

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA**  
**RECHERCHE SCIENTIFIQUE**  
**UNIVERSITÉ MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU**  
**FACULTÉ DE GÉNIE DE LA CONSTRUCTION**  
**DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE**



**MÉMOIRE**  
**DE FIN D'ETUDES**



**EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER**  
**EN GÉNIE MÉCANIQUE**  
**SPECIALITE: CONSTRUCTION MÉCANIQUE**

**THEME**

**Conception et réalisation d'un banc de  
thermoformage de thermoplastique  
Application au polystyrène choc (HIPS)**

**Proposé et dirigé par :**

**M.Ould Ouali Mohand**

**Etudié par :**

**M.Messaoudi Mahfoud**

**M.Oukaci Mehenna**

**Promotion : 2018 /2019**

Introduction générale

1 Introduction générale ..... 1

Chapitre I Les Matières d'œuvre en thermoformage

I) 2 Les polymères thermoplastiques ..... 3

    I) 2.1 Généralités ..... 3

    I) 2.2 Définition ..... 4

    I) 2.3 Morphologie ..... 4

        I) 2.3.1 Polymères amorphes ..... 4

        I) 2.3.2 Polymères semi-cristallins ..... 5

    I) 2.4 Comportement mécanique et processus élémentaires ..... 5

        I) 2.4.1 L'architecture du polymère ..... 6

        I) 2.4.2 La formulation du polymère ..... 6

        I) 2.4.3 La mise en œuvre ..... 7

        I) 2.4.4 Les conditions d'utilisation ..... 7

    I) 2.5 Effet de la température ..... 7

    I) 2.6 Equivalence temps-température ..... 8

    I) 2.7 Essais mécanique ..... 9

    I) 2.8 Influence de la masse molaire ..... 10

    I) 2.9 Mise en œuvre des thermoplastiques destinés au thermoformage ..... 10

        I) 2.14.1 L'extrusion gonflage ..... 10

        I) 2.14.2 Le Calandrage ..... 11

    I) 2.10 Comportement des thermoplastiques en thermoformage ..... 11

    I) 2.11 Classification des thermoplastiques ..... 13

I) 3 Les Composites à matrice thermoplastique et le Thermoformage (CMTP) ..... 14

    I) 3.1 Définition ..... 14

    I) 3.2 La matrice thermoplastique ..... 14

    I) 3.3 Le renfort ..... 15

        I) 3.3.1 Formes de renforts ..... 15

    I) 3.4 L'interface ..... 17

    I) 3.5 L'interphase ..... 17

    I) 3.6 Les stratifiés ..... 17

    I) 3.7 Les composites disponibles pour des applications en thermoformage ..... 18

    I) 3.8 Mécanismes de déformations ..... 18

    I) 3.9 Défauts structuraux typiques ..... 20

I) 3.10 Propriétés des composites destinés au thermoformage. ....	21
I) 4 Conclusion .....	22
Chapitre II Présentation du procédé de thermoformage	
II) 1 Introduction.....	23
II) 2 Le thermoformage de films thermoplastiques .....	23
II) 2.1 Définition .....	23
II) 2.2 Principe.....	24
II) 3 Les différentes techniques de thermoformage . ....	24
II) 3.1 Thermoformage par moyens mécaniques.....	24
II) 3.1.1 Emboutissage par moule mâle et femelle ou « positif et négatif» : .....	24
II) 3.1.2 Emboutissage ou étirage en forme par poinçonnage .....	25
II) 3.2 Thermoformage par moyens pneumatiques.....	25
II) 3.2.1 Thermoformage sous vide.....	26
II) 3.2.2 Thermoformage sous pression .....	26
II) 3.3 Thermoformage mixte (pneumatique et par pistonnage).....	27
II) 3.3.1 Moule négatif assisté par un poinçon .....	27
II) 3.3.2 Pistonnage sur moule positif .....	28
II) 3.3.3 Bullage avant formage sur moule positif ou négatif .....	28
II) 3.3.4 Différences entre moule positif et négatif .....	28
II) 4 Les étapes du thermoformage .....	28
II) 4.1 Préparation des feuilles.....	28
II) 4.2 Séchage :.....	29
II) 4.3 Chargement :.....	29
II) 4.4 Chauffage :.....	29
II) 4.5 Formage .....	30
II) 4.6 Refroidissement .....	30
II) 4.7 Déchargement .....	30
II) 4.8 Rognage .....	31
II) 5 Les machine a thermoformer .....	31
II) 5.1 Les types de machines .....	31
II) 5.1.1 La machine à navette.....	32
II) 5.1.2 La machine rotative .....	32
II) 5.1.3 La machine en continu .....	32

II) 5.2	Caractéristiques des machines à thermoformer .....	32
II) 5.3	Paramètres de réglage d'une machine à thermoformer: .....	32
II) 6	Le système de chauffage radiant .....	33
II) 6.1	Les cycles de chauffage .....	35
II) 7	Les Pompes à vide.....	36
II) 7.1	Temps de pompage .....	38
II) 8	Moules à thermoformer .....	38
II) 8.1	Outillage .....	38
II) 8.2	Cavités à vide.....	39
II) 8.3	Angles de dépouille .....	39
II) 8.4	Profondeur d'étirage .....	39
II) 8.5	Rayons d'angles / concentration de tension.....	40
II) 8.6	Le Retrait des pièces thermoformées:.....	40
II) 8.6.1	Retrait en moule .....	41
II) 8.6.2	Retrait post formage .....	41
II) 8.6.3	Post-retrait .....	41
II) 9	Le Serre flan .....	42
II) 10	Calcul de l'épaisseur moyenne d'une pièce.....	43
II) 11	Domaine d'application.....	43
II) 12	Avantages du thermoformage des thermoplastiques .....	44
II) 12.1	Faibles coûts des équipements:.....	44
II) 12.2	Faibles coûts d'outillage .....	45
II) 12.3	Délai, de la conception au prototype.....	45
II) 12.4	Rapports surface / épaisseur considérable .....	45
II) 12.5	Large variété de plastiques disponibles .....	45
II) 12.6	Multicouches.....	45
II) 13	Limites et désavantages du thermoformage.....	45
II) 13.1	Epaisseur non uniforme .....	45
II) 13.2	Coût de la feuille.....	45
II) 13.3	Découpe .....	45
II) 13.4	Coût du matériau de rognage.....	46
II) 13.5	Géométrie limitée .....	46
II) 13.6	Plage de température utile .....	46
II) 14	Le thermoformage des composites à matrices thermoplastiques .....	46
II) 14.1	Description du procédé.....	46

II) 14.2	Le moulage sous vide avec diaphragme (diaphragm forming).....	46
II) 14.3	L'hydroformage.....	46
II) 14.4	Le moulage sur caoutchouc.....	46
II) 14.5	Le procédé de thermoformage-estampage.....	47
II) 14.6	Equipements et outillages.....	48
II) 14.7	La Température de mise en forme.....	49
II) 14.8	Pression de formage: 100-300 psi (7-20 bars).....	50
II) 14.9	Exemple de plateforme de moulage.....	50
II) 14.10	Domaine d'application.....	51
II) 14.11	Avantages du thermoformage des composites.....	51
II) 14.12	Limites du thermoformage des composites.....	52
II) 15	conclusion.....	52

### Chapitre III Etude, conception et réalisation d'un banc de thermoformage

III) 1	Introduction.....	53
III) 2	Cahier des charges.....	53
III) 3	La Conception.....	53
III) 3.1	Le bâti.....	54
III) 3.2	Le serre-flan.....	54
III) 3.3	La chambre à vide / porte moules.....	55
III) 3.4	La pompe à vide muni d'un accumulateur de vide.....	56
III) 3.5	L'enceinte thermique et les moyens de chauffage :.....	56
III) 3.6	Le vérin :.....	58
III) 3.7	Le circuit pneumatique.....	58
III) 3.8	Le circuit électrique.....	58
III) 4	Les calculs.....	59
III) 4.1	Calcul de la chaleur.....	59
III) 4.2	Calcul de l'isolation thermique.....	60
III) 4.3	Calcul de la dépression.....	60
III) 4.4	Calcul du couple de serrage.....	61
III) 4.5	Calcul du vérin.....	62
III) 5	Réalisation du dispositif.....	63
III) 5.1	Matériaux pour la réalisation.....	63
III) 5.2	Matériels consommables.....	65

III) 5.3	Outillage .....	65
III) 6	Réalisation des moules.....	66
III) 6.1	Le modelage .....	66
III) 6.2	Préparation du Sable de moulage .....	66
III) 6.3	Le moulage .....	66
III) 6.4	La fusion et la coulée.....	67
III) 6.5	Décochage et ébavurage .....	68
III) 7	Présentation de la machine.....	69
III) 7.1	Principe de fonctionnement .....	69
III) 8	Conclusion .....	71
 Chapitre IV Etude expérimentale et simulation numérique		
IV) 1	Introduction.....	72
IV) 2	Présentation du matériau.....	72
IV) 3	L'essai de traction :.....	73
IV) 3.1	Découpe et préparations des éprouvettes : .....	73
IV) 3.2	Caractéristiques de la machine de traction : .....	75
IV) 4	Résultats des essais de traction .....	75
IV) 5	Analyse des résultats.....	78
IV) 6	Etude expérimentale de l'effet de la température sur l'épaisseur .....	79
IV) 6.1	Essai à T= 70° C .....	79
IV) 6.2	Essai à T= 90°C .....	79
IV) 6.3	Essai à T= 80° ± 5 °C .....	81
IV) 6.4	Résultats expérimentaux et observations:.....	81
IV) 7	Simulation numérique .....	85
IV) 7.1	Introduction :.....	85
IV) 7.2	Présentation des résultats :.....	86
IV) 7.2.1	Effet de la dépression.....	86
IV) 7.2.2	Distribution des contraintes et des déformations .....	88
IV) 8	Conclusion : .....	91
Conclusion générale et perspectives.....		92
Mises en plan.....		94
Références bibliographiques.....		99

## *Remerciements*

*La réalisation de ce mémoire a été possible grâce au concours de plusieurs personnes à qui nous voudrions témoigner notre gratitude.*

*Nous voudrions tout d'abord adresser toutes nos reconnaissances à notre encadreur monsieur Ould Ouali qui par sa patience, sa disponibilité et ces judicieux conseils, nous a permis d'aller au bout de toutes les difficultés rencontrées.*

*Nos remerciements vont également à tous les membres du jury qui ont bien voulu accepter de juger ce travail.*

*Nous tenons à remercier tous les enseignants qui ont contribué à notre formation, sans oublier les étudiants du département de Génie mécanique de l'UNM70.*

*Enfin, nos remerciements vont à tous ceux qui, de près et de loin ont aidé à l'élaboration de ce mémoire.*

## Dédicaces

Je dédie ce modeste travail aux êtres qui me sont chers :

Mes parents, mes sœurs et leur progéniture.

Mehenna

À Oava, Yemma, Nana, à mes frères et sœurs, neveux et nièces.

