3-1 Styrène

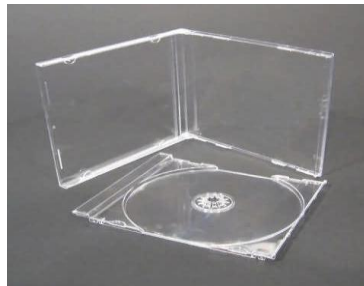
Le styrène, $C_6H_5CH=CH_2$, est le monomère principal des polymères styréniques. Il est obtenu en mélangeant de l'éthylène et du benzène qui se combinent en éthylbenzène, lequel est déshydrogéné ou soumis à un cracking pour obtenir le styrène. La polymérisation radicalaire du styrène seul donne un homopolymère, le polystyrène standard cristal, produit amorphe, atactique, transparent et cassant. Du fait de la compatibilité du styrène avec de nombreux monomères et polymères, on peut le modifier par copolymérisation pour apporter des propriétés particulières, comme la résistance aux chocs, une meilleure tenue thermique...etc.

I-3-4 Différents types de polystyrène

❖ Polystyrène standard (cristal)

Ce PS est également appelé le polystyrène d'utilisation général (General Purpose Polystyrène (GPPS)) ou bien le polystyrène rigide (PSR). C'est un polymère amorphe, transparent, brillant, rigide, cassant et pouvant être coloré. Il est souvent appelé PS cristal à cause de son aspect transparent. C'est le premier PS obtenu suite à la polymérisation. Toutes

les autres formes du PS sont obtenues par modification de celui-ci. Le PS cristal peut également être façonné par injection et des pièces moulées, comme des gobelets transparents ou des boîtiers de Digital Versatile Disc (DVD), sont obtenues. Dans ce cas, il porte le nom de PS injecté.

**PIPETTE GRADUÉE****BOITIER POUR CD****GOUBLET**

❖ Le polystyrène choc :

C'est un polymère amorphe constitué de deux phases distinctes l'une continue (matrice) de polystyrène, et l'autre discontinue comprenant des nodules de polybutadiène dispersés dans la matrice et dont la taille varie en général de 1 à 5 μm . Le PS choc ou HIPS en anglais (High impact polystyrène) est opaque, car les deux phases n'ont pas le même indice de réfraction. La résistance aux chocs est aussi une conséquence de cette structure à deux phases. Lors d'un choc, chaque nodule d'élastomère est capable d'absorber une certaine quantité d'énergie et, de ce fait, de participer à l'arrêt de la propagation d'une fissure.

Des propriétés particulières peuvent être obtenues en faisant varier la morphologie de la dispersion caoutchouteuse. (17) La figure I.15 montre une image TEM d'un polystyrène choc commercial. On observe les sphères du butadiène dans la matrice du PS.

L'amélioration de la résistance au choc des polymères styrénique tels que le polystyrène à haute résistance au choc (HIPS) ou le copolymère d'acrylonitrile-styrène-butadiène (ABS) est habituellement réalisée en incorporant une phase en caoutchouc dans la matrice rigide styrénique (polystyrène ou copolymères styrénique tels que styrène/acrylonitrile) (18).

Cette structure multi phasique confère au HIPS des propriétés mécaniques améliorées tels que (la bonne résistance au choc, l'allongement à la rupture amélioré, et la dureté élevée) (18).

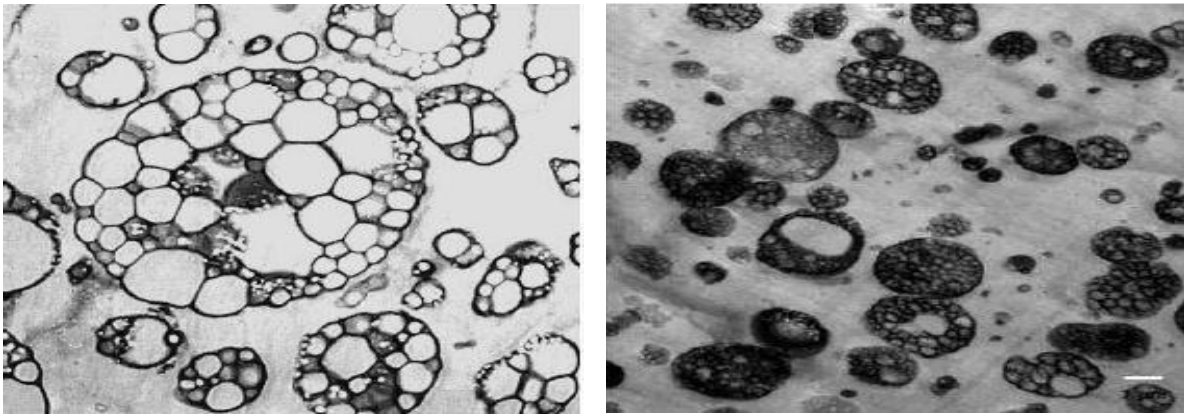


Figure I- 15: Micrographie du microscope électronique à transmission du polystyrène choc (MET) (17)

- **Structure de polystyrène choc**

Copolymère polybutadiène/styrène, appelé aussi HIPS (High Impact Polystyrène) résistant aux chocs mais opaque .de structure syndiotactique

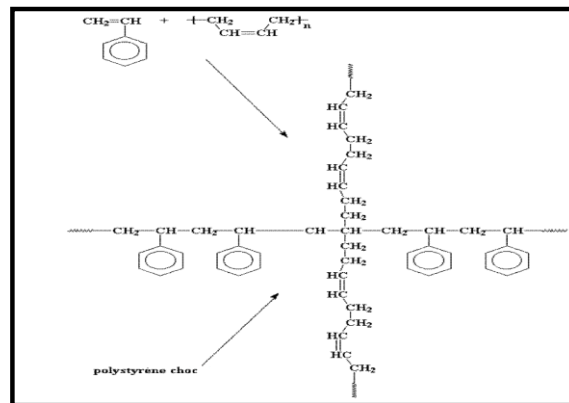


Figure I- 16 : Unités isométriques microstructurales du polybutadiène. (18)

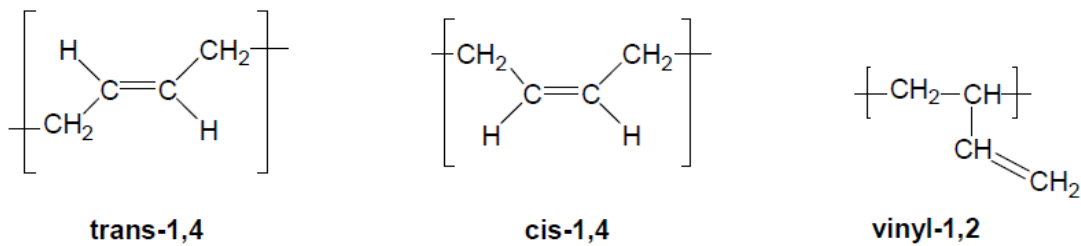


Figure I- 17: Représentation semi-développée de la chaîne macromoléculaire du polystyrène

Tableau I- 2 : Propriétés du HIPS (19)

Rhéologiques :	I-A-3-4
Indice de fluidité (200 °C-5 kg) (g/10min)	2 à 25
Thermiques :	I-A-3-4
Température Vicat (50N) (montée en température=50° C/h) (°C)	78 à 95
Température de fléchissement sous charge (1,8 MPa recuit)..... (°C)	76 à 94
Coefficient de dilatation linéaire (mm/°C)	9*10 ⁻⁵
Conductivité thermique (W/m.K)	0.17
Capacité thermique massique à 23 °C..... (J/kg. °C)	Environ 1 300
Mécaniques	4 à 15
Choc Charpy entaillé (kJ/m ²)	4 à 15
Choc Izod barreau entaillé (kJ/m ²)	18 à 32
Résistance au seuil d'écoulement..... (MPa)	16 à 36
Contrainte à la rupture (en traction) (MPa)	20 à 60
Allongement à la rupture..... (%)	1 600 à 2 300
Module d'élasticité en flexion (MPa)	1600 à 2500
Electriques :	
Rigidité diélectrique (kV/mm)	150
Résistivité superficielle (W)	> 10 ¹³

Diverses propriétés

- Masse volumique 1,04 (g/cm³).
- Retrait au moulage 0,4 à 0,7 (%)
- Absorption d'eau < 0,1 (%)
- Propriétés optiques Opaque

I-3-4-1 Polystyrène expansé PSE

Il est constitué de 98 % d'air. On distingue deux types de PSE : les polystyrènes expansés moulés (PSE-M) et les polystyrènes expansés extrudés (PSE-E).

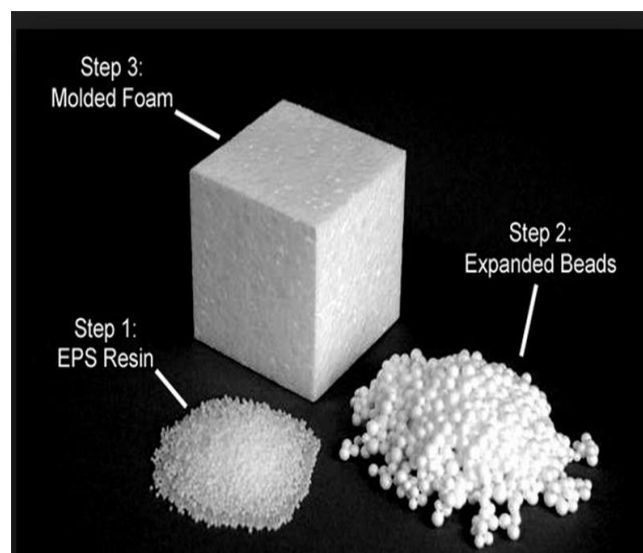


Figure I- 18: Image de PSE expansé en différents états

❖ Le PSE-M

Est obtenu à partir d'un polystyrène "expansible" qui n'est rien d'autre qu'un polystyrène cristal auquel on a ajouté, en cours de polymérisation, un agent d'expansion, le pentane (C₅H₁₂), dont la température d'ébullition, à la pression atmosphérique, est de 35°C. Une pré-expansion est opérée à la vapeur d'eau puis une période de stabilisation permet aux perles de PS pré-expansées de perdre leur excédent d'eau. Enfin, dans un moule, on les expands et on les moule à la vapeur.



Figure I- 19 : Polystyrène expansé moulé (PSE-M).

- ❖ **Le PSE-E** : est quant à lui obtenu lors de l'extrusion par injection sous pression d'un gaz (les HCFC ont été remplacés par le pentane) dans le polymère cristal fondu.



Figure I- 20 : Polystyrène expansé extrudé (PSE-X).

I-3-5 Avantages et inconvénients des Polymères

Avantages

- Les matières plastiques sont des matériaux peu coûteux.
- Elles sont résistantes à la corrosion.
- Elles sont chimiquement inertes
- . La mise en place des matières plastiques passe par le moulage, ce qui permet d'obtenir des formes plus complexes.

Inconvénients

- Non résistance à la chaleur.
- Toxicité des gaz de combustion.
- Non résistance aux produits chimiques.
- Lorsque les matières plastiques sont abandonnées dans la nature, il leur faut plusieurs décennies pour se décomposer.

I- 4 THERMOFORMAGE

I-4-1 Introductions :

Le thermoformage est l'un des procédés de mise en forme des polymères les plus utilisés permettant de réaliser, à partir de feuilles ou plaques généralement extrudées ou calandrées, des objets concaves d'épaisseurs et de dimensions diverses. Il consiste à chauffer une feuille de polymère jusqu'à une température permettant sa déformation, puis à la mettre en forme dans ou sur un moule. Après refroidissement, on obtient l'objet désiré.

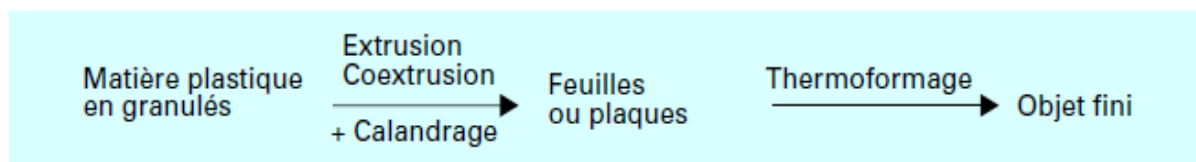
Les possibilités de produits finis sont nombreuses avec l'utilisation du thermoformage. Les Produits thermoformés peuvent allier résistance, légèreté, transparence, design les rendant ainsi incontournables. L'usinage peut compléter les pièces thermoformées et plusieurs finis de textures et de couleurs sont aussi disponibles. Même si parfois nous l'ignorons, le plastique thermoformé est omniprésent dans notre vie de tous les jours. Les emballages plastiques durs, les pots de yaourt, les coques et habillages de certains appareils utilisent cette technologie qui a l'avantage d'être très économique. Dans le domaine des jouets et du modélisme, réalisation de coques de voitures, de bateaux, éléments de cockpit, de verrière, de fuselage ou de voilure d'avions, de véhicules spatiaux ou création de décors et de personnages. Dans les applications

plus classiques, création d'emballages spéciaux, blisters, carrelages, protections, petits conteneurs, barquettes, moules culinaires basse température, plastification d'objets divers, etc. Pour ces utilisations, les masters (moules ou préformes) pourront le plus souvent être réalisés en bois, en argile ou en pâte à modeler durcissable pour des travaux d'amateurs mais pour des applications industrielles ils seront métalliques.

I-4-2 Présentations du thermoformage :

Les techniques de formage sont utilisées très largement dans l'industrie, elles vont de l'estampage, forgeage des métaux au thermoformage des matières plastiques.

Le thermoformage permet la production industrielle d'objets les plus divers tels qu'un carter de ventilateur, une barquette d'emballage, un pot de yaourt, une baignoire, etc. L'objet thermoformé s'obtient en deux étapes de transformation du matériau initial. La matière plastique, produite par l'industrie chimique à partir de monomères, se trouve dans la plupart des cas, sous forme de granulés. La première étape de mise en forme, consiste en la fabrication d'une feuille ou d'une plaque par la technique de l'extrusion. La seconde étape, en ligne, ou en reprise, est l'opération proprement dite du thermoformage, qui va conduire à l'objet final.



Le thermoformage permet de réaliser des objets d'épaisseurs très variables, de quelques dizaines de micromètres à plus d'un centimètre ; de travailler à très hautes cadences de production, avec des outillages bon marché, qui compensent le handicap du coût de la matière première. Aujourd'hui, le thermoformage est l'un des plus grands procédés de transformation des polymères thermoplastiques. Si le principe est resté le même depuis plusieurs décennies, les installations ont quant à elles, évolué. Elles permettent de transformer facilement la plupart des matériaux thermoplastiques, le polypropylène, le polystyrène, le polychlorure de vinyle, le polyméthacrylate de méthyle, les multicouches associant plusieurs types de polymères.

De plus en plus, on voit apparaître des polymères expansés qui confèrent aux objets, légèreté et isolation thermique. Les marchés intéressés sont ceux de l'emballage alimentaire, l'électroménager, le sanitaire, l'automobile, etc.

I-4-3 Principe :

Le thermoformage consiste à chauffer une feuille, ou une plaque, à une température permettant sa déformation dans un moule dont elle épouse la forme par action d'une différence de pression entre ses deux faces. Après refroidissement, on obtient l'objet désiré.

La mise en forme s'effectue généralement par une pression d'air sur la feuille, ou une dépression d'air sous cette dernière, souvent assistée mécaniquement par un poinçon (figure-21). Les moules peuvent être en plâtre, en bois, en résine, en métal ... l'aspiration de l'air par la pompe électrique permet l'utilisation de moules en positif et en négatif.

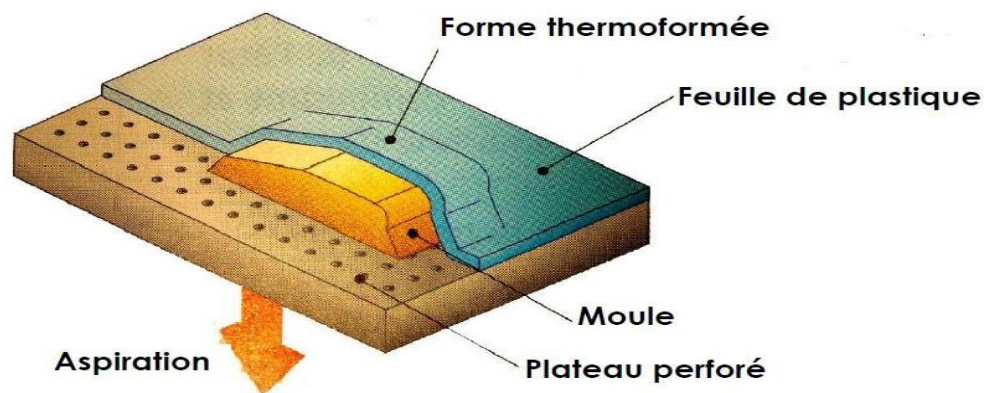


Figure I- 21: Principe du thermoformage : moule négatif

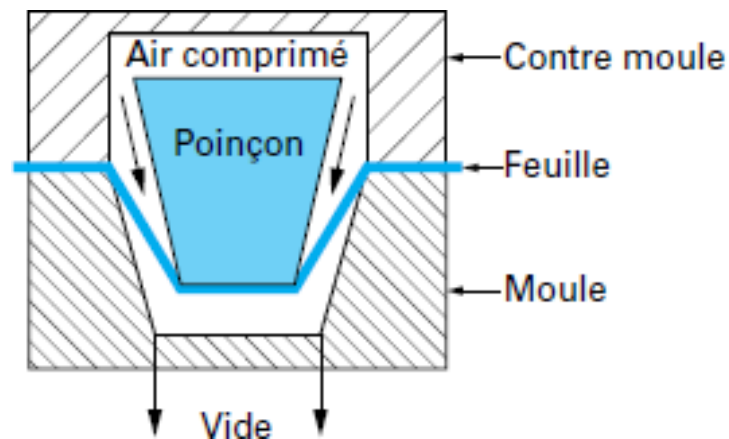
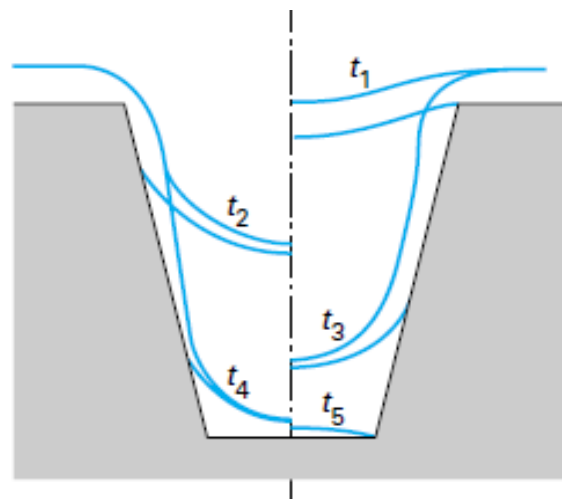


Figure I- 22 : principe de thermoformage : moule positif

C'est un procédé de transformation « basse pression », qui impose de faibles contraintes à la feuille. Les matériaux ne peuvent donc être formés que lorsque leurs propriétés mécaniques ont chuté, dans la zone du plateau caoutchouteux pour les polymères amorphes et dans la zone de la température de fusion pour les semi-cristallins.

L'art du thermoformage consiste à maîtriser le comportement de la feuille au cours de toutes les transformations qu'elle va subir notamment pendant le chauffage et le formage.

Si le principe général est le même, de nombreuses variantes existent, dans la géométrie des moules, dans le cycle de mise en pression, etc. L'étirage que subit le matériau pendant sa déformation va conduire à une diminution et à une hétérogénéité de l'épaisseur dans l'objet fini (figure I-23). La recherche d'une répartition idéale des épaisseurs est à l'origine de différentes variantes du cycle de thermoformage.



t_1 à t_5 : temps croissants de thermoformage

Figure I- 23 : Variation des épaisseurs au cours du thermoformage : moule négatif (19)

❖ Bullage avant formage sur moule positif ou négatif

Cette technique permet de diminuer les différences d'épaisseur entre les bords et le fond des pièces réalisées en thermoformage sur moule positif. On crée un étirement de la feuille préalablement ramollie, en appliquant une pression d'air. On a ainsi formation d'une bulle avant le formage de la pièce.

❖ **Différences entre moule positif et négatif**

Tableau I- 2 : La différence entre moule positif et négatif.

	Moule positif (en relief)	Moule négatif (en creux)
Qualité de la surface extérieure	Identique à la qualité de la surface de la plaque avant thermoformage (pas de contact avec le moule)	Fonction de l'état de surface du moule
Qualité de la surface intérieure	Fonction de l'état de surface du moule, risque de traces de démoulage	Identique à la qualité de la surface de la plaque avant thermoformage (pas de contact avec le moule)
Démoulage	Difficile pour les pièces profondes ou sans dépouille car le retrait de la pièce se fait sur le poinçon	Aisé car le retrait ne provoque pas de serrage sur le moule
Quantité d'air aspirée	Minime donc (formage rapide)	Importante formage lent
Variation d'épaisseur	Fond épais (épaisseur de plaque) bords minces	Fond mince bords épais
Formation de plis sur les pièces	Possible dans le cas de moule multi empreintes	Pas de plis dans le cas de moule multi empreintes
Coût du moule	Moule plus simple et meilleur marché	Moule plus cher

I-4-4 Les étapes de thermoformage :**I-4-4-1 PREPARATION DES FEUILLES**

La quantité et le type de préparation de la feuille dépendent de l'épaisseur de la feuille et du processus utilisé pour le formage. Le calibre épais est supérieur à 3,0 mm et le matériau d'une épaisseur supérieure à 13 mm est généralement appelé plaque. La feuille mince et le film sont fabriqués en rouleaux du moment que ce matériau est flexible. Les matériaux de moyenne épaisseur, de 1,50 mm à 3,0 mm sont généralement traités sous forme de feuilles

découpées et empilés à plat pour éliminer les problèmes de gondolage ou d'autres déformations indésirables avant le traitement.

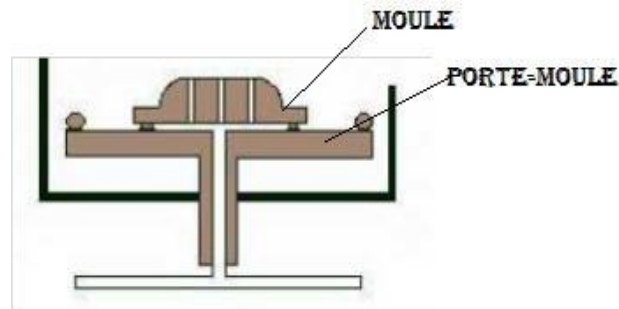


Figure I- 24: Fixation de moule sur plateau porte-moule

I-4-4-2 SECHAGE :

Certains matériaux sont hygroscopiques, ce qui signifie qu'ils absorbent l'humidité au niveau moléculaire. Si de l'humidité est présente pendant le processus de chauffage, elle se transforme en vapeur et crée des défauts de qualité. Si un séchage est nécessaire, il est effectué dans des fours à recirculation à une température d'environ 60 à 150 degrés et peut durer entre 2 et 4 heures en fonction du matériau et de l'épaisseur de la feuille.

I-4-4-3 CHARGEMENT :

Les feuilles fines sont généralement « alimentées en rouleaux » en utilisant un processus continu. Les feuilles épaisses prédécoupées sont chargées manuellement ou automatiquement. Les feuilles coupées sont maintenues dans un cadre de serrage sur tous les bords afin qu'elles ne se tordent pas et ne se déforment pas.

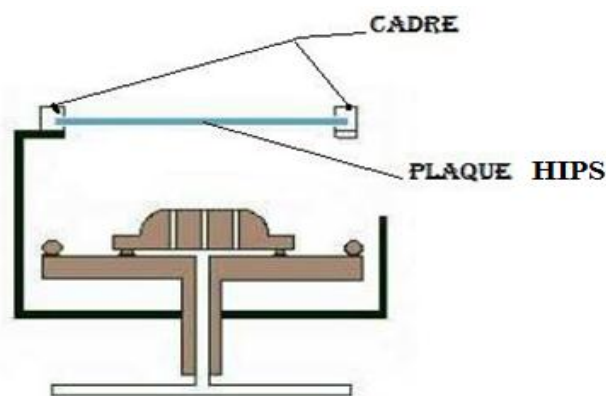


Figure I- 25 : Resserrage

I-4-4-4 CHAUFFAGE :

Le processus de chauffage a pour but de chauffer la feuille uniformément, les trois modes de transfert de chaleur sont utilisés en occurrence : le rayonnement, conduction et convection. Le rayonnement est principalement utilisé pour chauffer les feuilles à la température souhaitée. La conduction est utilisée pour chauffer le noyau de la feuille ainsi que dans le processus de refroidissement. La convection est principalement utilisée pour refroidir la pièce afin de pouvoir la démouler rapidement.

Les plastiques sont des isolants thermiques naturels. Il est très difficile de transférer de la chaleur au centre d'une épaisse feuille de plastique. Par exemple, la conductivité thermique de l'aluminium est presque 700 fois supérieure à celle du polystyrène. L'énergie radiante est absorbée dans la surface de la feuille jusqu'à une profondeur d'environ 0,2 à 0,7 mm. La conduction doit ensuite transférer la chaleur dans le noyau de la feuille. La conductivité thermique est beaucoup moins importante lors du formage de la feuille mince par rapport aux feuilles épaisses qui peuvent brûler à la surface avant que le noyau n'atteigne la température de formage. En conséquence, le thermoformage a une limite naturelle sur l'épaisseur de la feuille. Le formage de feuilles de plus de 13mm d'épaisseur nécessite une expertise et des équipements spéciaux. Plusieurs variables doivent être prises en compte, quelle que soit la source de chaleur à utiliser. L'une de ces variables est le type de matériau à former, car différentes matières plastiques nécessitent différentes quantités d'énergie radiante pour atteindre la température de formage.

Les plastiques étant des isolants thermiques naturels, l'étape de chauffage est souvent l'étape la plus longue du processus. Cela peut être réduit en modifiant le processus, par exemple en créant deux étapes de chauffage. Cela peut potentiellement réduire de moitié le temps de cycle.

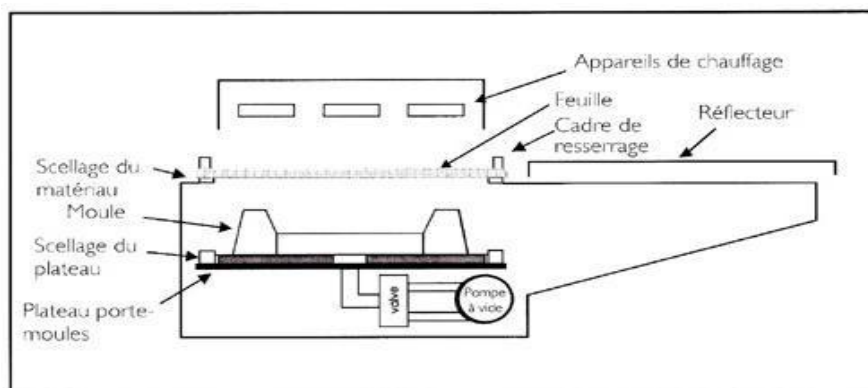
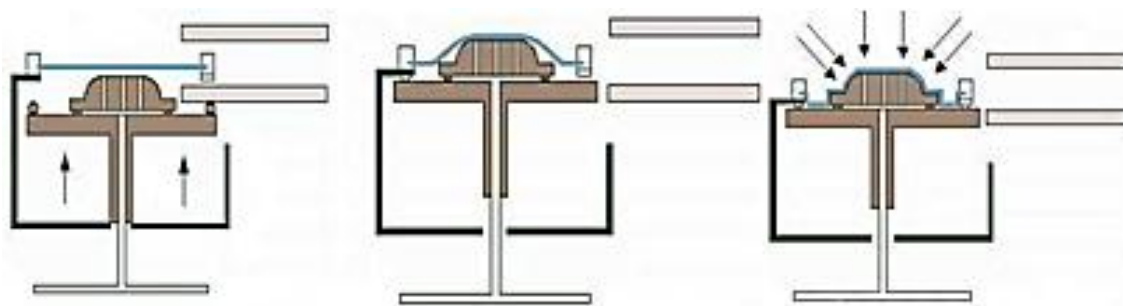


Figure I- 26 : Le cycle de chauffage

I-4-4-5 FORMAGE

Lorsque la pression atmosphérique est insuffisante pour donner à la feuille la forme ou les détails souhaités, le formage sous pression peut être utilisé. Dans ce cas, on utilise de l'air comprimé plutôt que la pression atmosphérique, ce qui correspond à une limite pratique d'environ 10 fois plus élevée que la pression de vide.

Pour les pièces volumineuses et comportant des détails une combinaison de forces pour former la feuille à la géométrie souhaitée sont souvent utilisées. Par exemple, une force mécanique peut étirer la feuille, suivie d'un vide pour plaquer la feuille contre le moule. Ceci est souvent utilisé pour réduire la variation d'épaisseur de la paroi.



Evacuation de chauffage

Montée du modèle

Aspiration de plaque

Figure I- 27 : les étapes de formage

I-4-4-6 REFROIDISSEMENT

Le refroidissement commence immédiatement lorsque la feuille entre en contact avec la surface du moule. En utilisant le concept de chauffage par conduction, le plastique (chaud) chauffe le moule froid. Plus la pièce se refroidit rapidement, plus elle peut être démoulée rapidement.

L'aluminium est le matériau de moulage le plus courant pour les pièces à volume élevé et pour pratiquement tous les processus alimentés par rouleau. Le moule en aluminium est refroidi en faisant passer de l'eau à température contrôlée dans des passages forés. En utilisant le concept de chauffage par convection, le moule chaud chauffe l'eau froide. De plus, le refroidissement par convection est souvent incorporé en insufflant de l'air ou de la vapeur d'eau sur la pièce formée. Le processus de refroidissement peut être très rapide ou très long en fonction du matériau du moule et de l'épaisseur de la pièce.

I-4-4-7 DECHARGEMENT

Si la pièce n'est pas suffisamment refroidie, elle peut se déformer après son retrait. S'il fait trop froid, le cycle est trop long et les profits en pâtissent. L'éjection mécanique ou par air peut aider et fournir l'angle de dépouille maximum autorisé pour le produit.

La robotique peut être utilisée efficacement lorsque le volume peut justifier les coûts. Un autre problème clé du déchargement est la qualité de la pièce. L'emballage des produits cosmétiques peut nécessiter beaucoup plus de soin que l'emballage d'un rasoir jetable.

Le déchargement d'un puits de lumière en acrylique peut être très délicat, car le matériau se raye facilement et le client s'attend à un produit exempt de défauts.

I-4-4-8 ROGNAGE

La pièce en plastique doit être maintenue dans un cadre pendant le processus de thermoformage. Par conséquent, toutes les pièces thermoformées doivent être découpées de la feuille formée.

Cela peut être assez simple, comme une simple ligne droite, ou très complexe. Les processus d'élimination des copeaux incluent le sciage, le routage, le forage, le découpage qui peuvent être manuels, robotisés, au jet d'eau et au laser.

I-4-5 Technique de thermoformage :

En thermoformage, le déroulement d'un cycle peut être divisé en deux étapes, le pré-étirage et le formage avec pour objectif celui d'obtenir une répartition d'épaisseur de paroi sur la pièce formée la plus régulière possible.

Le pré-étirage peut être opéré de différentes manières :

- Pré-étirage mécanique avec le moule de formage lui-même.
- Pré-étirage mécanique avec le piston auxiliaire.
- Pré-étirage pneumatique par bullage ou pré-aspiration.
- Combinaison des pré-étirages, mécanique et pneumatique.

L'objectif du pré-étirage est de réaliser une préforme dont les contours et la répartition d'épaisseur permettent d'obtenir un formage final, une pièce formée ayant une répartition d'épaisseur optimale.

Le formage, suivant l'équipement de la machine et la construction de l'outil de formage, est

opéré :

- Par le vide (formage par le vide),
- Par air comprimé (formage par pression d'air)
- Par le vide coté moule et air comprimé du côté opposé
- Par le vide des cotée (par ex. pour les mousses)
- Par embossage, perçage et calibrage additionnels, pour des surfaces limitées.
- À l'aide d'outils mécaniques tels que tiroirs, poinçons, le plus souvent, pour la prévention de plis pendant le démoulage.

I-4-5-1 Thermoformage sous vide :

Le thermoformage sous vide est le procédé de thermoformage le plus polyvalent et le plus utilisé. Le matériel est moins onéreux et plus facile à utiliser que dans la plupart des techniques sous pression ou mécanique. Pour le thermoformage sous vide, la plaque de thermoplastique est serrée sur un cadre et chauffée. Lorsque la plaque chauffée atteint l'état élastique, elle est placée par-dessus l'empreinte du moule négatif. L'air qui se trouve dans l'empreinte est alors extrait par application du vide et la plaque chauffée est appliquée avec force sur le profil du moule par pression atmosphérique. Si le moule négatif est relativement profond, un amincissement se produit généralement aux bords supérieurs de la pièce. Cet amincissement est dû au fait que la plaque chaude est d'abord aspirée vers le centre du moule. La partie de la plaque qui se trouve aux bords du moule doit subir l'étirage maximum et devient ainsi la partie la plus mince de l'article formée. Le thermoformage sous vide est généralement réservé aux formes simples et peu profondes. (Figure I-28)

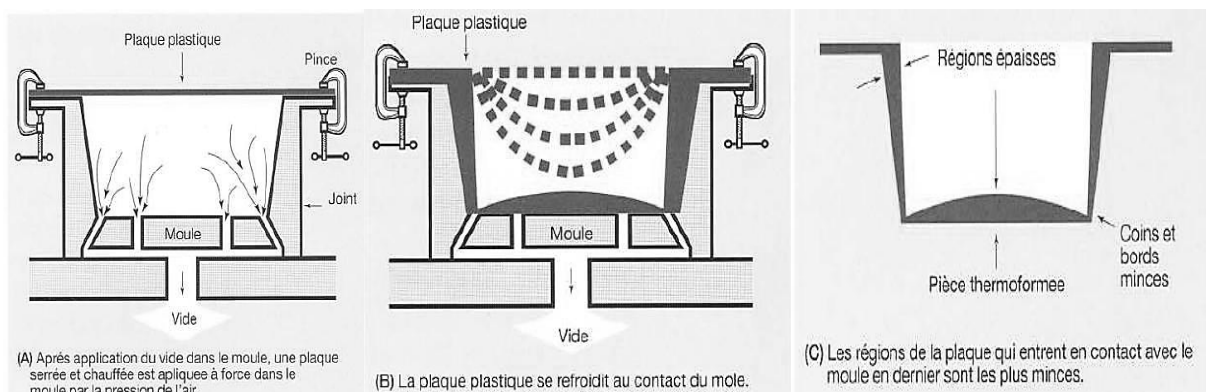


Figure I- 28 : Thermoformage par sous pression.

I-4-5-2 Drapage :

Le drapage est similaire au thermoformage sous vide, sauf que la plaque est étirée mécaniquement après avoir été mise sur cadre et chauffée. Elle est ensuite soumise à un différentiel de pression pour la former sur un moule positif. Dans ce cas, toutefois, la plaque qui entre en contact avec le moule est proche de son épaisseur. Le drapage peut être appliqué aux articles jusqu'au rapport 4 de profondeur sur diamètre. Cette technique est toutefois complexe que le thermoformage sous vide. Les moules positifs sont plus faciles à fabriquer et généralement moins onéreux que les moules négatifs, mais ils se détériorent plus facilement.

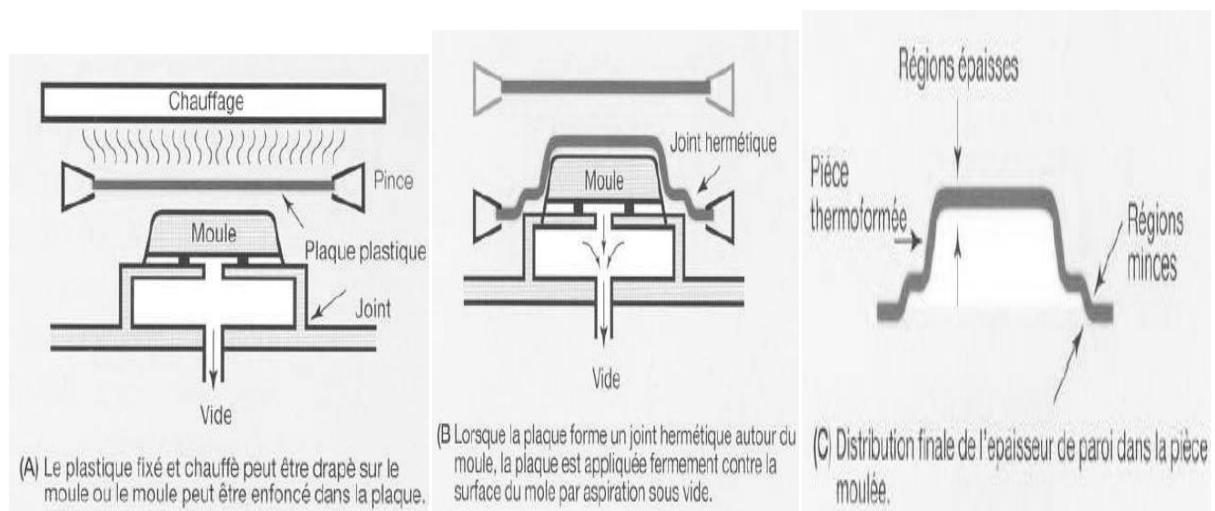


Figure I- 29: Drapage

I-4-5-3 Thermoformage par moule et contre-moule :

Le thermoformage par moule et contre-moule est similaire au moulage par compression en sens que la plaque chauffée est emprisonnée entre deux matrices réalisées en bois, en plâtre, en époxy ou en un autre matériau. Bien qu'ils soient plus onéreux, les outillages à moule et contre-moule refroidis par eau permettent de fabriquer des pièces plus précises et dans d'étroites tolérances (voir les figures)

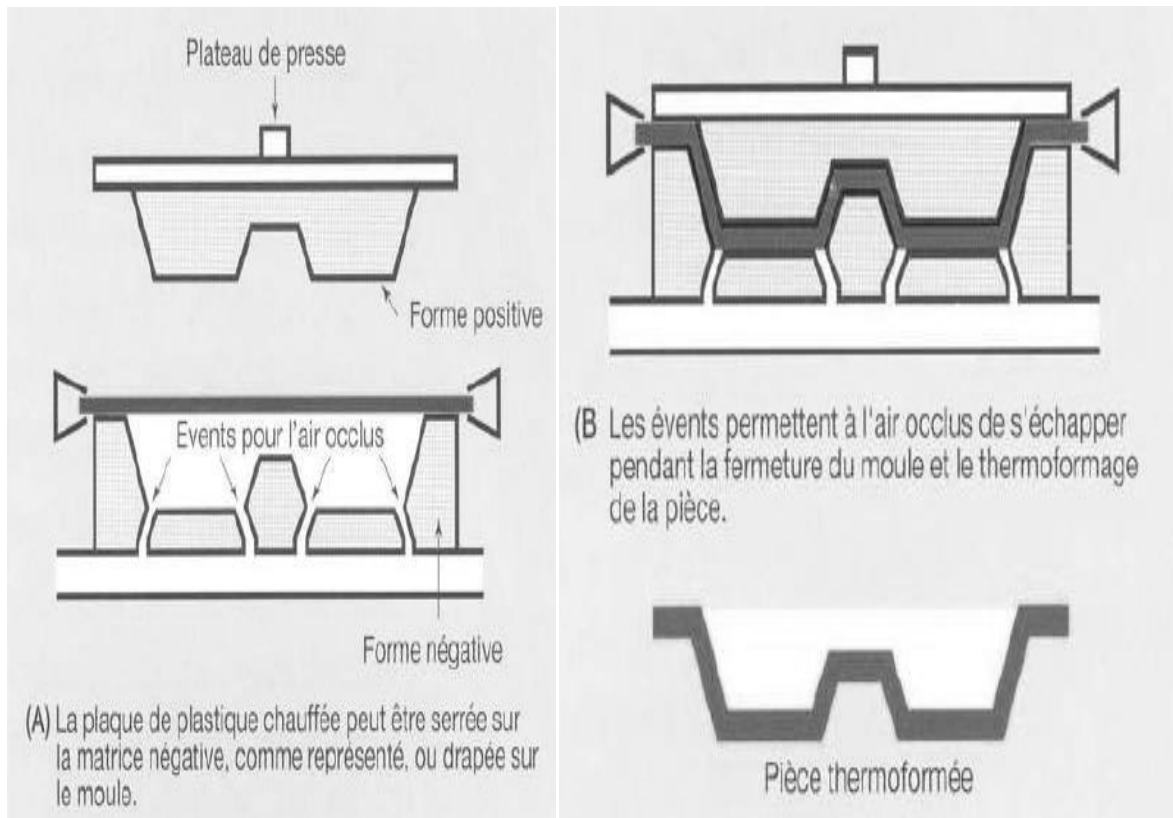


Figure I- 30: Thermoformage par moule et contre-moule

I-4-5-4 Thermoformage en bulle sous pression avec poinçon de pré-étirage :

La technique du thermoformage en bulle sous pression avec poinçon de pré-étirage peut être utilisée lorsque la plaque de thermoplastique doit être formée pour donner des articles profonds et dotés d'une bonne régularité d'épaisseur. La plaque, placée sur un cadre, est chauffée et une bulle est formée par de l'air sous pression régulée (voir figure I-31).