Mahfoud

## Liste des figures

---

### Chapitres I

<i>Figure I-1 : polymère du polystyrène</i> .....	3
<i>Figure I-2 : Architecture atomique des polymères</i> .....	4
<i>Figure I.3 : Représentation schématique d'un sphérolite et des lamelles le constituant</i> .....	5
<i>Figure I.4: Courbes schématiques de traction</i> .....	6
<i>Figure I.5 : Evolution schématique du module d'élasticité d'un polymère amorphe avec la température ; Transition <math>\alpha</math> et passage à l'état fluide</i> .....	8
<i>Figure I.6 : Mise en évidence de l'influence de la vitesse de chargement</i> .....	8
<i>Figure I.7 : Courbe de traction d'un matériau thermoplastique aux alentours de sa Tg</i> .....	9
<i>Figure I.8 : Quelques caractéristiques de certains polymères</i> .....	10
<i>Figure I.9 : Le procédé d'extrusion</i> .....	11
<i>Figure I.10: Le procédé de calandrage</i> .....	11
<i>Figure I.11 : Evolution des propriétés mécanique d'un polymère amorphe et semi-cristallin en fonction de la température</i> .....	13
<i>Figure I.12 : Classification des thermoplastiques de thermoformage</i> .....	14
<i>Figure I.13 : Architecture de renforcement</i> .....	16
<i>Figure I.14 : Architecture de renforcement</i> .....	16
<i>Figure I.15:Formes disponibles sur le marché</i> .....	18
<i>Figure I.16 : La percolation</i> .....	19
<i>Figure I.17 : Glissement interpli</i> .....	19
<i>Figure I.18 : Cisaillement intrapli</i> .....	20
<i>Figure I.19 : Défauts structuraux</i> .....	21
<i>Figure I.20 : Propriétés en flexion des composites à matrice thermoplastique et fibres continues</i> ..	22

### Chapitres II

<i>Figure II-1 : les principales étapes du thermoformage</i> .....	23
<i>Figure II-2 : emboutissage par moule positif et négatif</i> .....	24
<i>Figure II-3 : thermoformage sous vide avec un moule positif et négatif</i> .....	26
<i>Figure II-4: thermoformage sous pression avec un moule positif et négatif</i> .....	26
<i>Figure II-5 : thermoformage sous pression avec un moule positif et négatif</i> .....	27
<i>Figure II-6 : pitonnage sur moule positif avec bullage</i> .....	27
<i>Figure II-7 : thermoformage sur machine en continu</i> .....	31
<i>Figure II-8 : Profil-température, feuilles minces et épaisses</i> .....	36
<i>Figure II-9 : Charge de gaz à évacuer</i> .....	37
<i>Figure II-10 : Charge des gaz en fonction de l'évolution de la pression</i> .....	37

## Liste des figures

<i>Figure II-11 : Diagramme binaire Al-Cu</i> .....	39
<i>Figure II-12 : Pincés pour serrage</i> .....	42
<i>Figure II-13 : Principe du moulage sous vide, hydroformage et moulage sur caoutchouc</i> .....	47
<i>Figure II-14 : Le procédé de thermoformage-estampage</i> .....	48
<i>Figure II-15 : Cadre-support avec un flan installé, prêt à être préchauffé</i> .....	48
<i>Figure II-16 : Usinage sur CNC d'un moule pour thermoformage</i> .....	49
<i>Figure II-17 : Température de mise en forme des CTPFC</i> .....	49
<i>Figure II-18 : Tonnage requis pour une pièce carrée</i> .....	50
<i>Figure II-19 : plateforme de moulage, CNRC Canada</i> .....	51

## Chapitres III

<i>Figure III-1 : Le bâti</i> .....	54
<i>Figure III-2 : Le serre-flan</i> .....	55
<i>Figure III-3 : La chambre à vide / porte moule</i> .....	56
<i>Figure III-4 : La pompe à vide muni d'un accumulateur de vide</i> .....	56
<i>Figure III-5 : L'enceinte thermique plus les moyens de chauffage</i> .....	57
<i>Figure III-6 : Le vérin</i> .....	58
<i>Figure III-7 : moules en sables</i> .....	67
<i>Figure III-8 : Fusion et coulée</i> .....	68
<i>Figure III-9 : moules obtenus après décochage</i> .....	69
<i>Figure III-10 : capture écran de la machine conçue par SOLIDWORKS</i> .....	70
<i>Figure III-11 : photo de la machine réalisée</i> .....	70

## Chapitres IV

<i>Figure IV- 1: Dimensions des éprouvettes de traction</i> .....	73
<i>Figure IV-2: Montage poinçon-matrice sur presse (atelier centrale ENIEM)</i> .....	74
<i>Figure IV-3: Sens de découpe des éprouvettes</i> .....	74
<i>Figure IV-4 : machine de traction RM 100</i> .....	75
<i>Figure IV-5 : Eprouvettes 0° après essai</i> .....	76
<i>Figure IV-6 : Eprouvettes 90° après essai</i> .....	76
<i>Figure IV-7 : Eprouvettes ±45° après essai</i> .....	76
<i>Figure IV-8 : courbes <math>\sigma</math> (<math>\epsilon</math>) expérimentales des éprouvettes</i> .....	77
<i>Figure IV-9 : Essai à = 70° C</i> .....	79
<i>Figure IV-10 : Essai à = 90°C</i> .....	80
<i>Figure IV-11 : Essai à = 120°C</i> .....	80

## Liste des figures

<b>Figure VI-12 : Essai à <math>80^{\circ} \pm 5^{\circ}C</math></b> .....	81
<b>Figure VI-13 : coupe de la pièce</b> .....	81
<b>Figure IV-14 : Effet conjugué d'une température élevée et de l'aspiration</b> .....	82
<b>Figure IV-15 : Démoulage</b> .....	83
<b>Figure IV-16 : Matière rognée</b> .....	83
<b>Figure IV-17 : Pièce obtenue après rognage</b> .....	84
<b>Figure IV-18 : L'état de surface</b> .....	84
<b>Figure IV-19 : modèle implémenté en ABAQUS</b> .....	85
<b>Figure IV-20 : coupe d'une pièce formée à <math>80^{\circ}C</math> et à une dépression de -0.16 bar</b> .....	86
<b>Figure IV-22 : coupe d'une pièce formée à <math>80^{\circ}C</math> et à une dépression de -0.30 bar</b> .....	87
<b>Figure IV-22 : coupe d'une pièce formée à <math>80^{\circ}C</math> et à une dépression de -0.38 bar</b> .....	87
<b>Figure IV-23 : coupe d'une pièce formée à <math>100^{\circ}C</math> et à une dépression de -0.38 bar</b> .....	88
<b>Figure VI-24. Distribution des déformations pour une pièce formée à <math>100^{\circ}C</math> et à une dépression de -0.38 bar</b> .....	88
<b>Figure VI-25. Distribution des déformations pour une pièce formée à <math>100^{\circ}C</math> et à une dépression de -0.38 bar</b> .....	89
<b>Figure VI-26. Distribution des contraintes pour une pièce formée à <math>100^{\circ}C</math> et à une dépression de -0.38 bar</b> .....	89
<b>Figure VI-27. Distribution des contraintes pour une pièce formée à <math>100^{\circ}C</math> et à une dépression de -0.38 bar</b> .....	90
<b>Figure IV-28 : essai réalisé sur un dôme</b> .....	91

## **Chapitres I**

<i>Tableau I.1 : Propriétés des renforts</i> .....	15
--	----

## **Chapitres II**

<i>Tableau II-1 : différence entre moule positif et négatif</i> .....	28
<i>Tableau II-2 : Paramètres de réglage d'une machine à thermoformer</i> .....	32
<i>Tableau II-3 : Performances et entretien des appareils de chauffage</i> .....	34
<i>Tableau II-4 : diamètre des cavités en fonction des épaisseurs</i> .....	39
<i>Tableau II-5 : Epaisseur d'étirage</i> .....	40
<i>Tableau II-6: Paramètre de retrait des pièces thermoformées</i> .....	41
<i>Tableau II.7. Domaine d'application du thermoformage de thermoplastiques</i> .....	44

## **Chapitres III**

<i>Tableau III-1 : Matériaux pour la réalisation (a)</i> .....	63
<i>Tableau III-2 : Matériaux pour la réalisation (b)</i> .....	64
<i>Tableau III-3 : Matériaux pour la réalisation (c)</i> .....	64
<i>Tableau III-4 : Matériaux pour la réalisation (d)</i> .....	65
<i>Tableau III-5 : Matériels consommable</i> .....	65

## **Chapitres IV**

<i>Tableau IV-1: Fiche technique pour feuilles HIPS destinées au thermoformage</i> .....	72
<i>Tableau IV-2 : Dimensions des éprouvettes normalisées</i> .....	73
<i>Tableau IV-3 : dimensions des éprouvettes</i> .....	74
<i>Tableau IV-4 : caractéristiques mécaniques de l'éprouvettes e traction</i> .....	78
<i>Tableau VI-5. Tableau des épaisseurs des pièces thermoformées</i> .....	81
<i>Tableau VI-6. Fiche technique du HIPS</i> .....	86

## *Liste des symboles*

---

ABS	Acrylonitrile butadiène styrène
AMMA	Acrylonitrile méthacrylate de méthyle
ASA	Acrylonitrile styrène acrylate
CA	Acétate de cellulose
CAB	Acétobutyrate de cellulose
CAP	Acétopropionate de cellulose
EPS	Polystyrène expansé
ETFE	Éthylène tétrafluoroéthylène
EVA	Éthylène-acétate de vinyle, Levaprene
EVAl, EVOH	Éthylène-alcool vinylique
FEP	Perfluoro éthylène propylène, ex-PFEP
LCP	Polymère à cristaux liquides
MBS	Méthylméthacrylate-butadiène-styrène
MC	Méthylcellulose
PA	Polyamide, nylon, Perlon
PAI	Polyamide-imide
PAN	Polyacrylonitrile
PAR	Polyarylate
PB-1	Polybutène-1 (polyoléfine)
PBT	Poly(téréphtalate de butylène) (polyester)
PC	Polycarbonate, Lexan, Makrolon
PCTFE	Polychlorotrifluoroéthylène
PE	Polyéthylène (polyoléfine), Tupperware
PE-HD	Polyéthylène haute densité (polyoléfine)
PE-LD	Polyéthylène basse densité (polyoléfine)
PE-LLD	Polyéthylène à basse densité linéaire (polyoléfine)
PE-UHMW	Polyéthylène de masse molaire très élevée (polyoléfine)
PEBA	Copolymère bloc éther-amide
PEC	Polyestercarbonate
PEEK	Poly(éther-éther-cétone de phénylène)
PEI	Polyétherimide
PEK	Polyéthercétone
PEN	Poly(naphtalate d'éthylène) (polyester)
PESU (ou PES)	Polyéthersulfone
PET	Poly(téréphtalate d'éthylène), Tergal

## *Liste des symboles*

---

PFA	Perfluoroalkoxy
PI	Polyimide
PK	Polycétone
PMMA	Poly(méthacrylate de méthyle), Plexiglas
PMP	Polyméthylpentène
POM	Polyoxyméthylène, polyacétal
PP	Polypropylène (polyoléfine)
PPE	Polyphénylène éther. Voir aussi le mélange Noryl.
PPO (ou PPE)	Poly(oxyde de phénylène). Voir aussi Noryl.
PPOx	Poly(oxyde de propylène)
PPS	Poly(sulfure de phénylène)
PS	Polystyrène
PSU	Polysulfone
PTFE	Polytétrafluoroéthylène, Téflon
PUR	Polyuréthane, Lycra, Spandex
PVAC	Poly(acétate de vinyle)
PVAL	Poly(alcool vinylique)
PVC	Poly(chlorure de vinyle)
PVDF	Poly(fluorure de vinylidène)
PVF	Poly(fluorure de vinyle)
SAN	Styrène-acrylonitrile
SI	Silicone
SMA, SMAnh	Styrène anhydride maléique
TPE	Élastomère thermoplastique
TPE-A	Élastomère thermoplastique base polyamide
TPE-E	Élastomère thermoplastique base polyester
TPE-O	Élastomère thermoplastique base polyoléfine
TPE-S	Élastomère thermoplastique base styrène
TPU	Polyuréthane thermoplastique
TP	: thermoplastique
CMTP	: composite à matrice thermoplastique
CMTPFC	: composite à matrice thermoplastique et fibres continues
DSC	Differential Scanning Calorimetry

## Liste des symboles

---

mm	millimètre
d	Diamètre (mm)
t	Temps (s)
S	Section (mm <sup>2</sup> )
V	Volume (mm <sup>3</sup> )
$\rho$	Masse molaire (Kg.mole <sup>-1</sup> )
P	Pression (Pa ou bar)
P <sub>atm</sub>	Pression atmosphérique (Pa)
F	Force (N)
C	Couple de serrage (N.m)
T	Température (°C ou K)
T <sub>g</sub>	Température de transition vitreuse (°C ou K)
T <sub>f</sub>	Température de fusion (°C ou K)
$\lambda$	Conductivité thermique de matériau (W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )
$\phi$	Flux thermique (W)
h	Coefficient d'échange convectif (W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup> )
q	Quantité de chaleur (J)
P	puissance thermique ou électrique (W)
Q <sub>v</sub>	Débit volumique (m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> )
V	Vitesse de fluide (m.s <sup>-1</sup> )
$\varepsilon$	Emissivité d'un matériau
$\sigma_b$	La constante de Stefan Boltzmann (W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-4</sup> )
V <sub>c</sub>	Le volume de la chambre-à-vide (m <sup>3</sup> )
V <sub>r</sub>	Le volume de l'accumulateur de vide (m <sup>3</sup> )
$\alpha$	relaxation associée à la transition vitreuse
$\sigma_y$	Contrainte au seuil d'écoulement (MPa)
$\varepsilon_y$	l'allongement au seuil d'écoulement
$\sigma_r$	La contrainte à rupture (MPa)
$\varepsilon_r$	allongement à la rupture
$\sigma_m$	La contrainte maximale (MPa)
$\dot{\varepsilon}$	vitesses de déformation (s <sup>-1</sup> )
$\sigma$	contrainte (MPa)
E	Le module d'Young ou module élastique (MPa)

# Introduction générale

### 1 Introduction générale

Le thermoformage est un procédé industriel avec lequel une feuille thermoplastique (ou un film ou flan) est transformée pour prendre une nouvelle forme en utilisant la chaleur et la pression. C'est l'un des premiers procédés utilisés dans l'industrie du plastique, à partir du formage d'une feuille de nitrate de cellulose au milieu des années 1800. Le procédé s'accroît de manière exponentielle à mesure que de nouveaux matériaux et applications sont développés. Par exemple, la nécessité de recouvrir les avions pendant la deuxième guerre mondiale et de développer le polyméthacrylate de méthyle a créé l'occasion idéale de faire progresser la technologie des procédés de thermoformage. A l'heure actuelle, ce procédé permet de fabriquer de nombreux produits pour de nombreux secteurs de l'industrie notamment l'industrie automobile, aéronautique et agroalimentaire.