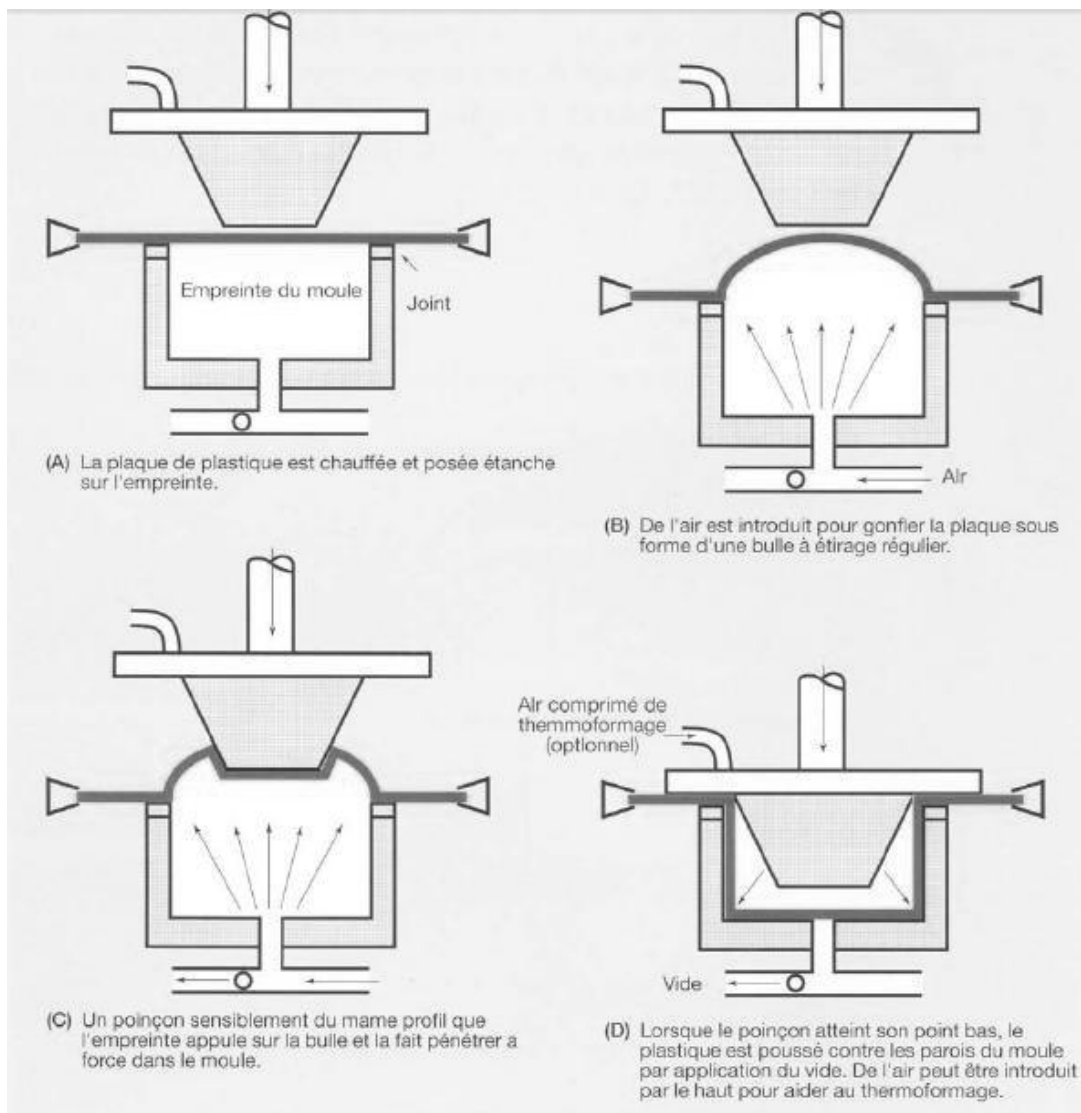


Figure I- 31: Thermoformage en bulle sous pression avec poinçon de pré-étirage

Lorsque la bulle s'est étirée jusqu'à atteindre une hauteur donnée, le poinçon de pré-étirage (qui est normalement chauffé) est abaissé pour appliquer une force à la plaque étirée dans l'empreinte. On peut jouer sur la forme et la vitesse du poinçon pour améliorer la répartition de la matière ; toutefois, le poinçon doit être aussi grand que possible pour pouvoir étirer le plastique jusqu'à adopter une forme proche de celle du produit fini. Le poinçon doit descendre dans l'empreinte sur 75% à 85% de la profondeur de l'empreinte. De l'air sous pression est alors envoyé par l'intermédiaire du poinçon tandis qu'un vide auxiliaire est appliqué dans l'empreinte.

I-4-5-5 Thermoformage sous pression avec poinçon de pré-étirage :

Le thermoformage sous pression avec poinçon de pré-étirage est similaire au thermoformage sous vide dans la mesure où un poinçon pousse la plaque dans une empreinte. De l'air comprimé envoyé par l'intermédiaire du poinçon applique ensuite une force à la plaque contre les parois du moule.

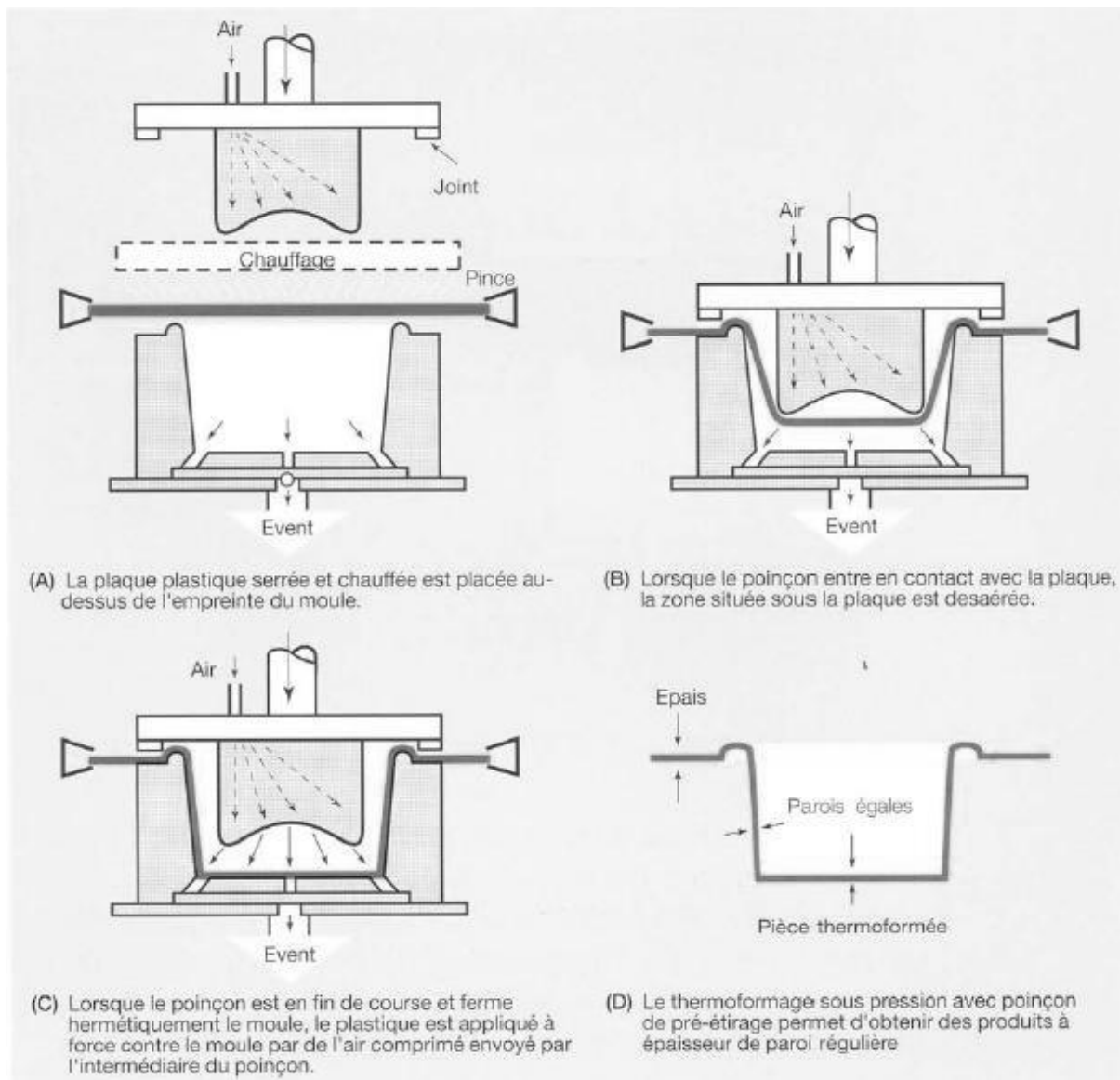


Figure I- 32: Thermoformage sous pression avec poinçon de pré-étirage

I-4-5-6 Thermoformage sous vide avec poinçon de pré-étirage :

L'amincissement aux angles ou à la périphérie des articles en forme de gobelet ou de boîte peut être évité à l'aide d'un poinçon de pré-étirage qui étire mécaniquement la matière plastique et en fait pénétrer davantage dans l'empreinte. Le poinçon, dont les dimensions doivent être de 10% à 20% inférieures à celles du moule, doit être chauffé à une température immédiatement inférieure à la température de thermoformage de la plaque.

Lorsque le moule a introduit à force la plaque chaude dans l'empreinte, l'air contenu dans le moule est aspiré pour former la pièce. Les deux procédés de thermoformage avec poinçon de pré-étirage sous vide et sous pression permettent de réaliser des emboutissages profonds, de réduire le cycle de refroidissement et de bien maîtriser l'épaisseur de paroi.

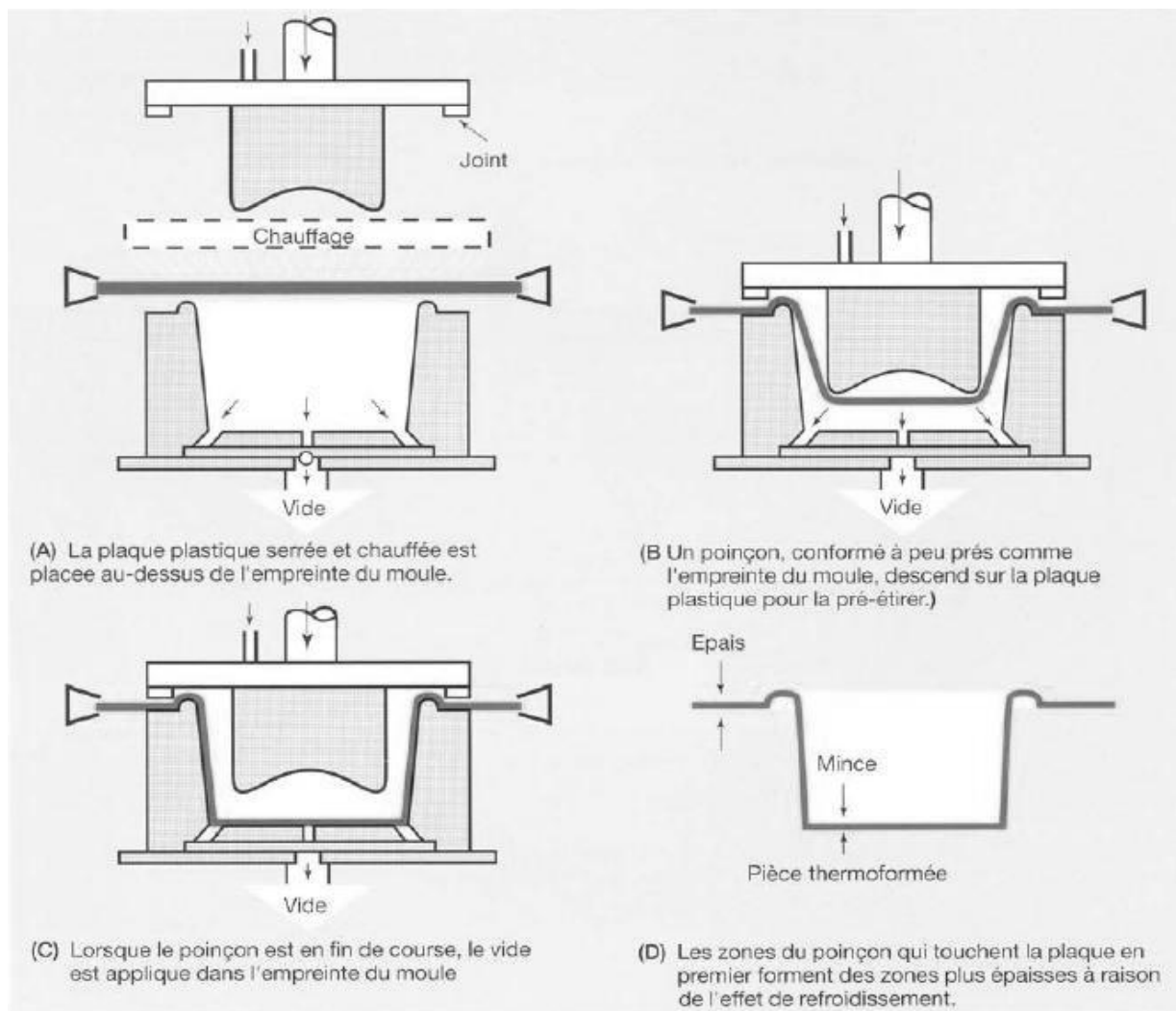


Figure I- 33: Thermoformage sous vide avec poinçon de pré-étirage

I-4-5-7 Thermoformage en relief profond sous vide :

Pour le thermoformage en relief profond sous vide, la plaque chauffée est placée au-dessus d'un caisson dans lequel le vide est appliqué pour former une bulle à l'intérieur. Le moule positif est ensuite abaissé et, par annulation du vide, la plaque plastique se replie autour du moule. Un vide auxiliaire peut aussi être appliqué au moule positif. Le thermoformage en relief profond sous vide est utilisé pour les pièces compliquées comportant des évidements (voir figure I-34).

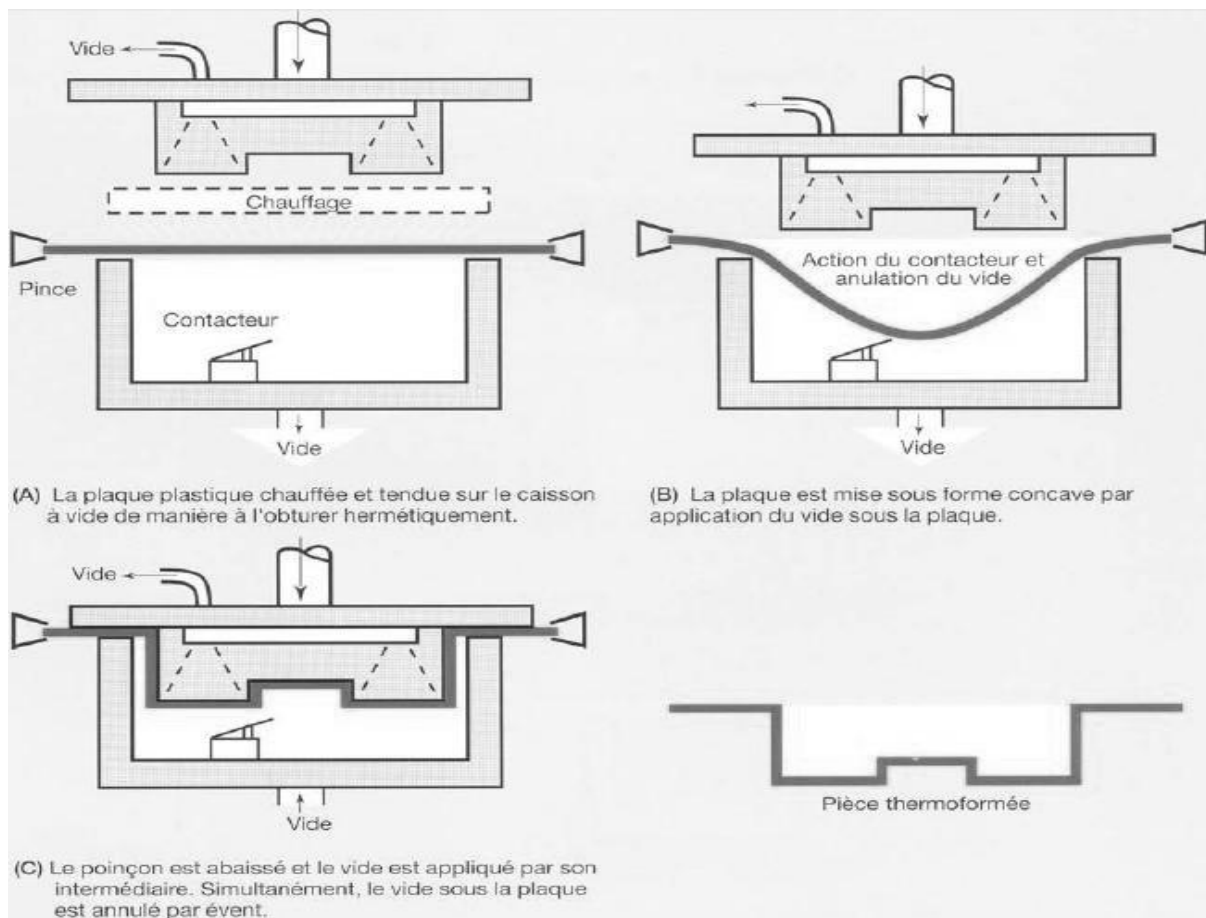


Figure I- 34: Thermoformage en relief profond sous vide

I-4-5-8 Thermoformage en relief profond sous vide avec bulle sous pression :

Pour le thermoformage en relief profond sous vide avec bulle sous pression, la plaque de thermoplastique est chauffée et étirée de 35% à 40% par de l'air sous pression. Le moule positif est ensuite abaissé, le vide est appliqué au moule positif et de l'air sous pression est envoyé dans l'empreinte négative. La plaque chauffée se replie alors sur le moule positif. Ce procédé permet de réaliser des emboutissages profonds et de former des pièces compliquées. Toutefois, le matériel est complexe et onéreux.

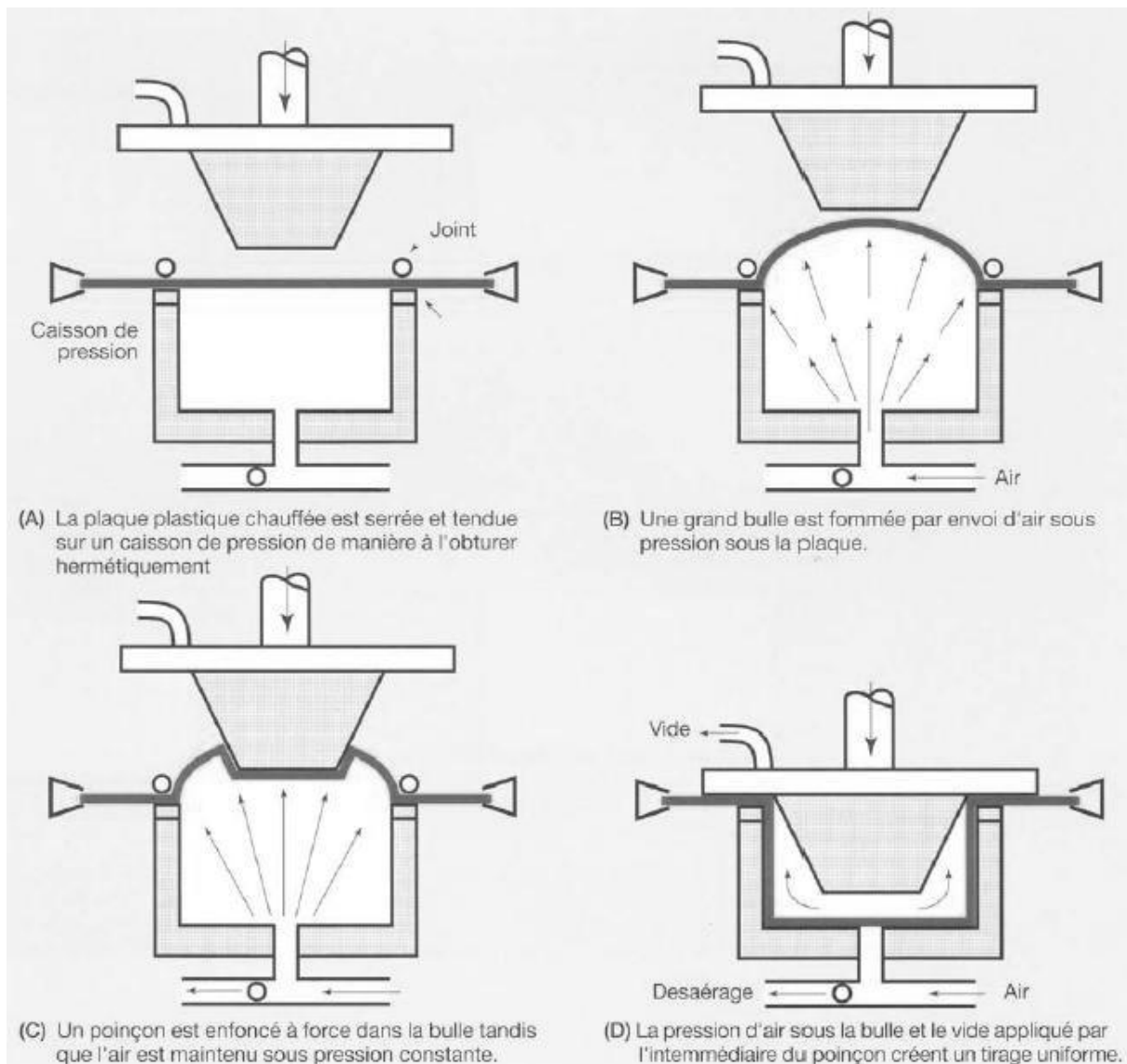


Figure I- 35 : Thermoformage en relief profond sous vide avec bulle sous pression

I-4-5-9 Thermoformage sous pression en moule ferme :

Ce procédé est similaire au thermoformage sous vide, à la différence qu'il fait appel à la fois au vide et à de l'air sous pression pour faire pénétrer avec force la plaque de thermoplastique dans un moule négatif. Les figures illustrent les étapes du procédé.

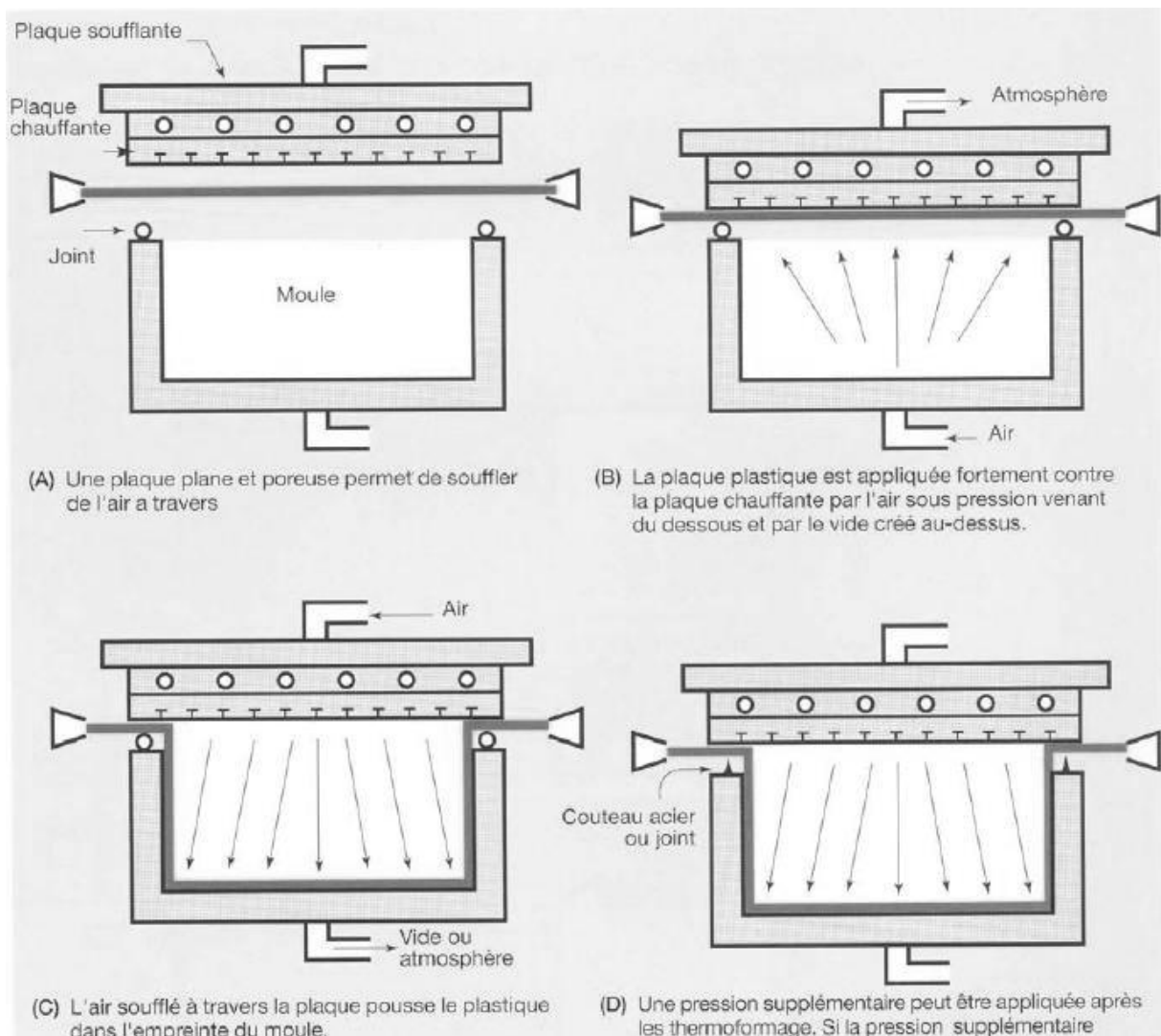


Figure I- 36 : Thermoformage sous pression en moule ferme

I-4-5-10 Thermoformage libre :

L'air sous pression forme un article lisse en forme de bulle comme ceux utilisés pour les lucarnes vitrées ou les couvercles de regard. Les deux faces de la pièce n'étant en contact qu'avec l'air, celle-ci sera exempte de marques, à moins qu'une butée ne soit utilisée pour former un contour spécial dans la bulle (voir figure-37). Il sert à noter que les pressions d'air peu élever dans celle technique.

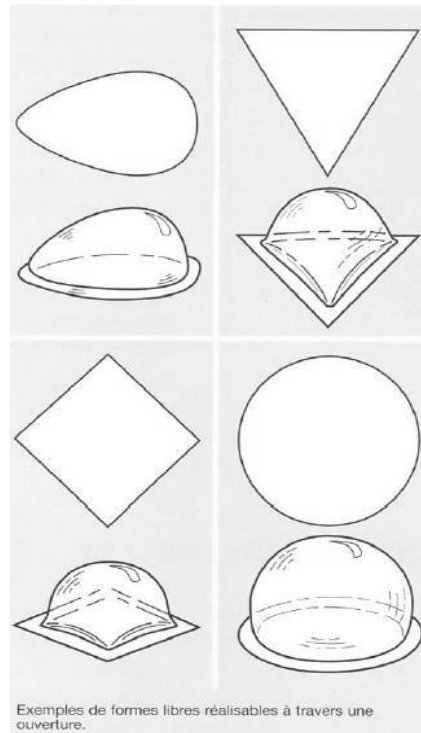


Figure I- 37 : Thermoformage libre.

I-4-5-11 Thermoformage mécanique :

Le thermoformage mécanique ne fait appel ni au vide, ni à l'air sous pression pour former la pièce. Le procédé est similaire au thermoformage par moule et contre-moule, mais les moules utilisés ne sont pas jointifs. Seules les forces mécaniques de cintrage, d'étirage ou de maintien de la plaque thermoplastique chauffée sont utilisées pour former la pièce.

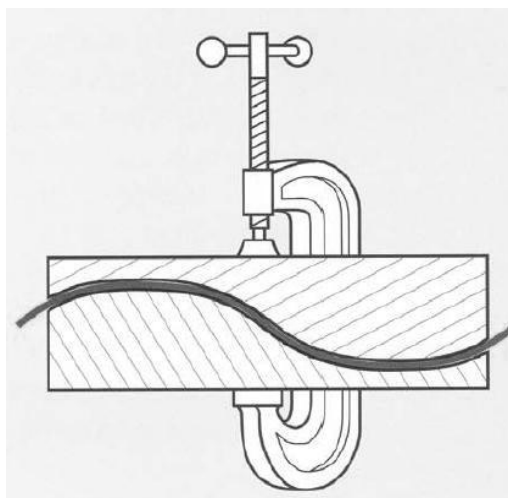


Figure I- 38 : Thermoformage mécanique

I-4-6 Avantages du thermoformage des thermoplastiques

I-4-6-1 FAIBLES COUTS DES EQUIPEMENTS :

Relativement peu coûteux par rapport à d'autres équipements de traitement de matières plastiques tels que le moulage par injection.

La force requise pour former une feuille est typiquement inférieure à 1 Bar pour le formage sous vide et inférieure à 10Bars pour le formage sous pression sans citer le moulage par injection qui se fait à plus de 680 Bars.

I-4-6-2 FAIBLES COUTS D'OUTILLAGE

En raison principalement de la basse pression utilisée dans les processus de thermoformage, l'outillage peut être fabriqué à partir de divers matériaux.

Bien que l'aluminium soit le plus souvent utilisé pour les moules de production, il est possible de produire des moules de faible volume en bois, en plâtre, en époxy, en composites et autres matériaux pouvant résister aux pressions et aux températures utilisées dans ce processus.

I-4-6-3 DELAI, DE LA CONCEPTION AU PROTOTYPE

L'outillage à faible coût est très rapide à produire, Un maquetiste peut être capable de produire un outil simple à faible volume en quelques heures seulement.

I-4-6-4 RAPPORTS SURFACE / EPAISSEUR CONSIDERABLE

Il est possible de produire des pièces très minces, trop minces pour que des procédés tels que le moulage par injection puisse produire.

Il est également possible de produire des produits de grande taille, tels que des doublures de réfrigérateur et des réservoirs, qui peuvent dépasser les capacités des procédés de moulage courants.

I-4-6-5 LARGE VARIETE DE PLASTIQUES DISPONIBLES

Presque tous les thermoplastiques pouvant être produits en feuille peuvent être thermoformés.

I-4-6-6 MULTICOUCHES

Les feuilles extrudées peuvent être produites avec de nombreuses couches de matériaux, Cela peut donner des produits thermoformés multicouches.

I-4-7 Limites et désavantages du thermoformage

I-4-7-1 EPAISSEUR NON UNIFORME

C'est l'inconvénient numéro un du processus de thermoformage. Le thermoformage étant un processus d'étirement, l'épaisseur de la paroi du produit varie en fonction de l'étirement nécessaire pour créer la géométrie souhaitée. Il existe de nombreuses règles de conception ainsi que des modifications dans le processus pour atténuer l'impact des « étirements ».

I-4-7-2 COUT DE LA FEUILLE

Le thermoformage est considéré comme un procédé secondaire vu que la feuille doit d'abord être produite. Les coûts de fabrication des feuilles s'ajoutent aux coûts des produits thermoformés.

I-4-7-3 DECOUPE

La feuille à partir de laquelle la pièce doit être thermoformée doit être fixée dans un cadre pendant le traitement de chauffage et de formage. Après le formage, les pièces doivent être retirées de la feuille à l'aide de nombreuses opérations de rognage.

Certaines d'entre elles sont hautement automatisées et très rapides, nécessitant des équipements coûteux tels que des robots et des lasers. D'autres peuvent avoir besoin de beaucoup de travail pour couper manuellement chaque partie.

I-4-7-4 COUT DU MATERIAU DE ROGNAGE

Après le retrait de la pièce de la feuille formée, les restes de squelette peuvent représenter jusqu'à 80% du matériau en feuille d'origine.

Ce matériau est généralement récupéré à l'aide de méthodes de broyage et de retraitement qui augmentent les coûts du produit.

I-4-7-5 GEOMETRIE LIMITEE

La plupart des procédés de thermoformage utilisent un moule dans lequel la feuille est étirée et refroidie. Ce moule à surface unique crée des détails sur une seule surface de la pièce. Les contre-dépouilles et les objets creux, bien que possible, créent des difficultés supplémentaires ainsi augmentation du coût.

I-4-7-6 PLAGES DE TEMPERATURE UTILE

Le thermoformage étant un formage et non un moulage, le produit a une « mémoire de forme » donc les molécules sont maintenues dans un état de contraintes. Si la température atteint la température de transition thermique la pièce reviendra à sa forme de feuille

I-5 Essai biaxial :

I-5-1 Essai de traction biaxial :

Les essais de traction biaxial consistent à exercer une contrainte dans deux directions perpendiculaires sur une même éprouvette ou encore un plan et la direction normale. Dans le premier cas on utilise des éprouvettes cruciformes, comme celle présentées sur la figure(I-40). Pour réaliser des états contraints uniformes, il faut que les bras de la croix aient des rigidités transversales assez faibles, ce que de l'on peut obtenir en les évidant. Les directions principales des contraintes sont fixées et on peut effectuer des chargements dans l'espace de contrainte tels que celui présenté sur la figure (I-42).



Figure I- 39 : Image de gauche : éprouvette de traction biaxiale montée. Image de droite : dispositif de traction biaxiale de laboratoire 3s à Grenoble.

I-5-2 But de l'essai

L'essai de traction biaxiale est utilisé pour déterminer les caractéristiques de déformation des matériaux.

I-5-3 Principe de l'essai traction biaxiale

Comme pour les essais de traction uniaxiale, les équipements utilisés pour la réalisation des essais de traction biaxiale sont : la machine de traction-compression commandée par ordinateur et un système de détermination des déformations locales dans la zone utile de l'éprouvette. La technique la plus utilisée est la corrélation d'image, qui consiste à mesurer les

déplacements des taches sur la surface de l'éprouvette à l'aide d'une caméra CCD et un logiciel d'acquisition et de traitement d'images.

Les données globales concernant les évolutions force-allongement de l'éprouvette ne sont pas exploitées dans l'identification des paramètres du comportement plastique. Il est toutefois possible d'estimer ces grandeurs à partir des figures I.13.a et b, qui montrent le schéma des biellettes, et le schéma simplifié servant à déterminer les forces sur l'éprouvette et les allongements de l'éprouvette à partir de la force et du déplacement imposés par la machine de compression.

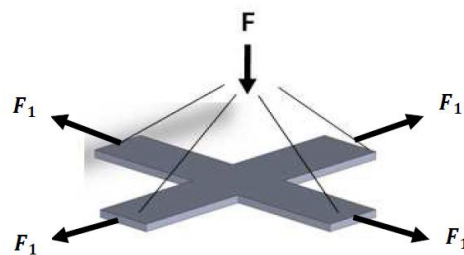


Figure I- 40 : Schéma des biellettes constituant le dispositif.

I-5-4 Les dispositifs de traction biaxiale :

Il existe un grand nombre de machines pour réaliser des essais de traction biaxiale, dont les avantages et les inconvénients sont liés à chaque type de réalisation.

Le principal inconvénient des dispositifs biaxiaux sont la nécessité de concevoir des machines spécifiques, et donc leur coût élevé, incluant les vérins hydrauliques et la réalisation d'importants ensembles mécaniques.

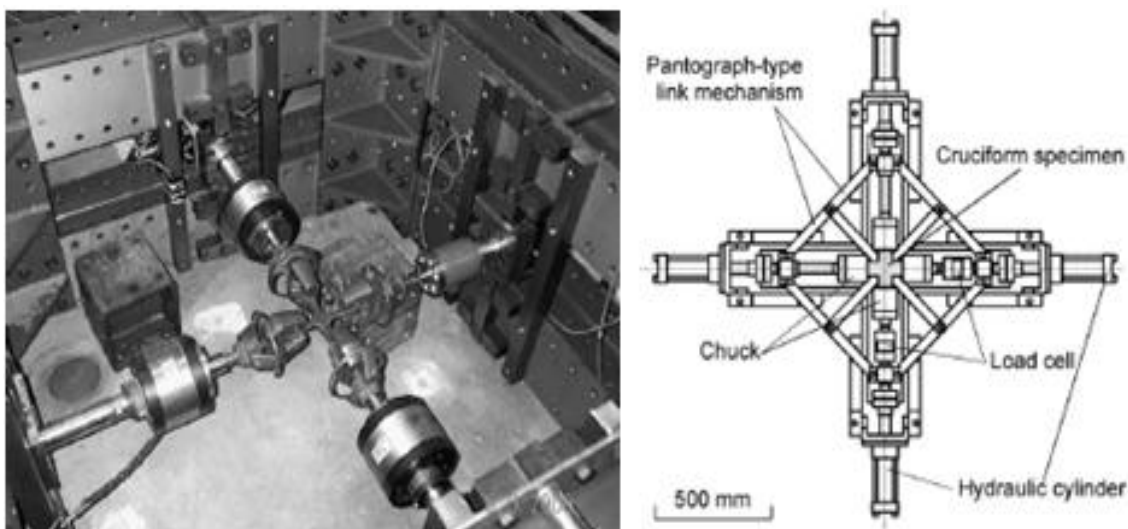


Figure I- 41: Dispositif d'essais biaxiaux

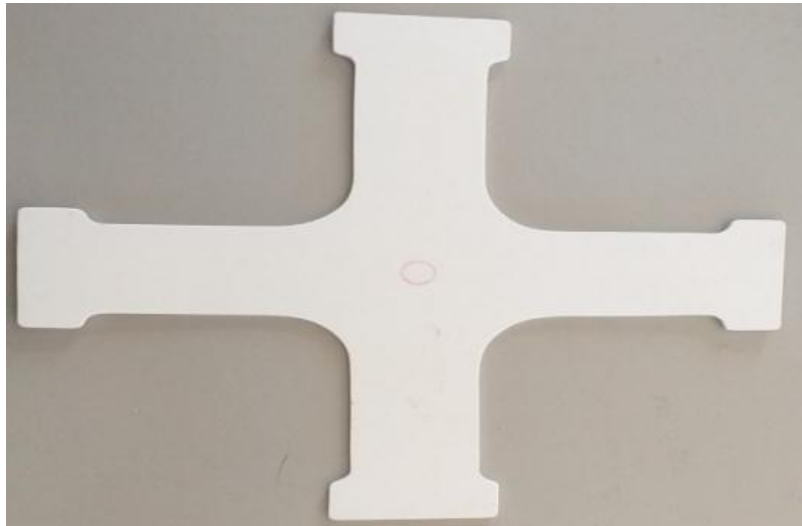


Figure I- 42: Epreuve cruciforme.

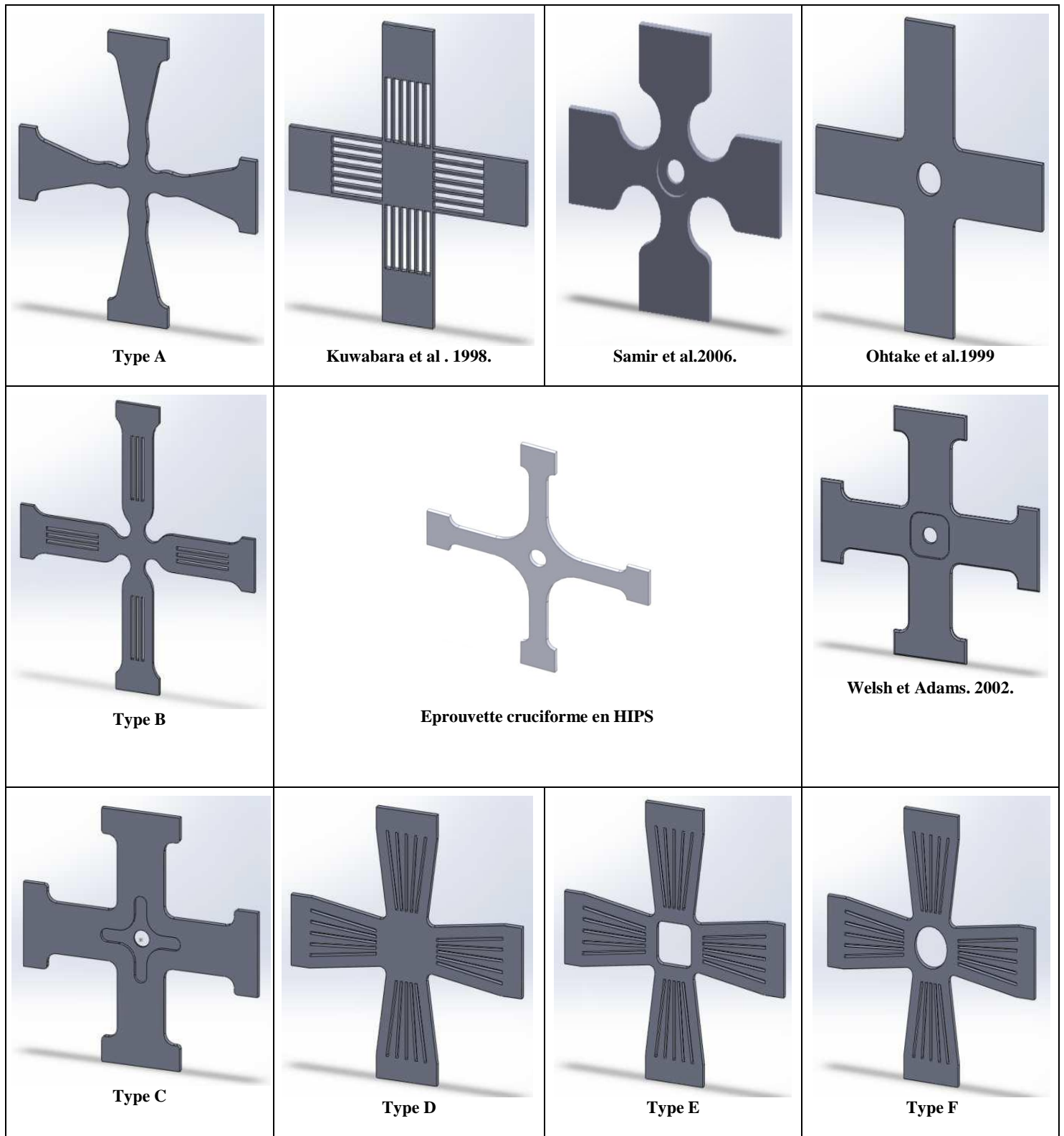
I-5-5 Les éprouvettes de traction biaxiale :

L'un des aspects les plus délicats de l'essai biaxiale avec une éprouvette en croix est la conception de l'éprouvette, qui pose des problèmes difficiles à résoudre.

Dans le cas de la recherche d'une identification directe du comportement, il est difficile de créer un champ de déformations homogènes dans la partie utile de l'éprouvette à cause de la rigidité des bras de liaison vers les mors de l'éprouvette. Il n'existe pas de modèle de géométrie standard, et il est difficile de comparer les résultats des tests de différents laboratoires.

Plusieurs types sont utilisés par les scientifiques (TabI- 4).

Tableau I- 3 : Eprouvettes cruciformes de différents types [8].



I-6 CONCLUSION :

Dans ce chapitre nous avons présenté les matériaux polymères en général en insistant sur le PS choc qui concerne notre travail. Nous avons aussi fait une présentation de différentes techniques de thermoformage. Dans le chapitre suivant, nous présenterons le banc d'essai biaxial, aussi que les calculs y afférant.

Chapitre II
Conception et réalisation
d'un banc d'essai biaxial

II-1- INTRODUCTION :

Notre modeste travail consiste à réaliser un dispositif de traction biaxial afin de caractériser des éprouvettes Cruciformes précisément en polystyrène choc (**HIPS**). Le but d'identifier le comportement mécanique de ce matériau, utilisé dans le procédé de thermoformage au niveau d'ENIEM pour la fabrication des cuves de réfrigérateur.

II-2- Description du banc d'essai :

C'est un banc qui transforme une charge axiale en charge appliquée à l'aide d'un vérin hydraulique de capacité de 100 KN sous chargement biaxial. Il est possible de réaliser deux types de sollicitation biaxial <<traction-traction>> ou bien <<traction-compression>>.

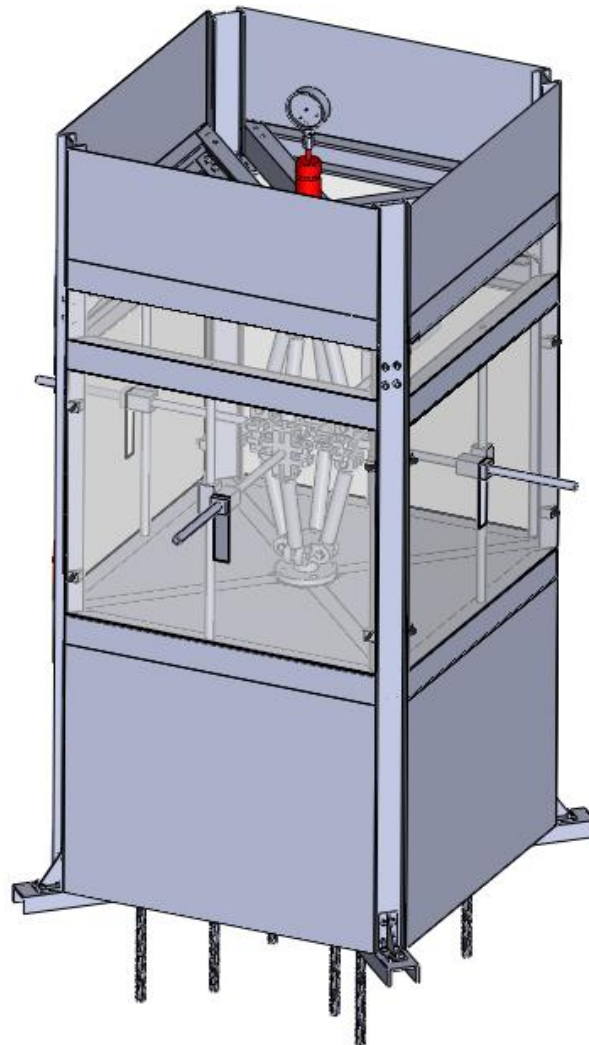


Figure II- 1: Banc d'essai traction-compression Biaxial

II-3- Répartition des forces d'application :

Le dispositif est soumis à une force de compression uniaxiale qui se transforme en une traction biaxiale à l'aide de tige à double méplats lorsqu'il s'agit d'un montage (traction – traction) figure (II-2) et en une sollicitation combinée lorsqu'il s'agit d'un montage (traction-compression) en remplaçant les 4 tiges à double méplats par 4 tiges plates placées horizontalement figure (II-3).

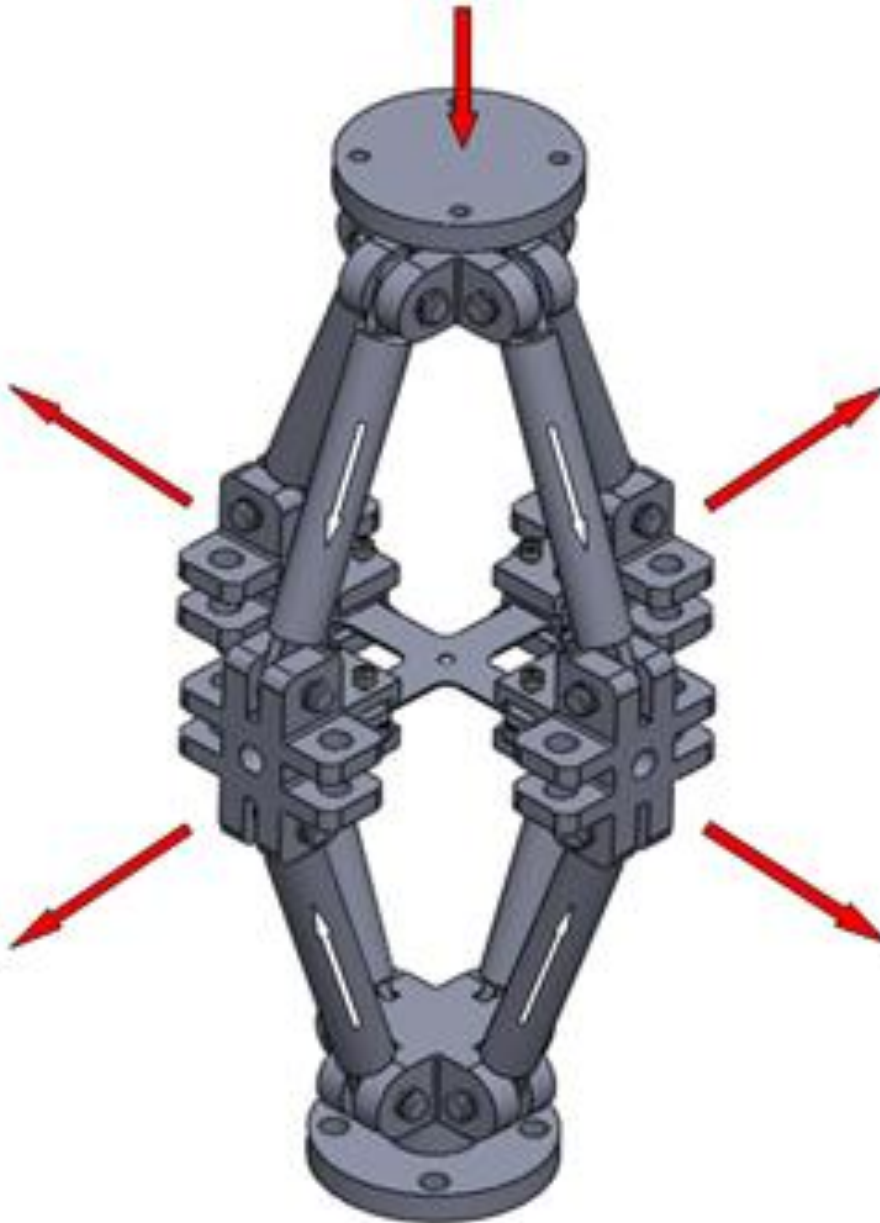


Figure II- 2: Montage traction-traction

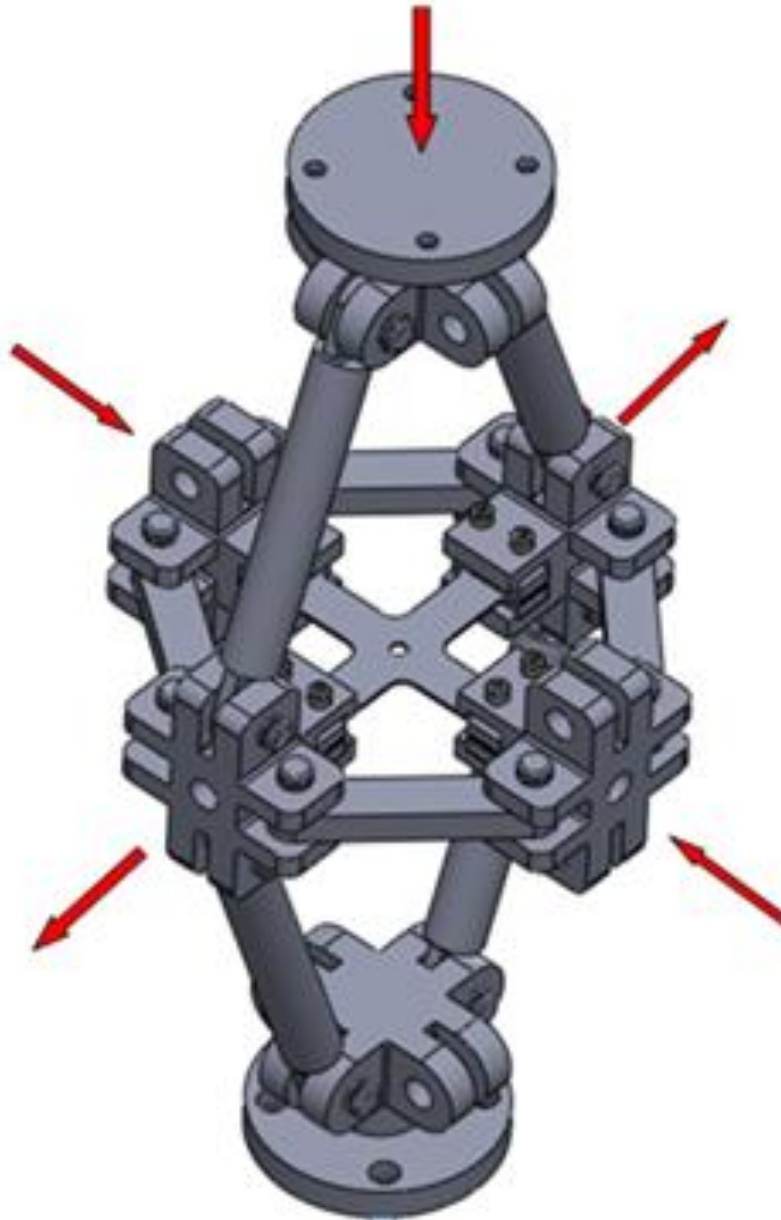


Figure II- 3: Montage traction-compression

II-4- Outillages utilisés

Lors de la réalisation du banc d'essai, nous avons utilisé différents appareils et outillages que nous pouvons classer dans deux catégories : ceux utilisés dans la fabrication et ceux utilisés pour contrôler et vérifier les côtes géométriques.

a) Appareils et Outillage de fabrication

Les différents appareils et outillages utilisés sont :

- Tour parallèles
- Fraiseuse verticale
- Perceuse verticale B 25
- Perceuse manuelle
- Forêt avec différents diamètres ($\varnothing 8$, $\varnothing 10$, $\varnothing 11$)
- Tronçonneuse manuelle
- Disque de coupe en métal et inox ($\varnothing 32$, $\varnothing 22$)
- Plieuse manuelle
- Poste à souder
- Baquettes électrodes ($\varnothing 2.5$, $\varnothing 3$, $\varnothing 3.2$)

b) Appareils et Outillages de contrôle et vérification

L'utilisation de ces appareils nous permet d'assurer certaines côtes géométriques telles que la perpendicularité, le parallélisme, le centrage...etc.

▪ Règle à bulle (règle de maçon)

Un niveau à bulle est un instrument de mesure conçu pour indiquer si une surface correspond à l'angle de référence. Par exemple l'horizontale, la verticale et 45° sont généralement proposés sur la règle du maçon.



Figure II- 4: Niveau à bulle

▪ Fil a plan toupie 6cm - Ø35 mm

Il est constitué d'une plaque guide et une masse en forme d'une toupie. Il est utilisé pour repérer l'axe de notre plaque porte-vérin qui a un trou de diamètre de 603 mm par rapport à la table.



Figure II- 5: Fil a plan toupie

▪ Niveau laser

C'est un instrument de mesure qui permet d'avoir des lignes précises. Ces avantages sont :

- Une grande visibilité Mise à niveau automatique (horizontale et verticale) pour un alignement rapide des lignes
- Grande précision (± 3 mm à 10 m)
- Utilisation simple
- Mise à niveau automatique (horizontale et verticale) jusqu'à $\pm 4^\circ$
- Trépied BT 150 Professional



Figure II- 6: Niveau laser

II-5- Définition des éléments du banc :

Nous donnons dans ce qui suit les composants qui constituent le banc d'essai biaxial tels que numérotés sur les figures II-7 et II-8.

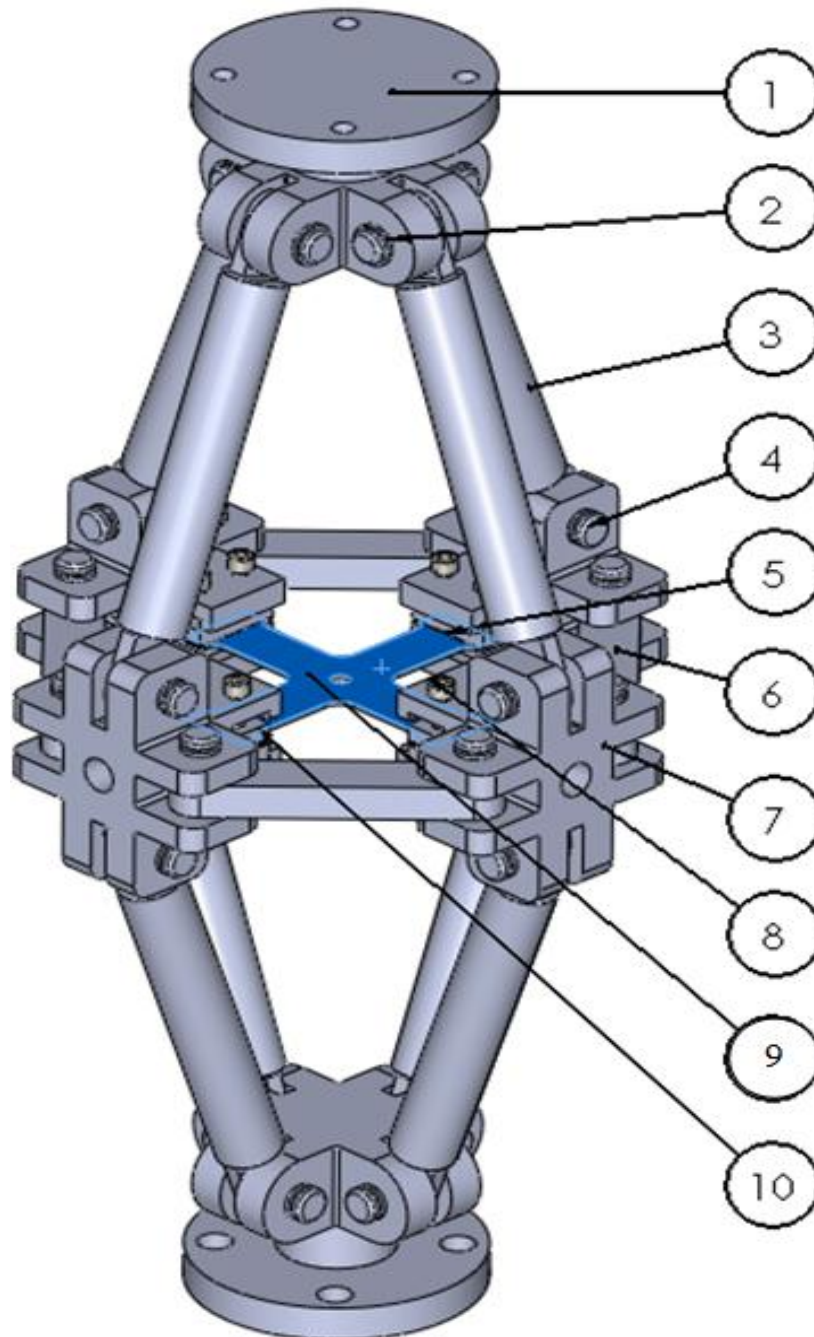


Figure II- 7: Mécanisme biaxial

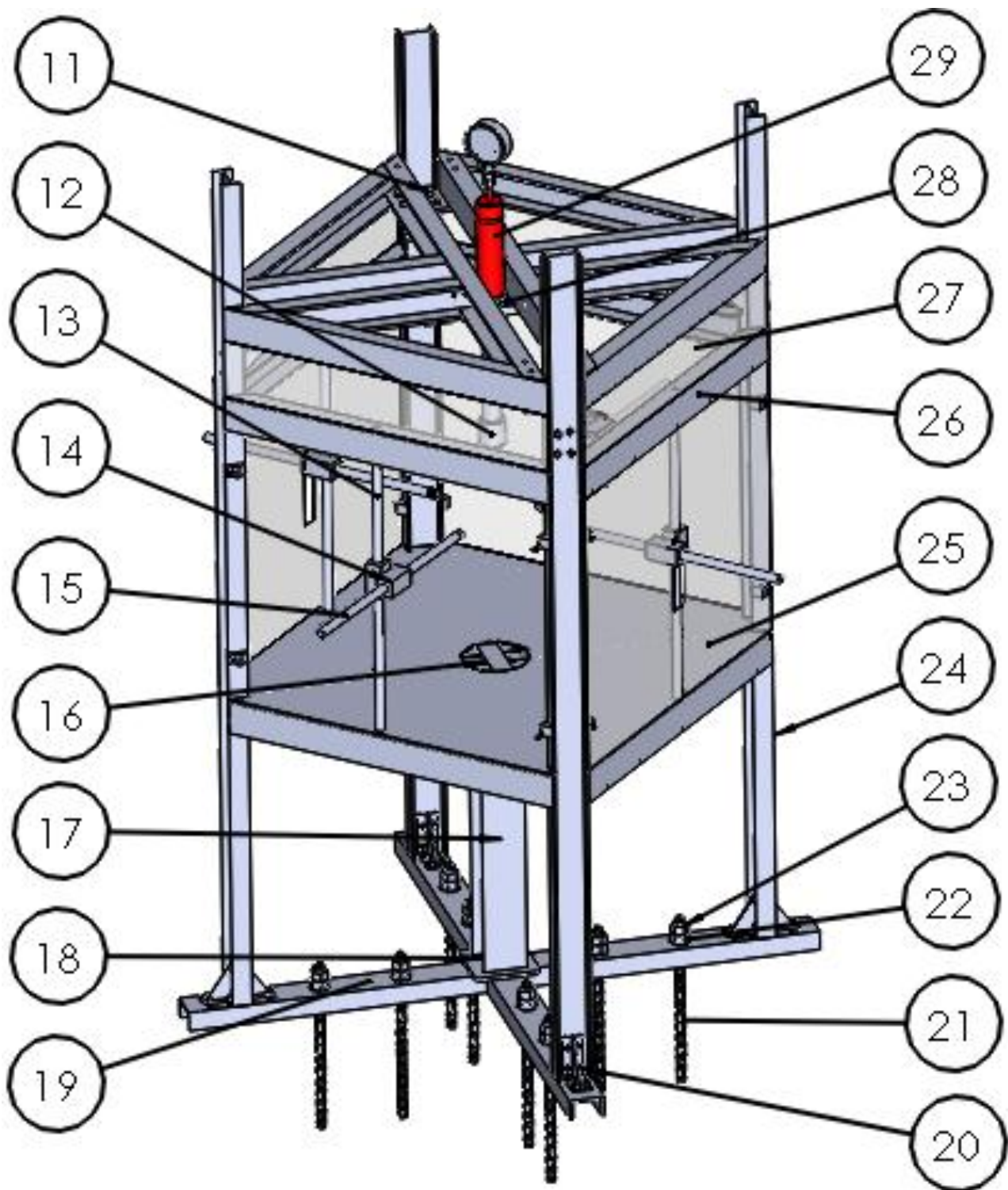


Figure II-8: Bâti du banc d'essai biaxial

La légende du banc d'essai est représentée dans le tableau ci-dessous :

Tableau II- 1: Différents éléments principales

Numérotations	Nombre de pièce	désignation
01	02	Tirant
02	24	Goupille cannelée
03	08	Bras à double méplat
04	48	Circlips
05	04	Mors de fixation
06	04	Tige plate
07	04	Bride
08	08	Vis de pression
09	01	Eprouvette
10	08	Vis de fixation
11	04	Elément de fixation
12	04	Vis de blocage
13	04	Glissière verticale
14	04	Elément de guidage
15	04	Glissière Horizontal
16	04	Triangle de renforcement
17	01	Profilé HEB100
18	02	Plaque (120×120×8)
19	03	Profilé UPN80
20	08	Triangle d'équerrage
21	08	Tige fileté Ø20
22	08	Rondelle Ø 20
23	08	Ecrous de serrage M20
24	04	Colonne en Profilé IPE80
25	01	Support du travaille
26	08	Tube carré acier (50×50)
27	08	psi glace
28	01	Plaque (340×100×27)
29	01	Vérin hydraulique
30	01	Pompe manuelle
31	01	Poste d'acquisition

II-6- Les éléments constituant le dispositif :

Les éléments constituant le dispositif sont donnés comme suivant :

- **Tirant :**

Partie supérieure du dispositif contenant quatre (4) perçages de diamètre 12mm et un taraudage de diamètre M16 d'une profondeur de 40 mm. Il permet de réaliser une liaison complète avec le piston de vérin. C'est une partie très importante du mécanisme car elle reçoit une force axiale pour la répartir en une force biaxiale.

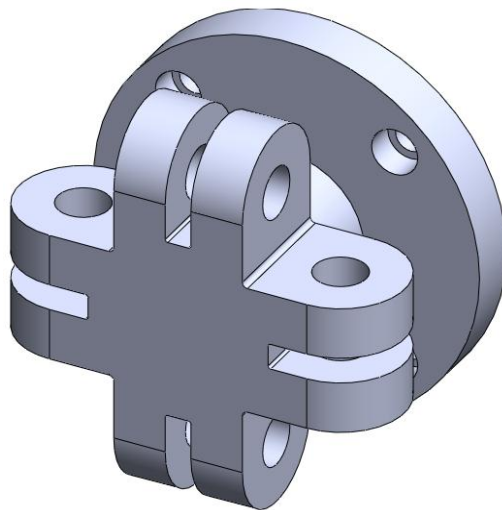


Figure II-9: Tirant

- **Bride :**

L'articulation de dimensions $140 \times 130 \times 50 \text{ mm}^3$, sert à maintenir l'éprouvette cruciforme avec les mors et vis de pression M10 \times 1,5 en CHC et assure un déplacement biaxial à l'aide des glissières horizontale et verticale.

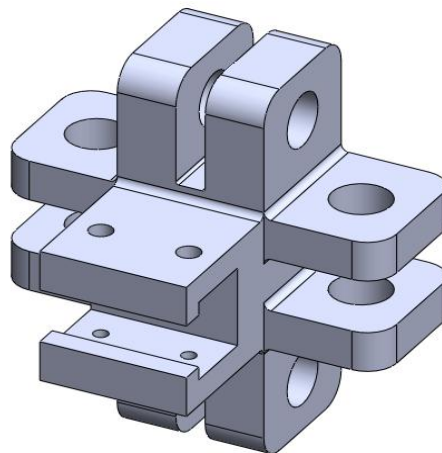


Figure II-10: Mors articulé

- **Tige à double méplat :**

Tige de dimensions 30×310 contenant un méplat et perçages de diamètre 20 mm de chaque côté. Elle reçoit un effort axial et le transforme en un effort combiné. L'inclinaison de la barre est variée suivant l'angle compris entre 0° et 45°.

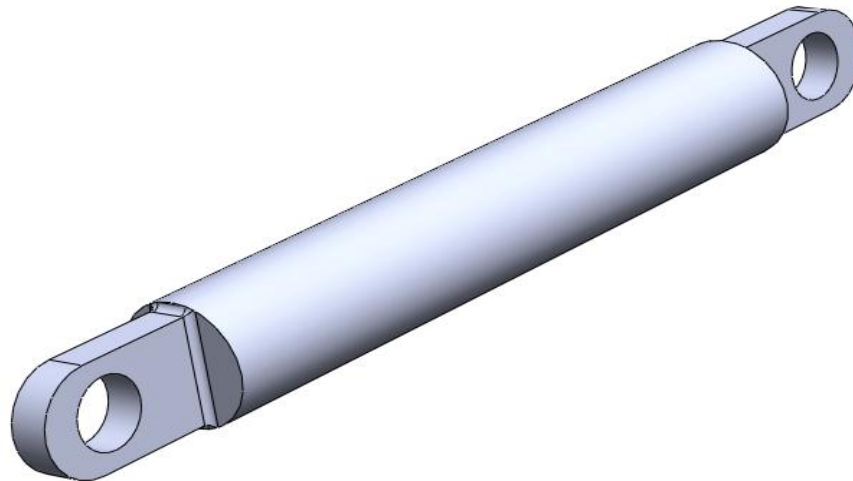


Figure II-11: Tige à double méplat

- **Tige plate :**

Barre de dimensions 164.35×25× 10, contenant deux perçages de diamètre 20mm, c'est l'élément qui transforme le déplacement biaxial en traction-compression lorsqu'il se réunit avec quatre tiges à double méplat dans le mécanisme.

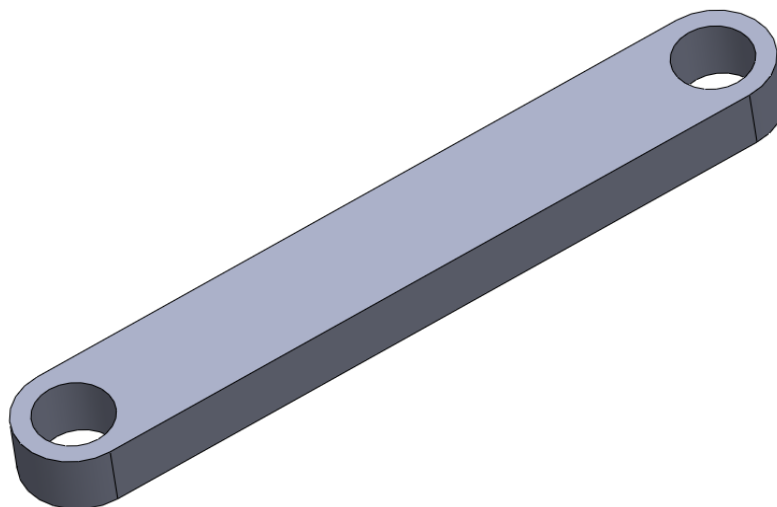


Figure II-12: Méplats

- **Goupille cannelée :**

La goupille cylindrique de diamètre 20mm. Assure le guidage en rotation de 8 tiges à double méplats et les 4 méplats par rapport au tirants et mors.

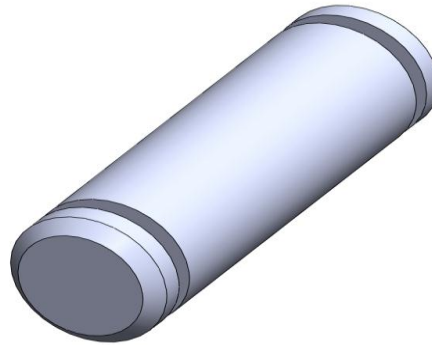


Figure II-13 : Goupille cannelé

- **Circlips :**

Le circlips externe de diamètre intérieur 16mm élimine un degré de liberté selon un axe (Translation) ; il empêche ainsi l'extraction des goupilles.



Figure II-14 : Circlips externe

- **Mors :**

Le mors de dimensions 50-25-10 mm assure la fixation et maintien des éprouvettes lors de l'application de la charge par le mécanisme. Il contient une surface rugueuse pour éviter le glissement.

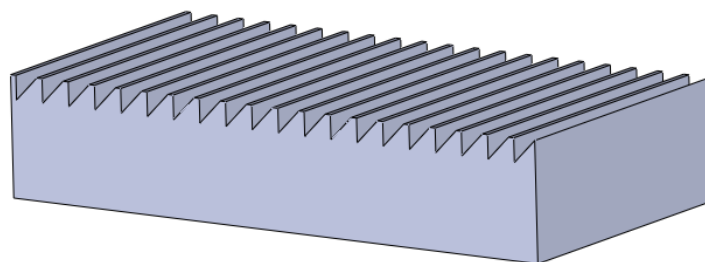


Figure II-15 : Mors

- **Vis de pression**

Vis à tête cylindrique à 6 pans creux CHC de norme (ISO 4762 M8 x 20 --- 20S), elle permet de bien serer le mors et assurer l'immobilisation de l'éprouvette.



Figure II-16: Vis de pression

- **Vis de fixation**

Vis à tête frisé à 6 pans creux (ISO 10642 M5 x 16 --- 16S), elle fixe la partie inférieure de bride avec le mors.



Figure II- 17: Vis de fixation

- **Vis de blocage**

Vis sans tête à 6 pans creux à bouts plats (ISO4026 M8). Elle permet de fixer le talon cylindrique avec le piston du vérin.



Figure II-18: Vis de blocage

- **Glissière horizontale**

Barre de dimension 20×600, elle se monte sur la bride avec une liaison hélicoïdale et elle fait une liaison glissière avec La pièce de guidage 90°.

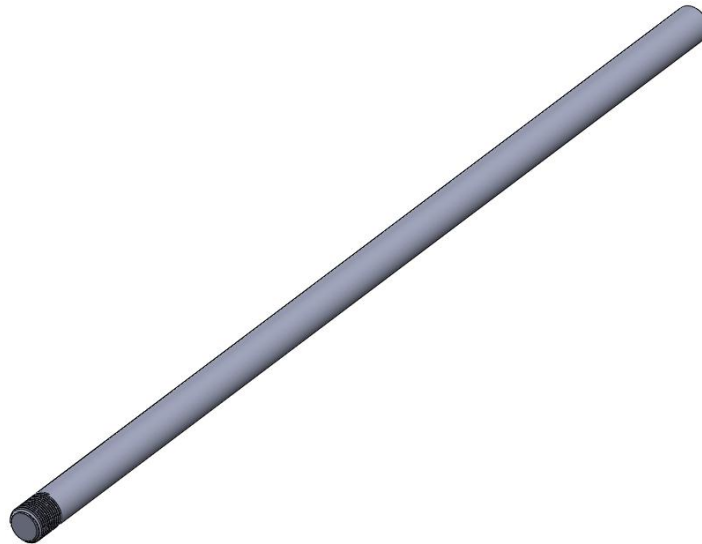


Figure II-19: Glissière horizontale

- **Glissière vertical :**

Barre de dimension 20×770mm qui contient un filetage de chaque extrémité qui permettent la fixation sur le gabarit de la machine. Elle fait aussi une liaison glissière avec la pièce de guidage 90°.

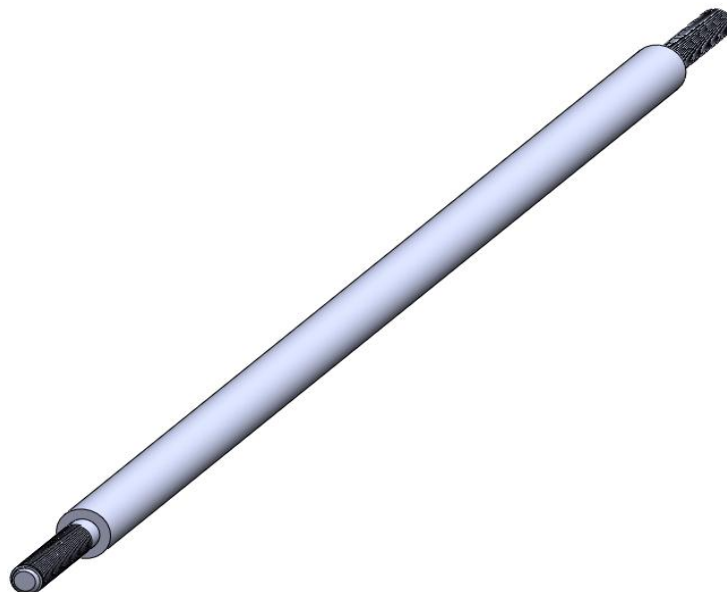


Figure II-20: Glissière verticale

- **La pièce de guidage en translation 90° :**

C'est l'élément qui relie les deux glissières qui sont montées respectivement sur la bride et le gabarit afin d'assurer une double liaison simultanément suivant les deux axes vertical et horizontal.

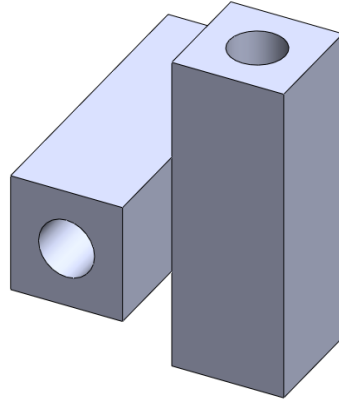


Figure II-21: Pièce de guidage 90°

- **Rondelle et écrou**

Deux éléments d'assemblage de diamètre 20 qui serrent la glissière verticale sur le portique



Figure II- 22: Rondelle et écrou

- **Tige fileté**

Le bâti contient 8 tige filetée de diamètre 20 au niveau de la racine qui servent à le fixé par- terre à l'aide des rondelles et écrous en faisons des trous d'une profondeur de 20 cm.

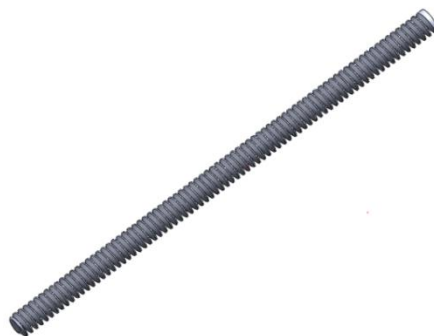


Figure II- 23: Tige filetée

▪ Plaque en acier

La plaque sur laquelle le vérin est fixé de dimension (340 × 100 × 30) mm en acier, contient quatre perçages de diamètre 12 mm qui vont servir à sa fixation sur le bâti. Un fraisage de diamètre de 600 mm permet la fixation de vérin sur le portique à l'aide de l'écrou de serrage.



Figure II-24: Plaque porte vérin

▪ Plexi glace

L'utilisation des plaques en plexi glace d'épaisseur 2mm pour protéger notre mécanisme et ses accessoires contre la poussière. La pièce elle contient une lumière de forme rectangulaire qui permet à la glissière de passer à travers dans de son mouvement et 4 perçages pour pouvoir la fixer sur le bâti.

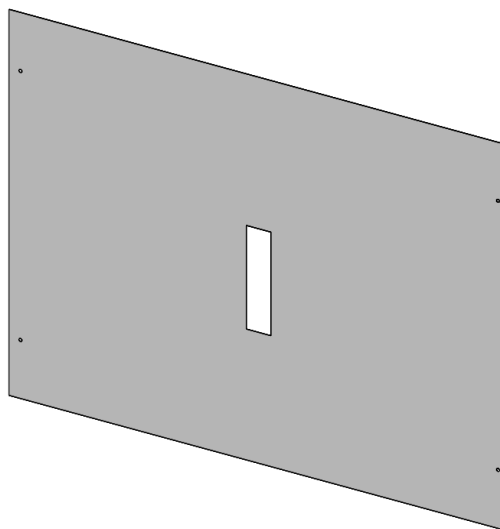


Figure II-25: Plexi glace

▪ Triangle d'équerrage

C'est un élément d'assemblage utilisé pour fixer les colonnes du portique au niveau de la racine découpée à partir de profilés IPE80 en deux pièces séparés qui ont été rassemblés par la suite par soudure. Il contient 8 pressages de diamètres 8 mm utilisés pour la fixation.



Figure II-26: Triangle d'équerrage

▪ Élément d'équerrage

C'est quatre élément d'assemblage qui relie les traverses supérieures au montant fabriqués en deux pièces triangle d'équerrage découpés à partir de HEB100 en deux pièces séparés (rassemblé par la suite par la soudure). Il contient 8 pressages de diamètres 10 mm utilisés pour la fixation et une plaque découpés à partir de profilé UPN120.



Figure II-27: Élément d'équerrage

▪ Support du travail

La feuille en aluminium de dimensions carrés $820 \times 820 \times 1.5$ (mm)³ conçue pour être un support de travail comme fonction principale et un couvercle pour la partie basse du bâti comme fonction secondaire. Elle contient des pressages pour permettre la fixation des glissières d'une part et d'une autre part de la fixation la plaque.



Figure II-28: Support du travail

▪ Élément de renfort

Des éléments de renfort ont été rajouté au bâti découpé à l'aide d'une tronçonneuse manuelle à partir de profilé UPN80 dans deux zones spécifiques pour une meilleur résistance et rigidité de l'ensemble. La première zone au-dessus du pilier central et la deuxième zone au niveau de l'endroit de la fixation du vérin donne la charge appliquée sur le même axe que c'est deux zones.



Figure II-29: Éléments de renforts

▪ Bâti

C'est le support et squelette de la machine sur le quelle les différents éléments (dispositif, vérin, glissières...). Il est fabriqué à partir de différents profilés (IPE80, UPE80, HEB100 tube carré 50×50) pour assurer une meilleure rigidité il fait environ 1,20 m² de base et une hauteur de 2,35 m de hauteur.



Figure II- 30: Le bâti

▪ Les profilés

Les profilés ont été utilisés sont résumés dans le tableau ci-dessous :

Tableau II- 2: caractéristique des profilés

Profils	Poids Kg/m	Dimensions Mm						A Cm ²	Moment d'inertie Cm ⁴		Module de résistance Cm ³		Rayon de giration cm	
		h	b	a	e	r	h1		s	Ix	Iy	Ix/Vx	Iy/Vy	Vx
IPE80	6	80	46	3.2	5.2	5	60	7.64	80.1	8.49	20	3.69	3.24	1.05
UPN80	7.90	80	50	4	7	10	46	10.1	106	19.4	26.5	6.36	3.10	1.33
HEB100	24.4	100	100	6	10	12	56	26	450	167	90	33	4.16	2.53

▪ La norme des profilés

Ce sont des aciers de construction destinés à un usage général avec une limite élastique minimal de 235 Mpa.

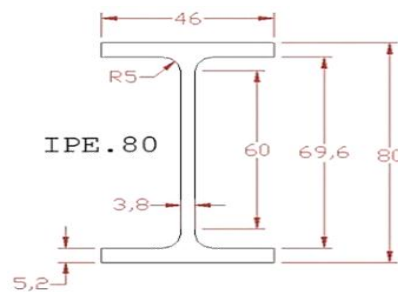


Figure II-31: IPE80 (NF EN 10034 - S235 JR)

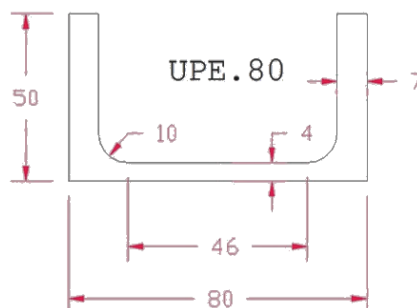


Figure II-32: UPN80 (NF EN 10279 - S235 JR)

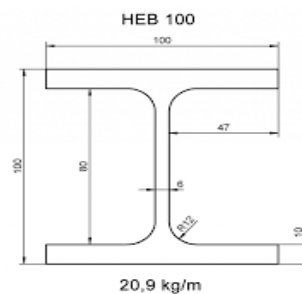


Figure II-33: HEB100 (NF EN 10025- S235 JR)

▪ Tube et profile creux carré

Le tube carré $50 \times 50 \times 2(\text{mm})^3$ en acier S235 à usage générale a été utilisé dans le bâti du bon d'essai pour répondre à deux fonctions ; une première fonction principale est de fixer les glissières verticales qui permet le guidage en translation des mors du mécanisme et une seconde fonction de rigidifier et renforcer la structure.

Les différents paramètres de ce profilé sont mentionnés dans le tableau ci-dessus

Tableau II- 3: Paramètres du profilé creux carré 50×50

Dimension Extérieur mm	Epaisseur mm	Masse Linéique Kg/m	Aire de section transversale Cm^2	Moment d'inertie de flexion Cm^4	Rayon de Giration Cm
50×50	2	2.93	3.74	14.15	1.95
	2.5	3.60	4.59	16.94	1.92
	3	4.25	5.41	19.47	1.90
	4	5.45	6.95	23.74	1.85
	5	6.56	8.36	27.04	1.80

Le tube carré, il était découpé à l'aide d'une tronçonneuse manuelle à des longueurs de 820 mm avec une découpe spécifique sur chaque extrémité afin de pouvoir les mettre en place sur les colonnes du portique.

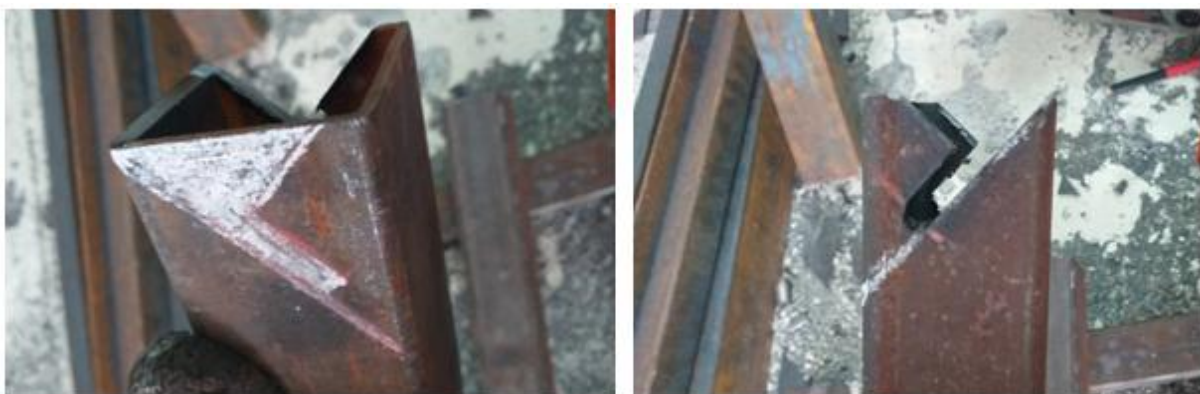


Figure II-34: Profile creux carré de norme NF EN 10219 – S235JR

▪ Vérin hydraulique



Figure II-35: Vérin hydraulique

a) Description

Un vérin hydraulique d'une réelle capacité de 10 tonnes alimenté par un réservoir d'huile et pompe hydraulique manuelle forte pression, peut être positionnée horizontale ou verticalement, avec un Manomètre bain huile Robuste et peu encombrante équipé en raccord rapide pour un démontage simple.

Des modifications ont été apportées sur la tête du piston pour obtenir une liaison complète et relier le mouvement de vérin à celui du mécanisme biaxial. Les figure ci-dessous montre les étapes de réalisation.



Figure II- 36: Opération de perçage et taraudage sur la tête du piston pour mettre en place les vis de pression et la vis de fixation.

a) Les caractéristiques du vérin

Tableau II- 4: Les caractéristiques du vérin hydraulique.

Matériau	Acier
Diamètre de corps	60mm
Diamètre de piston	38mm
Course de piston	340mm
Capacité	100KN
Capacité d'huile de pompe	0.5L
Pression d'utilisation de la pompe	62Mpa
coup de bélier	135mm

b) Mode d'emploi

Pour faire fonctionner le vérin (entrant au bien sortant), il faut procéder comme suite :

- ✓ Fermer la valve de décharge en la tournant dans le sens des aiguilles d'une montre jusqu'à ce qu'elle soit bien refermée.
- ✓ Pomper à l'aide de la poignée pour appliquer la pression.
- ✓ Tourner la valve de décharge dans le sens contraire des aiguilles d'une montre pour relâcher la pression.

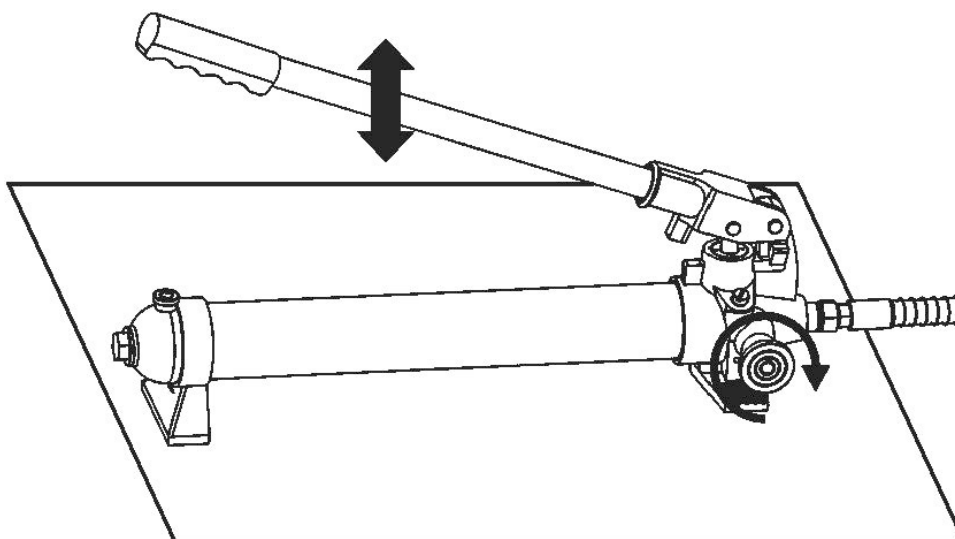


Figure II-37: Pompe hydraulique manuelle

▪ Acquisition et traitement de données

Un poste de traitement des données pour récupérer les mesures et les traiter (tracer les courbes contrainte-déformation est nécessaire dans ce travail). Il est possible d'utiliser la caméra CCD utilisant la technique de la grille, la photographie de speckle ou encore la corrélation d'image numérique (CIN). Cette technique est peu sensible aux perturbations environnementales et simple d'utilisation. De plus, elle permet de conserver la microstructure observable tout au long des essais, qui pourra ainsi être mise en relation avec les champs mesurés, elle peut être utilisée sur tous types de matériaux ainsi qu'en présence de gradients de déformation.