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, publicitaires et présentoirs 3D sur les lieux de vente, 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.

Le polystyrène choc dit Hips, pour *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.

Le développement et l'optimisation des procédés de mises en forme en vue de la réduction du temps de cycle. La modélisation et la simulation s'appuyant sur des modèles mathématiques et des logiciels informatiques sont des étapes importantes pour la prédiction des propriétés mécaniques et de la faisabilité technique des pièces thermoformées.

Comment fonctionne le thermoformage ? Quelles sont les matières thermoformables ? Quels sont les avantages du procédé de thermoformage ? Des questions auxquelles nous tenterons de répondre tout au long de ce modeste travail. Nous l'avons décomposé en quatre chapitres comme suit :

- ✓ Chapitre I : présentations de la matière d'œuvre, essentiellement des polymères pour des raisons évidentes de leurs abondance dans notre vie quotidienne, bien que la liste des matériaux destinés au thermoformage est loin d'être exhaustive, les laboratoires de recherche et d'industries ne cessent de repousser les limites de la chimie et d'en développer de nouveaux.
- ✓ Chapitre II : présentation détaillée du procédé du thermoformage, différentes étapes du processus, différents types de thermoformage, machines et éléments de machines tels que les voutes chauffantes, pompes à vide pour le thermoformage sous vide, les moules et poinçons ainsi que les caractéristiques et fonctions de chaque partie. Une attention particulière sera apportée au thermoformage sous vide car c'est la technique la plus largement adoptée.
- ✓ Chapitre III : Etude, conception et réalisation d'un banc d'essai pour thermoformage sous vide de films plastiques d'épaisseurs et de natures variées ainsi que la conception et coulée de deux moules en aluminium aux formes volontairement compliquées à des fins expérimentales. Une étude numérique sera proposée pour le calcul des capacités dudit banc (température maximale des voutes chauffantes, dimensionnement de la pompe à vide, contraintes subies par le serre flans...etc.
- ✓ Chapitre IV : mise à l'épreuve du banc sur feuilles HIPS d'épaisseur 1mm .une étude expérimentale de l'effet de la température sur la distribution des épaisseurs des pièces réalisées, la distribution des contraintes et les déformations sera mise en exergue en implémentant un modèle dans le logiciel de calcul par éléments finis ABAQUS.
- ✓ Nous ponctuerons notre travail par une conclusion générale que nous espérons riche en enseignements

# Chapitre I

## Les Matières d'œuvre en thermoformage

## I) 1 Introduction

Le procédé de thermoformage est considéré comme un processus secondaire dans l'industrie du plastique car les matériaux de base, la feuille et le film, doivent d'abord être créés. Cette feuille et ce film sont généralement produits par extrusion, coulée et calandree. Dans ce chapitre nous allons présenter les matières d'œuvre en thermoformage.

## I) 2 Les polymères thermoplastiques

### I) 2.1 Généralités

Les polymères sont des macromolécules (généralement organiques) formées en joignant par covalence une ou plusieurs unités individuelles appelées monomères. Il se forme de longues chaînes qui sont reliées entre elles par les forces de Van Der Waals. Il existe trois types de polymères, les thermoplastiques, les thermodurcissables et les élastomères.

L'amidon, la cellulose, la soie et l'ADN sont des exemples de polymères naturels, et le nylon, le polyéthylène et la bakélite sont des polymères synthétiques qui résultent d'une polymérisation.

Exemple : le polystyrène est un polymère formé par l'union de nombreux monomères qui sont les styrènes. «  $n$  » étant le degré de polymérisation. [1]

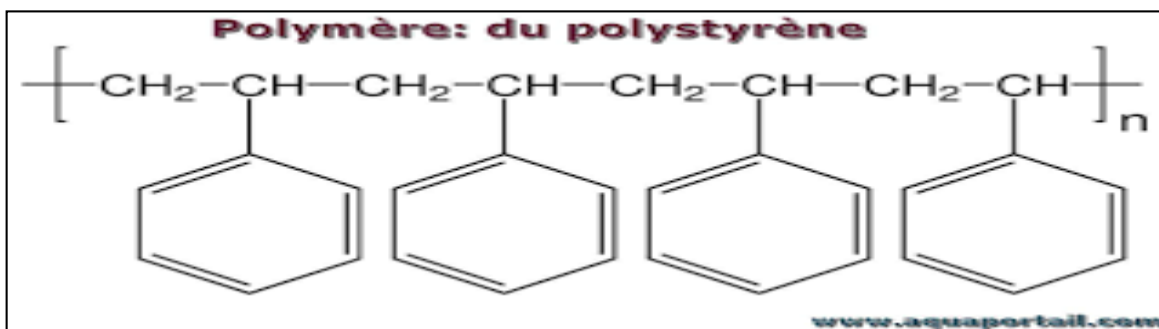


Figure I-1 : polymère du polystyrène [2].

Pour synthétiser des composés en polymères, il faut unir des composés en basses molécules au moyen de la température, la pression ou le catalyseur. Cette réaction est appelée (Polymérisation). Les procédés les plus employés actuellement pour former des polymères à partir des basses molécules sont la Polycondensation et la Polyaddition. Il y a en outre la copolymérisation et la polymérisation par fission de chaîne.

Lorsque des polymères sont formés, il existe trois structures moléculaires communes, réticulée, linéaire et ramifiée. La réticulation se produit lorsqu'un matériau thermodurcissable polymérise ou durcit et que les molécules se lient entre elles dans un réseau ou une bande souvent comparées à la toile d'araignée. Une molécule linéaire ressemble à une corde avec très peu de branches latérales. Elles peuvent être empilées ensemble sans interaction avec les branches latérales. D'autre part, les molécules ramifiées ont de nombreuses branches latérales créant une structure tridimensionnelle. En utilisant le polyéthylène comme exemple, le chimiste peut produire un matériau linéaire et ramifié.

Le matériau linéaire a tendance à être de densité supérieure, moins translucide, plus dur et plus rigide et à avoir une meilleure résistance chimique que le matériau ramifié de densité inférieure [3].

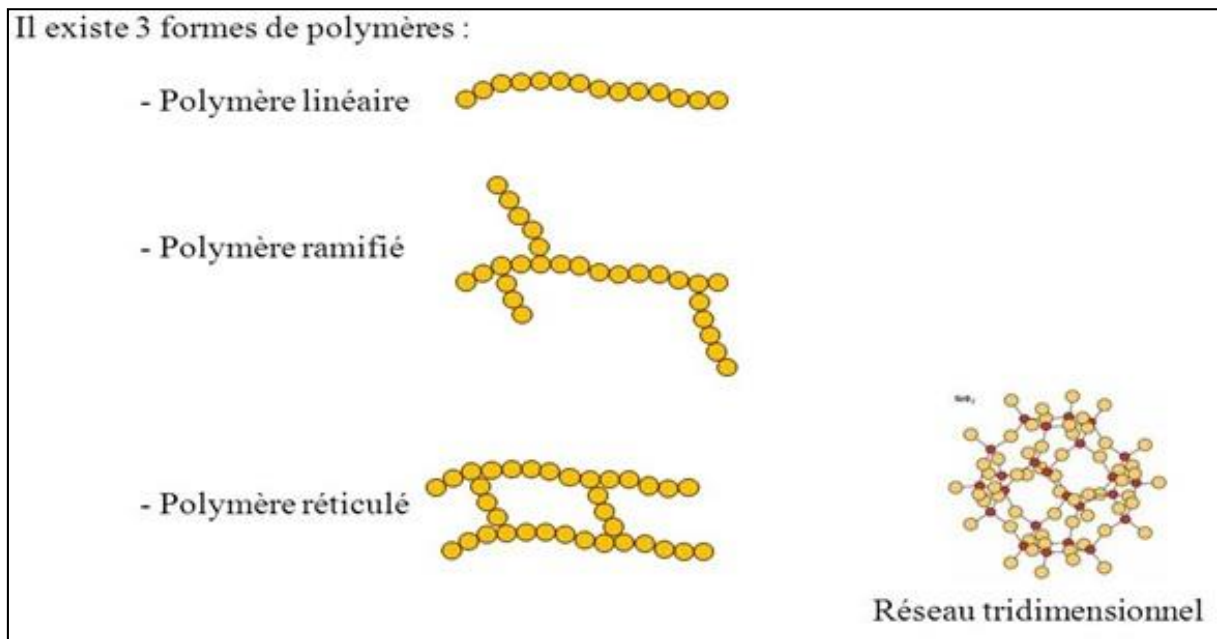


Figure I-2 : Architecture atomique des polymères [3].

## I) 2.2 Définition

Les thermoplastiques sont des polymères linéaires ou faiblement ramifiés constitués de grandes chaînes de monomères reliés entre eux par des liaisons covalentes. Ces macromolécules sont à leur tour liées par des liaisons secondaires qui assurent la stabilité du polymère. Ces liaisons secondaires sont des liaisons ou ponts d'hydrogène ou des liaisons de Van Der Waals. Lorsque ces liaisons existent, le matériau devient rigide et présente le comportement d'un solide.

Si, la température s'élève ou sous l'action de fortes contraintes, l'agitation moléculaire qui en résulte va rompre progressivement ces liaisons secondaires. Le matériau va pouvoir s'écouler sous son propre poids. Il présente alors le comportement d'un liquide visqueux. Ce phénomène réversible permet leur recyclage. [1]

## I) 2.3 Morphologie

### I) 2.3.1 Polymères amorphes

L'arrangement spatial des chaînes de macromolécules peut être totalement désordonné. C'est le cas des polymères amorphes. Autrement dit, la distance entre les chaînes de macromolécules constituant la matière n'est pas constante. Les chaînes sont disposées et orientées de manière aléatoire pour avoir une configuration enchevêtrée en pelote statistique.

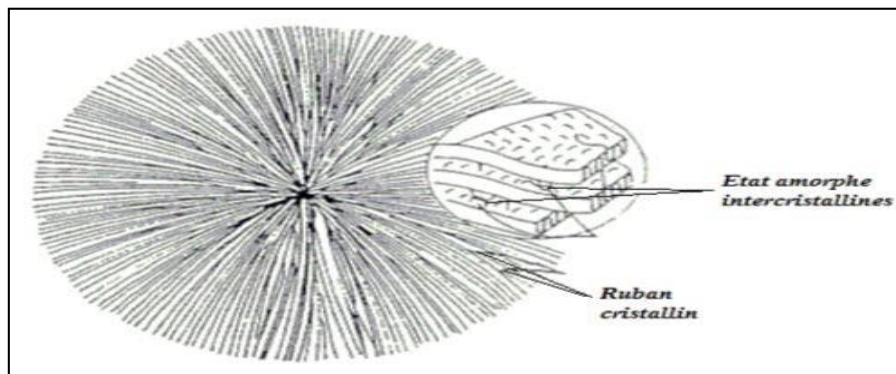
Lors de son refroidissement le polymère tend à minimiser son énergie interne et la matière a tendance à se densifier. Cependant la densification n'est jamais parfaite, il reste des espaces libres distribués régulièrement dans la matière qui permettront le déplacement des atomes et par conséquent la

déformation de la matière. Ce volume n'est autre que le volume libre. La proportion de ces volumes libres dépend de la cinétique de refroidissement du polymère et donc la microstructure des polymères amorphes en dépend aussi. Ce volume libre est la principale cause de l'existence d'un crochet de contrainte au niveau de la courbe contrainte-déformation. [4]

### I) 2.3.2 Polymères semi-cristallins

Pour certains thermoplastiques, il peut y avoir une certaine régularité dans la disposition des atomes mais la cristallisation ne peut jamais être totale, d'où l'appellation polymère semicristallin. Lorsque les chaînes de macromolécules sont disposées les unes parallèles aux autres, alors la régularité de la structure moléculaire peut exister.

L'assemblage de ces régularités forme alors une morphologie cristalline qui est essentiellement lamellaire. L'épaisseur des lamelles est souvent de l'ordre de quelques dizaines de nanomètres. A une échelle un peu plus importante, ces lamelles cristallines et l'état amorphe dans les zones interlamellaires s'organisent en un arrangement polycristallin appelé sphérolites. La taille des sphérolites varie d'un micromètre à plusieurs dizaines de millimètres[4].



*Figure I.3 : Représentation schématique d'un sphérolite et des lamelles le constituant [5].*

### I) 2.4 Comportement mécanique et processus élémentaires

Dans la famille des polymères, on peut retrouver un grand nombre de types de comportement : viscoélastique, viscoplastique, hyperélastique, durcissant, endommageable.