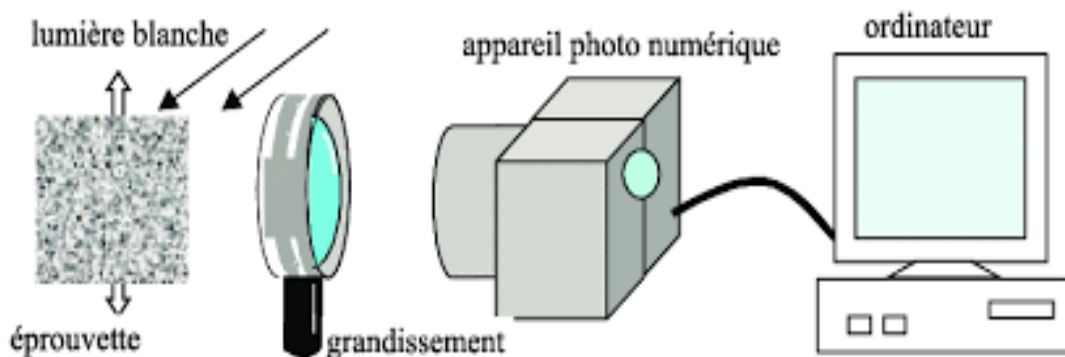


Figure II-38: Principe de corrélation d'image

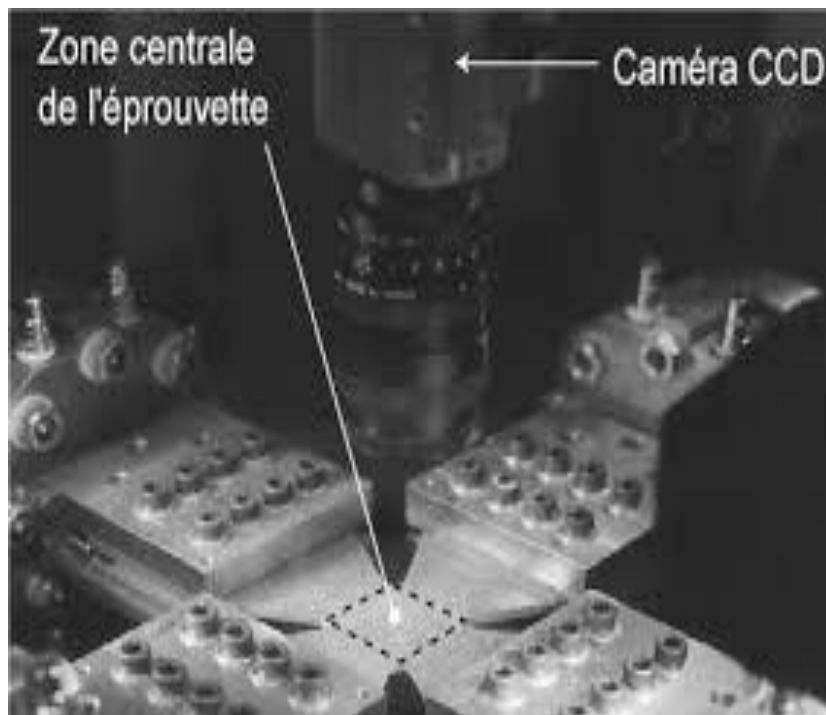


Figure II-39: Exemple d'utilisation de la caméra CCD projeté sur une éprouvette biaxiale (1)

▪ C'est quoi la corrélation d'image ?

La Corrélation d'Images Numériques permet de mesurer le champ de disparité en pixels \mathbf{u} entre deux images, f à l'état dit « référence » et g à l'état dit « déformé », f et g représentent les niveaux de gris des deux images (figure II-40). Ces deux images sont en fait deux fonctions mathématiques associant un niveau de gris à chaque pixel \mathbf{x} . Classiquement, des images 8-bits sont utilisées, ce qui revient donc à l'utilisation de 256 niveaux de gris. Pour chaque pixel \mathbf{x} d'une Région d'Interet (*ROI*) de l'image de référence f , on cherche le pixel correspondant dans l'image g sous la forme :

$\mathbf{y} = \mathbf{x} + \mathbf{u}(\mathbf{x})$ par l'équation de conservation stricte de la luminance :

$$f(\mathbf{x}) = g(\mathbf{x} + \mathbf{u}(\mathbf{x}))$$

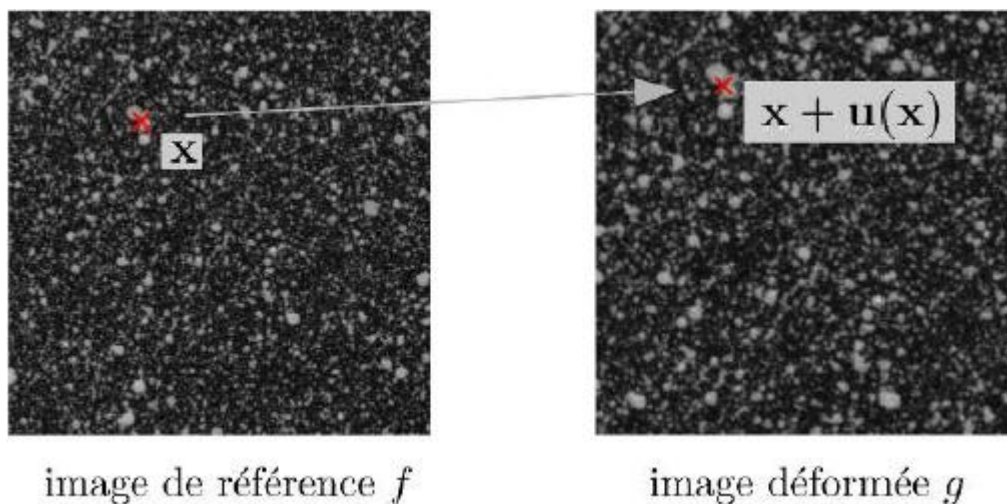


Figure II-40: Deux images de mouchetis, f avant de formation (à gauche) et g après de formation (à droite).

La photographie de speckle permet, à l'aide de fonctions de corrélation, de déterminer les déplacements entre deux figures de speckle d'un objet à deux instants différents. Pour une meilleure facilité de mise en œuvre et une sensibilité moindre aux perturbations environnementales, elle a été remplacée par la technique de corrélation d'images numériques

(2). Le speckle est remplacé par une distribution aléatoire de niveaux de gris physiquement déposée à la surface de l'échantillon à l'aide d'une bombe de peinture (mouchetis) dont la taille des gouttes est optimisée en fonction de l'échelle d'analyse. Parfois, le simple marquage naturel lié à la texture propre de l'échantillon peut suffire à la corrélation

(3). La zone d'étude est divisée en petites facettes d'analyse et le principe fondamental de la technique de corrélation d'images est basé sur l'hypothèse que la distribution des

niveaux de gris dans l'état non déformé d'une facette reste la même dans son état déformé (figure II-41).

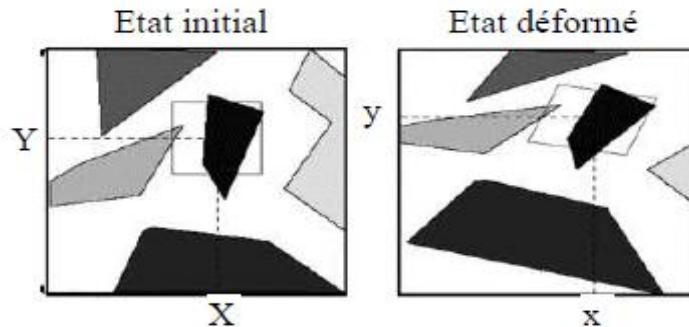


Figure II-41: Facettes d'analyses caractérisées par leur niveau de gris dans l'état initial et l'état déformé (4)

On enregistre donc, grâce à une caméra CCD, la même zone d'un échantillon à différents états de déformation. La corrélation d'images permet ensuite de reconnaître la facette dans l'état déformé grâce à sa distribution en niveaux de gris. La comparaison de la position des facettes dans chaque état de déformations permet de connaître les déplacements subis par chaque facette entre ces deux états dans le plan d'observation (figure II-42).

Les déformations sont ensuite calculées en post-traitement, par différenciation de champs de déplacement.

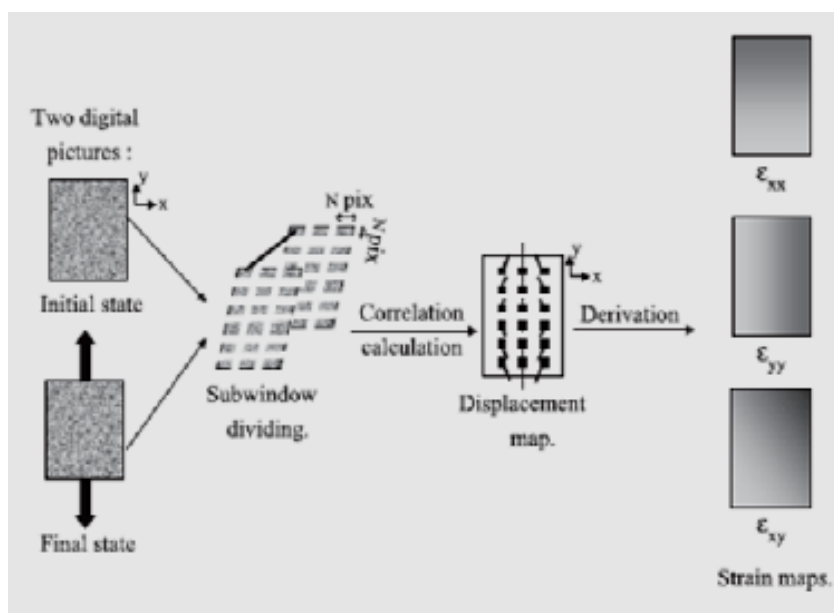


Figure II-42: La technique de corrélation d'images (5)

II-7- Calcul de résistance du bâti :

Le bâti sur lequel repose le mécanisme est constitué sur de profilé IPE 80 et de tubes carrés 50*50mm rassemblés à l'aide de la soudure et boulonnages.

Les vérifications de résistance des éléments constituant notre bâti soumis à différente sollicitations sont données ci-dessus.

Vérification de résistance

✓ Pilier centrale HEB 100

Le pilier central de notre portique de Profilé HEB 100 d'une longueur de 650 mm repose sur une plaque d'acier de dimension $120 \times 120 \times 8$ mm et sur le profilé UPE80 qui est lui-même rattaché au sol par des tiges filetées de diamètre 20. Il est soumis à la compression et au flambement. Il est assimilé à une poutre encastré libre comme le montre la figure ci-dessus.

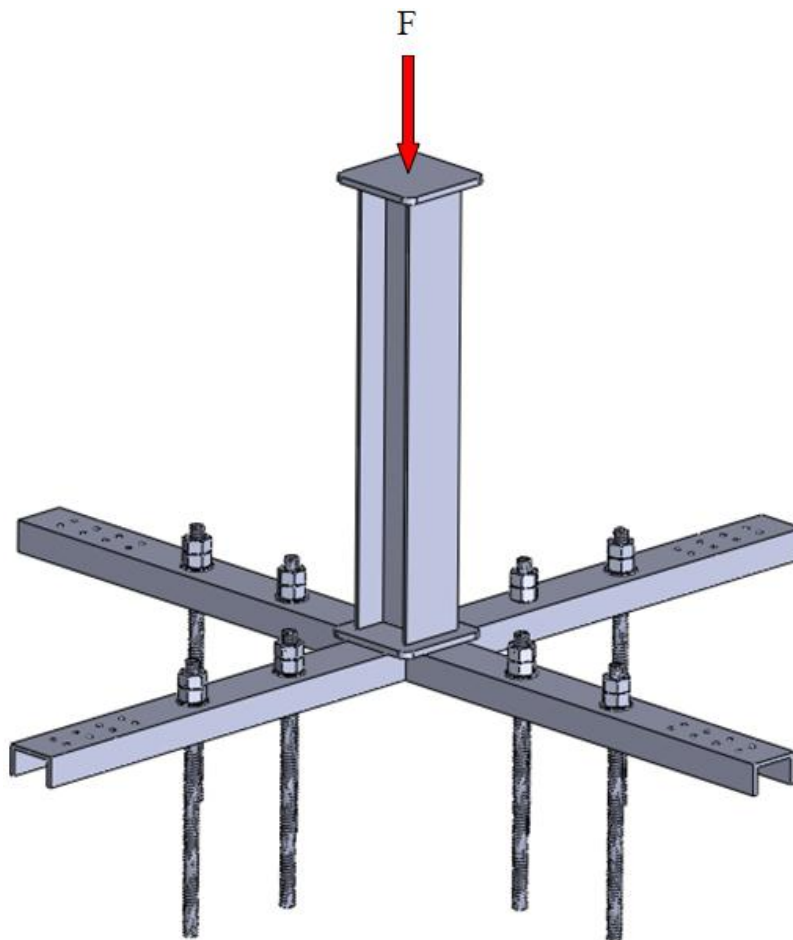


Figure II-43: La direction de la charge sur le pilier centrale en HEB 100.

Pour que le pilier résiste, il doit vérifier les deux conditions suivantes :

La condition de résistance s'écrit alors :

$$\sigma = \begin{cases} \frac{F}{A} \leq [\sigma] \\ \frac{F}{A} \leq [\sigma_c] \text{ Euler} \end{cases}$$

Ce qui implique :

$$\begin{cases} A \geq \frac{F_{max}}{[\sigma]} & \text{Avec } [\sigma] = \frac{[\sigma_e]}{s} \\ A \geq \frac{F_{max}}{[\delta c]} \delta c = \frac{N_{cr}}{A} \end{cases}$$

- Calcul la valeur de la contrainte admissible :

$$[\delta] = \frac{[\sigma_e]}{s}$$

S : coefficient de sécurité (S=2)

σ_e : La contrainte du profilé

$$\text{Donc } [\delta] = \frac{235}{2} = 117.5 \text{ [Mpa]}$$

$$\text{D'où } A \geq \frac{F_{max}}{[\sigma]}$$

$$\text{AN : } A = \frac{100 \times 10^3}{117.5} = 851.064 \text{ mm}^2$$

Avec la section (HEB100) : $A = 2600 \text{ mm}^2$

$$\text{D'ou } 2600 > 851.064 \text{ [mm}^2\text{]}$$

La première condition est vérifiée..... 1

- **Calcul la charge critique :**

$$N_{cr \text{ Euler}} = \frac{\pi E I_{min}}{L f^2}$$

N_{cr} : Charge critique d'Euler (charge de compression longitudinale sur colonne).

E : Module d'élasticité du matériau de la colonne.

I : Moment d'inertie minimal de la section de la colonne.

L : Longueur de colonne non prise en charge.

K : Facteur de longueur effective de colonne

-Longueur équivalente du plier centrale :

Pour une poutre encasté-libre : $L_f = 2l$

$$L_f = 2 \times 650 = 1300 \text{ mm}$$

Donc :

$$\text{AN : } N_c = \frac{3.14 \times 210000 \times 167}{(1300)^2} = \frac{\frac{N}{\text{mm}^2} \times \text{cm}^4}{\text{mm}^2} = [10^4 \text{ N}]$$

$$N_c = 651596.45 \text{ [N]}$$

-La charge critique :

$$\delta c = \frac{N_c r}{A} = \frac{651596.45}{2600} = 250.61 \text{ [MPa]}$$

$$\Rightarrow A \geq \frac{F_{max}}{[\delta c]} = \frac{100 \times 10^3}{250.61} = 399.026 \text{ mm}^2$$

Implique donc $2600 > 399.026 \text{ [mm}^2\text{]}$

La deuxième condition est vérifiée..... 2

Les deux conditions (1) et (2) sont vérifiées donc le profilé HEB100 résiste au flambement.

✓ **Traverse centrale du bâti**

Les traverses centrales sont les poutres en profilé IPE 80. Elles relient les quatre montants au piet centrale HEB100. Elles sont encastées au niveau des montantes et libre au dessus du pilier centrale.

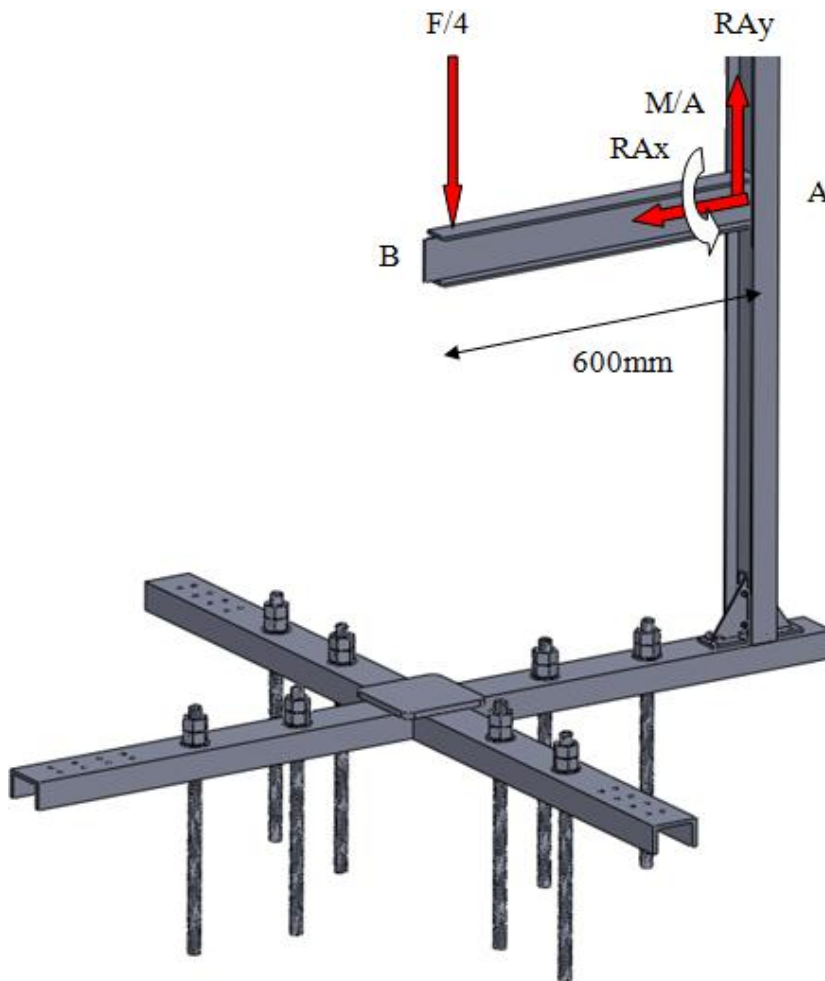


Figure II-44: Traverses centrale du bâti en IPE 80

- **Vérification de la traverse à la flexion simple**

- **Les efforts extérieurs**

$$\sum \overrightarrow{F_{EXT}} = 0$$

-Suivant x : $R_{Ax} = 0$

-Suivant Y : $\overrightarrow{R_{Ay}} - \overrightarrow{R_{By}} = 0$

$$\Leftrightarrow R_{Ay} = R_{By} = \frac{F}{4} = \frac{100}{4} = 25 \text{ KN}$$

$$\sum \overrightarrow{M/A} = 0$$

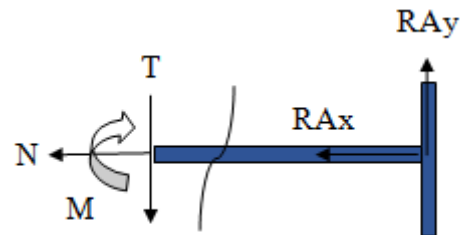
$$\Leftrightarrow M/A = \frac{F}{4} \times L = \frac{25 \times 10^3}{4} \times 600 \times 10^{-3} = 15000 \text{ Nm}$$

➤ Les efforts tranchants : $0 \leq x \leq L$

$$T = \frac{F}{4}$$

$$M_f = \frac{F}{4} \times x$$

$$M_f = M_A = 15000 \text{ Nm}$$



-Vérification à la flexion

$$\frac{I_{GZ}}{V_{max}} \geq \frac{M_{fmax} \times x}{\sigma_e}$$

Avec :

S : coefficient de sécurité, dans notre cas on prend $s = 2$

Moment d'inertie de profilé IPE80 $I_{GZ} = 80.14 \text{ cm}^4$

$$\Rightarrow \frac{I_{GZ}}{V_{max}} = \frac{80.14 \times 10^4}{40} = 20035 \text{ mm}^3$$

$$\frac{M_{fmax} \times s}{\sigma_e} = \frac{15000 \times 2 \times 10^3}{235} = 6382.9 \text{ mm}^3$$

$$\text{Donc : } \frac{I_{GZ}}{V_{max}} > \frac{M_{fmax} \times s}{\sigma_e}$$

On conclue qu'IPE80 résiste à la contrainte de flexion, alors que les traverses à l'endroit du placement du vérin vont résister largement (traverse de renfort supplémentaire).

✓ Vérification sur les colonnes du bâti

Les quatre colonnes en IPE80 d'une longueur de 1.70 m sont soumises à la compression, flambement + flexion on les considère dans le cas le plus défavorable c'est à dire encasté libre sans les autres éléments de renfort.

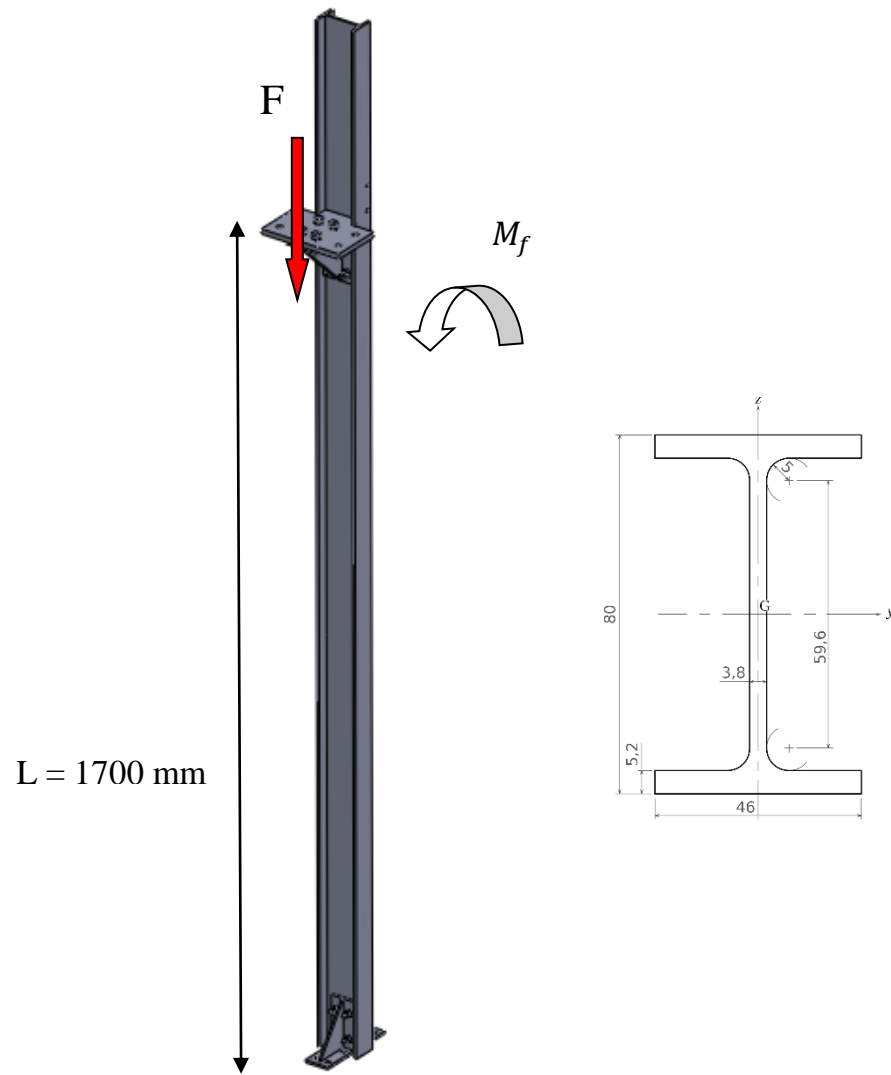


Figure II-45: La colonne du bâti en IPE80

• **Vérification :**

$$\sigma_{crit} = \frac{N_{crit}}{A} \quad \text{Avec } A : \text{ c'est l'aire de la section droite}$$

$$N_{crit} \text{ Euler} = \frac{\pi^2 EI_{min}}{L_f^2}$$

L_f : Longueur de flambement donnée par :

$$L_f = k_f \times L \quad \text{Avec} \begin{cases} k_f : \text{coefficient de réduction de la longueur} \\ L : \text{longueur de la barre} \end{cases}$$

$$L_f = 2L \Leftrightarrow L_f = 2 \times 1700 = 34000 \text{ mm}$$

Par la vérification au flambement, on prend une longueur la plus défavorable, encastrement à l'application de la charge.

Donc :

$$\sigma_{crit} = \frac{\pi^2 EI_{min}}{L^2 f \times A} \quad \text{avec le rayon de giration} \quad I_{gmin} = \sqrt{\frac{I_{min}}{A}}$$

-Le rayon de giration est le rayon du cercle parcouru par un mobile en mouvement circulaire uniforme.

- **Correspond au plan de flambement :**

$$\sigma_{crit} = \frac{\pi^2 EI_{gmin}^2}{L^2 f} \quad \dots\dots\dots 1$$

Et si nous définissons la notion d'élanement λ d'une colonne par :

$$\lambda_{col} = \frac{L_f}{I_g} \quad \text{donc l'équation (1) va devenir : } \sigma_{crit Euler} = \frac{\pi^2 E}{\lambda_{col}^2}$$

$$\lambda_{limite Euler} = \pi \sqrt{\frac{E}{R_e}} \quad \text{avec } \lambda_{limite} : \text{c'est l'élanement limite d'Euler}$$

L'élanement renduit : $\bar{\lambda} = \frac{\lambda_{col}}{\lambda_{lim Euler}}$

$$\sigma_{crit Euler} = \frac{\lambda_{lim Euler}^2}{\lambda_{col}^2} R_e = \frac{R_e}{\bar{\lambda}^2}$$

$$N_{Crit Euler} = \frac{R_e A}{\bar{\lambda}^2}$$

Application numérique des deux conditions :

$$\lambda_{limite Euler} = \pi \sqrt{\frac{E}{R_e}} = 3.14 \sqrt{\frac{E}{R_e}} = 3.14 \frac{\sqrt{210000}}{235} = 93.9 \dots\dots 2$$

$$\lambda_{col} = \frac{L_f}{I_{gmin}} = \frac{3400}{10.5} = 323.809 \dots\dots 3$$

D'après (2) et (3), on constate que $\lambda_{col} > \lambda_{limite Euler}$ donc c'est vérifié selon Euler, et les colonnes IPE80 Résiste au flambement.

- ✓ **Vérification de la plaque porte vérin :**

Lors du fonctionnement du vérin dans le bâti, il exerce une force de 100 KN comme valeur maximale sur le mécanisme biaxial. La réaction qui va être générée sur le piston se transforme vers la plaque, puis vers les traverses en IPE80 qui sont montées sur les quatre montantes.

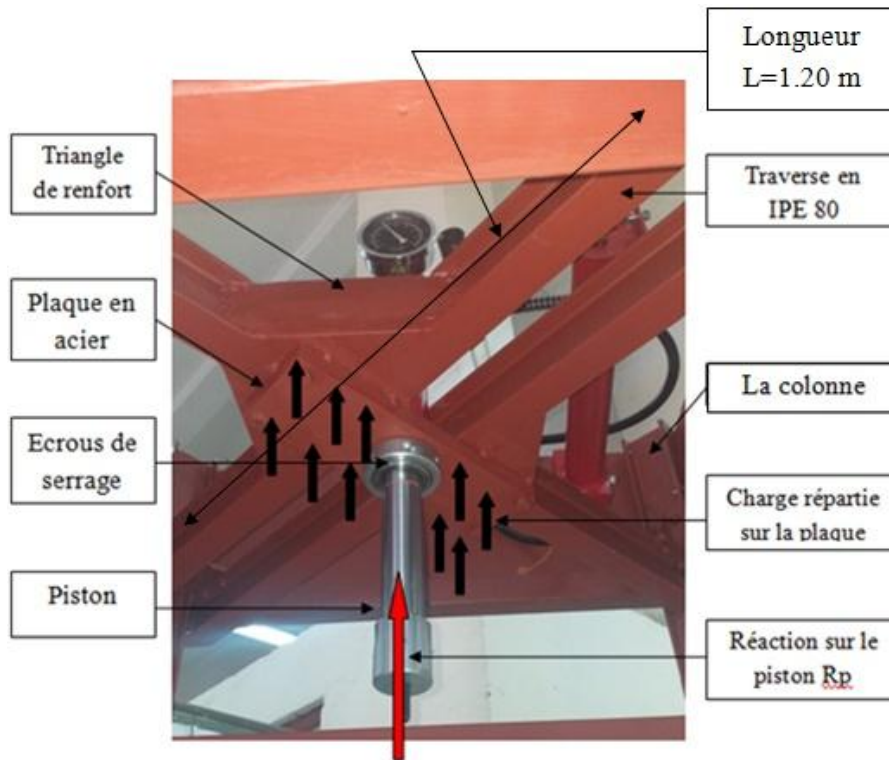


Figure II-46: Plaques porte vérin

-Vérification :

Vérification à l'effort tranchant :

La charge appliquée sera répartie sur la surface.

On doit vérifier : $V_Z \leq V_{plz}$

$$V_Z = \frac{F_u}{s}$$

V_Z : Effort tranchant résistant par la poutre.

F_u : C'est la réaction du dispositif sur le piston, on prend le cas le plus défavorable pour une valeur $F_u = 100\text{KN}$

S : surface de contact entre le IPE80 et la plaque

$$S = a \times b = 100 \times 46 = 4600 \text{ mm}^2$$

$$V_Z = \frac{100 \times 10^3}{4600} = 21.74 \text{ Mpa}$$

Aux appuis : $V_{Z/2} = 10.87 \text{ Mpa}$

$$V_{plz} = \frac{A_{VZ} \times R_e}{\sqrt{3} \times \delta_{mo}}$$

R_e : Limite d'élasticité en Mpa

δ_{mo} : Coefficient des sections transversale ($\delta_{mo} = 0$ selon l'annexe nationale)

A_{VZ} : Aire de cisaillement

L : la longueur des traverses $L = 1.2 \text{ m}$

Selon le tableau des profilés :

$$\begin{cases} A_{VZ} = 3.58 \times 10^2 \text{ mm}^2 \\ f_y = 235 \text{ Mpa} \\ \delta_{mo} = 1.1 \end{cases}$$

$$V_{plz} = \frac{3.58 \times 10^2 \times 235}{\sqrt{3} \times 1.1} = 55826$$

Ce qui implique $V_Z < V_{plz}$

Donc la condition de l'effort tranchant est satisfaite.

-Vérification au moment fléchissant

$$M_{sd} \leq M_{Rd}$$

$$M_{sd} = \frac{q_u \times l^2}{2} = \frac{100 \times 1.2^2}{2} = 72 \text{ KN.m}$$

$$M_{Rd} = \frac{M_{ply} \times f_y}{\delta_{mo}} = \frac{23.2 \times 10^3 \times 235}{1.1} = 4956.363 \text{ KN.m}$$

Ce qui implique $M_{sd} \leq M_{Rd}$

Donc la condition au moment fléchissant est satisfaite.

✓ **Calcul et vérification des éléments d'assemblage à la résistance :**

Nous avons utilisé des vis qui ont les caractéristiques suivantes :

a) -vis de fixation

P : pas.

H : hauteur du filetage = $0.866p$.

D = d = diamètre normal (vis et écrou).

D2 = d2 = diamètre sur flanc (vis et écrou) = $d - 0.6495p$.

D1 = d1 = diamètre intérieur du taraudage (écrou) = $d - 1.0825p$.

D3 = d3 = diamètre intérieur du filetage (vis) = $d - 1.2268p$.

d3 = diamètre du noyau.

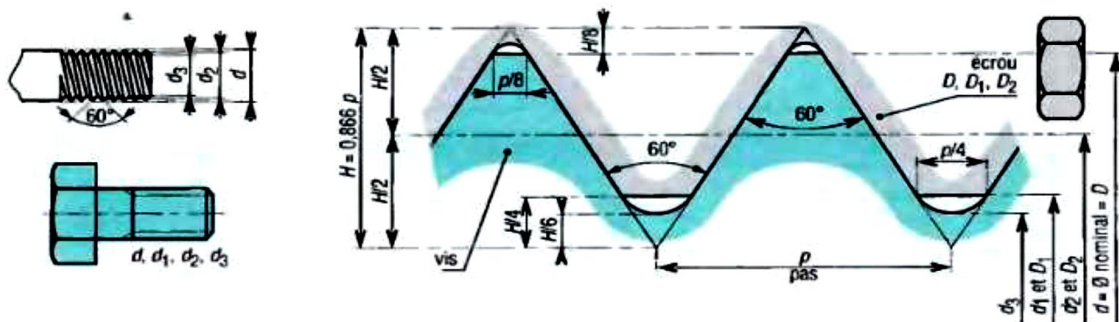


Figure II-47: Représentation du filetage métrique ISO à filet triangulaire.

b) Choix du matériau :

Classe de qualité des vis et des écrous :

- CHc 8.8 zingué blanc diamètre 8, pas 125 ;
- CHc 8.8 zingué blanc, diamètre 10, pas 150 ;

Caractéristiques mécaniques moyennes (Désignation AFNOR normalisé) :

A l'état trempé et revenu :

- Matériaux des boulons : XC 48 ;
- La limite élastique : $\sigma_e = 370\text{MPa}$, HB190 (dureté BRINELL) ;
- Résistance à la rupture : $R_t = 630\text{N/mm}^2$ ou Mpa ;
- Contraintes de cisaillement : $\tau = 0.5 \tau_e = 185\text{MPa}$;
- Charge maximale de la machine de traction uniaxiale : $F_t = 100\text{kN}$.
- Contrainte admissible de cisaillement est $[\tau]_{\text{cis}} = 185\text{ Mpa}$

Détermination de la charge extérieure supportée par chaque vis :

-Caractéristiques mécaniques des vis

Les vis sont en acier. L'acier, obéit à la loi de Hooke :

$$\sigma = E \times \varepsilon$$

Avec :

- σ =contrainte normale (Mpa).
- E = module d'élasticité longitudinale ou module d'Young (Mpa).
- ε =allongement relatif (sans unité).

Nombre des vis :

Le dispositif contient 8 vis de diamètre M8×20 et 4 vis M12×36 à tête cylindrique a 6pans creux et 8 vis de diamètre M5×16 à tête fraise six pans creux.

II. 3.3.C-DETERMINATION DE LA VALEUR DE L'EFFORT EXTERIEUR

Le tableau suivant (**tab. II.5**) donne la résistance des boulons **ISO** relatifs aux classes les plus courantes.

Tableau II- 5: La résistance des boulons ISO

Marquage des têtes (S . Y)	3.6	4.6	4.8	5.6	5.8	6.8	8.8	9.8	10.9	12.9
Classes de résistance	3.6	4.6	4.8	5.6	5.8	6.8	8.8	9.8	10.9	12.9
Limite élastique Re(N/mm ² ou MPa)	180	240	320	300	400	480	640	720	900	1080
Limite à la rupture Rr(N/mm ² ou MPa)	330	400	420	500	520	600	800	900	1040	1220
Allongement A (%)	25	22	14	20	10	8	12	10	9	8

S et Y représentent les classes de résistance.

- $R_r = 100 \times S$ (en N/mm^2)
- $R_e = R_r \times (Y/10)$ (en N/m^2)
- $R_e = S \times Y$ (en daN/mm)

Dans notre étude nous avons un mécanisme en mouvement suivant les quatre brides et glissières. On a une charge faible qui est générée par le vérin lors de la répartition des forces sur les éléments mobiles de l'assemblage.

-Vérification de la résistance des vis de pression.

Les vis de pression sont soumises à une contrainte de cisaillement, après l'application de la charge F par la traverse mobile de la machine traction-compression uniaxiale (**figure II-48**).

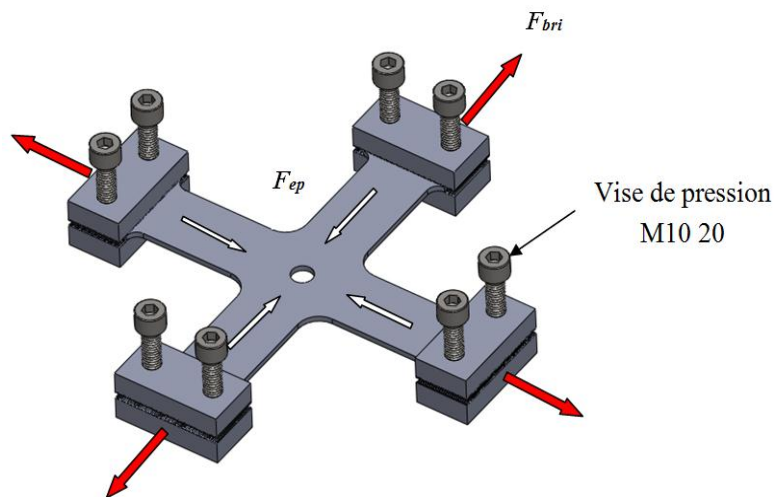


Figure II-48: Schéma des efforts appliqués sur les vis de pression

Les efforts appliqués sur la section des vis sont obtenus par décomposition de l'effort appliqué par la machine et sont donnés comme suit :

- F_x : Effort reparté sur les brides uniformément ;
- F_{ep} : Effort appliqué par l'éprouvette ;
- F_{bri} : Effort appliqué par la bride.

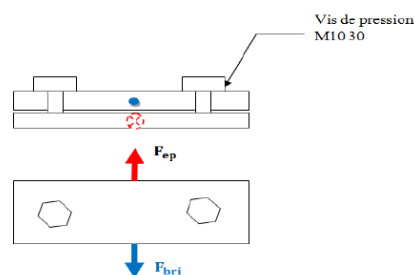


Figure II- 49: Représentation des efforts appliqués sur les vis de pression.

-Répartition des forces de pression :

L'effort F_m va se décomposer en deux forces selon l'axe x et y , on aura l'effort suivant x égale à l'effort suivant y . Dans notre étude, il suffit de vérifier la résistance aux cisaillements des vis au niveau d'une partie car notre système est symétrique.

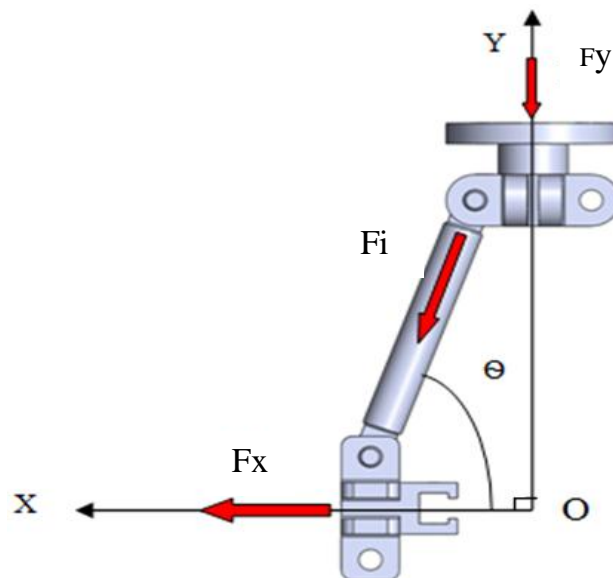


Figure II-50: Représentation du mécanisme sous forme d'un schéma cinématique.

-Détermination des efforts appliqués :

- L'effort appliqué sur le dispositif F_T :

$$F_T = 100 \text{ KN} = 100\,000 \text{ N.}$$

- L'effort supporté par chaque mors F_m :

$$F_m = \frac{F_T}{4}$$

$$\text{AN: } F_m = 100 / 4 = 25 \text{ KN} = 25\,000 \text{ N}$$

Le mécanisme subit de grandes sollicitations au niveau des vis et les goupilles qui sont sollicitées au cisaillement.

- Chaque mors est assemblé par deux vis, l'effort supporté pour chaque vis est calculé comme suit :

$$F_v = F_m / \text{nombre de vis}$$

$$\text{AN: } F_v = 25\,000 / 2 = 12\,500 \text{ N}$$

-Vérification de la résistance des matériaux

Condition de la résistance au cisaillement des vis

$\alpha \in [0^\circ, 45^\circ]$ (Les forces de frottement sont négligées)

$$\begin{cases} F_X = (F_T / 4) \times \cos(\alpha) \\ F_Y = (F_T / 4) \times \sin(\alpha) \end{cases}$$

Avec :

- F_X : c'est l'effort appliqué au dispositif suivant l'axe X.
- F_Y : c'est l'effort appliqué au dispositif suivant l'axe Y.
- $\alpha=45^\circ$ (par mesure de sécurité on prend $\alpha=45^\circ$), $\cos \alpha = 0.707$

Donc :

$$F_X = (25000/4) \times 0.707 = 17677.67 \text{ N}$$

$$F_Y = (12500/4) \times 0.707 = 2209.375 \text{ N}$$

La condition de cisaillement s'écrit :

$$\tau_{\text{cis}} = \frac{F_X}{S_r} \leq [\tau]_{\text{adm}} \quad (1)$$

F_X : effort appliqué au le dispositif suivant l'axe X.

S_r : Section de la vis.

$$\text{On a : } S_r = \frac{\pi d^2}{4}$$

Donc on remplace cette expression dans (1) :

$$\frac{F_X}{2S_r} \leq [\tau_{\text{cis}}]_{\text{adm}}$$

$$\frac{F_X}{2 \frac{\pi d^2}{4}} \leq [\tau_{\text{cis}}]_{\text{adm}}$$

$$\frac{2F_X}{\pi d^2} \leq [\tau_{\text{cis}}]_{\text{adm}}$$

$$d \geq \sqrt{\frac{2F_X}{\pi \cdot [\tau]_{\text{cis}}}} \quad \Rightarrow \quad d \geq \sqrt{\frac{2 \times 4418.75}{\pi \cdot 185}}$$

$$\Rightarrow \quad \boxed{d \geq 7.79 \text{ mm}}$$

Condition vérifiée et par normalisation, on choisit une vis M10×1.5×20.

- **Goupilles de liaison :**

La goupille est soumise à une sollicitation de cisaillement.

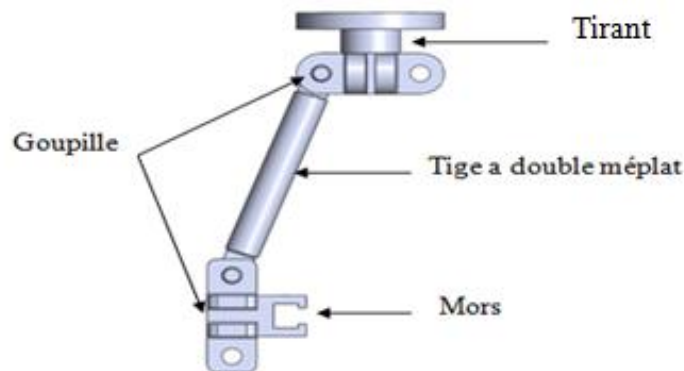


Figure II-51: Schéma des efforts appliqués sur la goupille.

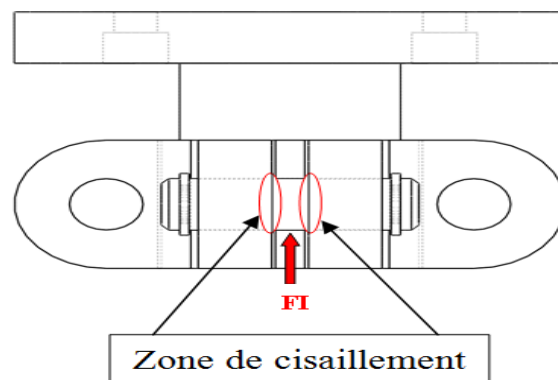


Figure II-52: Représentation des efforts appliqués sur les goupilles.

– **Le matériau des goupilles est choisi comme suit :**

- **Matériau :** acier inoxydable INOX 360L est également connu sous le nom d'AISI 316L présente de grands niveaux de résistance au fluage à la rupture à basse et à haute température. Ces alliages répondent aux exigences de nombreuses applications. (1)

Les propriétés principales de cet acier sont :

- module de Young est $E=19.3\text{GPa}$, [AFNOR (Z2CND17.12)]
- Limite élastique : $\sigma_e = 205\text{ MPa}$
- Contraintes de cisaillement : $\tau = 170\text{Mpa}$
- La charge maximale de la machine traction uniaxiale $F_T = 100\text{kN}$.
- S : Coefficient de sécurité ($S=2$).

Notre dispositif contient des goupilles de diamètre 20mm voir (Figure II-52)

-Détermination de l'effort extérieur de chaque goupille

Effort appliqué sur chaque goupille :

$F = F_T / \text{nombre des goupilles}$

Notre mécanisme est symétrique. Il contient 16 goupille en montage (traction-traction). Donc on aura nombre de Goupille égale a 8 et 16 goupille en montage (traction compression) qui fait 12 qui sont en sollicitation.

$$\text{AN : } F = \frac{100 \times 10^3}{8} = 12500 \text{ N}$$

a) Condition de la résistance au cisaillement des Goupilles

On a $\|\tau_{\text{M}}\| \leq [\tau]_{\text{cis}}$

$$\tau = \frac{\|\overline{F_x}\|}{S_r} \leq [\tau]_{\text{cis}} ; \tau = \frac{\|\overline{F_x}\|}{S_r} \leq R_{\text{pg}}$$

F_x : Effort appliqué sur le dispositif suivant l'axe X.

S_r : Section de la goupille.

τ_e : Limite d'élastique au cisaillement.

R_{pg} : Résistance pratique au glissement.

$$S_r = \frac{\pi d^2}{4} \frac{F_x}{2.S_r} \leq [\tau]_{\text{cis}}$$

Bien sûr, la résistance pratique au glissement est égale à la contrainte tangentielle admissible (τ_{adm}).

$F_x = F \cos(\alpha)$, $\alpha = 45$ (par mesure de sécurité)

$$\text{AN : } F_x = 12500 \times 0.707 = 8837.5 \text{ N}$$

$$\frac{F_x}{\frac{\pi d^2}{4}} \leq [\tau]_{\text{cis}}$$

$$d \geq \sqrt{\frac{2 \|\overline{F_x}\|}{\pi \cdot [\tau]_{\text{cis}}}}$$

$$d \geq \sqrt{\frac{2 \times 8837.5}{\pi \cdot 170}} \quad \Rightarrow \quad \boxed{d \geq 5.75 \text{ mm}}$$

Condition vérifiée et par la normalisation, on choisit le diamètre de la goupille $d = 10 \text{ mm}$

II-8- SolidWorks Simulation

SolidWorks Simulation est un logiciel de calcul par éléments finis intégré à SolidWorks. Il utilise les fichiers pièces et assemblages auxquels il intègre des études dans chacune des quelles sont définis les matériaux, les chargements, les conditions aux limites ainsi que les paramètres de maillage et d'analyse. Les résultats sont contenus dans un fichier portant l'extension CWR.

II-8-1- Le but de l'utilisation de SolidWorks simulation

On a utilisé SolidWorks simulation dans notre cas pour faire une étude statique sur une éprouvette cruciforme en polystyrène choc sollicité sur un bon d'essai de traction bi axial. D'une part caractériser le matériau sollicité d'une autre part tester et vérifier la capacité de notre bon d'essai en insèrent des matériaux rigides avec module d'élasticité important pour juger notre dimension et choie de matériaux avec le quelle le bon d'essai et fabriquer est-t-il le bonne choie au pas.

II-8-2- Comment ouvrir une étude sur SolidWorks simulation

Vérification du menu SolidWorks Simulation S'il est installé correctement, le menu SolidWorks Simulation apparaît sur la barre de menus de SolidWorks. Si ce n'est pas le cas :

- 1 Cliquez sur Outils, Compléments. La boîte de dialogue Compléments apparaît.
- 2 Cochez les cases placées à côté de SolidWorks Simulation. Si SolidWorks Simulation ne se trouve pas dans la liste, vous devez l'installer.
- 3 Cliquez sur OK. Le menu Simulation apparaît dans la barre de menus de SolidWorks.

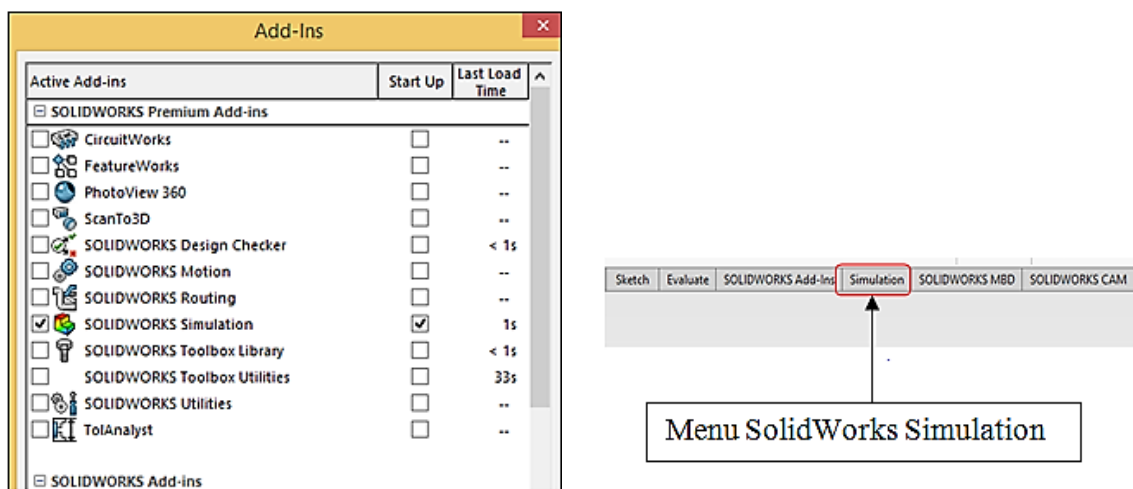
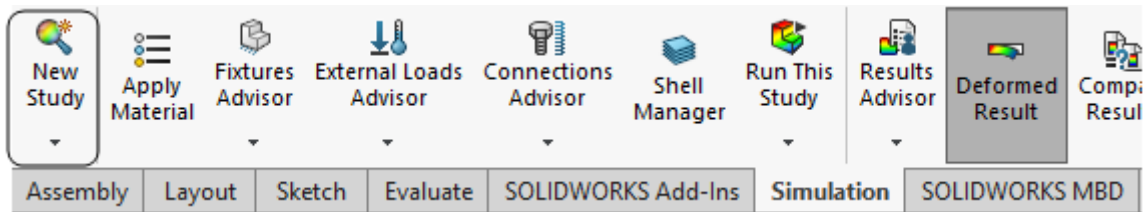


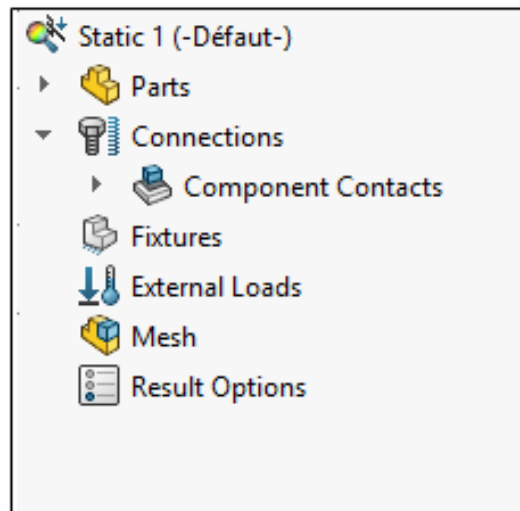
Figure II-53: Insertion de menu SolidWorks simulation a la barre d'outils

II-8-2-1- Lancer une nouvelle étude

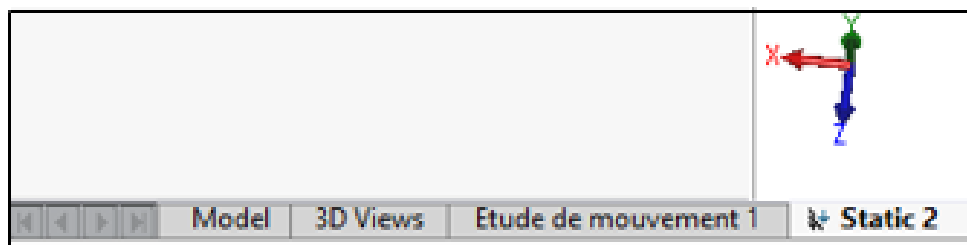
Cliquer sur menus SolidWorks simulation pour afficher la fenêtre New study qui nous permis de lancer une étude comme le montre la figure ci-dessus.



Une fois la fenêtre ouverte il y'as plusieurs études sur les quelles en peut travailler dans notre cas on travaille sur une étude statique qu'end peut renommer au bien prendre par défaut static 1. En valide notre fonction le champ de travaille s'affiche comme le montre la figure ci-dessous.



Un angle est également créé au bas de la fenêtre, il nous permet de nous déplacer entre plusieurs études.

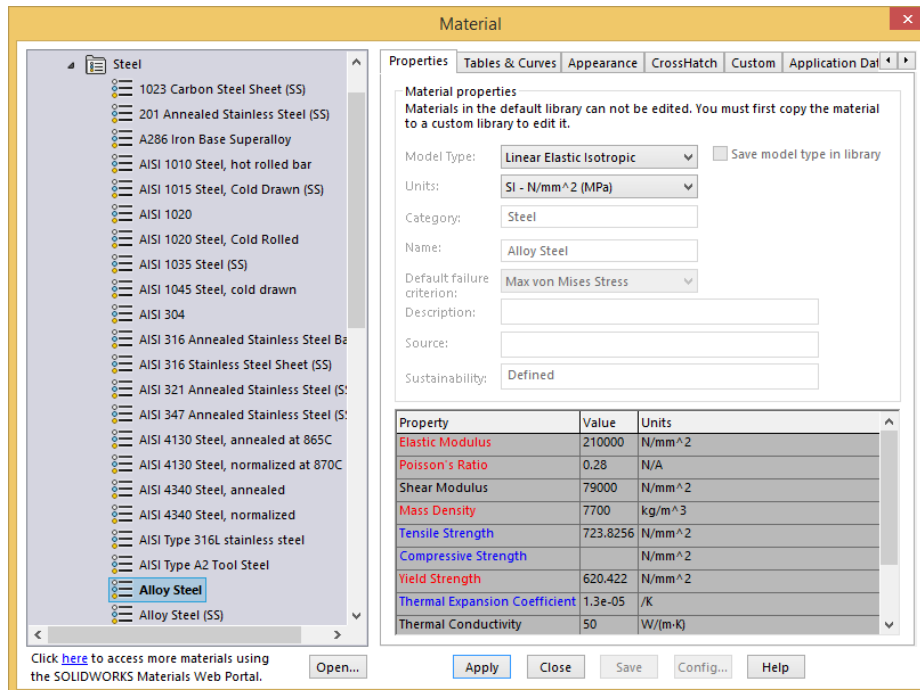


II-8-2-2- Les différentes étapes de l'étude :

Etape 1 : Affectation du matériau

Tous les composants de l'assemblage sont en acier allié sauf notre éprouvette pour laquelle on peut tester plusieurs matériaux.

Dans l'arbre SolidWorks Simulation Manager, cliquez à l'aide du bouton droit de la souris sur le dossier Pièces et cliquez sur Appliquer le matériau à tout.



Remarque : Les propriétés physiques et mécaniques de l'acier allié apparaissent dans le tableau à droite.

Etape 2 : les connexions

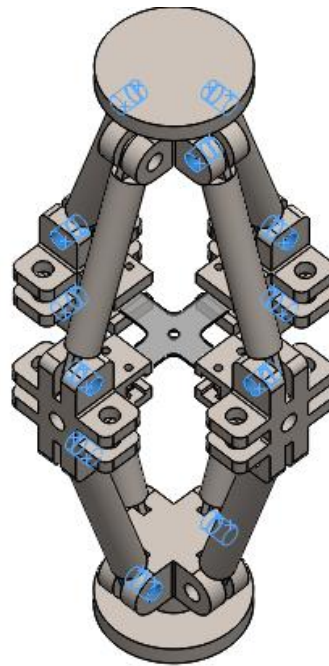
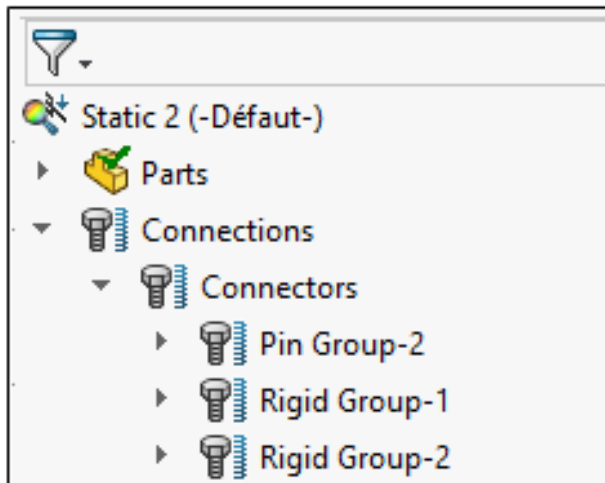
Lorsque toutes les pièces de notre modèle sont définies on passe à la connexion.

Dans cette fonction on définit la relation au bien les liaisons entre différentes pièces du modèle

Exemple : axe ; pivot ; hélicoïdale, liaison rigide.....etc.

Dans notre cas on l'a définie :

- Axes (pin) entre les tiges à double méplat et les Mors.
- Liaison rigide (Rigide connections) entre éprouvette et mors.
- Un contacte globale défini par défaut il reste à faire un autre contacte en cliquant sur bouton doré et choisir (component contacte) et cliquer sur no pénétration et sélectionner toutes les pièces.



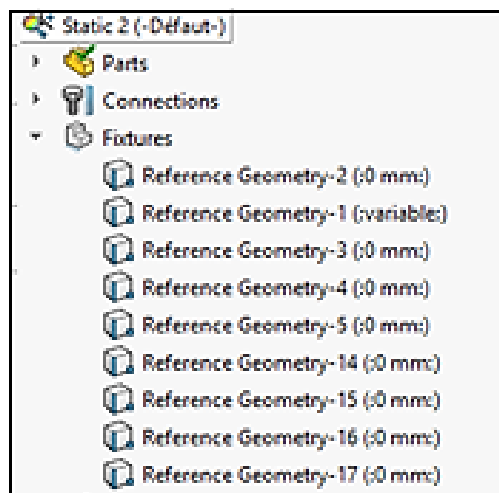
Etape 3 : Application de déplacements imposés

Dans cette étape ont défini les degrés de liberté à éliminer ou à laisser suivant les trois direction (X, Y, Z) de notre modèle et en condition l'étude par un déplacement imposé.

Et pour ce là on clique sur bouton droit de la fonction fixtures, référence géométrique sur la quelle en choisi la surface désirée pour imposer un déplacement dans un sens ou bien bloquer dans l'autre sans en fessons référence au plan qui est parallèle à la surface choisie.

Donne notre cas :

On a une géométrie fixe sur la base du mécanisme et des références géométriques l'une sur le tirent avec un déplacement imposé variable selon l'axe z nul selon x et y les autres déplacements sur les mors selon les deux axes x et z c'est nul et y variable comme le montre la figure ci-dessous.



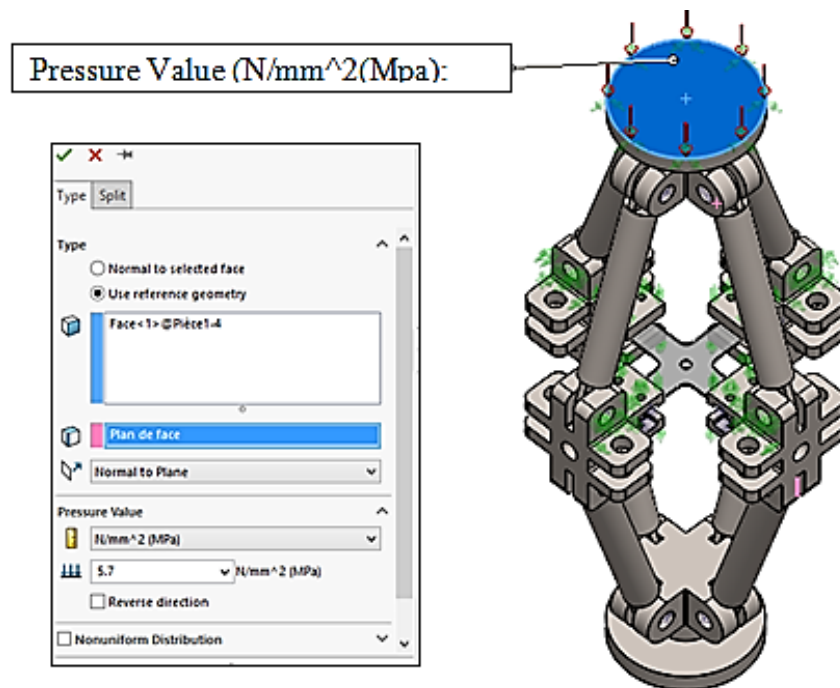
Etape 4 : choix de chargement

Dans cette étape on choisit le chargement à appliquer sur notre modèle (force, pression, couple, force centrifuge ...etc.

Dans notre cas :

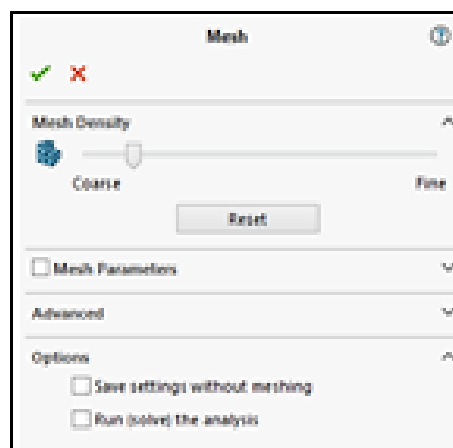
On applique une pression de 5.7 N/mm^2 , On clique sur la fonction (Use reference geometry) et faire notre Choix de plan ci la direction de la charge n'est pas la bonne on inverse la direction comme la montre la figure ci-dessous.

Remarque : la surface sur la quelle on applique le chargement on la référence par rapport à un plan.



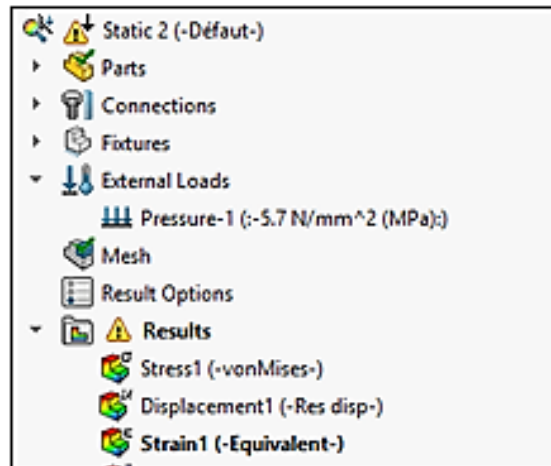
Etape 5 : le maillage

Pour cette étape on doit lancer le maillage on peut garder les paramètres par défaut comme on peut définir nous propre paramètre.



Etape 6 : lancer le calcul

Après avoir maillé le modèle il faut faire attention à ce l'ensemble soit mailler et y'est pas de message d'erreur (Maillage correcte s'affichera en vers) et aux finales on lance notre calcul pour obtenir le résultat.



Les étapes quand on a suivi dans notre étude sur SolidWorks simulation se résume en trois parties comme le montre la figure ci-dessous on commence par la conception du modèle comme premier étape on applique les différents conditions de l'étude (choix de matériaux, connexion, chargement externe...etc.) et obtenir le maillage comme deuxième étape et au final c'est la partie résultat.

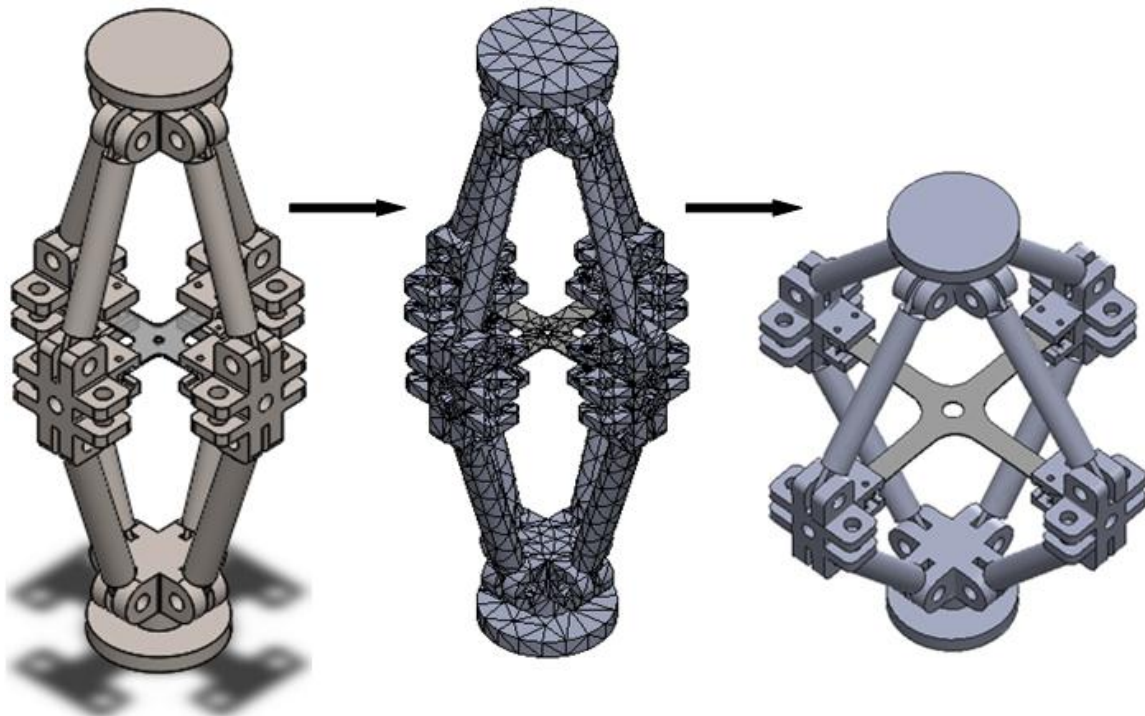


Figure II-53: L'évolution des étapes de simulation

II-8-2-3- Dimensionnement du banc d'essai biaxial

Calcul de rigidité

La répartition du déplacement selon l'axe (Ox) est représentée ci-dessus. Ils sont entre 0mm dans la zone de serrage et $9.534e + 01 \mu\text{m}$.

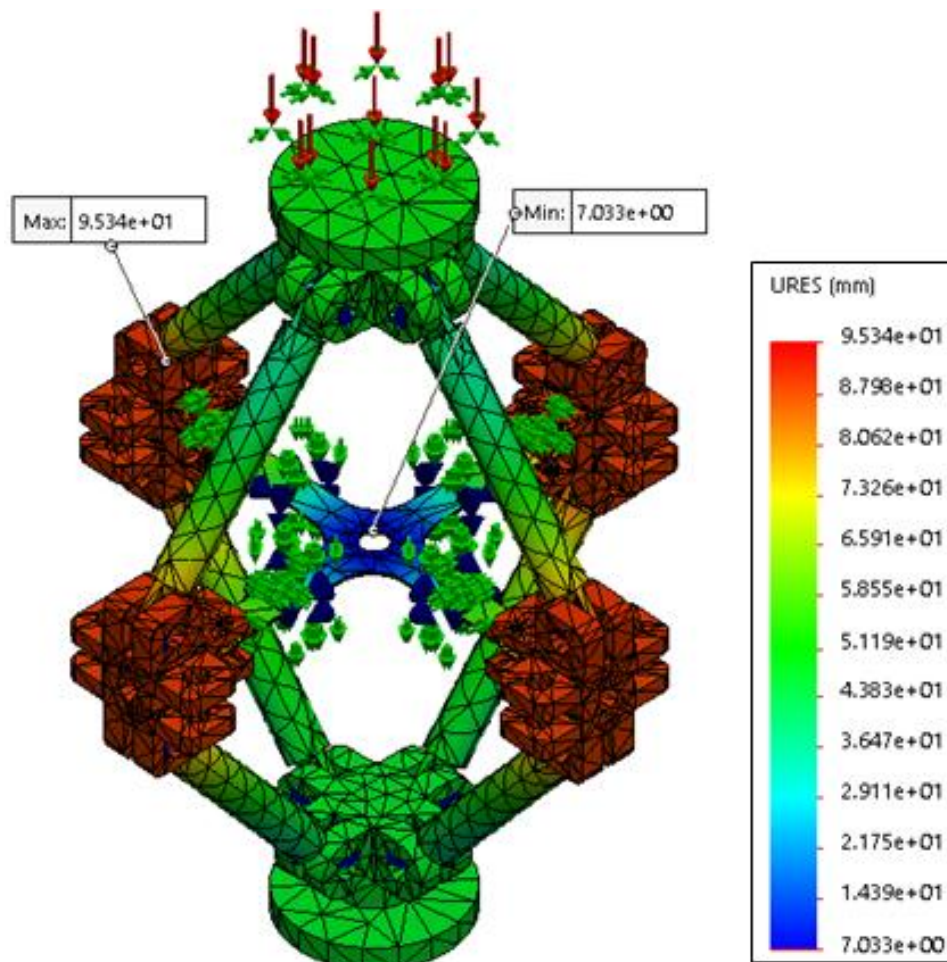


Figure II-54: La répartition des déplacements appliqués en traction pour l'éprouvette Selon l'axe OX.

II-8-2-4- Vérifications de coefficient de sécurité du modèle

Les coefficients de sécurité sont des paramètres permettant de dimensionner les dispositifs. Lorsque l'on conçoit un dispositif, il faut s'assurer qu'il remplisse ses fonctions en toute sécurité pour l'utilisateur. Il faut pour cela connaître la charge sur laquelle il sera soumis. Cela mène au dimensionnement du dispositif : choix de la section du fil débitant le courant, section de la poutre supportant la structure (Portique), ...

Mais la connaissance des charges normales en utilisation ne sont pas suffisantes : il faut prévoir la possibilité d'une utilisation inadaptée : imprudence de l'utilisateur, surcharge

accidentelle ou prévue, défaillance d'une pièce, événement extérieur imprévu, ... On utilise pour cela un coefficient de sécurité, noté habituellement s^1 :

- Soit on l'utilise avant le calcul de dimensionnement :
 - En multipliant la charge en fonctionnement par s , ou bien
 - En divisant la charge maximale admissible par s ;
- Soit on l'utilise après le calcul, en multipliant ou en divisant le résultat dans le sens d'une plus grande sécurité.

Si l'on note R la résistance du système et S (*stress*) les sollicitations auxquelles il est soumis, la condition de validation dit « à l'état limite ultime » (ELU) s'écrit :

$$S \leq R/s \text{ ou bien } S \times s \leq R$$

Les coefficients de sécurité sont définis par les « règles de l'art » pour chaque domaine, éventuellement codifié dans des normes. S'il sert à diviser la résistance théorique, il est supérieur ou égal à 1, et est d'autant plus élevé que le système est mal défini, que l'environnement est mal maîtrisé. On utilise aussi parfois la marge de sécurité qui vaut $s - 1$, ou le coefficient inverse, $k = 1/s$, la validation s'écrivant alors :

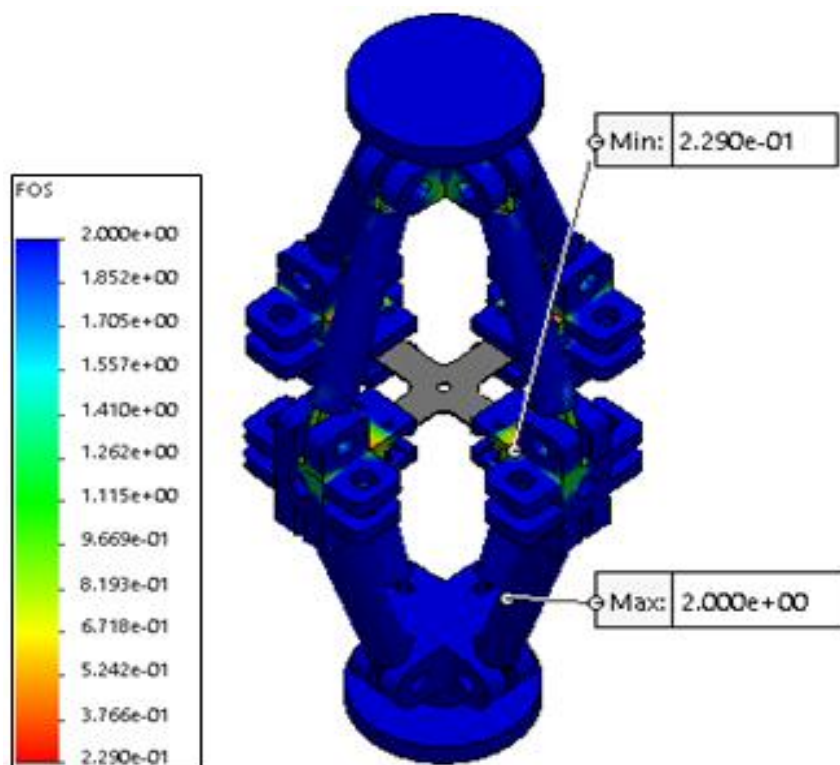


Figure II- 55: Le coefficient de sécurité du modèle lors d'un essai de traction sur une éprouvette cruciforme en HIPS

II-9- CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons présenté le dispositif Biaxial, conçu et réalisé puis nous avons donné les calculs de résistance sur les différents éléments constituent le Bâti.

Le dimensionnement du dispositif avec le logicielle solidworks simulation.

Chapitre III

Résultats et discussions

III-1 INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous présentons d'abord une étude expérimentale sur le comportement de plaques en HIPS des éprouvettes soumises à un chargement uniaxial de traction. Vu que les problèmes rencontrés lors de la mise en forme de cuves de réfrigérateur en HIPS à l'entreprise ENIEM, a lieu à des températures élevées, nous étudions aussi l'influence de la température et de la vitesse de chargement. Par la suite, nous nous sommes intéressés au comportement du HIPS sous chargements biaxiaux. A la fin du chapitre, nous donnons une pré-étude sur le thermoformage du PS choc.

III-2 TRACTION UNIAXIAL :

III-2-1 Introduction :

L'essai de traction est l'un des essais les plus utilisés pour la caractérisation mécanique des matériaux. Etant purement uniaxiale du moins tant qu'il n'y a pas de striction (diminution significative de la section de l'éprouvette), il permet de s'affranchir des méthodes de calcul inverse pour aboutir directement à une loi de comportement uniaxiale.

Cet essai permet de déterminer les propriétés mécaniques du matériau, telles que le module d'élasticité longitudinal, la limite d'élasticité, la résistance à la rupture, l'allongement après rupture et le coefficient de striction.

III-2-2 Fiche technique du matériau :

La figure ci-dessous représente la fiche technique (utilisée par le service contrôle qualité de l'entreprise ENIEM) indiquant les différentes caractéristiques et les normes d'essais pour des feuilles en PS (destinées au thermoformage). Elle nous sert ici d'élément de comparaison.

TP 5051




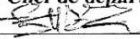
 DE/SQTQL Sce Etudes C.F : 721	FICHE TECHNIQUE		Document N° :013/2012 Etabli par : Mlle S.AMRANI Fonction : Chargé d'études Visa : 																																
	Pièce/composant..... <input type="checkbox"/> Matière..... <input checked="" type="checkbox"/> Ensemble..... <input type="checkbox"/> Produit fini..... <input type="checkbox"/>	Désignation : FEUILLE H.I.S RAL 9003		Vitrifié par : Mr A.NEHLIL Fonction : Chef de service Visa :  Approuvé par : Mr A.ALIANE Fonction : Chef de département Visa : 																															
Code : 100 147B																																			
I - Domaine d'utilisation: Les feuilles en H-I-S (Higt Impact Styrene) utilisées pour la réalisation des contre-portes de réfrigérateurs électriques par thermoformage.																																			
II - Présentation: Les feuilles doivent être en polystyrène super choc résistantes au cyclopentane avec une face brillante. Les pièces fabriquées seront en contact des denrées alimentaires. Les feuilles HIS doivent se conformer à la législation concernant les matériaux utilisés au contact des aliments.																																			
III- Dimensions : (mm)																																			
	Longueur	: 1564 (+10/0)																																	
	Largeur	: 613 (+5/0)																																	
	Epaisseur	: 1,8 ± 0,05																																	
	Diagonal	: 1680 (+12/0)																																	
IV -Caractéristiques: (Les éprouvettes d'essais doivent être découpées des feuilles HIS.)																																			
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>CARACTERISTIQUES</th> <th>CRITERES</th> <th>UNITES</th> <th>NORMES</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1-Densité</td> <td>1,04(±0,01)</td> <td></td> <td>ISO 1183</td> </tr> <tr> <td>2-Résistance à la traction (contrainte au seuil d'écoulement)</td> <td>18</td> <td>N/mm²</td> <td>ISO 527</td> </tr> <tr> <td>3-Module d'élasticité à la traction</td> <td>>1400</td> <td>N/mm²</td> <td>ISO 527</td> </tr> <tr> <td>4-Allongement au point de rupture</td> <td>>30</td> <td>%</td> <td>ISO 527</td> </tr> <tr> <td>5-Temperature ramollissement Vicat B/50 (50°c/ 5kg)</td> <td>90</td> <td>°C</td> <td>ISO 306</td> </tr> <tr> <td>6-Choc IZOD (épreuve entaillée)</td> <td>>70</td> <td>J/m</td> <td>ISO 180</td> </tr> <tr> <td>7-Choc CHARPY (épreuve entaillée)</td> <td>7</td> <td>kJ/m²</td> <td>ISO 179</td> </tr> </tbody> </table>				CARACTERISTIQUES	CRITERES	UNITES	NORMES	1-Densité	1,04(±0,01)		ISO 1183	2-Résistance à la traction (contrainte au seuil d'écoulement)	18	N/mm ²	ISO 527	3-Module d'élasticité à la traction	>1400	N/mm ²	ISO 527	4-Allongement au point de rupture	>30	%	ISO 527	5-Temperature ramollissement Vicat B/50 (50°c/ 5kg)	90	°C	ISO 306	6-Choc IZOD (épreuve entaillée)	>70	J/m	ISO 180	7-Choc CHARPY (épreuve entaillée)	7	kJ/m ²	ISO 179
CARACTERISTIQUES	CRITERES	UNITES	NORMES																																
1-Densité	1,04(±0,01)		ISO 1183																																
2-Résistance à la traction (contrainte au seuil d'écoulement)	18	N/mm ²	ISO 527																																
3-Module d'élasticité à la traction	>1400	N/mm ²	ISO 527																																
4-Allongement au point de rupture	>30	%	ISO 527																																
5-Temperature ramollissement Vicat B/50 (50°c/ 5kg)	90	°C	ISO 306																																
6-Choc IZOD (épreuve entaillée)	>70	J/m	ISO 180																																
7-Choc CHARPY (épreuve entaillée)	7	kJ/m ²	ISO 179																																
V -Emballage : Les feuilles doivent être livrées sur palettes en bois, housées et cerclées de façon à protéger la qualité du produit qui ne doit en aucun cas se détériorer lors de la manutention, transport et le stockage. Et l'on doit lire sur l'emballage la désignation, le code, le nom du fabricant et le poids.																																			
VI- Exigences environnementales. Le produit doit être accompagné d'une fiche technique et de fiche de données sécurité. Il est préférable que l'emballage soit biodégradable, réutilisable ou recyclable.																																			
N°de révision	01	02	folio																																
Date de révision	30/03/1999	16/01/2012	1/1																																

Figure III- 1: Fiche technique pour feuille

III-2-3 L'essai de traction :

Pour effectuer l'essai de traction nous avons procédé comme suit :

a) Découpage des éprouvettes normalisées

L'éprouvette d'essai est prélevée dans la plaque à caractériser selon les dimensions normalisées. Pour chaque type de matériau, il existe un type d'éprouvette.

Nous présentons sur figure ci-dessous la géométrie des éprouvettes normalisées utilisées dans notre travail.

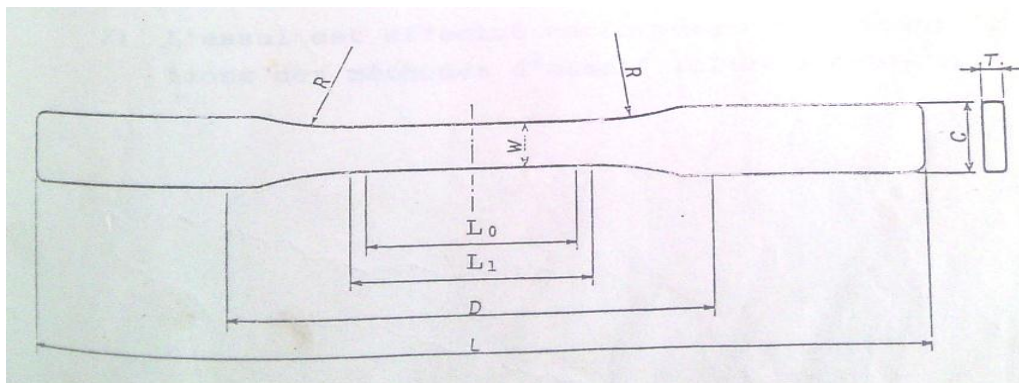


Figure III- 2: Géométrie de l'éprouvette de traction

Les dimensions des éprouvettes sont représentées dans le tableau

Tableau III- 1: Dimensions des éprouvettes de traction

Signe	Rubriques	Dimensions	tolérances
C	Largeur de la partie large	19.0	± 0.5
W	Largeur de la partie étroite	12.0	+0.5 -0
L1	Longueur de la partie étroite	57.2	± 0.5
L0	Distances entre les lignes de repère	50.8	± 0.5
D	Distance entre les pinces	114.0	± 5.0
L	Longueur totale	Plus de 216	-
R	Rayon	Plus de 76	+5 -0
T	Epaisseur	Moins de 6.4	-

Les éprouvettes ont été découpées selon la norme (ASTM-D-790) au niveau de l'atelier central de l'entreprise ENIEM. Un montage poinçon-matrice, monté sur une presse manuelle comme montré sur la figure ci-dessous, a été utilisé pour la découpe à l'emporte-pièce



Figure III- 3: Montage poinçon-matrice sur presse (atelier centrale ENIEM).



Figure III- 4: Epreuve axiale de norme (ASTM D-790) en HIPS.

Après découpage, les éprouvettes ont été ébavurées au papier abrasif. Afin d'étude l'effet de la température et de la vitesse de chargement et dans souci de reproductibilité, nous avons choisi 36 éprouvettes : Trois vitesses de chargements $V1=4.8\text{mm/min}$, $V2=48\text{mm/min}$ et $V3=480\text{mm/min}$ et quatre (04) températures $T0=25\text{c}^\circ$, $T1= 40\text{c}^\circ$, $T2= 60\text{c}^\circ$ et $T3=80\text{c}^\circ$ ont été choisies.

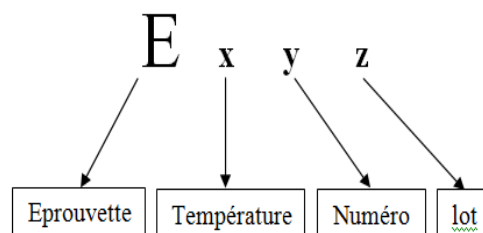


Figure III- 5: désignation des éprouvettes

Tableau III- 2 : Tableau des classifications

Lot A (vitesse = 4.8mm /minute)					
température 25c°					
éprouvette	Épaisseur e [mm]	Largeur b [mm]	La charge à la rupture Fm (N)	Allongement A%	F seuil (N)
E11A	3.8	13.21	665	33	598
E12A		13.00	658	45	599
E13A		13.12	672	29	588
Température 40 c ° (temps de maintien t = 25 s)					
E21A	3.8	12.80	419	/	492
E22A		12.65	413		417
E23A		12.60	456		483
température 60c ° (temps de maintien t = 35 s)					
E31A	3.8	12.77	388	/	464
E32A		12.59	395		453
E33A		12.69	392		459
température 80c ° (temps de maintien t = 45 s)					
E41A	3.8	12.62	296	/	381
E42A		11.87	267		372
E43A		12.74	252		378
Lot B (vitesse = 48mm /minute)					
température 25c°					
E11B	3.8	13.18	746	41	684
E12B		13.13	737	39	680
E13B		12.66	770	43	652
température 40 c ° (temps de maintien t = 25 s)					
E21B	3.8	12.92	532	/	581
E22B		12.75	532		589
E23B		12.67	542		576

température 60c ° (temps de maintien t = 35 s)					
E31B	3.8	12.08	472		512
E32B		12.32	504		534
E33B		12.72	484		531
Température 80c ° (temps de maintien t = 45 s)					
E41B	3.8	12.38	436		453
E42B		12.65	384		421
E43B		12.86	392		423
Lot C (vitesse = 480mm /minute)					
temperature 25c°					
E11C	3.8	12.92	845	31	840
E12C		12.87	854	27	844
E13C		12.79	846	29	840
température 40 c ° (temps de maintien t = 25 s)					
E21C	3.8	12.92	636		741
E22C		12.75	696		818
E23C		12.67	644		746
température 60c ° (temps de maintien t = 35 s)					
E31C	3.8	12.08	672		733
E32C		12.32	632		729
E33C		12.72	604		695
température 80c ° (temps de maintien t = 45 s)					
E41C	3.8	12.38	556		613
E42C		12.65	564		626
E43C		12.86	540		587

b) Enceinte thermique :

C'est l'outil ou l'élément quand on avait associé dans notre essai de traction a fin de chauffer nos éprouvettes dans différentes températures en fonction d'un temps de maintien suffisant pour qu'elle puisse atteindre le $e/2$ de notre éprouvette figure (24), constituer de deux partie l'une est fixe et l'autre mobile qui se glisse sur quatre tige de guidage en translation, un isolant thermique, résistance et un thermocouple type K.