Cette diversité se retrouve, pour un même polymère, si l'on fait varier certaines de ses caractéristiques, ou simplement ses conditions d'utilisation. Il peut être rigide fragile, ductile ou élastique... etc. [6]

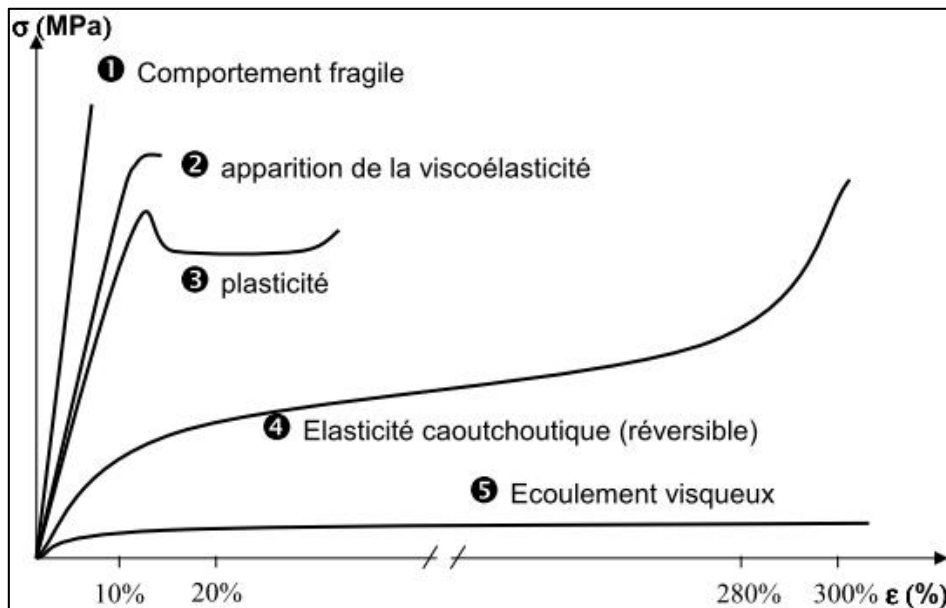


Figure I.4: Courbes schématiques de traction [6].

Le mouvement de base qui autorise la déformation macroscopique du polymère est thermo activé et sensible à la vitesse. Certains paramètres sont plus influant que d'autres, les plus importants sont :

#### I) 2.4.1 L'architecture du polymère

La nature et le nombre de co-monomères sont les premiers points à prendre en compte; En effet, c'est le choix des monomères qui conditionne la souplesse des enchaînements covalents du squelette des chaînes et en partie leur cohésion, par les interactions physico chimiques inter chaînes que les substituants autorisent, la nature des chaînes, leur tacticité, leur linéarité, le taux et les longueurs de branchements, la nature des enchaînements des monomères (statistique, bloc, alterné) dans le cas des copolymères, la réticulation.

Enfin la longueur des chaînes conditionne leur capacité à développer des interactions « physiques », par exemple les enchevêtrements, qui interviennent dans la tenue mécanique du matériau final [7].

#### I) 2.4.2 La formulation du polymère

Il convient de connaître au mieux la nature et les taux d'additifs divers, de plastifiants, de charges, de fibres, d'éléments de mélanges, nature des constituants, dispersion des phases. Par exemple, l'absorption d'énergie lors de chocs est souvent ajustée en dispersant une phase nodulaire, dont la taille conditionne l'efficacité du renfort dans une matrice, L'existence d'un agent de couplage entre phases qui s'agit parfois d'un troisième polymère greffé qui stabilise plus ou moins la dispersion des phases et participe au transfert des contraintes d'une phase à l'autre. [4]

#### I) 2.4.3 La mise en œuvre

Peut modifier l'architecture du matériau, c'est-à-dire la nature des chaînes en provoquant des ramifications ou des réticulations, la longueur des chaînes par dégradation, l'organisation des chaînes

en induisant la microstructure, l'extension et l'orientation moléculaire, la cristallisation et la texturation cristalline, l'organisation spatiale des constituants, la répartition et l'orientation des charges et hétéro phases. [8]

#### **I) 2.4.4 Les conditions d'utilisation**

La réponse d'un polymère peut dépendre :

- ✓ du type de sollicitation: traction, compression ou cisaillement.
- ✓ de la température qui est un paramètre primordial que nous allons détailler.
- ✓ de la vitesse de sollicitation qui est d'importance équivalente à celle de la température.
- ✓ de la pression (du moins à haute pression).
- ✓ du taux de déformation, car la déformation se traduit par une évolution structurale et donc une évolution des propriétés.
- ✓ du passé thermomécanique, c'est à dire d'une éventuelle dégradation pendant la mise en œuvre.
- ✓ de l'environnement: dans certains cas le taux d'humidité peut changer le comportement des polymères hydrophiles, les hydrocarbures peuvent gonfler le matériau [8].

**NB :** Tous les polymères ne sont pas sensibles dans les mêmes proportions à chacun de ces paramètres. Il convient donc de les traiter au cas par cas.

#### **I) 2.5 Effet de la température**

Le comportement des thermoplastiques dépend fortement de la température. Ils sont le siège de transitions de comportement qui peuvent être associées aux différentes relaxations moléculaires. D'un point de vue macroscopique cela se traduit par des changements de comportement plus brutales pour certaines gammes de température.

La plus importante de ces relaxations est la relaxation  $\alpha$  associée à la transition vitreuse ( $T_g$ ), qui se traduit par une grande évolution du comportement. Elle correspond au moment où la chaîne polymère amorphe acquiert assez de mobilité pour être le siège de changements de conformation globale, du fait de la coopérativité de mouvements locaux. [9]

Elle se traduit, en particulier, par une diminution brutale des modules d'élasticité (Figure I.5) qui peuvent être divisés par 100 ou 1000 sur un intervalle de 5 à 10 °C. En fait, l'ensemble du comportement évolue fortement dans cet intervalle.

Cette transition délimite le passage de l'état vitreux, à basse température, à l'état caoutchoutique, à température intermédiaire, en passant par l'état que l'on appelle quelquefois viscoélastique. Le plateau caoutchoutique prend fin lors de l'écoulement du polymère, c'est-à-dire lorsqu'il entre dans son état fluide à la température de fusion  $T_f$ . En fait, un polymère à faible déformation est toujours viscoélastique à des degrés divers et passe progressivement d'un solide viscoélastique vitreux à un fluide viscoélastique.

La transition  $\alpha$  n'affecte que le polymère amorphe et est, de ce fait, moins importante pour les polymères semi cristallins quoique sensible.

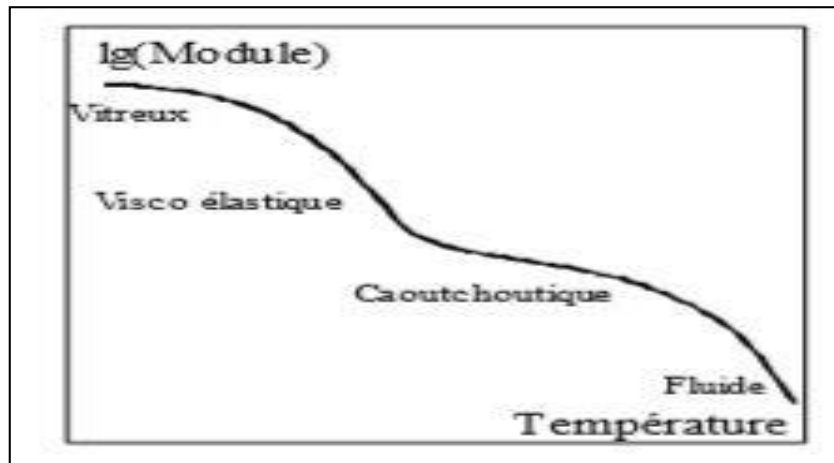


Figure I.5 : Evolution schématique du module d'élasticité d'un polymère amorphe avec la température ; Transition  $\alpha$  et passage à l'état fluide [9].

**NB :** La technique couramment utilisé pour déterminer la Tg d'un polymère est la DSC. (Differential Scanning Calorimetry) [10].

**I) 2.6 Equivalence temps-température**

Cette évolution de comportement en température est équivalente à celle que l'on peut observer, pour une température donnée, avec la vitesse de sollicitation.

Exemple avec un polymère amorphe, un bon ordre de grandeur est d'admettre qu'un refroidissement de  $-10$  à  $-20$  °C, correspond à une accélération de une à deux décades de la vitesse. [11]

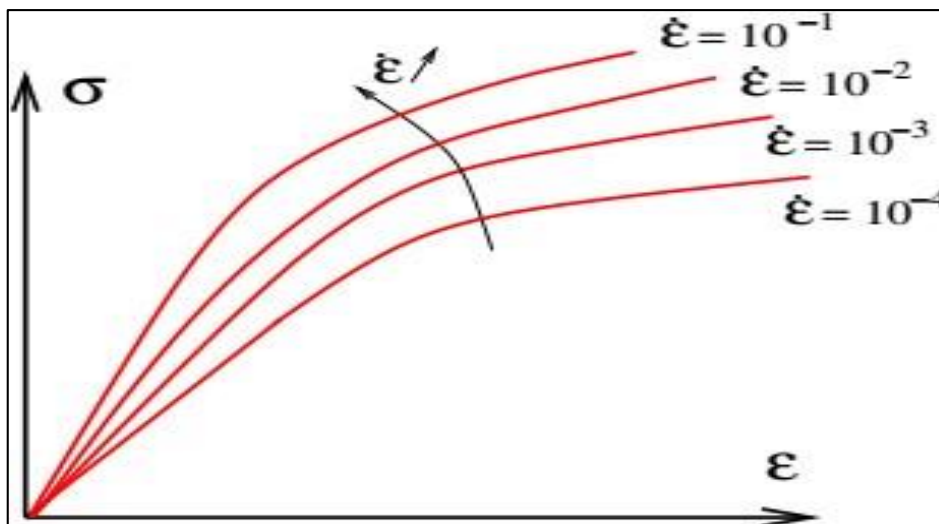


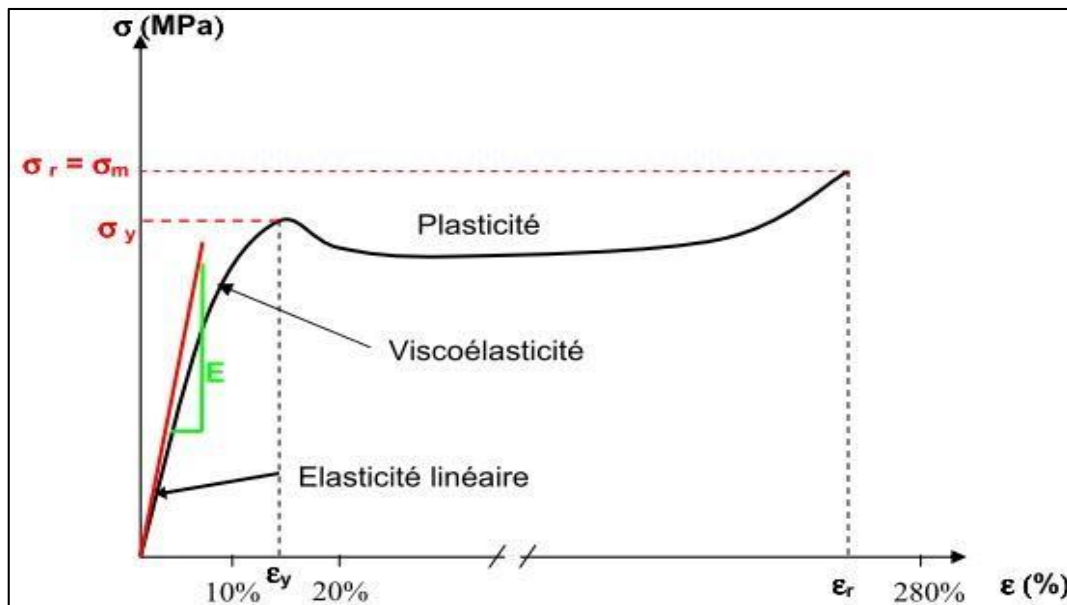
Figure I.6 : Mise en évidence de l'influence de la vitesse de chargement [11].

La sensibilité des matériaux à la vitesse de déformation a deux conséquences pour la tenue de ces matériaux dans le temps qui sont le fluage et la relaxation.