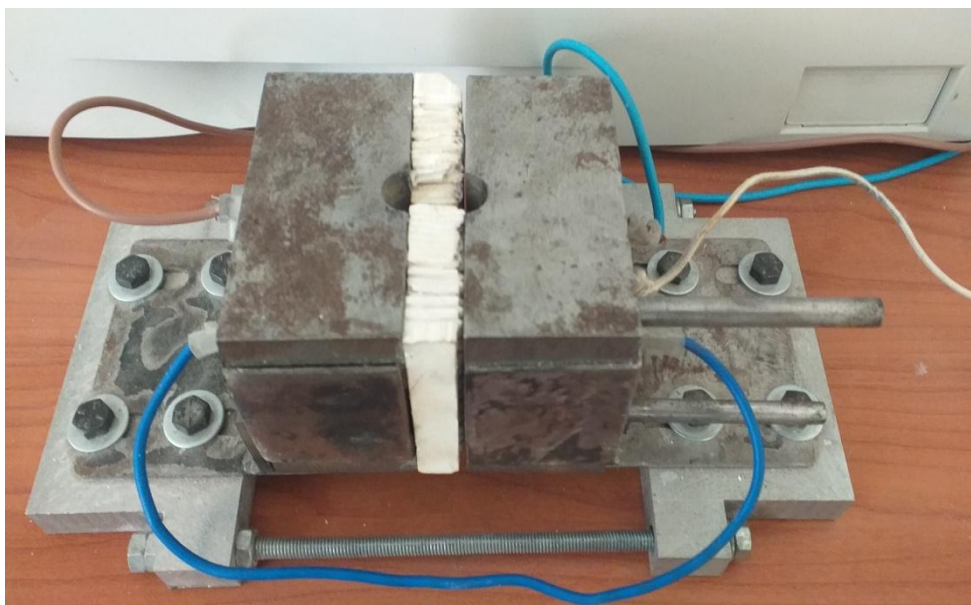
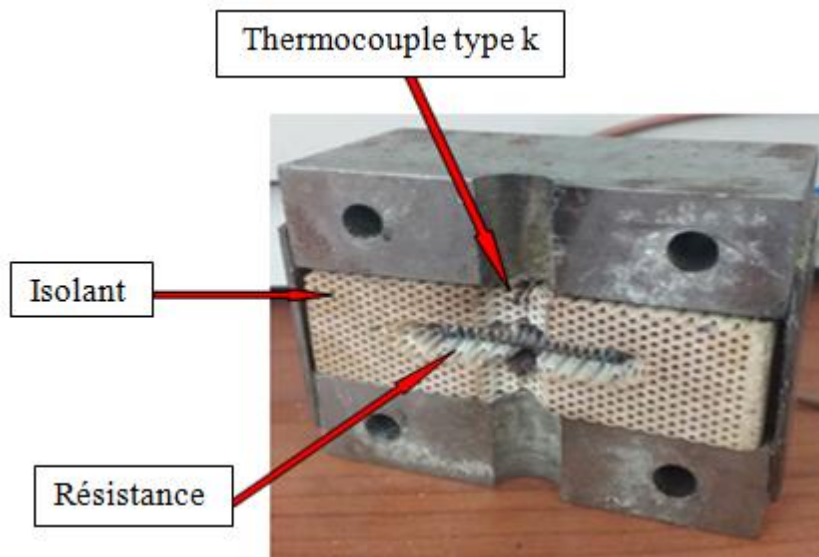


Figure III- 6: Enceinte thermique

c) Régulateur de Température

Un régulateur de température (figure III-7) est un appareil de contrôle de température. Il est relié à son entrée avec un capteur de température (un thermocouple). C'est un appareil qui compare la température du milieu extérieur avec la température de régulation désirée. A sa sortie il est branché à un élément de commande. (18).



Figure III- 7: Régulateur de température

d) Caractéristiques de la machine de traction :

Les essais de traction ont été réalisés sur une machine de traction de type RM100 (Figure III-8), dotée d'une cellule de charge d'une capacité de 100 KN, accompagnée par des vitesses de chargement qui varient de 0.125 à 500 mm/min.

Cette machine de traction a un réglage manuel qui permet de mesurer la force appliquée sur l'éprouvette ainsi que le déplacement au cours de l'essai. Ces mesures sont générées sur feuille millimétrée. Pour notre étude, nous avons effectué des essais de traction uniaxiale à des vitesses de 4.8mm/min ,48mm/min et 480mm/min. Et à des températures de 25°C, 40°C, 60°C et 80°C.



Figure III- 8: Machine de traction RM 100.

e) Post-traitement

Les valeurs mesurées directement lors de l'essai de traction sont la force F et l'allongement ΔL , à travers lesquels on calcule la contrainte σ et la déformation ε .

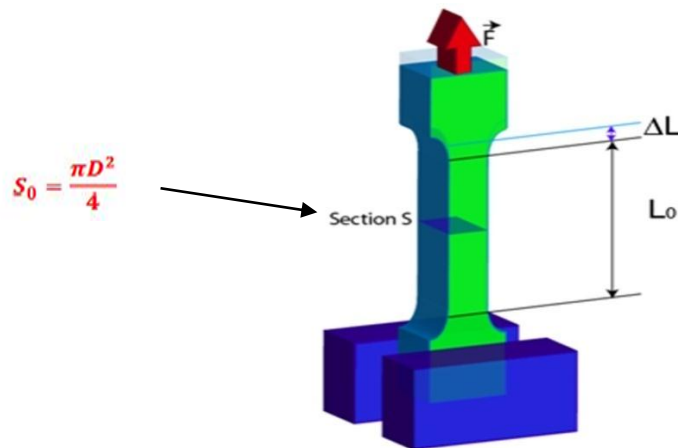


Figure III- 9: Epreuve en traction

$$\sigma = F/S_0$$

σ : La contrainte de traction (MPa) ;

F : La force de traction (N) ;

S_0 : La section initiale de l'éprouvette (mm²)

De même, la déformation ε (déformation nominale) réfère à la longueur utile initiale L_0 .

$$\varepsilon = \Delta L / L_0$$

Avec :

ε : La déformation longitudinale de l'éprouvette ;

L_0 : La longueur utile de l'éprouvette (mm);

ΔL : L'allongement de l'éprouvette lors de l'application de la charge
(longueur finale - longueur initiale) (mm).

f) Reponse du matériau en traction uni axial :

Le diagramme contrainte-déformation obtenu lors de la sollicitation de l'éprouvette en traction peut être schématisé comme suit.

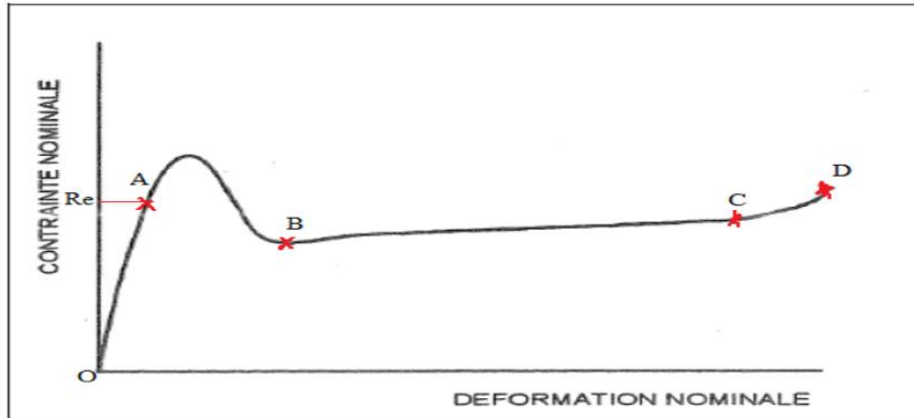


Figure III- 10: Diagramme Effort-Allongement du comportement de l'éprouvette pendant l'essai.

Cette courbe contient diverses régions :

Zone OA : La déformation est viscoélastique ou réversible.

Zone AD : Nous entrons dans le domaine de la déformation inélastique

Zone AB : C'est le crochet. Il est souvent relié à la viscoélasticité des thermoplastiques.

Zone BC : C'est le palier plastique, la contrainte évolue lentement.

Zone CD : La déformation augmente progressivement jusqu'à la rupture pour un allongement maximum en D. On parle de contrainte à la rupture R_r (σ_r).

Tous ces domaines sont variables selon les matériaux et leurs modes d'élaboration.

Ces différentes étapes peuvent être représentées comme suit (figure III-11) :

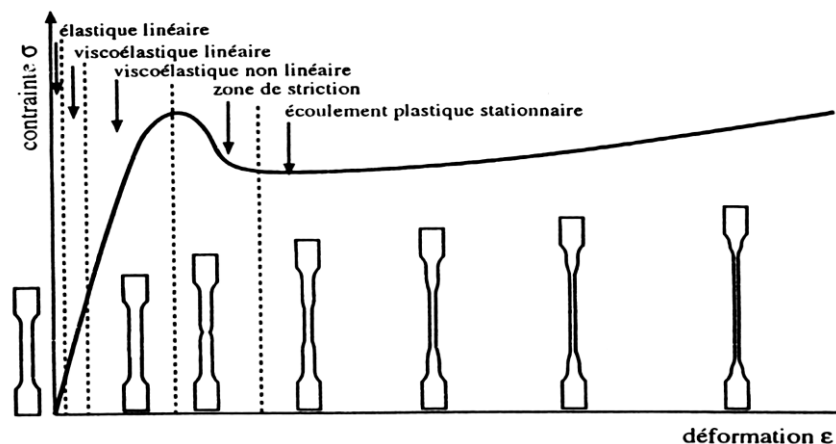


Figure III- 11: Différentes zones de traction uniaxiale avec la représentation schématique de l'éprouvette d'essai.

III-2-4 Résultats des essais de traction

Les courbes contraintes-déformation obtenues lors des essais de traction sont données sur les figures III-13 à III-15.



Figure III- 12: Eprouvette en HIPS après l'essai de traction

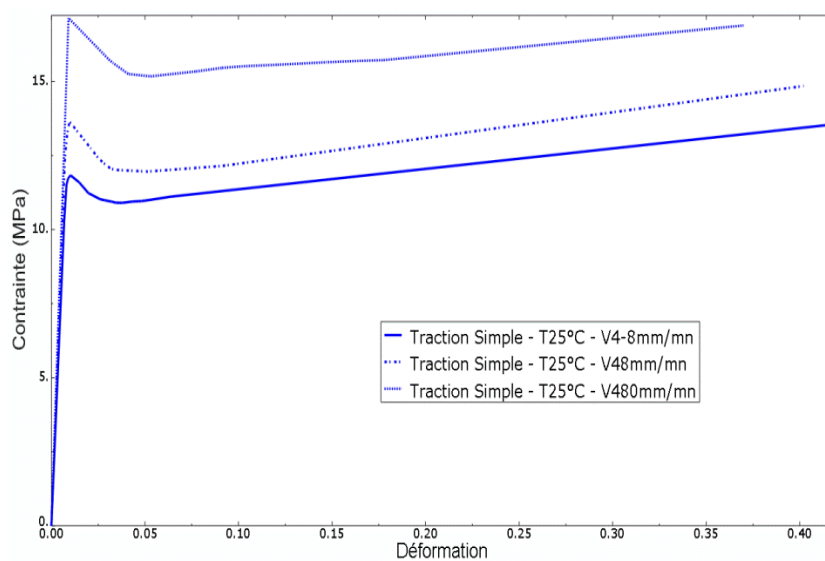


Figure III- 13: Evolution de contrainte-déformation à température ambiante (25c°) en fonction de la vitesse.

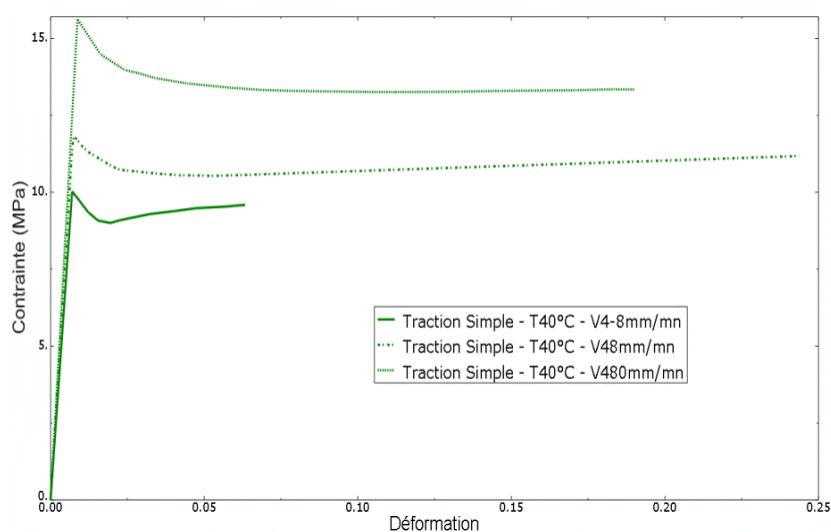


Figure III- 14: Evolution de contrainte-déformation à température T=40c° en fonction de la vitesse.

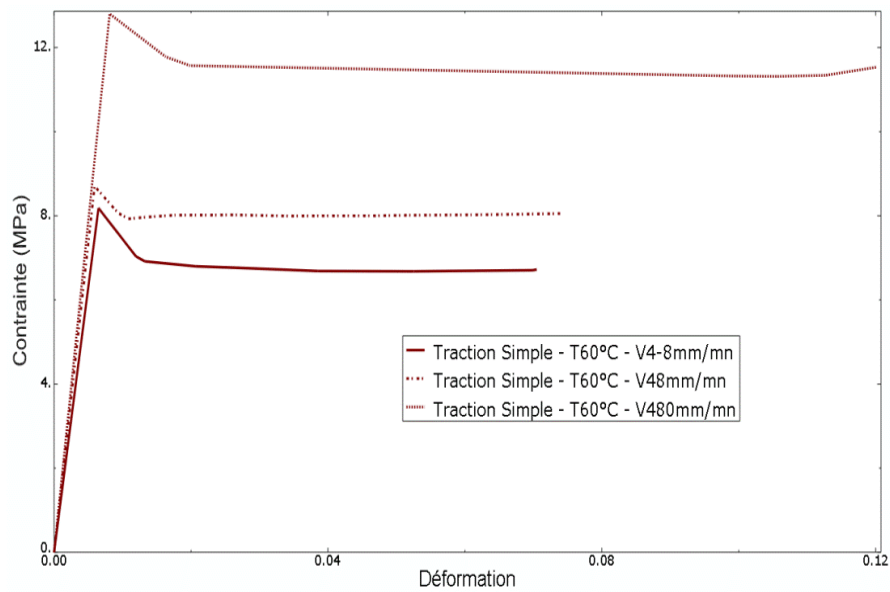


Figure III- 15: Evolution de contrainte-déformation à température $T= 60c^{\circ}$ en fonction de la vitesse.

Interprétations des courbes :

Les trois Figures III- (13, 14, 15) représente l'évolution contrainte-déformation pour chaque température en fonction de la vitesse. On remarque que, à chaque fois quand on augmente la vitesse de chargement, la contrainte maximale augmente dans le cas d'une température ambiante. Les résultats expérimentaux ce rapproche par rapport aux résultats numérique.

Les courbes suivantes représentent l'évolution de la contrainte en fonction de déformation lors de l'essai de traction pour une vitesse constante et différentes températures.

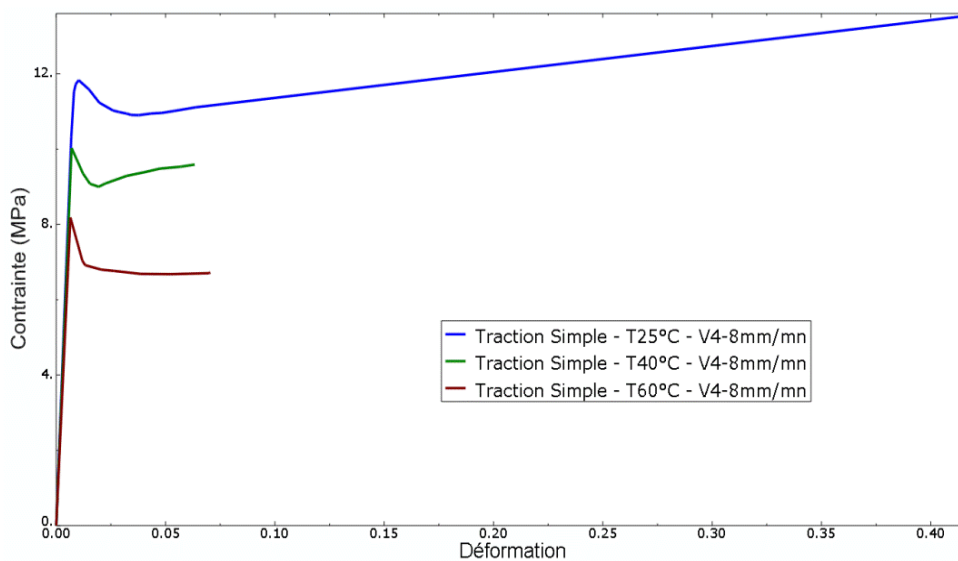


Figure III- 16: Evolution contrainte en fonction déformation de l'essai de traction pour une vitesse de 4.8 mm/min en fonction des températures.

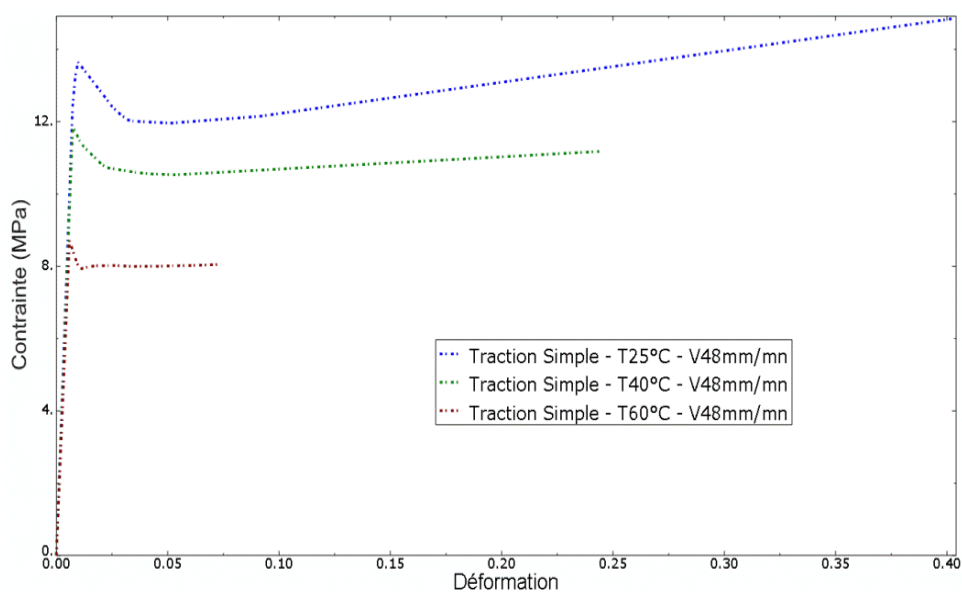


Figure III- 17: Evolution contrainte en fonction de déformation de l'essai de traction pour une vitesse de 48 mm/min en fonction des températures.

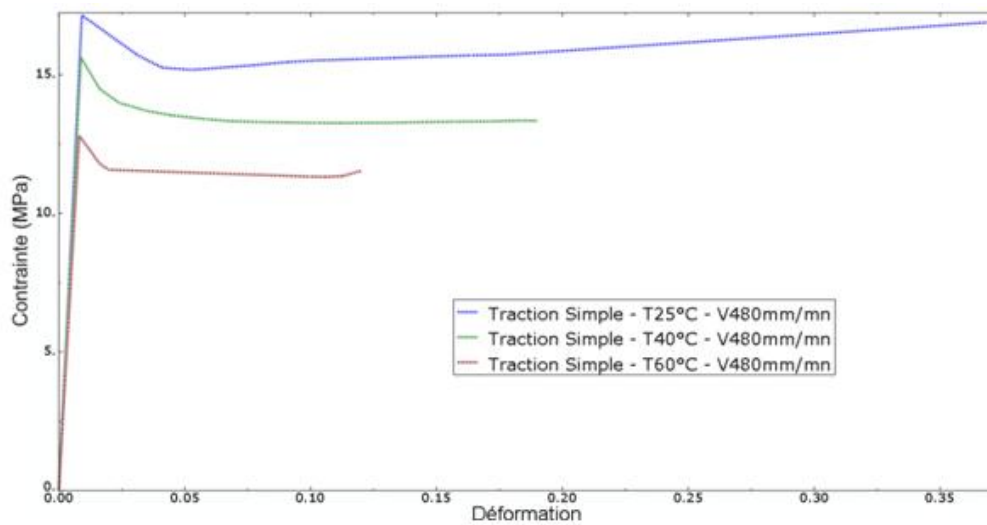


Figure III- 18: Evolution contrainte en fonction de déformation de l'essai de traction pour une vitesse de 480 mm/min en fonction des températures.

Interprétations des courbes :

Les trois figures III-16 à II-18 représentent l'évolution contrainte déformation pour les trois températures différentes en fonction d'une vitesse constante. On distingue sur les courbes, la zone linéaire correspond à un comportement élastique du matériau. On remarque que à chaque fois quand on augmente la température, la contrainte diminue pour différentes vitesses de chargement. Les propriétés mécaniques telles que là le module de Young, la limite d'élasticité et la rupture, etc. peuvent être obtenus à partir des courbes précédents.

III- 2-5- Simulation avec SolidWorks de l'essai biaxial sur le dispositif

Nous présentons dans ce qui put une étude sur le comportement biaxial du HIPS, sur le banc d'essai.

a) Contrainte de Von Misses

La répartition de contraintes équivalentes de Von Misses est représentée dans le schéma ci-dessus. Les flèches en bleu représentent une liaison rigide entre éprouvette et les Mors de fixation dans les quatre directions.

Celles en vert représentent les références géométriques qui éliminent les degrés de liberté pour conditionner le mouvement de notre modèle (mouvement nul au variable selon les trois axes (x, y, z), et les flèches en rouge représentent le chargement extérieur de 100 kN/mm². Comme on peut visualiser l'endroit de la concentration de contrainte sur les mors, qui est représenté avec la couleur verte et la contrainte maximale et minimale sur notre modèle.

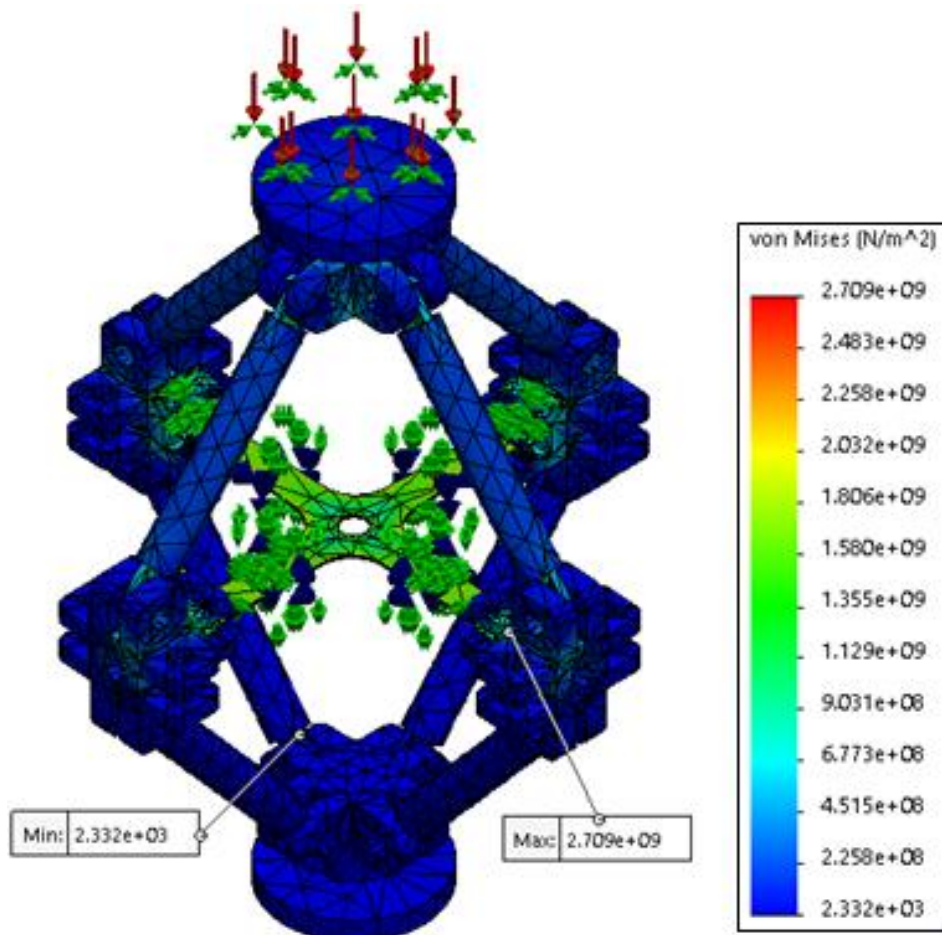


Figure III- 19: Représentation des tensions de Von Misses sur l'éprouvette en HIPS sollicitée en traction Biaxiale

b) La Déformation ESTRN

La déformation (ESTRN) est la déformation équivalente qui n'est pas en mm mais en %.

La répartition des déformations spécifiques ESTRN est représentée sur la figure ci-dessus. La valeur des déformations est entre $5.621e-09$ $\mu\text{m}/\text{mm}$ et $6.165e-01$ $\mu\text{m}/\text{mm}$. Comme on peut visualiser l'endroit de la déformation maximale et minimale respectivement sur l'éprouvette et la partie base du mécanisme (tirant).

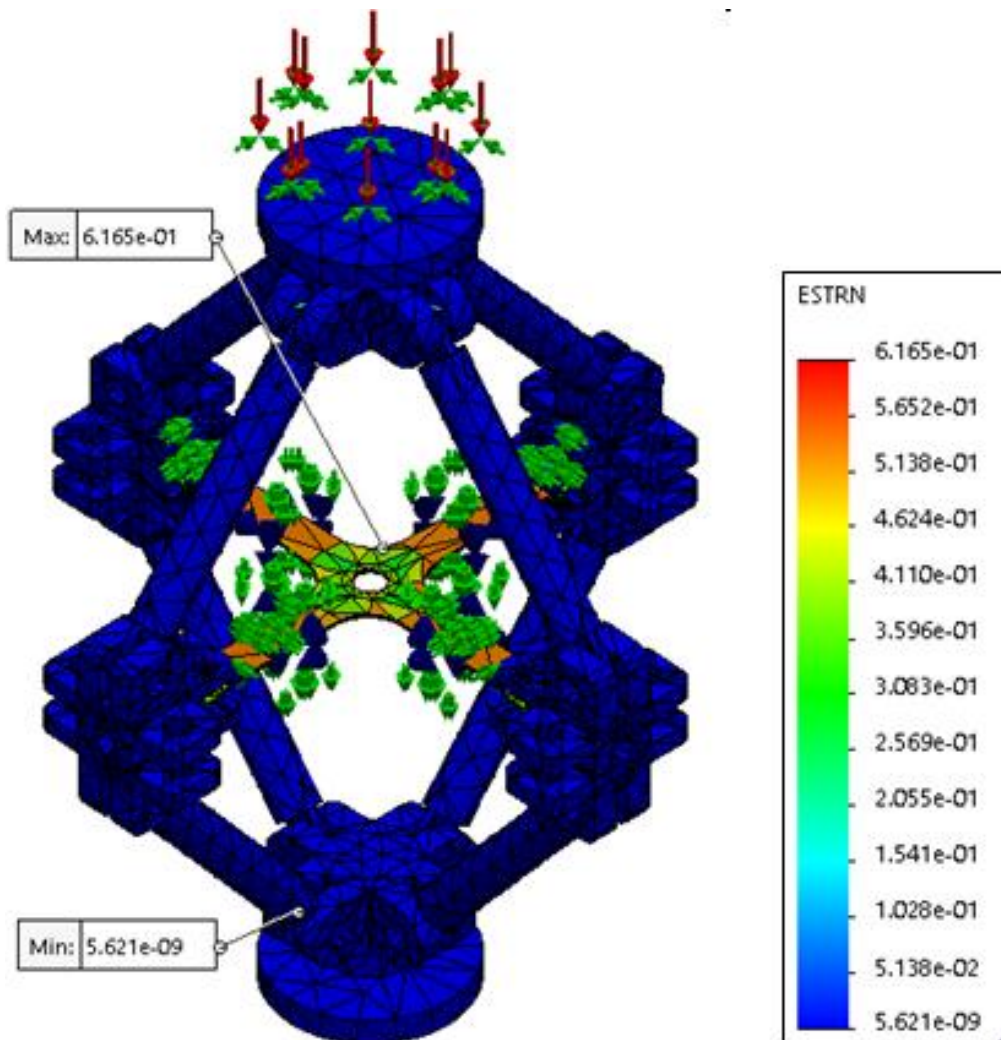


Figure III- 20: Répartition de la déformation équivalente spécifique dans l'éprouvette HIPS

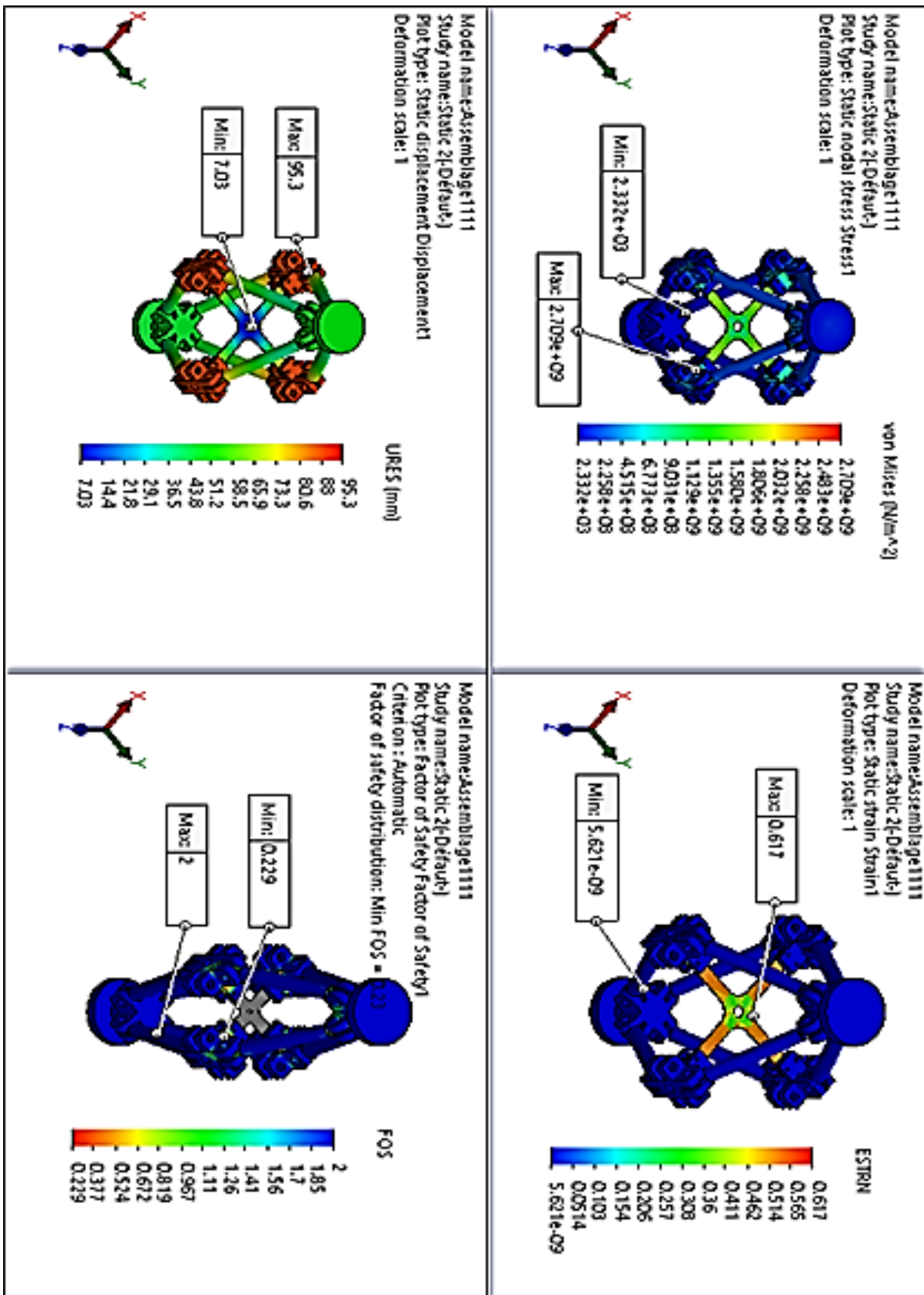


Figure III- 21 : Comparaison des résultats

III-3- Comparaison expérimentale et numérique

Les courbes ci-dessus, représentent la superposition des courbes expérimentales et numériques de la contrainte-déformation pour la température ambiante en fonction de la des trois vitesses. Ces résultats sont obtenus après étude du maillage.

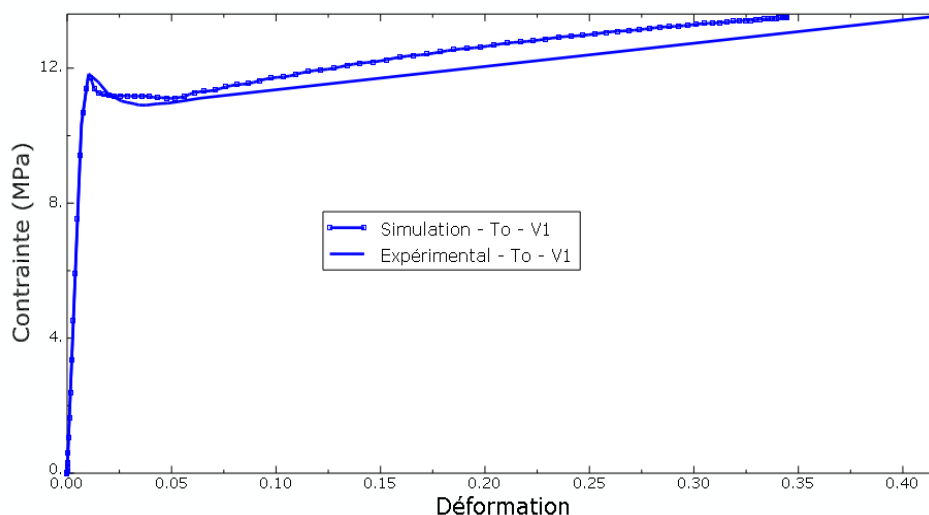


Figure III- 22: Superposition des courbes expérimentales et numériques de la contrainte-déformation pour la température ambiante en fonction de la vitesse V_1 .

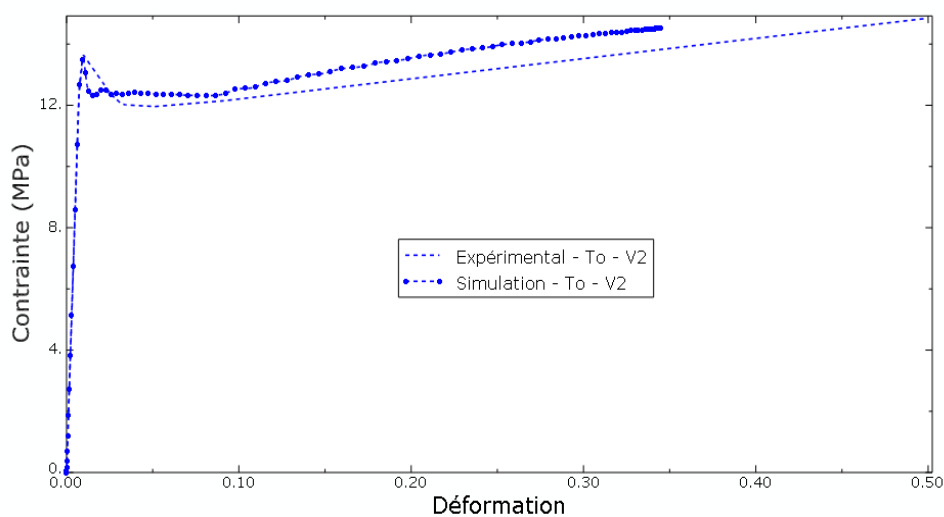


Figure III- 23 : Superposition des courbes expérimentales et numériques de la contrainte-déformation pour la température ambiante en fonction de la vitesse V_2 .

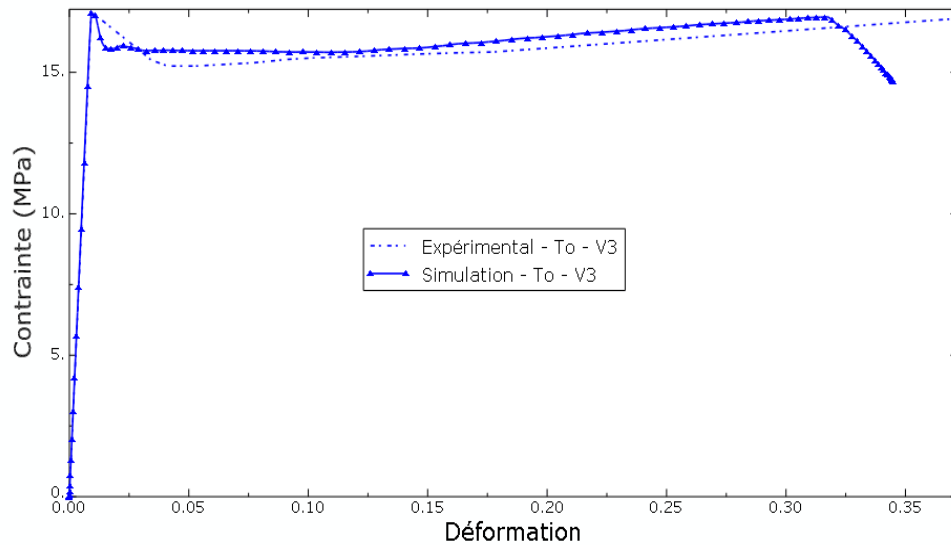


Figure III- 24: La superposition de courbes expérimentales et numériques de la contrainte déformation pour la température ambiante en fonction de la vitesse V_3 .

Interprétations des courbes :

Les figures III- (19, 20, 21) représentent la superposition des courbes expérimentales et numériques de contrainte-déformation pour la température ambiante en fonction des trois vitesses ($v_1 = 4.8\text{mm/min}$, $v_2 = 48\text{mm/min}$, $v_3 = 480\text{mm/min}$). On distingue sur les courbes deux zones : une première zone linéaire correspond à un comportement élastique du matériau, une deuxième zone non linéaire correspond à un comportement plastique (ductile).

En raison notamment de la difficulté à tracer les courbes contrainte-déformation, nous avons donc décidé de réaliser une étude avec le logiciel Abaqus.

III-4- Rappel sur le logiciel Abaqus :

Les techniques expérimentales fournissent des indications parfois insuffisantes aux ingénieurs qui calculent les structures et s'assurent de leur mise en service. En effet, la réponse expérimentale fournit peu de détails à une échelle locale. Des investigations supplémentaires influencent beaucoup le prix de revient des essais. De nos jours une alternative plus économique est apportée par les modélisations numériques...

III-4-1- Simulations avec Abaqus

Le logiciel *ABAQUS*, a été développé par *Hibbit, Karlsson & Sorensen (HKS)* depuis le début de la théorie des éléments finis et a été amélioré au fur et à mesure pour intégrer toutes les nouveautés de la théorie et des besoins de la recherche. *ABAQUS* est très largement utilisé dans les industries automobiles et aéronautiques. En raison du large spectre de ses capacités d'analyse et de sa bonne ergonomie, il est également très populaire dans les milieux universitaires, pour la recherche et l'éducation.

La structure du fichier de données d'Abaqus est assez complexe : elle doit contenir toutes les définitions géométriques, les descriptions des maillages, les matériaux, les chargements, etc..., suivant une syntaxe précise.

ABAQUS propose le module *ABAQUS CAE*, interface graphique qui permet de gérer, souvent l'ensemble des opérations liées à la modélisation :

- La génération du fichier de données.
- Le lancement du calcul proprement dit.
- L'exploitation des résultats.

III-4-2- Etapes de la simulation sur ABAQUS

Nous étudions le comportement rhéologique en réalisant des simulations de traction sur ce logiciel afin d'explorer l'état des contraintes et déformations. *ABAQUS CAE* est divisé en unités fonctionnelles appelées modules. Chaque module contient les outils qui sont propres à une partie de la tâche de modélisation :

1- Le module « PART » : Permet de créer tous les objets géométriques nécessaires à notre problème.

2- Le module « PROPERTY » : Permet, de définir toutes les propriétés d'un objet géométrique ou d'une partie de ces objets.

3- Le module « ASSEMBLY » : Permet d'assembler les différents objets géométriques créés dans un même repère de coordonnées global.

4- Le module « STEP » : Ce module permet de définir toutes les étapes et les requêtes pour le post traitement, c'est à dire le moment à partir duquel une force est appliquée et jusqu'à quand.

5- Le module « INTERACTION » : Il est possible de spécifier toutes les interactions entre les différentes parties et régions du modèle, qu'elles soient mécaniques, thermiques ou autres.

6- Le module « LOAD » : Le module *Load* permet de spécifier tous les chargements, conditions limites et champs d'application.

7- Le module « MESH » : Ce module contient tous les outils nécessaires pour générer un maillage en éléments finis du matériau.

8- Le module « JOB » : Une fois que toutes les tâches de définition du modèle ont été réalisées, le module Job permet d'analyser le modèle.

9- Le module « VISUALIZATION » : Ce module permet de visualiser *le modèle* et les résultats, les courbes de charges, les déformations...

III-4-3- Conduite de la simulation :

La géométrie des éprouvettes qui ont servi aux essais en expérimental est présentée sur la figure (III-25). Les dimensions de la section réduite sont 58 mm de longueur ;

19 mm de largeur sur 3.8 mm d'épaisseur. Comme la pièce est symétrique, seulement la moitié de la pièce avec des conditions frontières (CF) de symétrie est prise en compte. En fait, seulement la partie utile de l'éprouvette a été modélisée à cause de la bi-symétrie, on la représente sur la figure ci-dessous :

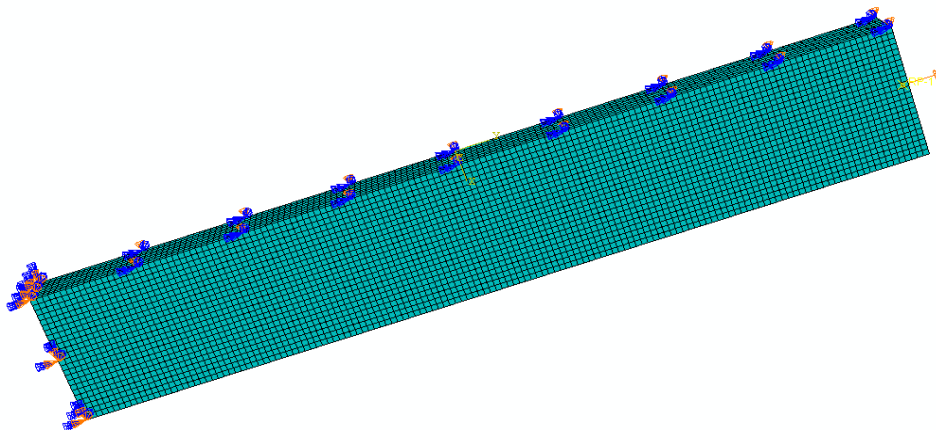


Figure III- 25: *La charge appliquée sur la partie utile de l'éprouvette soumis en traction.*

Résultats et discussions

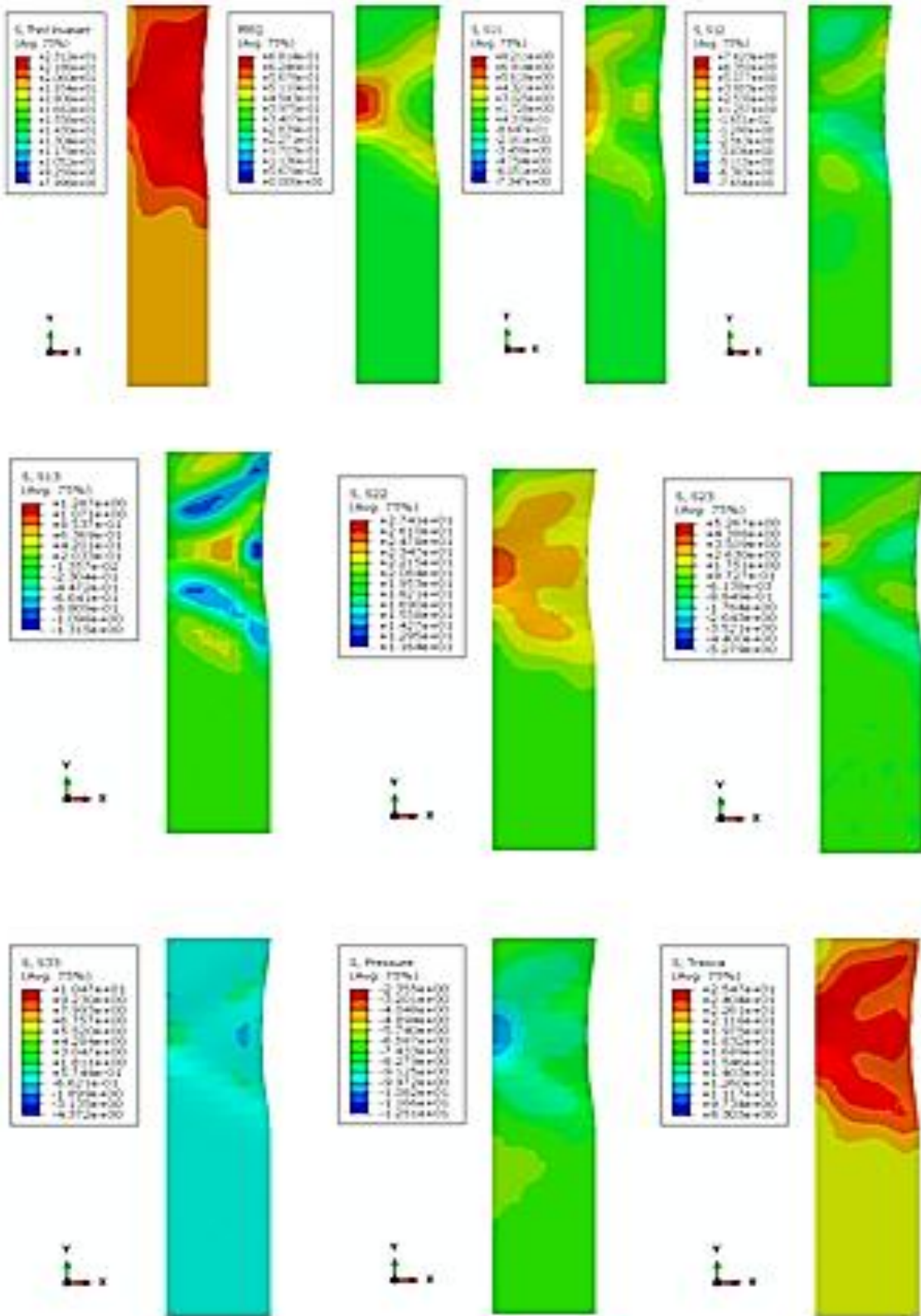


Figure III- 26: Les résultats d'essai de traction sur la partie utile de l'éprouvette

Les paramètres du modèle sont :

- Module de Young (E)= 1500 Mpa.
- Coefficient de Poisson (ν)=0.3.
- Matériau homogène et isotrope.

Interprétation :

Nous remarquons sur les figures que la contrainte et déformation cumulée se concentrent sur une bande inclinée de 45° . Donc la rupture a lieu alors cette bande.

III-5- Simulation numérique des éprouvettes cruciformes (Abaqus)

Dans cette section effectuée des simulations (sur Abaqus) de la rupture d'éprouvettes biaxiales. Nous avons choisi OX comme direction majeur et OY mineur.

Un déplacement fixe $U_X^{\max}=23\text{mm}$ est imposé en traction. Selon la direction mineure, nous avons appliquée trois chargements dans 3 simulations différentes :

- | | |
|---|-----------------------------|
| 1) $U_Y^{\max}= U_X^{\max}= 23\text{mm}$, $R= U_Y^{\max} / U_X^{\max}= 1$ | traction-traction |
| 2) $U_Y^{\max}= 0$, $R=0$ | traction-blocage |
| 3) $U_Y^{\max}= -U_X^{\max}= -23\text{mm}$, $R= U_Y^{\max} / U_X^{\max}= -1$ | traction-compression |

Il est à noter que nous avons d'abord fait une étude de maillage.

Courbes force-déplacement :

Nous présentons sur les figures suivantes, l'évolution de la force appliquée en fonction du déplacement pour chaque valeur de R.

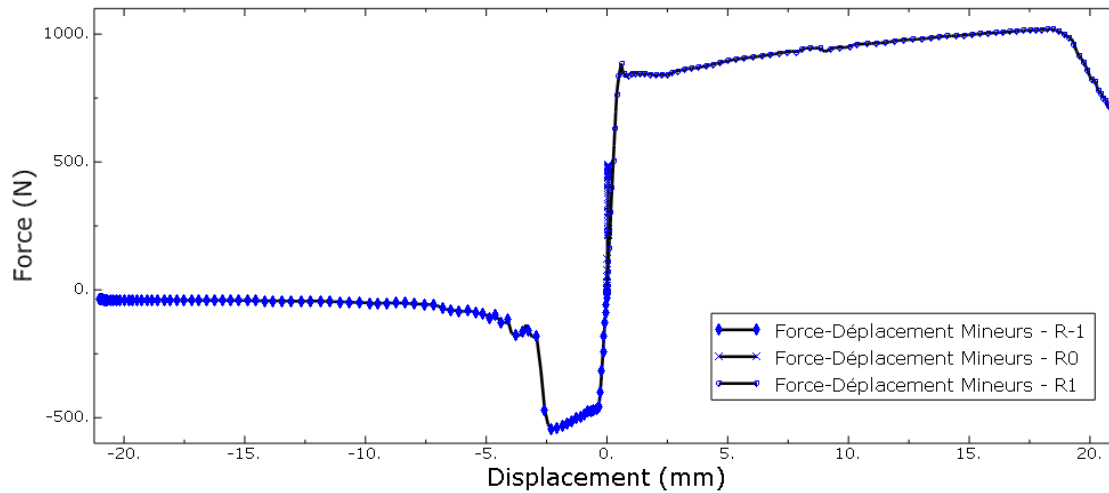


Figure III- 27 : Evolution de force-déplacement mineur à trois rapports différents.

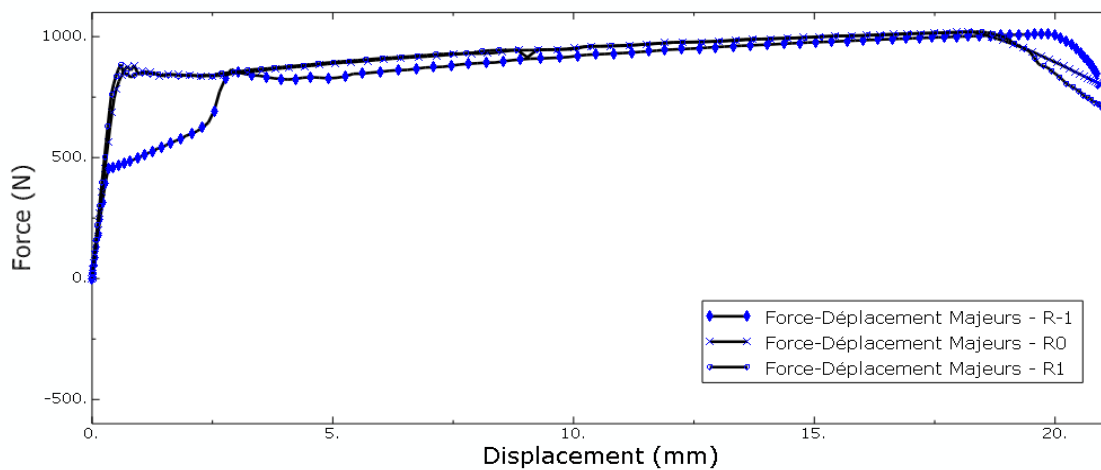


Figure III- 28 : Evolution de force-déplacement majeur à trois rapports différents

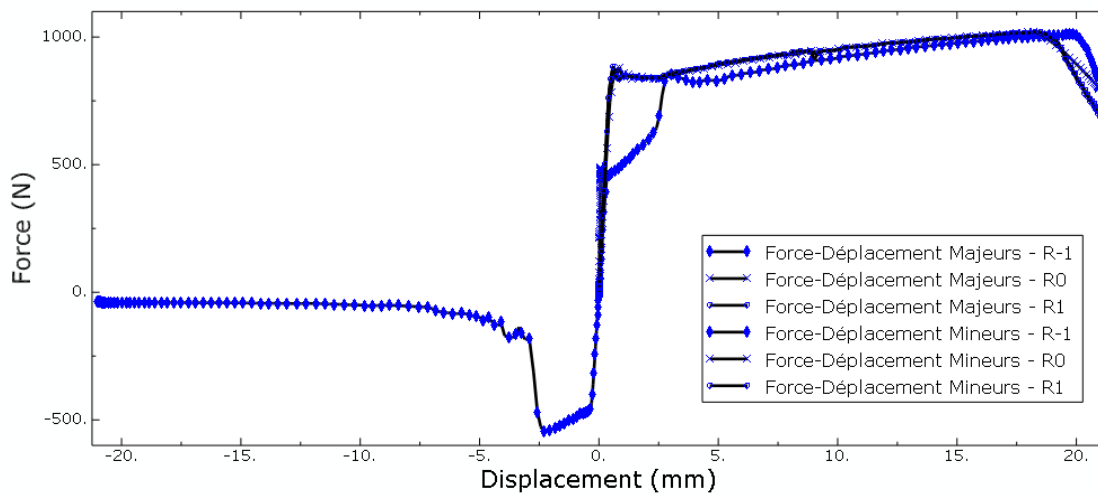


Figure III- 29 : La superposition des courbes de déplacement majeur et mineur à trois rapports différents.

Interprétation des résultats :

Les figures III-27 à III-29 représentent les superpositions des courbes de déplacements majeurs et mineurs pour les trois rapports. Il apparaît sur les courbes que les trois comportements ($R=-1$, $R=0$ et $R=1$) se distinguent clairement. En effet, dans le cas $R=1$, la traction-traction apparaît sur les deux directions. Pour $R=-1$ nous avons une traction selon OX et une compression selon OY. Pour $R=0$, le blocage généré comme-même une réaction (qui est la force nécessaire pour bloquer le déplacement).

Résultats des éprouvettes cruciformes

Nous donnons sur les figures III-30 à III-35 la distributions de la contrainte de von Mises et la déformation cumulée pour chaque valeur de R et à 3 déplacement différent 9.2mm, 16.1mm et 19.55mm.

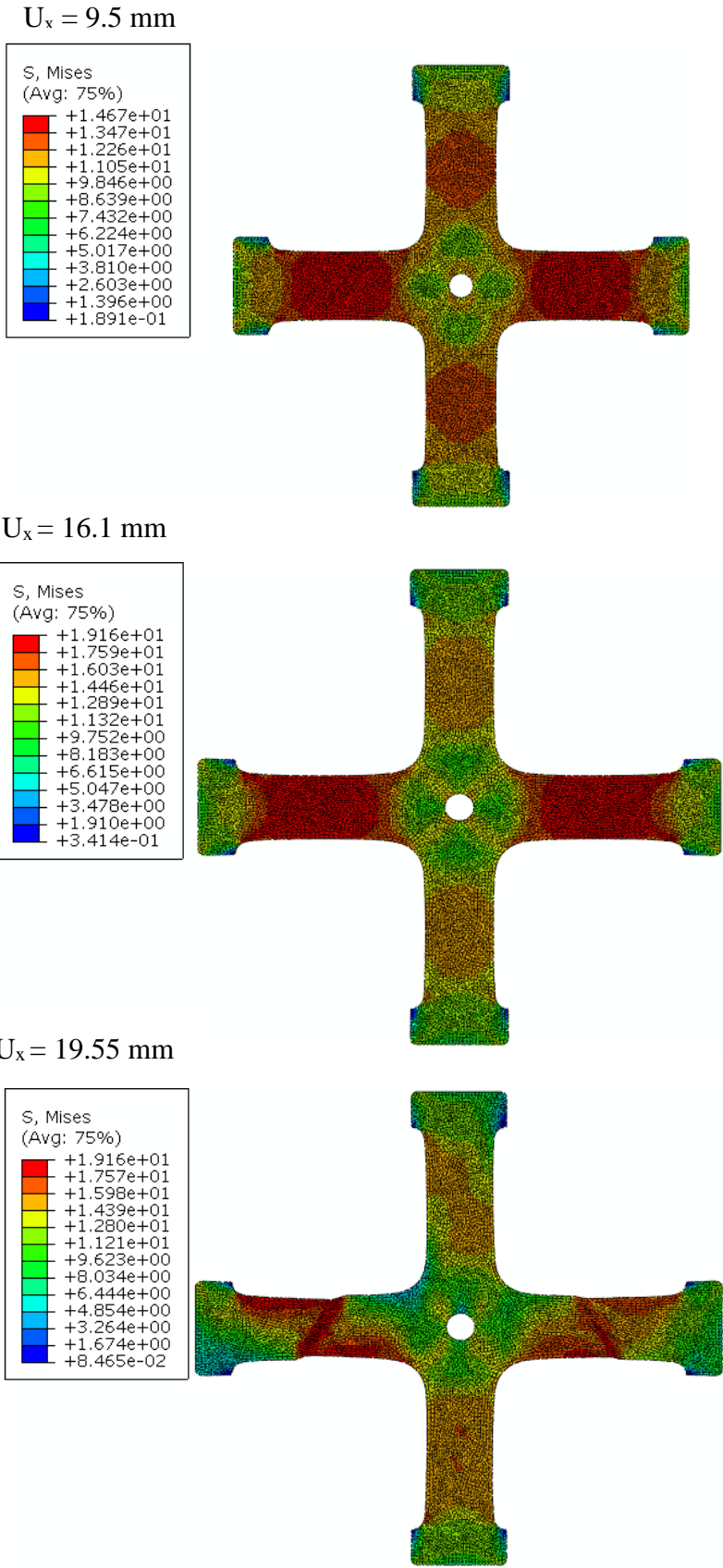
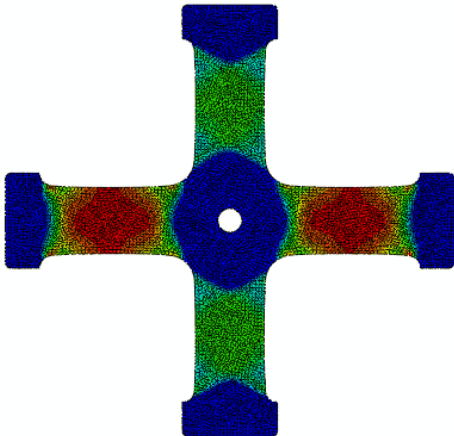
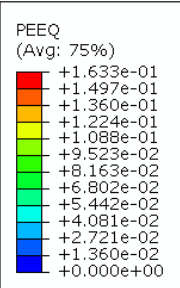
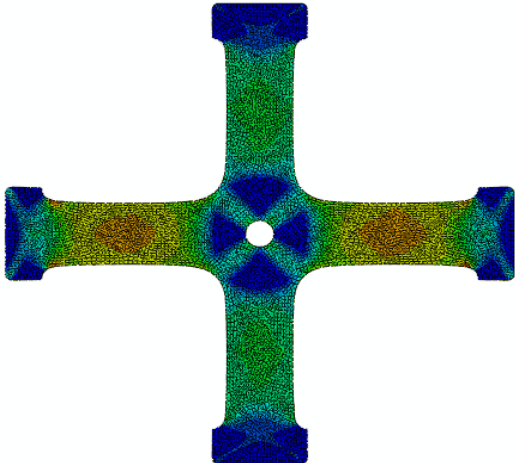
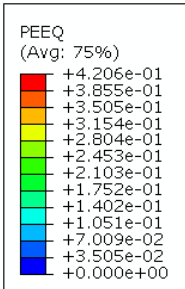


Figure III- 30: La contrainte de Von Mises pour un rapport de déplacement $R = 1$

$U_x = 9.5 \text{ mm}$



$U_x = 16.1 \text{ mm}$



$U_x = 19.55 \text{ mm}$

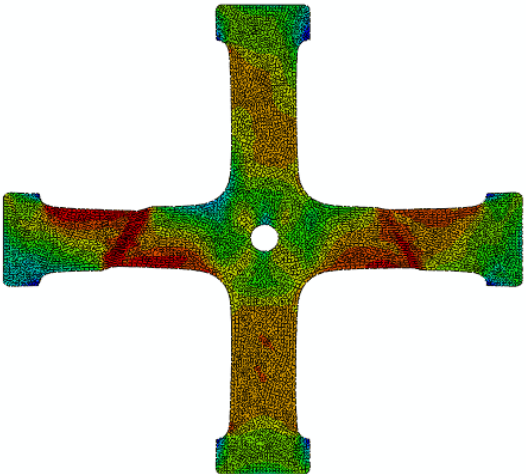
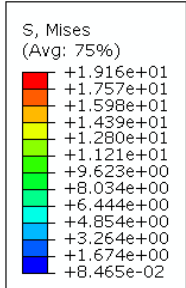
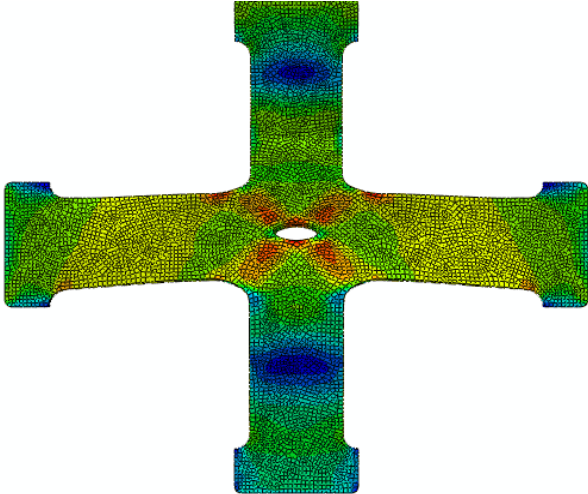
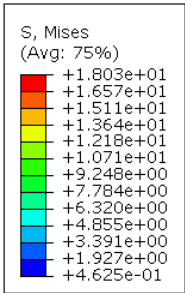
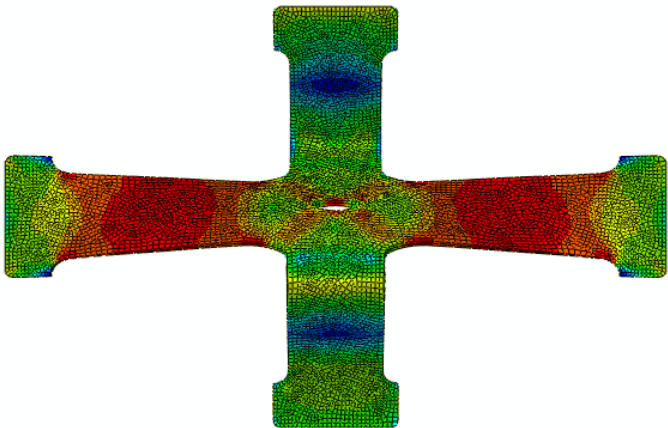
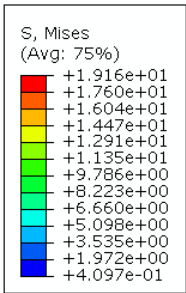


Figure III- 31 : Déformation plastique pour un rapport de déplacement $R = 1$

$U_x = 9.5 \text{ mm}$



$U_x = 16.1 \text{ mm}$



$U_x = 19.55 \text{ mm}$

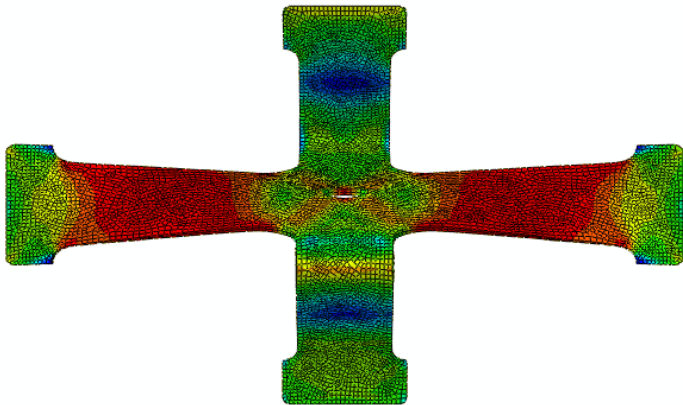
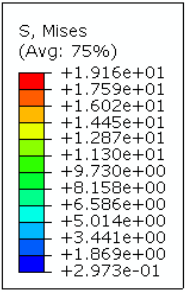


Figure III- 32 : La contrainte de Von Mises pour un rapport de déplacement $R = -1$

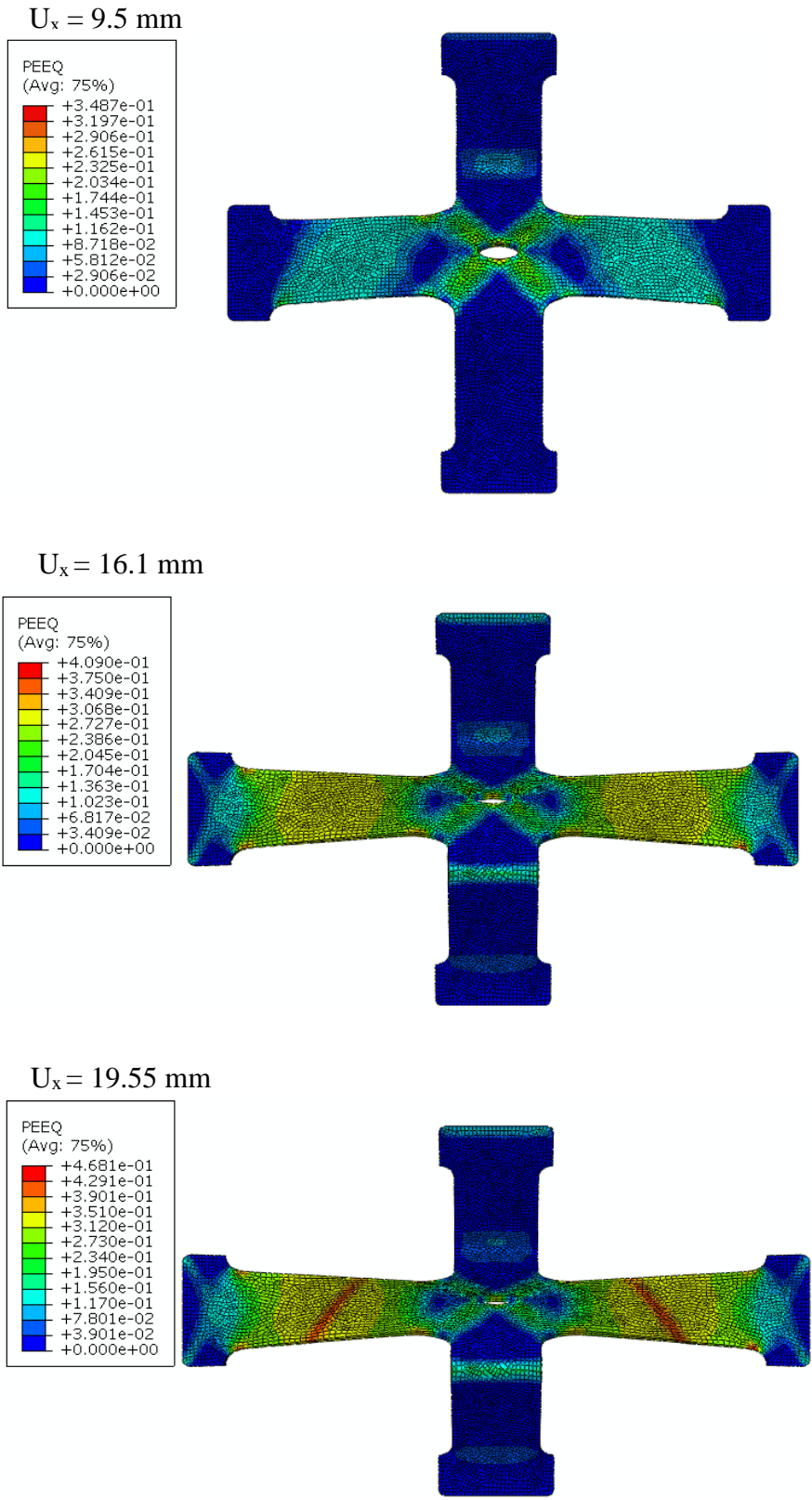


Figure III- 33: La déformation plastique pour un rapport de déplacement $R = -1$

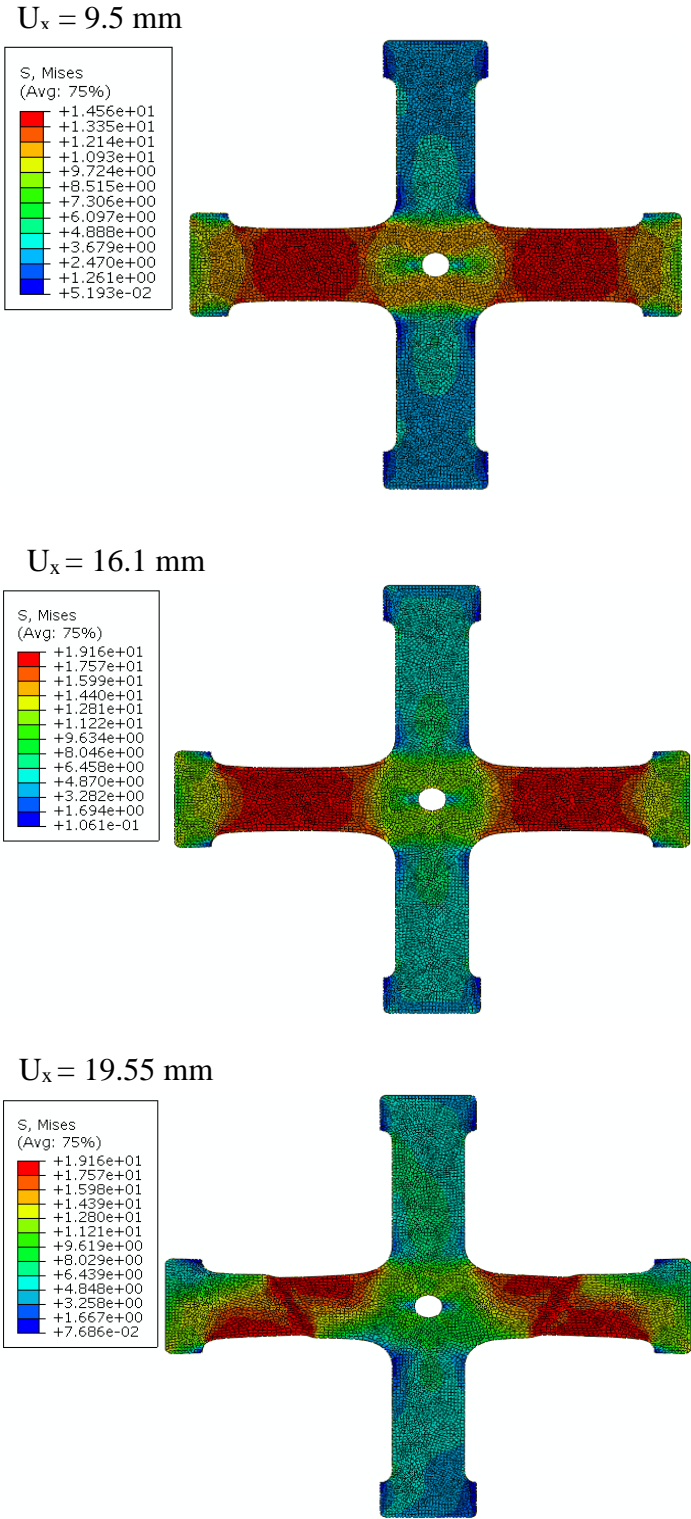


Figure III- 34 : La contrainte de Von Mises pour un rapport de déplacement $R = 0$

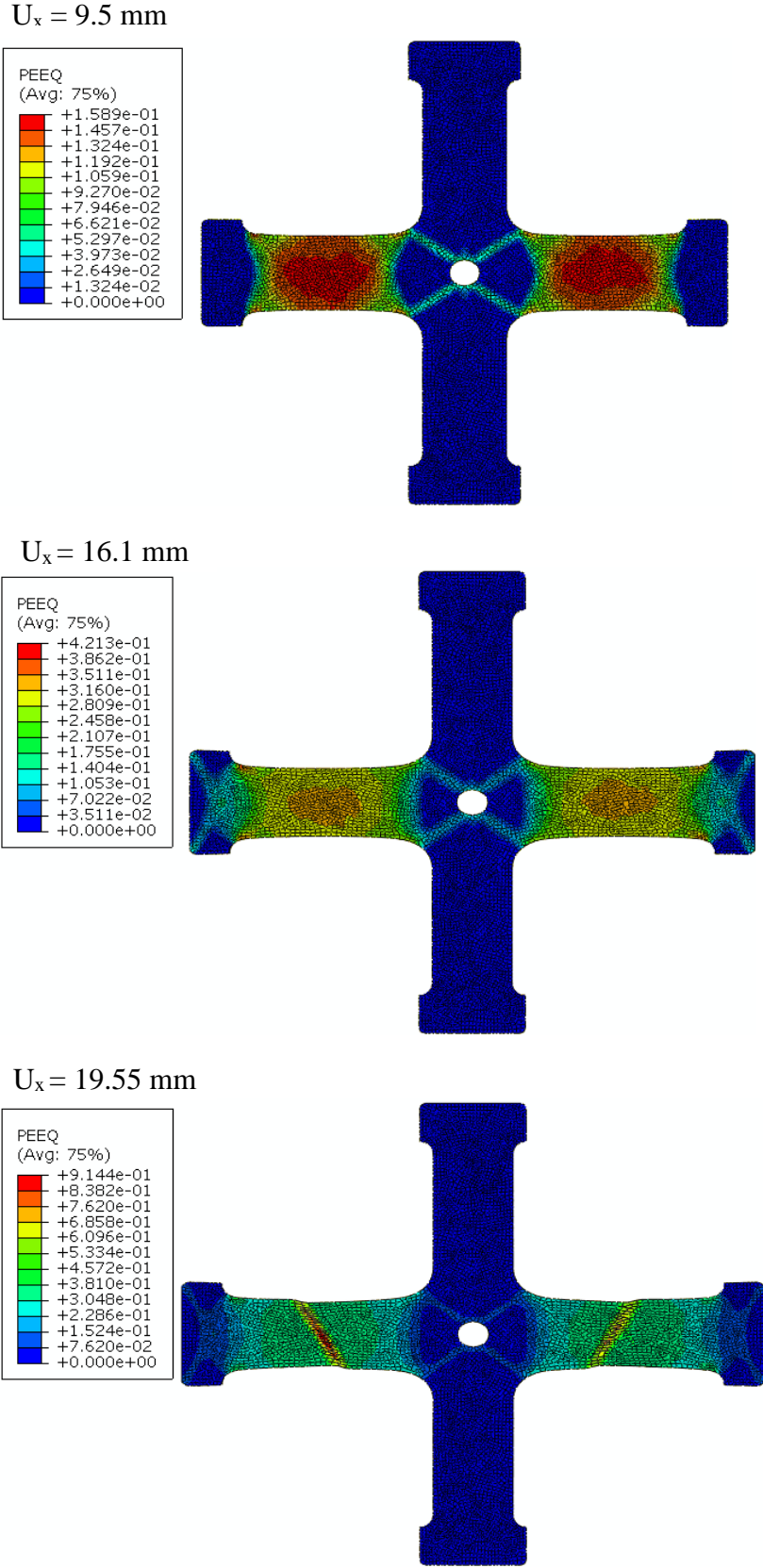


Figure III- 35: La déformation plastique pour un rapport de déplacement $R = 0$

Interprétations

Pour $R = 1$, nous remarquons que la rupture survient à 45° par rapport à la direction de chargement au milieu de zone utile, ce résultat est confirmé par la déformation cumulée. Le trou central garde une forme circulaire.

Dans le cas de $R = -1$ le trou central se referme progressivement selon la direction de compression. Dans ce cas une striction apparaît au voisinage de la zone centrale.

Dans le cas $R=0$, le trou central s'allonge dans la direction de traction.

III-6- Simulation du thermoformage :

La disposition des différents éléments constituant le procédé de thermoformage en bulle sous pression avec poinçon de pré-étirage est montrée sur les figures III-36 et III-37.

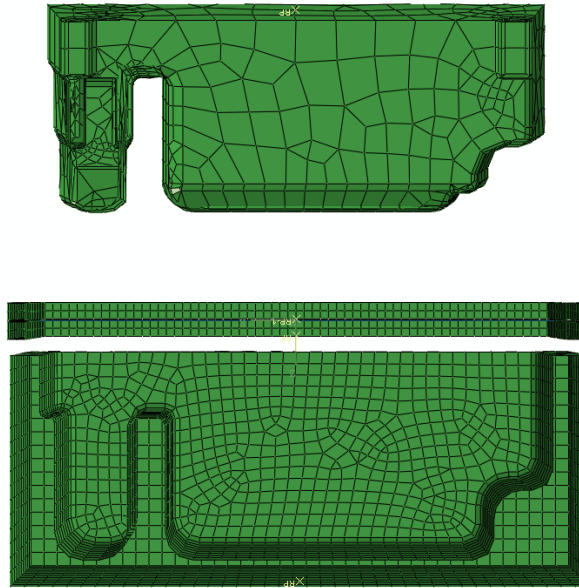


Figure III- 36: Le maillage des outils et de la plaque.

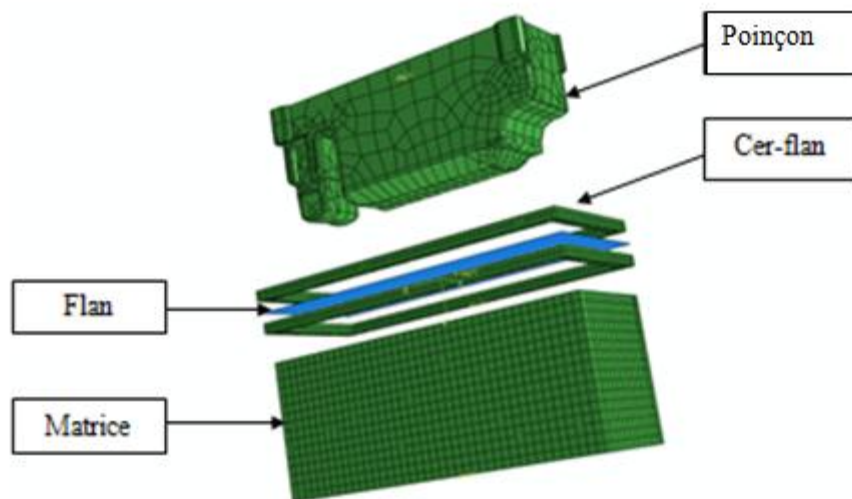


Figure III- 37: Vue éclatée des éléments en perspective.

Les courbes suivantes représentent l'évolution de la Force en fonction du déplacement du Poinçon selon trois directions différentes.

La figure III-38 représente le module de la force totale.

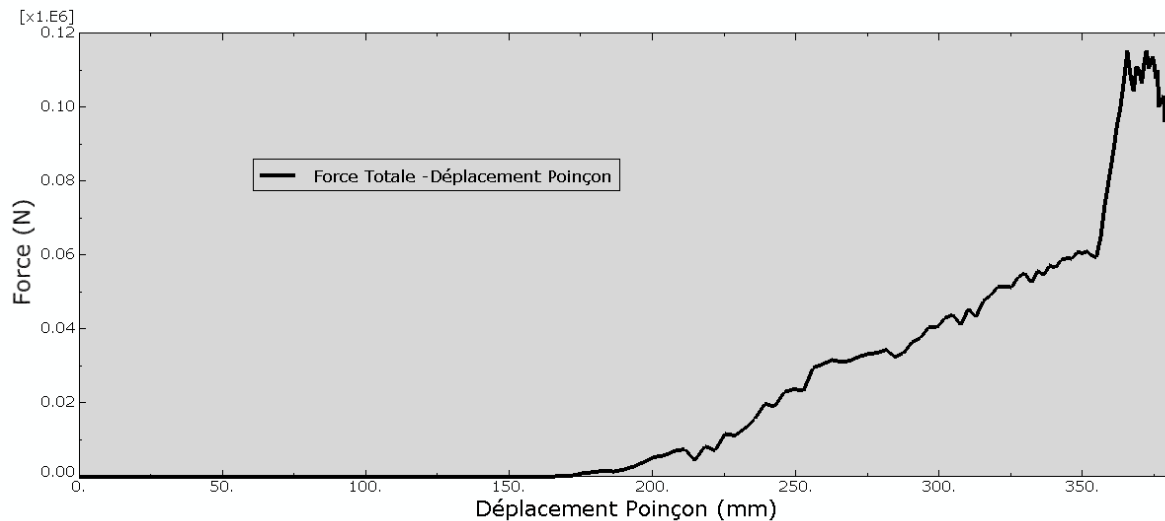


Figure III- 38: Evolution force déplacement du poinçon

La figure III-39, représente l'évolution de chaque composante de la force

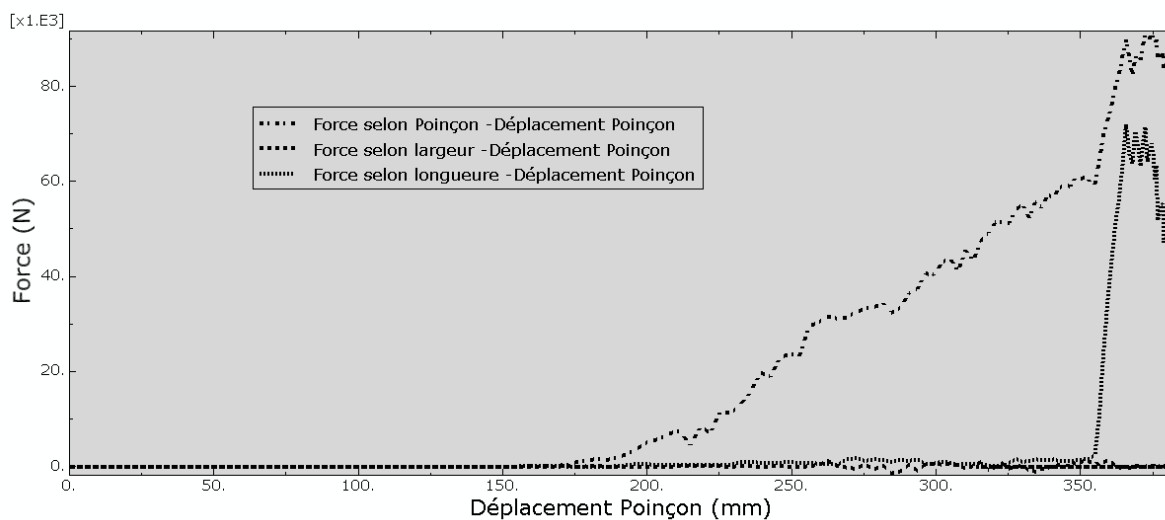


Figure III- 39: La superposition des courbes force déplacement des trois directions.

Comme il fallait s'y attendre, la composante selon le poinçon est la plus grande. Il est aussi à noter que la composante de la force selon la longueur est beaucoup plus grande que celle selon la largeur.

La simulation du procédé est réalisée en comparant un bullage, puis le poinçon pré-étiré la plaque. En fin, un vide est appliqué pour fermer la cuve.

Les figures III-40 à III-43 présentent la distribution de la contrainte de Von Mises élément à la fin du thermoformage.