## I) 2.7 Essais mécanique

Plusieurs grandeurs peuvent être définies grâce aux tests mécaniques comme la traction, la compression, la flexion...etc:

- ✓ Le module d'Young ou module élastique  $E$  qui décrit la relation entre la contrainte et la déformation associée dans le domaine linéaire où la loi de Hooke est valable.
- ✓ Contrainte au seuil d'écoulement  $\sigma_y$  définie comme la contrainte en traction pour laquelle la pente de la courbe contraintes-déformations s'annule pour la première fois et à laquelle correspond l'allongement au seuil d'écoulement  $\epsilon_y$
- ✓ La contrainte à rupture  $\sigma_r$  détermine à la rupture de l'éprouvette et à laquelle correspond un allongement à la rupture  $\epsilon_r$
- ✓ La contrainte maximale  $\sigma_m$  c'est la contrainte maximale supportée par l'éprouvette en traction



**Figure I.7 :** Courbe de traction d'un matériau thermoplastique aux alentours de sa  $T_g$  [12].

L'essai de la viscosité est contrôlé en déformation et effectué à différentes vitesses de déformation  $\dot{\epsilon}$ . Si l'on obtient des courbes  $(\sigma, \epsilon)$  différentes, le matériau testé présente une viscosité, c'est-à-dire une sensibilité à la vitesse de sollicitation [12].

La figure I.8 donne quelques caractéristiques de certains thermoplastiques

Matériaux	E (MPa)	$\sigma_v$ (MPa)	$\sigma_m$ (MPa)	T <sub>g</sub> (°C)
<b>Thermoplastique</b>	~1000	20-50	~50	
PE HD	700	25	40	-80
PD	200	10	20	—
PVC	2500	45	—	81
PS	3000	50	60	100
PMMA	3400	60-110	110	105
PC	2600	50	60	140
<b>Thermodurcissable</b>	3000	30-100	30-120	100-220
Résine époxyde (EP)	3000	30-100	30-120	100-220
<b>Elastomères</b>	~10	—	~30	~70
Polyisoprène	10	—	30	-73
<b>Verre :silice</b>	94000	7000	—	—
<b>Céramique : diamant</b>	1000000	50000	—	—
<b>Métaux : Fer</b>	200000	50	200	—

Figure 1.8 : Quelques caractéristiques de certains matériaux [13].

## I) 2.8 Influence de la masse molaire

L'évaluation des propriétés d'un plastique nécessite la connaissance de la courbe de distribution des masses molaires des différentes espèces présentes en fonction du degré de polymérisation, il est important également de définir la masse molaire moyenne en masse et la masse molaire moyenne en nombre, on cherche toujours, lors de l'élaboration des polymères à atteindre une certaine masse molaire moyenne, il est alors nécessaire de faire des compromis vis-à-vis des différentes propriétés désirées.

L'augmentation de la longueur des chaînes et du nombre d'enchevêtrements est à l'origine d'une diminution de la mobilité moléculaire, la formation de cristallite devient plus difficile, pour des valeurs croissantes de la masse molaire, la proportion des zones cristallines décroît en faveur des zones amorphes, une diminution de la cristallinité, causée par l'augmentation de la masse molaire moyenne entraîne par conséquent une diminution du module d'élasticité et de l'abrasion, l'allongement à la rupture s'en trouve au maximum [4].

## I) 2.9 Mise en œuvre des thermoplastiques destinés au thermoformage

### I) 2.14.1 L'extrusion gonflage

C'est une variante de l'extrusion qui permet de fabriquer des films plastiques. Ce procédé consiste, en sortie de l'extrudeuse, à dilater avec de l'air comprimé une gaine polymère précédemment formée. La sortie de l'extrudeuse est verticale, on insuffle de l'air comprimé dans la matière fondue qui se gonfle et s'élève verticalement en une longue bulle de film. Après refroidissement, des rouleaux aplatissent le film en une gaine plane qui s'enroule sur des bobines. On fabrique ainsi des films utilisés dans la fabrication d'emballages, de sacs-poubelles, de sacs de congélation, des poches médicales pour perfusion et des feuilles souples et fines de revêtements pour serres horticoles. [14]

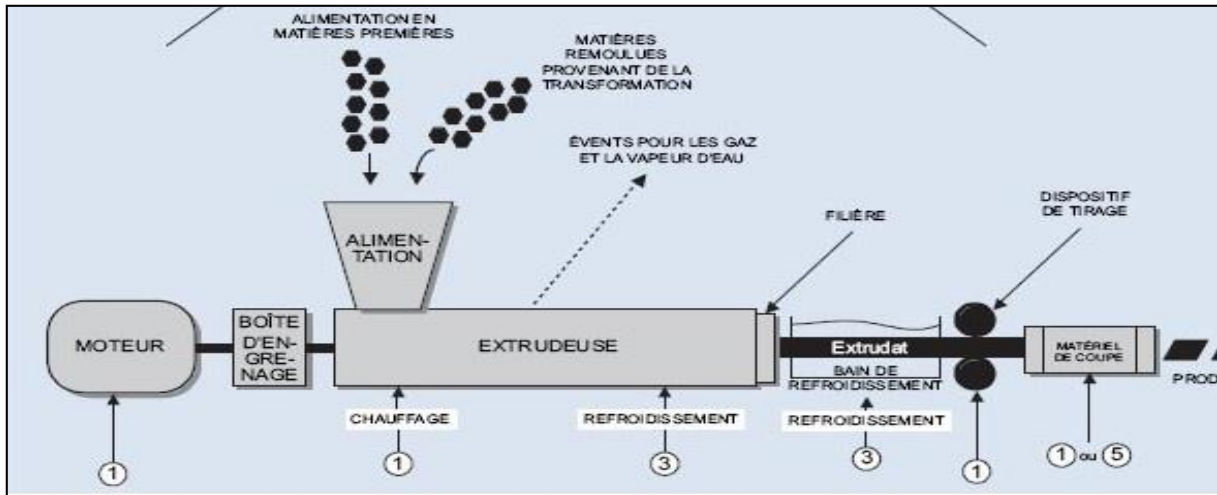


Figure I.9 : Le procédé d'extrusion [15].

### I) 2.14.2 Le Calandrage

Le calandrage est un procédé de laminage utilisé pour la production de feuilles et de films plastique. La résine thermoplastique chauffée et fondue, est placée entre des rouleaux chauffants qui opèrent comme les anciennes essoreuses. Les rouleaux sont de plusieurs tailles et tournent donc à des vitesses légèrement différentes pour transformer le plastique en feuilles ou en fine pellicule. Le film est ensuite refroidi puis enroulé sur de grosses bobines. [14]

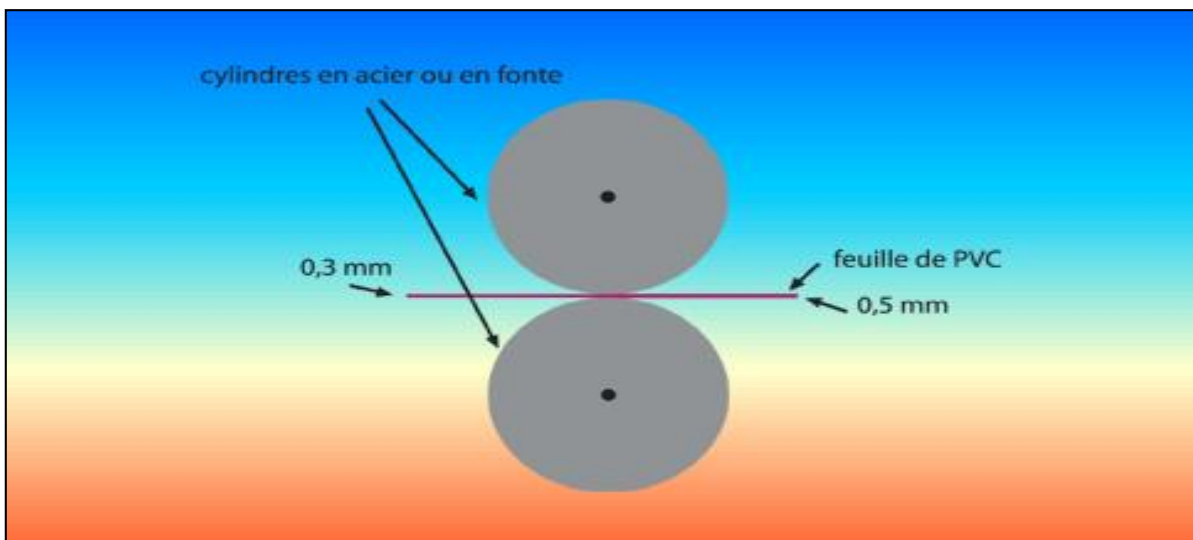


Figure I.10: Le procédé de calandrage [15].

### I) 2.10 Comportement des thermoplastiques en thermoformage

A chaud, la feuille de thermoplastique rigide devient à un certain point malléable et caoutchouteux à mesure que la température s'accroît. C'est à ce stade de transition qu'elle entre dans le domaine du travail en thermoformage. L'exécution de tout formage doit avoir lieu au sein de ces paramètres de températures. Il est important d'identifier la fourchette de températures à laquelle la feuille devient élastique. Cette réaction varie selon les polymères.

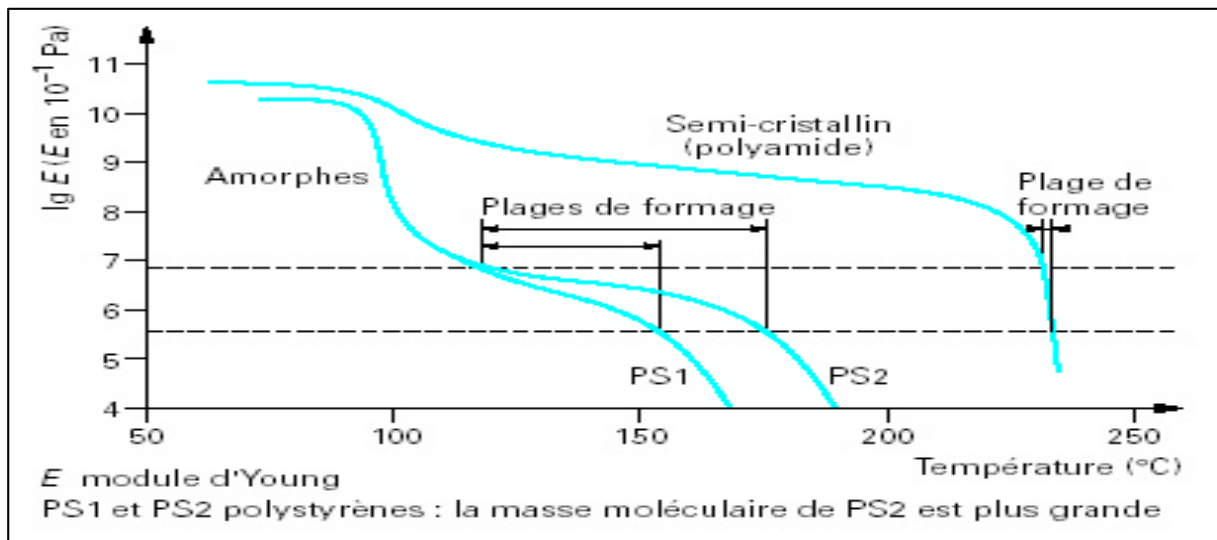
Si la fourchette est étroite, il est important de contrôler strictement le déroulement des opérations. Il est préférable que les matières à thermoformer se ramollissent et s'élastifient sur une large fourchette de températures plutôt qu'à un point de fusion bien déterminé. Les matières amorphes (comme le polystyrène à résistance modifiée ou l'ABS) présentent en général des paramètres de thermoformage plus souples que les matières cristallines (comme le polypropylène).

La qualité du matériau au moment où il commence à s'élastifier est l'une des grandes considérations qu'il faut prendre en compte lors du thermoformage. A l'état caoutchouteux, le module d'élasticité, ou la résistance à la déformation, des polymères varie d'une matière à l'autre. Ils présentent un comportement élastique, plastique, ou encore élastique-plastique. La condition élastique se caractérise essentiellement par une phase où la matière est forte et élastique. Dans cet état, la matière présente une haute résistance à chaud et peut s'étirer jusqu'à 500 ou 600 % (il s'agit de matières à haute résistance à la rupture à chaud). Par contraste, il existe des matières de nature principalement plastique. A chaud, elles perdent leur résistance, se ramollissent et acquièrent une consistance de mastic. Ces matières disposent d'une résistance faible à l'élongation à chaud et ne peuvent s'étirer qu'à 15 ou 20 % avant de se rompre (il s'agit de matières à basses résistance à la rupture à chaud).

On peut identifier les propriétés élastiques et plastiques dans la fourchette de thermoformage exploitable d'une matière, qui peut être dominée par l'un ou l'autre de ces comportements. Les matières qui présentent une élasticité dominante se prêtent au formage sous pression (drapage). Les matières qui présentent une plasticité dominante dans la fourchette de thermoformage se prêtent bien au formage sous vide, une technique qui permet de réaliser un produit hautement défini.