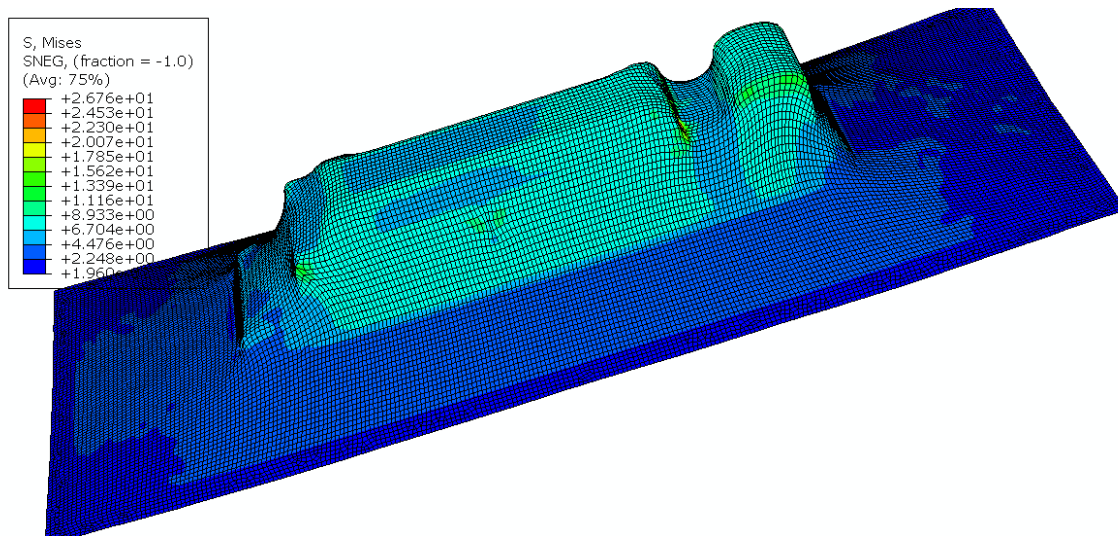


Figure III- 40: La distribution des contraintes sur la feuille en HIPS

Lors de la mise en forme

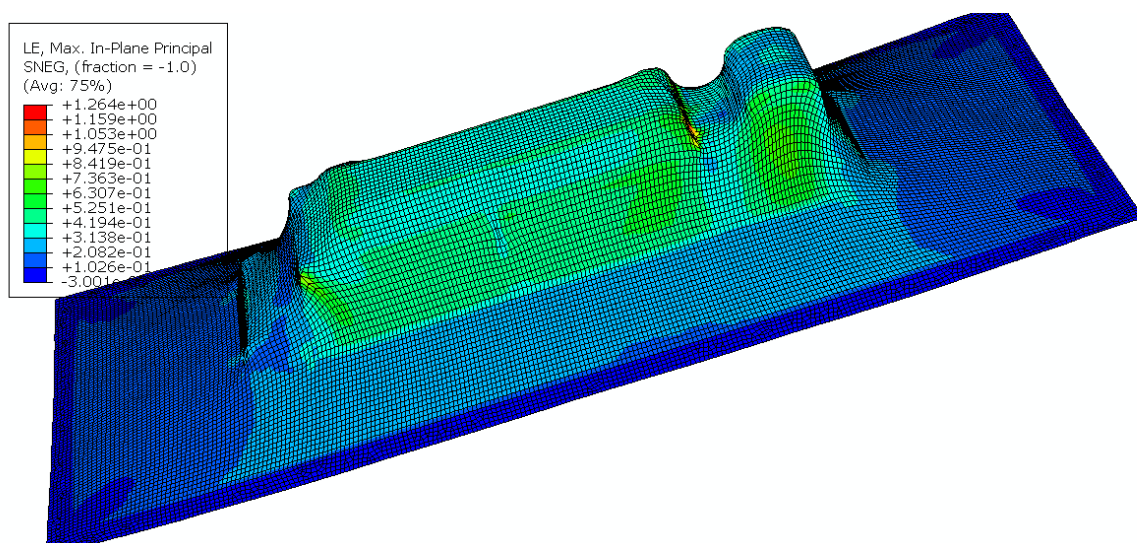


Figure III- 41: La distribution de la déformation sur la feuille en HIPS

Lors de la mise en forme

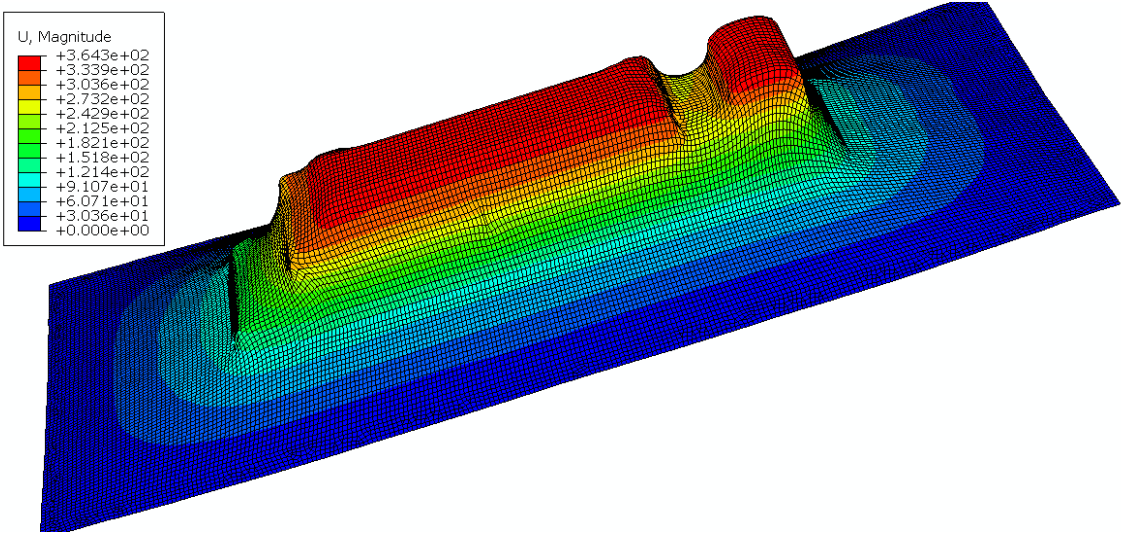


Figure III- 42: La distribution des déplacements sur la feuille en HIPS
Lors de la mise en forme

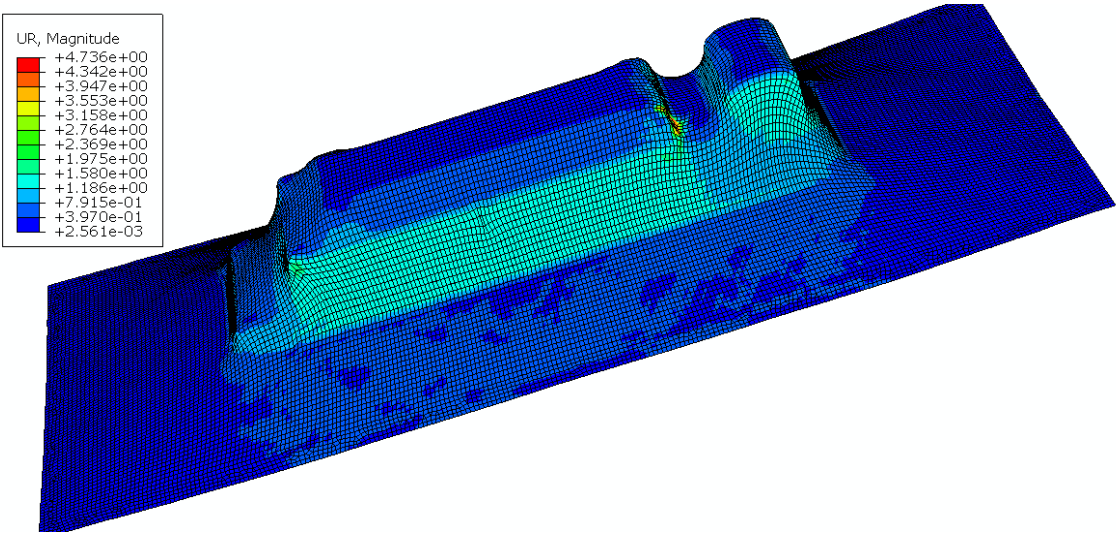


Figure III- 43: La distribution des rotations sur la feuille en HIPS
Lors de la mise en forme

III-7 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats obtenus au cours des essais de traction ainsi que les simulations effectuées avec Abaqus.

Conclusion Générale

Dans ce mémoire de master, nous nous sommes caractérisés aux sollicitations biaxiales qui sont prépondérantes dans le formage de plaque. Dans cet objectifs, nous conçu avec le logiciel SolidWorks, un banc d'essai biaxial. Ce banc permet de transformer l 'effet généré par un vérin en un chargement biaxial. Ce banc a été ensuite étudié et dimensionnée avec SolidWorks Simulation. Certains organes du banc ont été calculés à la résistance dans le cadre de la théorie de la RDM. Dans une deuxième étape, nous avons étudié le Polystyrène Choc (HIPS) dans l'objectifs de caractériser sa formabilité en cours du procédé de thermoformage en bulle sous pression avec poinçon de pré-étirage du HIPS. Des essais expérimentaux sur le même matériau ont été réalisés à différentes températures, puis validés par la simulation numérique en utilisant Abaqus. Le comportement biaxial du HIPS a aussi été étudié avec le même logiciel.

Finalement, une simulation du thermoformage a été réalisée avec Abaqus. Nous avons donc effectué une modélisation thermomécanique du procédé dans le but de simuler le formage de la cuve de réfrigérateurs au niveau l'entreprise ENIEM.

Comme perspectives à ce travail, nous proposons :

- ✓ Réalisation d'un système d'acquisition par ordinateur du banc d'essai biaxial.
- ✓ Mener une étude sur le type d'éprouvette biaxiale, on combinant la simulation numérique et l'expérimental.
- ✓ Caractérisation thermomécanique du HIPS en uniaxial et biaxial, on utilisant une enceinte thermique approprié.
- ✓ Une étude approfondie du thermoformage on optimisant certains paramètres du procédé.

Chapitre I : ETAT DE L'ART

1. Hachour, K. *contribution a l'élaboration d'un critère de plasticité pour le Pehd. universite mouloud mammeri,tizi ouzou : s.n., 2010.*
2. internet. Commission européenne-Ministère de L'écologie, de L'énergie, du durable et de la Mer.
3. Latifa, BOUZID. *Modélisation moléculaire des copolymères PMMA-PS.* universite oran : s.n. : s.n., , 2011.
4. Doctorat, Moingeon. Thèse de, chimie, option et . Université Louis Pasteur Strasbourg I : s.n., 2006.
5. D.A. Tomalia, J. M .J. Fréchet. *Dendrimers and other Dendritic Polymers et . Wiley, New York, : s.n., 2001.*
6. Dorlot., Jean-Paul Bilon et Jean-Marie. *Des matériaux, troisième édition.* Ecole Polytechniques de Montréal, : s.n., 2000.
7. B.Ilschner., S.Degallai et. *Caractérisation expérimental des matériaux I, propriétés physiques, thermiques et mécaniques et premiere edition.* s.l. : Presses polytechniques et universitaires romandes, 2007.
8. S.Jouanne. *options chimie physicochimie des polymères, . université Piere et Marie Curie : s.n., 2005.*

CHAPITRE II : Conception et réalisation d'un banc d'essai Biaxial

1. <http://eduscol.education.fr/sti/si-ens-cachan/>.
2. J. Brillaud, F. Lagattu. *Lilits and possibiliteis of laser speckle and white light image.*
3. A. El Bartali, V. Aubin, S. Degallaix. *Fatigue damage analysis in a duplex stainless.*
4. *Manuel d'utilisation du logiciel Aramis, version 6, Gom, 2002.*
5. F. Lagattu, J. Brillaud, M.C. Lafarie-frenot, *High strain gradient measurements by.*

Annexe 1 : Rappel sur le logiciel Abaqus :

Les techniques expérimentales fournissent des indications parfois insuffisantes aux ingénieurs qui calculent les structures et s'assurent de leur mise en service. En effet, la réponse expérimentale fournit peu de détails à une échelle locale. Des investigations supplémentaires influencent beaucoup le prix de revient des essais. De nos jours une alternative plus économique est apportée par les modélisations numériques...

- Simulations avec Abaqus

Le logiciel *ABAQUS*, a été développé par Hibbit, Karlsson et Sorensen (HKS) depuis le début de la théorie des éléments finis et a été amélioré au fur et à mesure pour intégrer toutes les nouveautés de la théorie et des besoins de la recherche. *ABAQUS* est très largement utilisé dans les industries automobiles et aéronautiques. En raison du large spectre de ses capacités d'analyse et de sa bonne ergonomie, il est également très populaire dans les milieux universitaires, pour la recherche et l'éducation.

La structure du fichier de données d'Abaqus est assez complexe : elle doit contenir toutes les définitions géométriques, les descriptions des maillages, les matériaux, les chargements, etc..., suivant une syntaxe précise.

ABAQUS propose le module *ABAQUS CAE*, interface graphique qui permet de gérer, souvent l'ensemble des opérations liées à la modélisation :

- La génération du fichier de données.
- Le lancement du calcul proprement dit.
- L'exploitation des résultats.

- Etapes de la simulation sur ABAQUS

Nous étudions le comportement rhéologique en réalisant des simulations de traction sur ce logiciel afin d'explorer l'état des contraintes et déformations. *ABAQUS CAE* est divisé en unités fonctionnelles appelées modules. Chaque module contient les outils qui sont propres à une partie de la tâche de modélisation :

1- Le module « PART » : Permet de créer tous les objets géométriques nécessaires à notre problème.

2- Le module « PROPERTY » : Permet, de définir toutes les propriétés d'un objet géométrique ou d'une partie de ces objets.

3- Le module « ASSEMBLY » : Permet d'assembler les différents objets géométriques créés dans un même repère de coordonnées global.

4- Le module « STEP » : Ce module permet de définir toutes les étapes et les requêtes pour le post traitement, c'est à dire le moment à partir duquel une force est appliquée et jusqu'à quand.

5- Le module « INTERACTION » : Il est possible de spécifier toutes les interactions entre les différentes parties et régions du modèle, qu'elles soient mécaniques, thermiques ou autres.

6- Le module « LOAD » : Le module Load permet de spécifier tous les chargements, conditions limites et champs d'application.

7- Le module « MESH » : Ce module contient tous les outils nécessaires pour générer un maillage en éléments finis du matériau.

8- Le module « JOB » : Une fois que toutes les tâches de définition du modèle ont été réalisées, le module Job permet d'analyser le modèle.

9- Le module « VISUALIZATION » : Ce module permet de visualiser *le modèle* et les résultats, les courbes de charges, les déformations...

Annexe2 : Acquisition et traitement de données

Un poste de traitement des données pour récupérer les mesures et les traiter (tracer les courbes contrainte-déformation est nécessaire dans ce travail). Il est possible d'utiliser la caméra CCD utilisant la technique de la grille, la photographie de speckle ou encore la corrélation d'image numérique (CIN). Cette technique est peu sensible aux perturbations environnementales et simples d'utilisation. De plus, elle permet de conserver la microstructure observable tout au long des essais, qui pourra ainsi être mise en relation avec les champs mesurés, elle peut être utilisée sur tous types de matériaux ainsi qu'en présence de gradients de déformation.

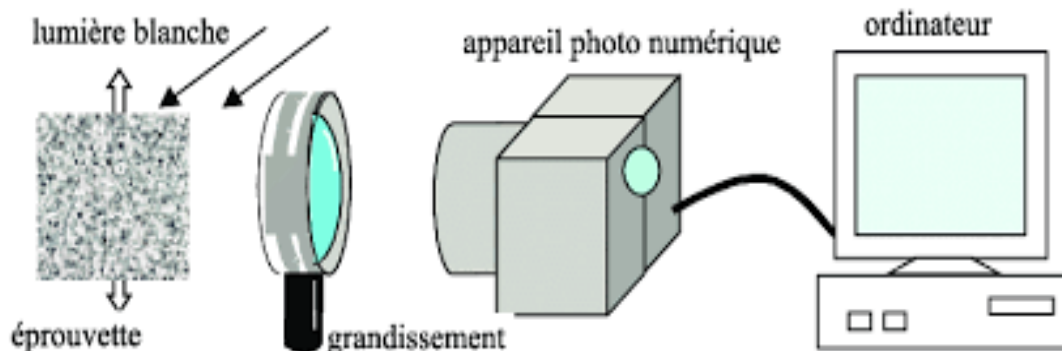


Figure 1: Principe de corrélation d'image

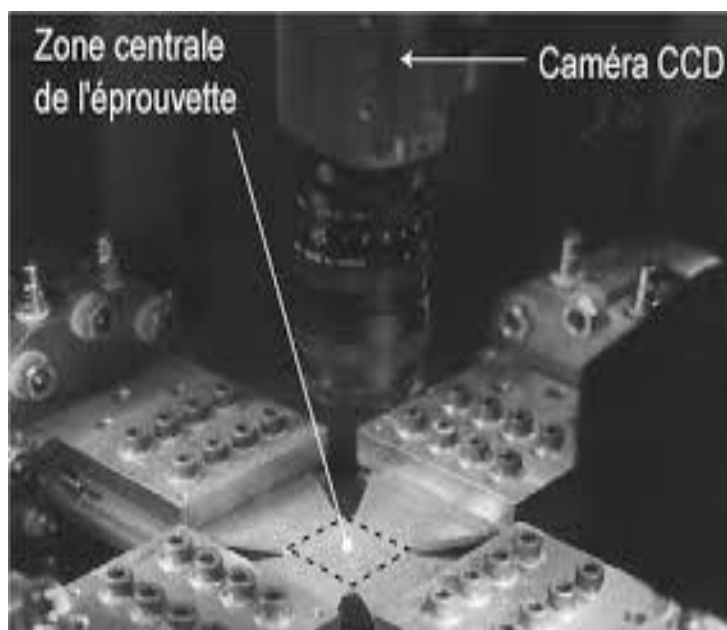


Figure 2: Exemple d'utilisation de la caméra CCD projeté sur une éprouvette biaxiale(1)

▪ **C'est quoi la corrélation d'image ?**

La Corrélation d'Images Numériques permet de mesurer le champ de disparité en pixels \mathbf{u} entre deux images, f à l'état dit « référence » et g à l'état dit « déformé ». f et g représentent les niveaux de gris des deux images (figure 3). Ces deux images sont en fait deux fonctions mathématiques associant un niveau de gris à chaque pixel \mathbf{x} . Classiquement, des images 8-bits sont utilisées, ce qui revient donc à l'utilisation de 256 niveaux de gris. Pour chaque pixel \mathbf{x} d'une Région d'Interet (*ROI*) de l'image de référence f , on cherche le pixel correspondant dans l'image g sous la forme :

$\mathbf{y} = \mathbf{x} + \mathbf{u}(\mathbf{x})$ par l'équation de conservation stricte de la luminance :

$$f(\mathbf{x}) = g(\mathbf{x} + \mathbf{u}(\mathbf{x}))$$

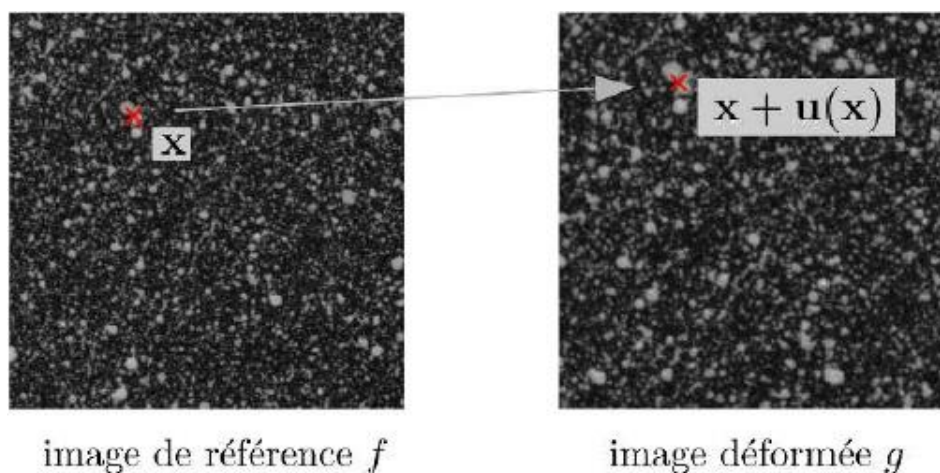


Figure 3: Deux images de mouchetis, f avant déformation (à gauche) et g après déformation (à droite).

La photographie de speckle permet, à l'aide de fonctions de corrélation, de déterminer les déplacements entre deux figures de speckle d'un objet à deux instants différents. Pour une meilleure facilité de mise en œuvre et une sensibilité moindre aux perturbations environnementales, elle a été remplacée par la technique de corrélation d'images numériques (2). Le speckle est remplacé par une distribution aléatoire de niveaux de gris physiquement déposée à la surface de l'échantillon à l'aide d'une bombe de peinture(mouchetis) dont la taille des gouttes est optimisée en fonction de l'échelle d'analyse. Par fois, le simple marquage naturel lié à la texture propre de l'échantillon peut suffire à la corrélation (3). La zone d'étude est divisée en petites facettes d'analyse et le principe fondamental de la technique de corrélation d'images est basé sur l'hypothèse que la distribution des niveaux de gris dans l'état non déformé d'une facette reste la même dans son état déformé (figure 4).

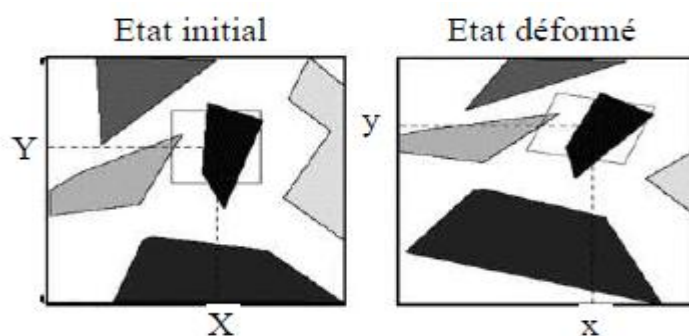


Figure 4: Facettes d'analyses caractérisées par leur niveau de gris dans l'état initial et l'état déformé (4)

On enregistre donc, grâce à une caméra CCD, la même zone d'un échantillon à différents états de déformation. La corrélation d'images permet ensuite de reconnaître la facette dans l'état déformé grâce à sa distribution en niveaux de gris. La comparaison de la position des facettes dans chaque état de déformations permet de connaître les déplacements subis par chaque facette entre ces deux états dans le plan d'observation (figure 5).

Les déformations sont ensuite calculées en post-traitement, par différenciation de champs de déplacement.

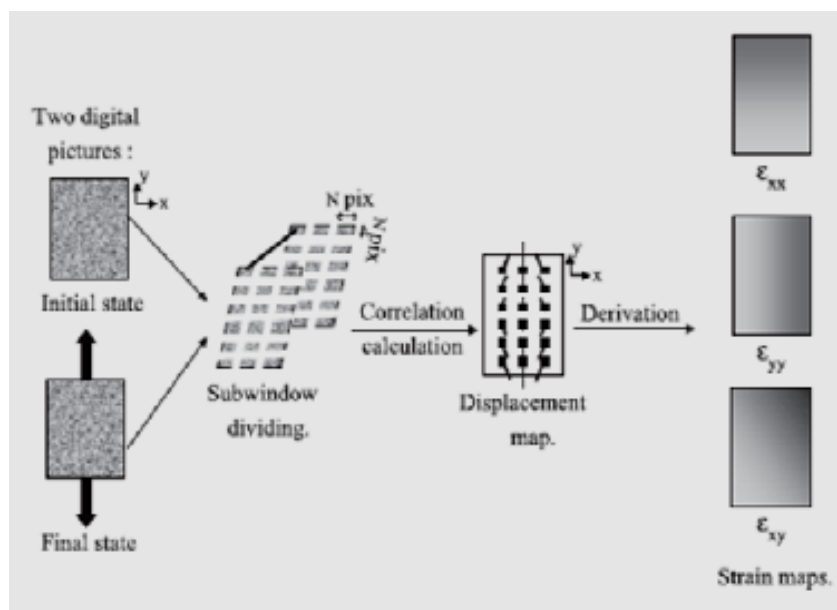
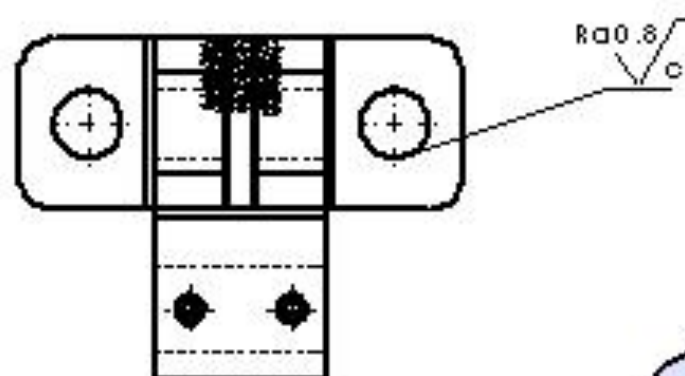
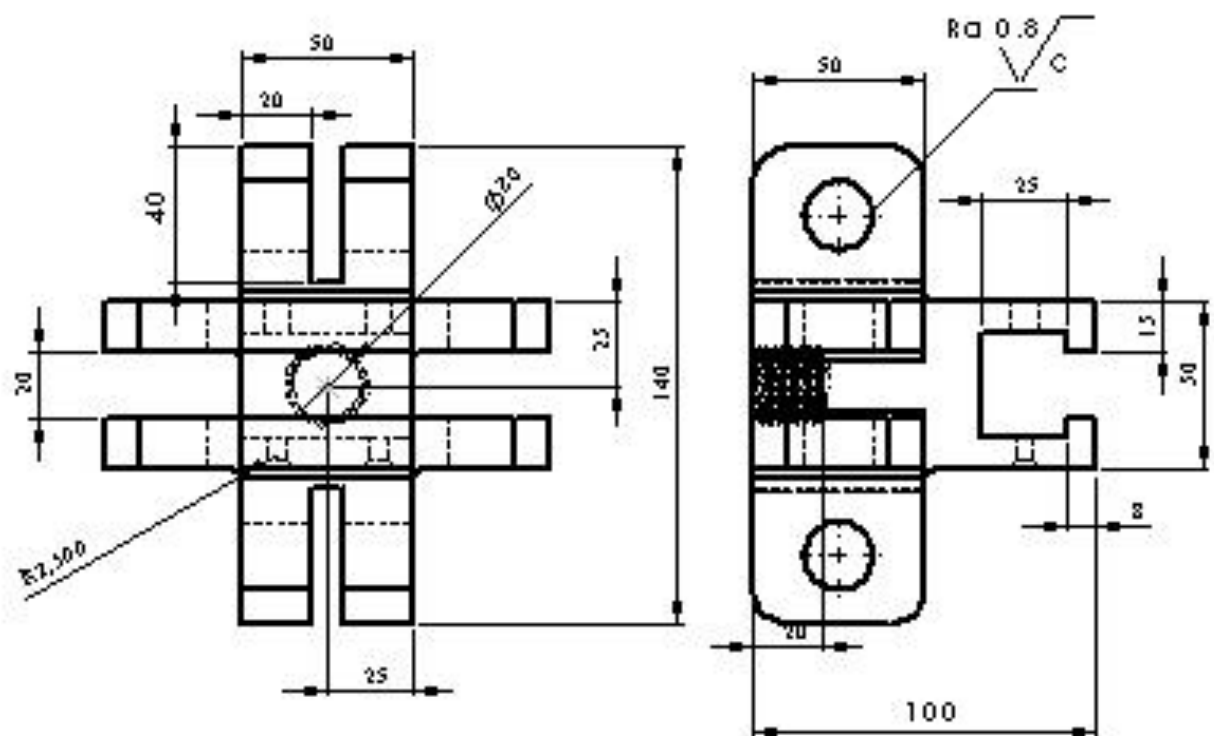
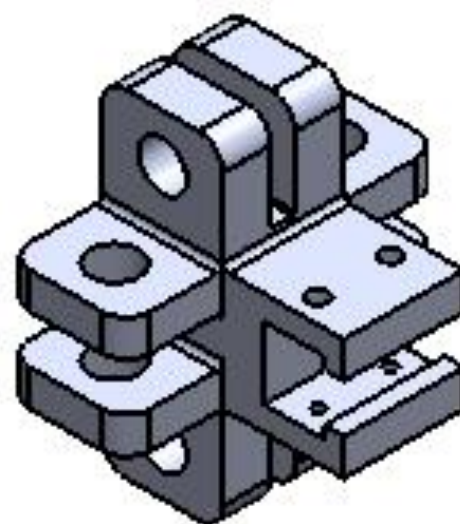


Figure 5: La technique de corrélation d'images (5)

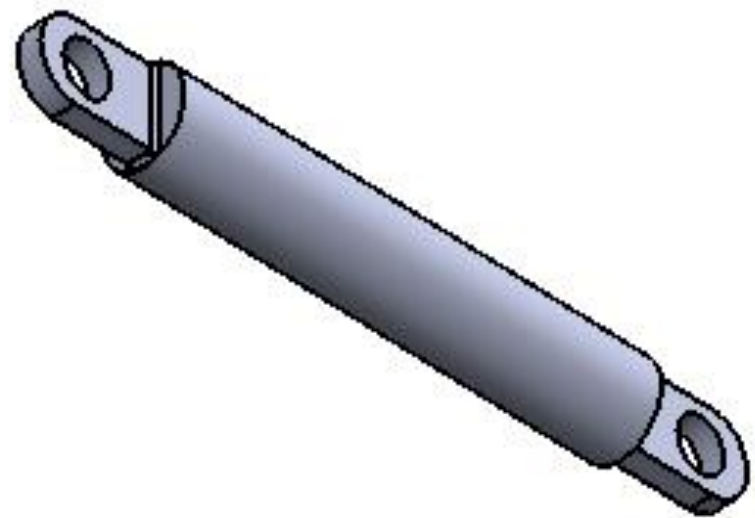
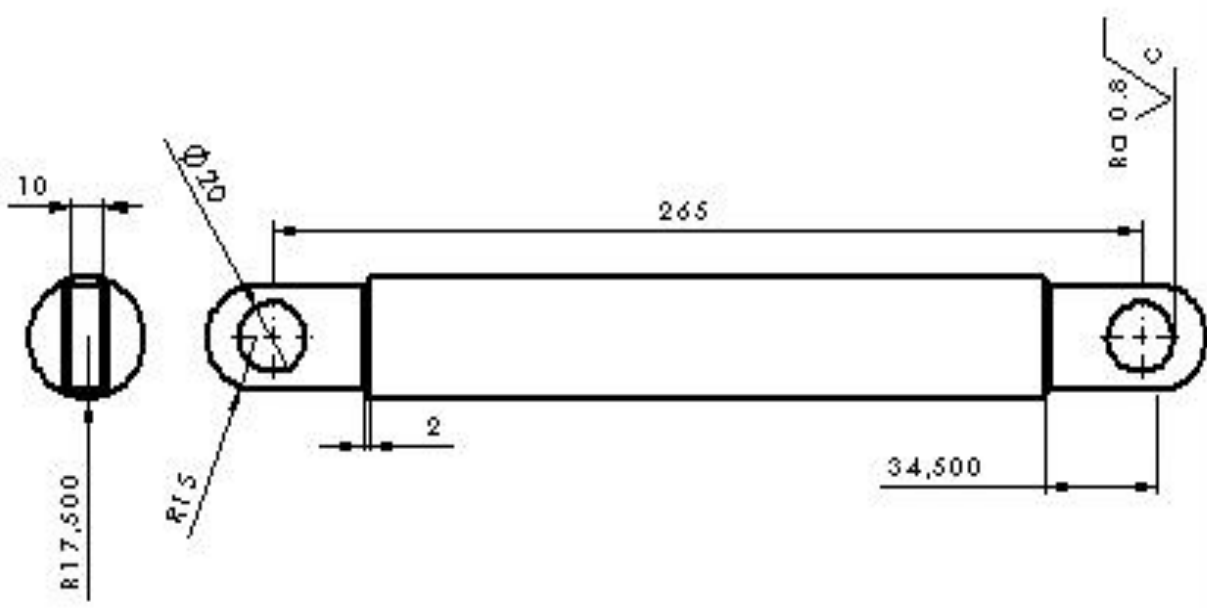


VUE
ECHELLE 1 : 2



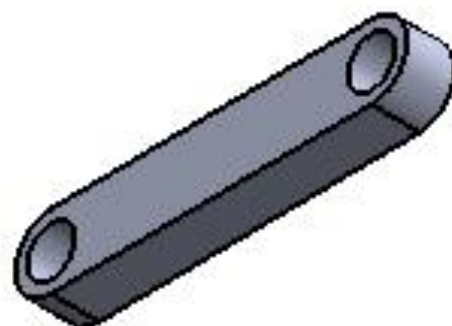
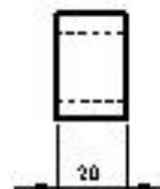
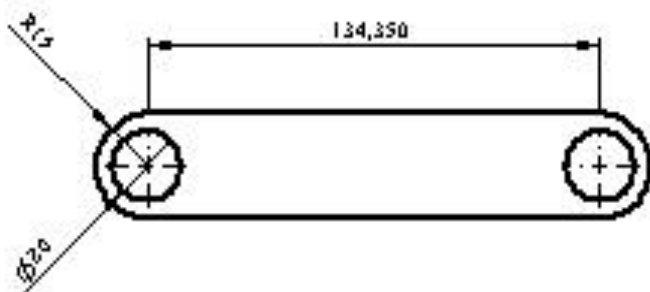
$Ra 3.2$

3	4	L'articulation	Acier	
RF	NB	Disgniation	Mtière	Observation
Echelle 1/2		Mécanisme de sollicitation biaxiale (traction compression)	BELLIL Fayçal BENAMEUR Souad	
			2018/2019	
A4		U M M T O - F G C - C M		



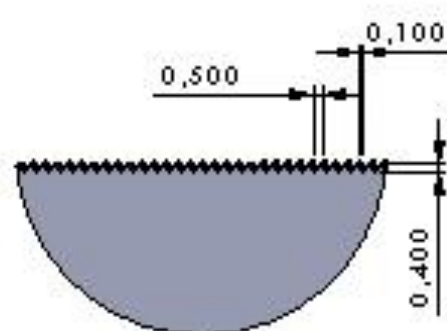
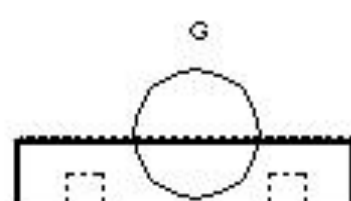
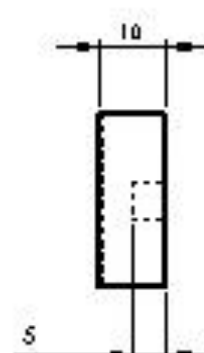
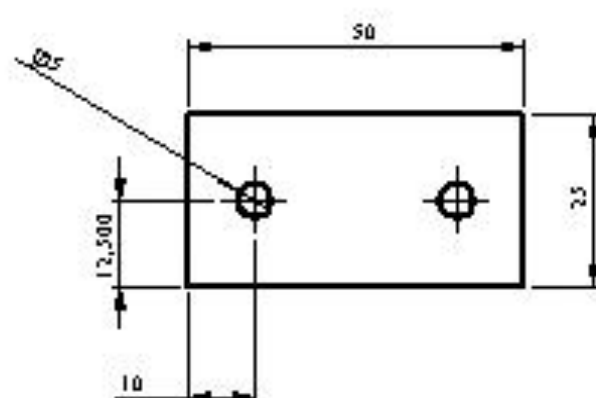
Ra 3.2

03	08	L'articulation	Acier	
RF	NB	Disgniation	Mtière	Observation
Echelle 1/2		Mécanisme de sollicitation biaxiale (traction compression)	BELLIL Fayçal BENAMEUR Souad	
A4		U M M T O - FGC - CM	2018/2019	

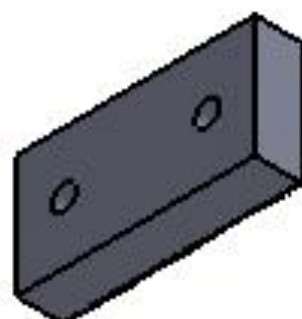


RA3.2

6	4	Tige Plate	Acier	
RF	NB	Désignation	Matière	Observation
Echelle:1/2		Mécanisme de sollicitation biaxiale (traction compression)	BELLIL Fayçal BENAMEUR Souad	
A4		U M M T O - F G C - C M	2018/2019	

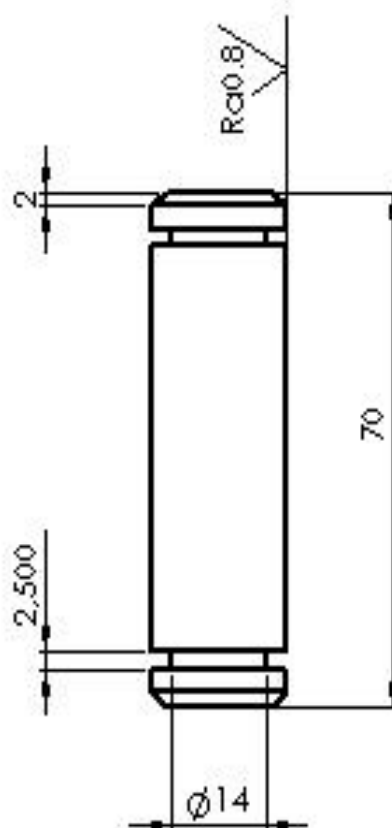
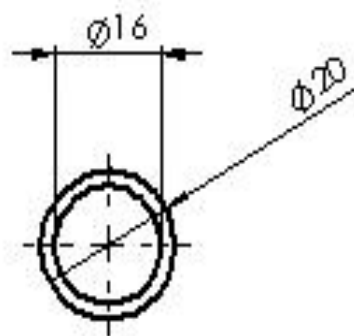


DÉTAIL G
ECHELLE 3 : 1



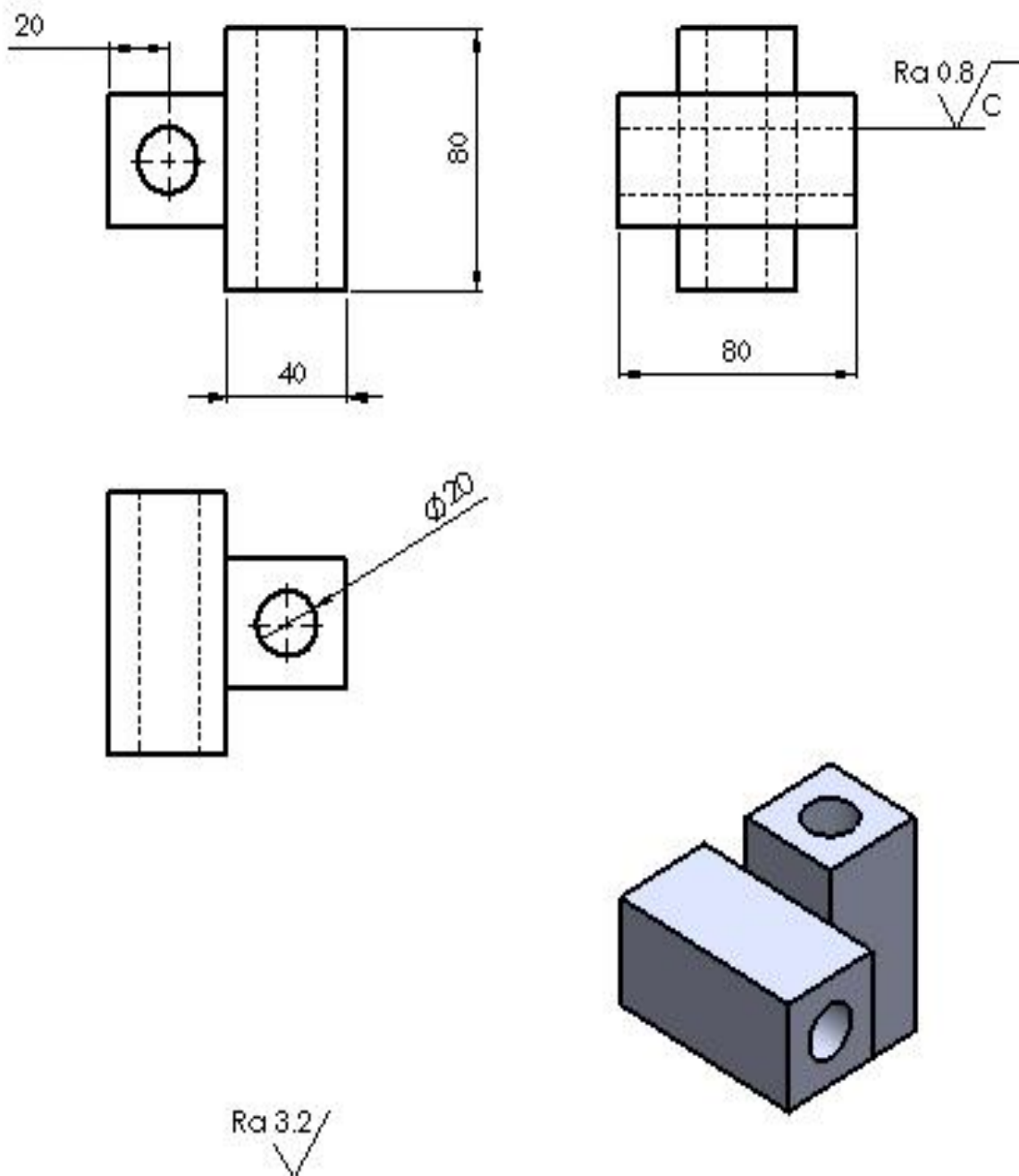
RA3.2

5	4	le bride de l'éprouvette	Acier	
RF	NB	Désignation	Matière	Observation
Echelle:1/1		Mécanisme de sollicitation biaxiale (traction compression)	BELLIL Fayçal BENA MEUR Souad	
A4		U M M T O - F G C - C M	2018/2019	

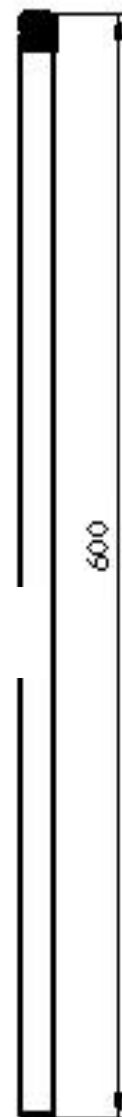
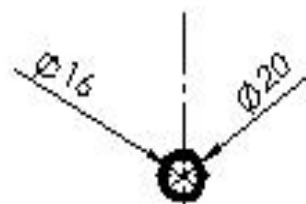


Ra 0.8
√C

2	24	Goupille cannelée	Acier	
RF	NB	Disgniation	Mtière	Observation
Echelle : 1/2		Mécanisme de sollicitation biaxiale (traction compression)	BELLIL Fayçal BENA MEUR Souad	
A4		U M M T O - F G C - C M	2018/2019	



14	4	pièce de guidage 90°	Acier	
REP	NBR	Disgniation	Mtière	Observation
Echelle: 1/2		Mécanisme de sollicitation biaxiale (traction compression)	BELLIL Fayçal BENA MEUR Souad	
			2018/2019	
A4		U M M T O - F G C - C M		



Ra 0.8
√C

15	4	Glissière horizontale	Acier	
RF	NB	Disgniation	Mtière	Observation
Echelle :1/3		Mécanisme de sollicitation biaxiale (traction compression)	BELLIL Fayçal BENAMEUR Souad	
A4		U M M T O - FGC - CM		2018/2019