La feuille de polymère est chauffée à une température permettant sa déformation, c'est à dire à une température telle qu'elle soit flexible et étirable mais encore suffisamment rigide pour résister à son propre poids. On dispose ainsi d'une plage de température, dite plage de formage, combinant un allongement à la rupture maximum à un module minimum.

La figure ci-dessous présente les évolutions des modules d'élasticité en fonction de la température d'un polystyrène amorphe et d'un polyamide semi-cristallin, et les plages de formages correspondantes [16].



**Figure I.11 :** Evolution des propriétés mécaniques d'un polymère amorphe et semi-cristallin en fonction de la température [17].

Pour les thermoplastiques amorphes, la plage de formage est assez large et correspond grossièrement à l'état caoutchoutique du polymère.

### I) 2.11 Classification des thermoplastiques

Les polymères TP sont souvent groupés en fonction de leur domaine d'utilisation en température (voir figure I.12 et nomenclature en annexes) :

Polymères de commodité: Polymères pouvant être utilisés en continu à des températures inférieures à 100°C. [18]

Polymères d'ingénierie: Polymères pouvant être utilisés de façon prolongée à des températures comprises entre 100°C et 150°C.

Polymères haute performance: Conservent leurs propriétés physiques à des températures plus élevées et présentent une excellente stabilité thermique

Il est aussi courant d'utiliser des associations de plusieurs polymères dont la plupart sont recyclables. La réutilisation de plastique recyclé est pratique courante et représente un intérêt économique important. Ces matières peuvent être utilisées seules, intimement mélangées (blend) ou en multicouches en fonction entre autre de :

- ✓ La résistance aux frottements, résistance au choc et à l'usure.
- ✓ La tenue aux produits chimiques, huiles et essences.
- ✓ Le respect des normes alimentaires
- ✓ Le respect des normes de sécurité (comportement au feu, isolation électrique).
- ✓ La capacité de stérilisation.
- ✓ La stabilité dimensionnelle.
- ✓ L'aspect de surface : lisse, grainé, brillant, mat, dépoli, "givré", miroir, etc.



déformation de la matrice est influencée par tous ces facteurs. Les polymères thermoplastiques ont une structure linéaire ; ils sont mis en forme par chauffage (les chaînes se plient), et durcissent au cours du refroidissement (les chaînes se bloquent). La transformation est réversible.

### I) 3.3 Le renfort

Une distinction nette entre le renfort et le chargement n'est pas toujours possible. Dans certains cas l'amélioration d'une propriété peut être accompagnée par l'altération d'une autre.

L'agent de renforcement, pour qu'il soit efficace doit avoir une résistance et un module d'élasticité supérieurs à ceux de la matrice (voir tableau I.1), un allongement à la rupture qui correspond approximativement à l'allongement au seuil d'écoulement de la matrice ainsi qu'une orientation géométrique favorable. Destiné à supporter les charges structurelles auxquelles le composite est soumis, le renforcement détermine donc dans une large mesure la rigidité et la résistance du composite ainsi que plusieurs autres propriétés. Le renforcement d'un composite peut prendre différentes formes, mais **seul le renforcement fibreux est pertinent pour la formation de feuilles thermoplastiques.**

La structure moléculaire d'une fibre est généralement alignée dans le sens de l'axe de fibre, ce qui produit une structure forte dans cette direction.

Les types de renforcement fibreux les plus couramment utilisés dans les applications composites sont le verre, le bore, le carbone et l'aramide. Cependant, ce n'est pas seulement le type de fibre qui a de l'importance; sa configuration ou sa forme est tout aussi importante. Par exemple les fibres peuvent être discontinues ou continues, disposées ou orientées de manière aléatoire, toutes alignées ou sous forme de tissu, etc [20].

Matériau	Module d'Young (GPa)	Résistance en traction (MPa)	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	Température d'utilisation max (°C)	Allongement à rupture (%)
Verre R	80	2500	2500	650	3
Kevlar 49	130	3600	1450	200	2
Carbone HM	400	2000	1900	2500	
Bore	400	3500	2650	700	0,8
SiC (fibre)	480	2300	3200	900	0,5
SiC (trichite)	840	21000	3200	1600	2,5

*Tableau I.1 : Propriétés des renforts [21].*

#### I) 3.3.1 Formes de renforts

Les structures composites sont anisotropes. La plupart des renforts travaillent bien en traction, mais offrent de moins bonnes performances en compression et cisaillement. Il est donc impératif de

jouer sur la texture et la géométrie des renforts pour créer une architecture adaptée, Il existe différentes géométries et textures de renforts :

### I) 3.3.1.1 Forme linéique

Uni directionnelle (UD) : Les fibres sont élaborées suivant un diamètre de quelque micromètre et ne peuvent, par conséquent, être utilisée sous forme unitaire. Pour leur utilisation pratique, ces fibres sont réunies en fils ou en mèches de différentes formes.

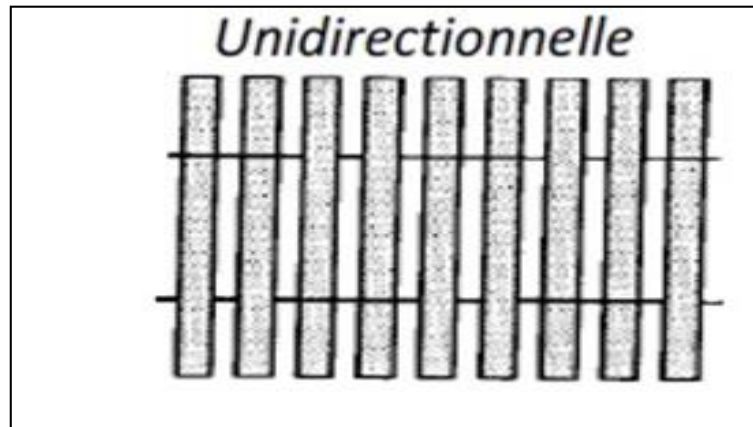


Figure I.13 : Architecture de renforcement.

### I) 3.3.1.2 Formes surfaciques

Les fils peuvent être utilisés pour réaliser des formes surfaciques de divers types : mats, tissus ou rubans.

- ✓ *Les mâts* : Les mâts sont des nappes de fils continus dispersés aléatoirement.
- ✓ *Les tissus et rubans* : Un tissu (ou ruban) est un ensemble surfacique de fils, de mèches, etc., réalisé sur un métier à tisser. Il est constitué d'une chaîne ou d'un ensemble de fils parallèles répartis dans un plan suivant la longueur de tissu et d'une trame, ensemble de fils s'entrecroisant avec les fils de chaîne.

Les tissus diffèrent par le type de fils utilisé (fils simples, mèches,...etc.), donc par la masse linéique des fils, et par le mode d'entrecroisement (ou armure) des fils de chaîne et des fils de trames. La figure suivante illustre les armures classiques utilisées : toile ou taffetas, satin, sergé, armure haut module, armure unidirectionnelle.

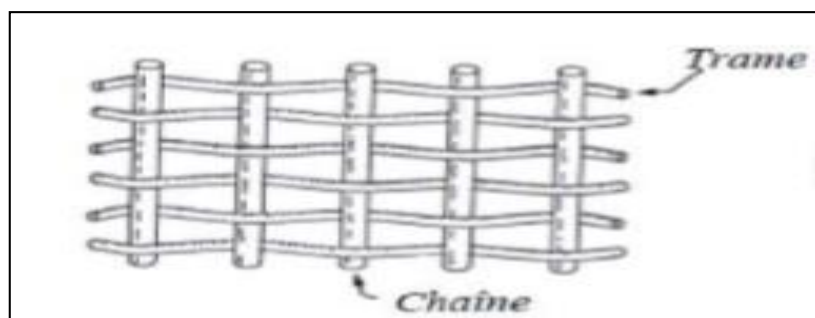


Figure I.14 : Architecture de renforcement.

Les motifs du tissu peuvent être extrêmement variés. De nombreux tissus sont plans et ne comportent qu'une couche de fils ; l'épaisseur de la pièce est alors obtenue en cousant plusieurs couches entre elles, ou encore en les empilant pour former un stratifié. Les tissus de les figures précédents sont équilibrés, c'est-à-dire qu'ils comportent autant de fils dans les deux directions de tissage. Ils possèdent donc la même résistance et la même rigidité dans ces deux directions, mais il faut bien noter qu'ils n'ont pas pour autant un comportement isotrope : ils résistent a priori mieux en traction dans la direction des fils qu'en traction à 45° ou en cisaillement. En outre, il est possible de faire varier la proportion de fils dans les deux directions pour jouer sur cette anisotropie, lorsque le chargement appliqué à la pièce le justifie : les tissus ainsi obtenus sont dits non équilibrés.

On préférera un tissu en raison des avantages suivants :

- ✓ meilleure résistance au délaminage.
- ✓ tolérance à l'endommagement grâce au tissage des fibres
- ✓ épaisseur régulière grâce au maintien latéral des fibres
- ✓ propriétés mécaniques dans le sens transverse
- ✓ drapabilité.

### **I) 3.4 L'interface**

En plus des fibres et de la matrice, il faut rajouter une interface qui assure la compatibilité renfort/matrice, qui transmet les contraintes de l'un à l'autre sans déplacement relatif. Bonne adhérence en couche fine. Des produits chimiques entre aussi dans la composition du composite, l'interphase etc... qui peut jouer sur le comportement mécanique, mais n'interviennent pratiquement jamais dans le calcul de structures composites.

### **I) 3.5 L'interphase**

Est un milieu continu qui peut être une zone de réaction chimique formée par les constituants du composite lors de son élaboration, ou une fine couche introduite volontairement dans le but de protéger la fibre ou de contrôler la liaison inter faciale . [22]

### **I) 3.6 Les stratifiés**

Les structures composites stratifiées sont constituées de couches successives de renforts (fils, stratifils, mats, tissus, etc.) imprégnés de résines. Les couches sont également nommées plis. Les stratifiés sont utilisés, comme matériaux structuraux, à chaque fois qu'on a d'un côté la nécessité d'excellentes performances mécaniques en termes de résistance, rigidité, comportement à la fissuration, et de l'autre l'exigence de limiter le poids.

Les stratifiés à base de fils ou de tissus unidirectionnels constituent un type de stratifié de base auquel peut se ramener en théorie tout autre type de stratifié. Ces stratifiés sont constitués de couches de fils ou de tissus unidirectionnels, dont la direction est décalée dans chaque couche.

La désignation de ces stratifiés est normalisée et dépend du système d'axes choisi. Ainsi un stratifié peut être symétrique, séquencé ou hybride [23].

### I) 3.7 Les composites disponibles pour des applications en thermoformage

Les composites à fibres continues sont disponibles principalement sous trois formes:

- ✓ Fibres comêlées (tissus, tresses)

Mélange de fibres de renfort (verre, carbone, aramide) et de fibres de polymère

Suivant l'application de chaleur et de pression, les fibres de polymère fondent et imprègnent les fibres de renfort

- ✓ Rubans pré-imprégnés (Figure I.15.A)

Disponibles sous forme UD ou 0/9

Épaisseurs typiques comprises entre 0.15 et 0.25 mm

- ✓ Plaques consolidées (Figure I.15.B)

Disponibles en diverses épaisseurs

Matériaux tissés ou empilement de plis unidirectionnels [19].



(A)

(B)

*Figure I.15 : Formes disponibles sur le marché*

### I) 3.8 Mécanismes de déformations

Les composites sont soumis à deux contraintes dites « cinématiques » : l'inextensibilité des fibres et l'incompressibilité générale du composite. Ces deux contraintes sont d'une grande importance puisqu'elles régissent la manière dont un composite réagit lors de sa mise en forme. La contrainte d'inextensibilité est reliée à la rigidité longitudinale des fibres. Ainsi, lorsqu'une fibre est soumise à un chargement longitudinal, elle ne montre qu'une très faible déformation, quasiment nulle, dans la direction de la charge. La contrainte d'incompressibilité renvoie à l'impossibilité de comprimer le composite, ou d'en modifier le volume pour une même quantité de matière.

La déformation globale du matériau est générée par la somme de plusieurs mécanismes de déformation qui tirent souvent leur source de la nature des composants élémentaires qui le compose et des efforts générés par la mise en forme.

- ✓ La percolation définit l'écoulement de la résine, à l'état fondu, au travers du réseau de fibres (Figure I.16.a).
- ✓ L'écoulement transversal se rapporte au mouvement par convection des fibres à l'intérieur de la matrice à l'état fondu, et ce, dans la direction transversale au renfort (Figure I.16.b).
- ✓ Le glissement interpli (ou interlaminaire) fait référence au mouvement de translation dans le plan d'une couche par rapport à une couche adjacente (Figure I.17), il se produit lors de la mise en forme de pièce à courbure simple (courbure 2D).
- ✓ Le cisaillement intrapli se réfère à la réorientation des fibres au sein d'une seule et même couche (Figure I.18 a et I.18.b).
- ✓ Pour les plis tissés, le cisaillement intrapli est caractérisé par une limite physique, l'angle de blocage, au-delà duquel la compaction latérale des fibres paralyse ce mécanisme. Il se produit pour des pièces affichant une courbure double (courbure 3D). La rotation interpli (ou interlaminaire) correspond au mouvement de rotation dans le plan d'une couche par rapport à une couche adjacente (Figure I.18.c) [24].

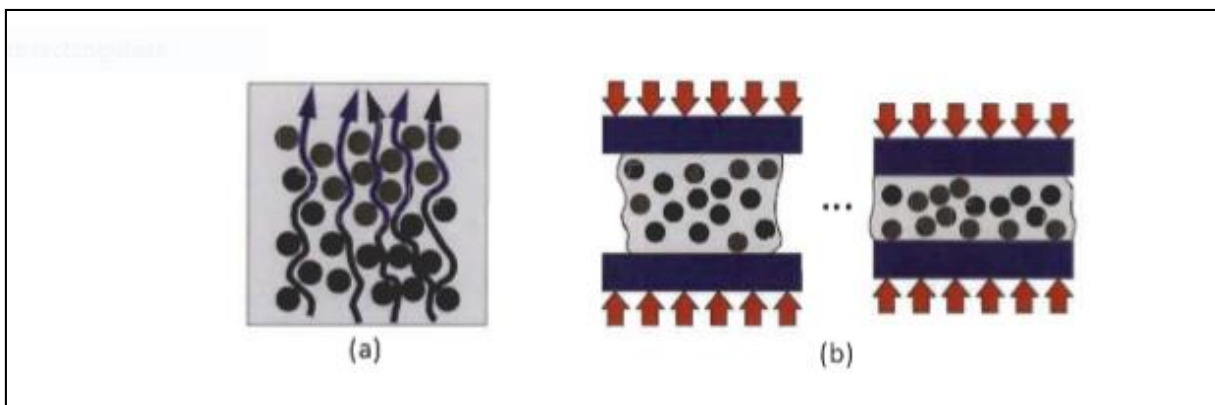


Figure I.16 : La percolation

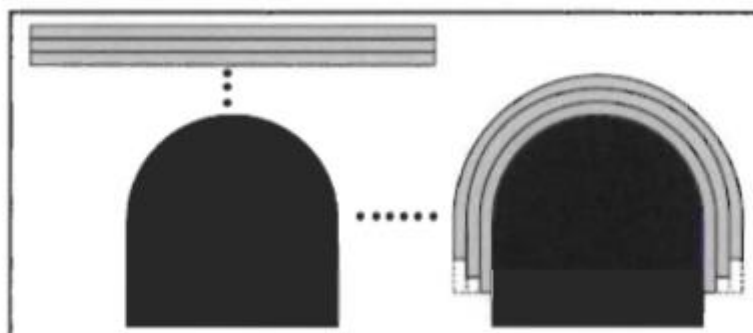


Figure I.17 : Glissement interpli

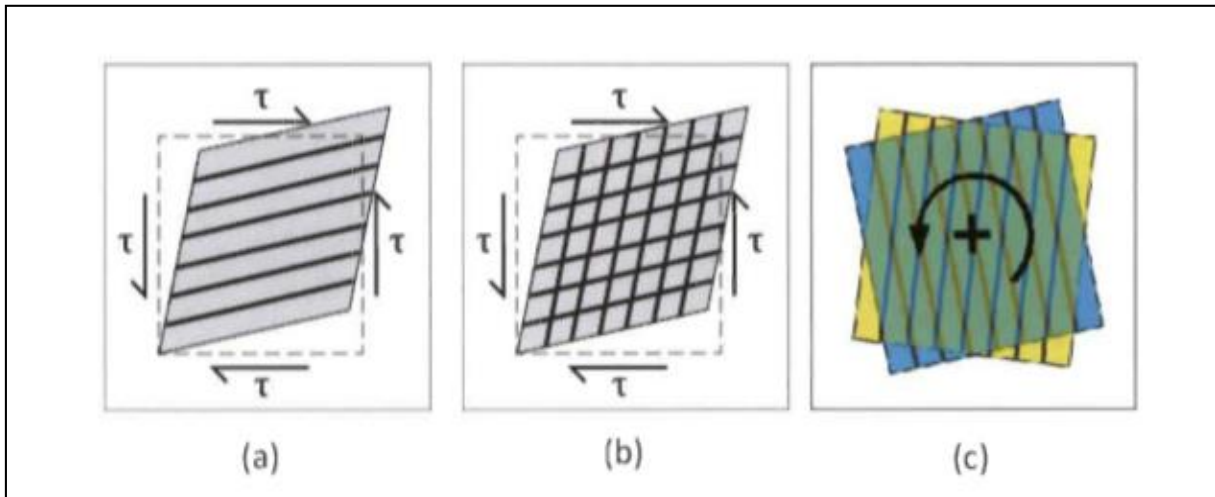


Figure I.18 : Cisaillement intrapli

### I) 3.9 Défauts structuraux typiques

Les défauts structuraux les plus fréquents sont:

- ✓ La rupture des fibres qui survient lorsque les fibres sont soumises à une contrainte de tension trop élevée. Elle est associée à deux aspects de la mise en forme: l'inextensibilité des fibres et l'apport d'une force de tension dans le plan du laminé par le serre-flan. Ce défaut diminue considérablement la résistance du matériau (Figure I.19.a).
- ✓ La création de zones riches en résine. Les zones riches en résine se forment lorsque la percolation de résine est trop importante. Cela a pour conséquence de modifier localement le pourcentage volumique de fibres dans la pièce. Les zones riches en résine affichent alors de moins bonnes propriétés mécaniques, tandis que les zones riches en fibres affichent une fragilité accrue (Figure I.19.b).
- ✓ Le flambage des plis tout comme le flambage d'une poutre, survient lorsque les fibres sont soumises à un effort de compression dans leur direction longitudinale. Les fibres ne pouvant pas absorber l'énergie générée par la compression en se déformant longitudinalement, elles se déforment en dehors du plan du pli, créant une ondulation dans ce dernier (Figure I.19.c). L'ondulation des fibres est similaire au flambage des plis à la différence que ce sont les fibres qui flambent

Un repli se forme lorsque, sous l'action de la compression générée par le moule, une zone soumise au flambage se replie sur elle-même. La formation de replis est un défaut majeur qui affecte fortement les propriétés mécaniques d'une pièce (Figure I.19.d). [24].

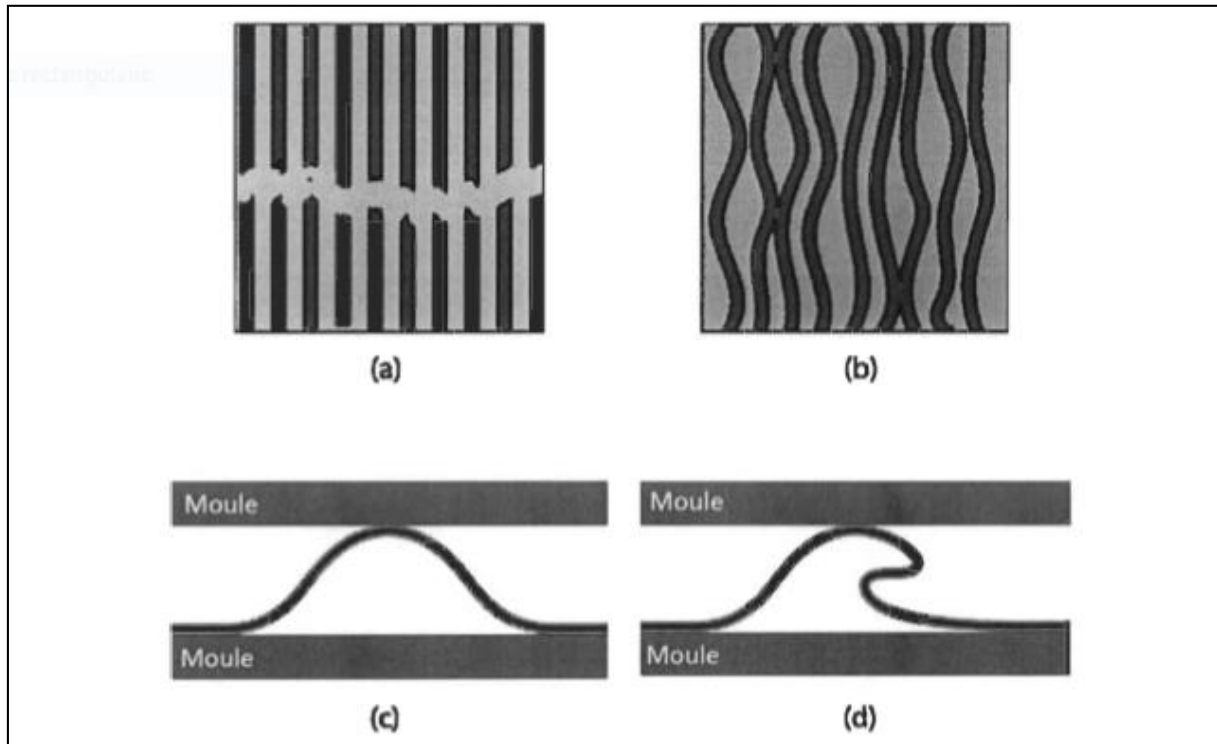


Figure I.19 : Défauts structuraux [24].

### I) 3.10 Propriétés des composites destinés au thermoformage

Jusqu'à tout récemment, l'exclusivité était détenue par les composites à matrice thermodurcissable mais les composites à matrices thermoplastiques présentent de nombreux avantages vis-à-vis de leurs contreparties thermodurcissables. On parle alors d'une meilleure tolérance à l'endommagement et à la propagation de fissures, des possibilités de recyclage, de l'absence d'une durée de vie en entreposage (« shelf life ») et de délais de polymérisation de la matrice. [25].

- ✓ Des propriétés similaires peuvent être obtenues pour des composites thermoplastiques et des composites thermodurcissables
- ✓ Composites à base de PA6 ont des propriétés similaires à celles des composites thermodurcissables de base
- ✓ Pour des composites aéronautiques à base d'époxy, l'équivalent thermoplastique est le PPS

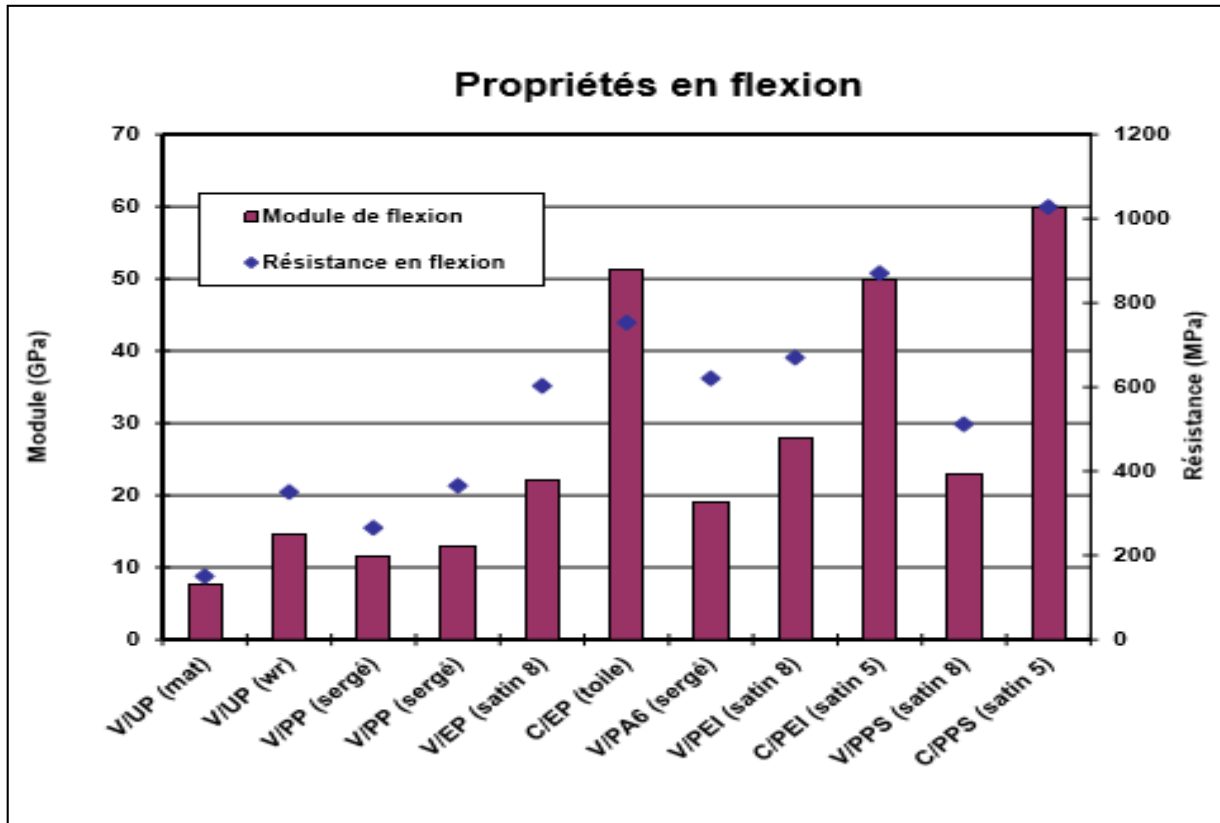


Figure I.20 : Propriétés en flexion des composites à matrice thermoplastique et fibres continues

[19]

#### I) 4 Conclusion

On utilise pour le thermoformage des matières thermoplastiques qui se déforment en chauffant, contrairement aux matières thermodurcissables qui, une fois mises en œuvre, ne peuvent plus être « fondues ».

Pendant, tous les matériaux thermoplastiques ne sont pas thermo-formables. Il s'agit de polymères amorphes ou semi-cristallins à faibles taux de cristallinité.

Ce chapitre nous a permis de mieux cerner les matériaux thermo-formables. Les polymères thermoplastiques sont constitués de macromolécules unidimensionnelles liées entre elles par des liaisons de types de Van Der Waals. La déformation à l'échelle macroscopique est la résultante de la mobilité de ces chaînes de macromolécules qui est assurée par l'existence de vide dans la matière. Le processus est thermo-activé.

L'objectif de ce chapitre n'est pas de faire une étude approfondie des matériaux composites, il se propose simplement de constituer une introduction à l'étude du comportement mécanique des matériaux composites à matrice thermoplastique en thermoformage.

# Chapitre II

## Présentation du procédé de thermoformage

II) 1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons présenter le procédé du thermoformage des thermoplastiques. Une attention particulière sera apportée au thermoformage sous vide car c'est la technique la plus largement adoptée. La deuxième partie sera une introduction au thermoformage des composites a matrices thermoplastique.

II) 2 Le thermoformage de films thermoplastiques

II) 2.1 Définition

Le thermoformage consiste à chauffer une feuille de polymère thermoplastique jusqu'à une température permettant sa déformation, puis à la mettre en forme dans une matrice ou sur un moule, après refroidissement on obtient l'objet désiré. La figure ci-dessous donne les principales étapes du thermoformage. [26]

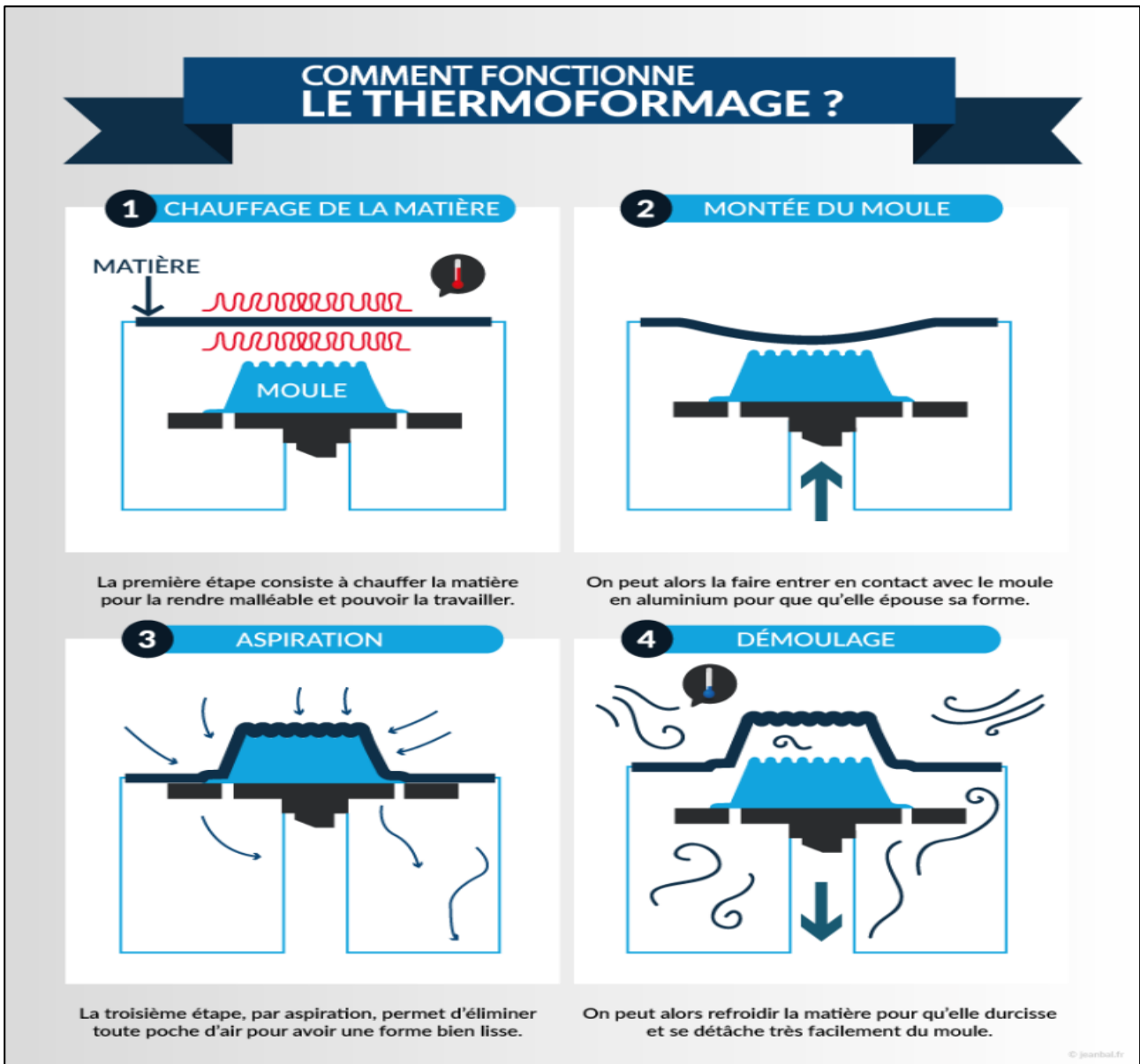


Figure II-1 : les principales étapes du thermoformage [28].

## II) 2.2 Principe

La technique de thermoformage consiste essentiellement à resserrer la feuille thermoplastique sur un cadre et à la soumettre à la chaleur. Une fois la feuille ramollie, le moule (mâle ou femelle), placé en dessous de la feuille, s'élève vers la feuille. L'air résiduel entre le plateau porte-moule et la feuille chaude est alors évacué par une pompe à vide. La pression atmosphérique se charge d'achever le processus en comprimant la feuille chaude sur le moule. La feuille adopte ainsi l'empreinte de ce dernier. Une fois refroidie en deçà de la température de durcissement ou du point de défection calorifique, le plateau est rabaissé et la pièce moulée retirée.

La pression peut être exercée soit par évacuation d'air sous une paroi de la feuille, soit par pression d'air, soit par compression de la feuille chaude entre un moule concave et un moule convexe. Ces procédés entrent dans la catégorie des techniques de formage sous vide.

## II) 3 Les différentes techniques de thermoformage

Il existe plusieurs techniques de formage. On peut les classer en trois groupes:

- ✓ Les procédés dans lesquels la déformation est obtenue grâce à l'action directe d'un poinçon sont appelés : techniques de thermoformage par emboutissage ou moyens mécaniques
- ✓ Les procédés qui utilisent la pression ou l'aspiration d'air sont appelés : techniques de thermoformage sous vide ou par gonflage donc de thermoformage par moyens pneumatiques
- ✓ Les procédés basés sur la combinaison de ces deux systèmes précédents sont appelés : techniques de thermoformage mixte (pneumatique + mécanique)

NB : Pour le conditionnement de produit on utilise des techniques particulières [29].

### II) 3.1 Thermoformage par moyens mécaniques

#### II) 3.1.1 Emboutissage par moule mâle et femelle ou « positif et négatif » :

Ce procédé est de moins en moins utilisé car il a pour inconvénient de marquer les pièces.

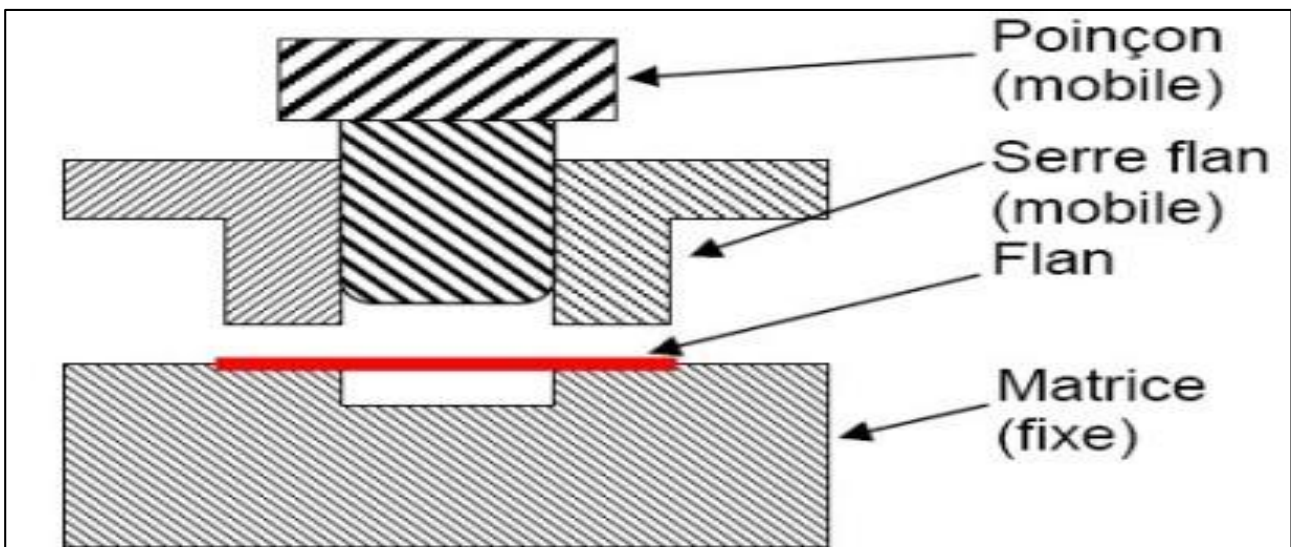


Figure II-2 : emboutissage par moule positif et négatif [31].

**II) 3.1.2 Emboutissage ou étirage en forme par poinçonnage**

Tenant compte de l'élasticité de la matière chaude on peut souvent supprimer le moule femelle ou plus exactement le réduire à deux plaques ajourées au contour extérieur de la pièce à obtenir entre lesquelles est pincée la feuille chaude. Un poinçon massif ayant la forme intérieure de la pièce est descendu convenablement. Cette descente a pour conséquence de déformer la feuille de plastique sous une.

Il n'est pas nécessaire que le poinçon soit toujours massif. Lors du formage les feuilles de thermoplastique se tendent comme une peau de tambour. Il peut alors être évidé pour se constituer simplement d'une sorte de "squelette" suffisamment rigide, ne portant que sur les angles de variations de surface. Ainsi un simple anneau ou un cadre rigide permettra d'obtenir une forme parallélépipédique ou cylindrique si elle n'est pas trop profonde.

Lorsque l'emboutissage devient trop profond l'étirage tend à donner à la pièce une forme en trompette pour les pièces coniques ou à produire un resserrement de la matière en arrière du poinçon dans les pièces cylindriques. [30]

**II) 3.2 Thermoformage par moyens pneumatiques**

La technique de formage thermo pneumatique est la plus utilisée dans les machines de thermoformage. Le principe de fonctionnement de ces machines est basé sur l'utilisation de l'air sous pression (gonflage) ou le vide pour plaquer la feuille contre une empreinte munie d'évents. Ces orifices de petit diamètre servent à évacuer l'air enfermé entre la feuille et la matrice dans le premier cas, ou aspirer l'air et créer le vide qui plaque la feuille sous la pression atmosphérique contre la paroi de l'empreinte. [30]

**II) 3.2.1 Thermoformage sous vide**

Cette technique est actuellement la plus utilisée. De nombreux constructeurs ont mis sur le marché des machines automatiques permettant de réaliser avec des débits importants, le cycle des opérations nécessaires en continu. Le thermoformage sous vide peut s'effectuer avec deux types de moules, ces derniers réalisés en bois ou en métal coulé, de préférence en alliage léger facile à couler tel que le Zamak. [30]

- ✓ moule en creux appelé moule négatif
- ✓ moule en relief appelé moule positif

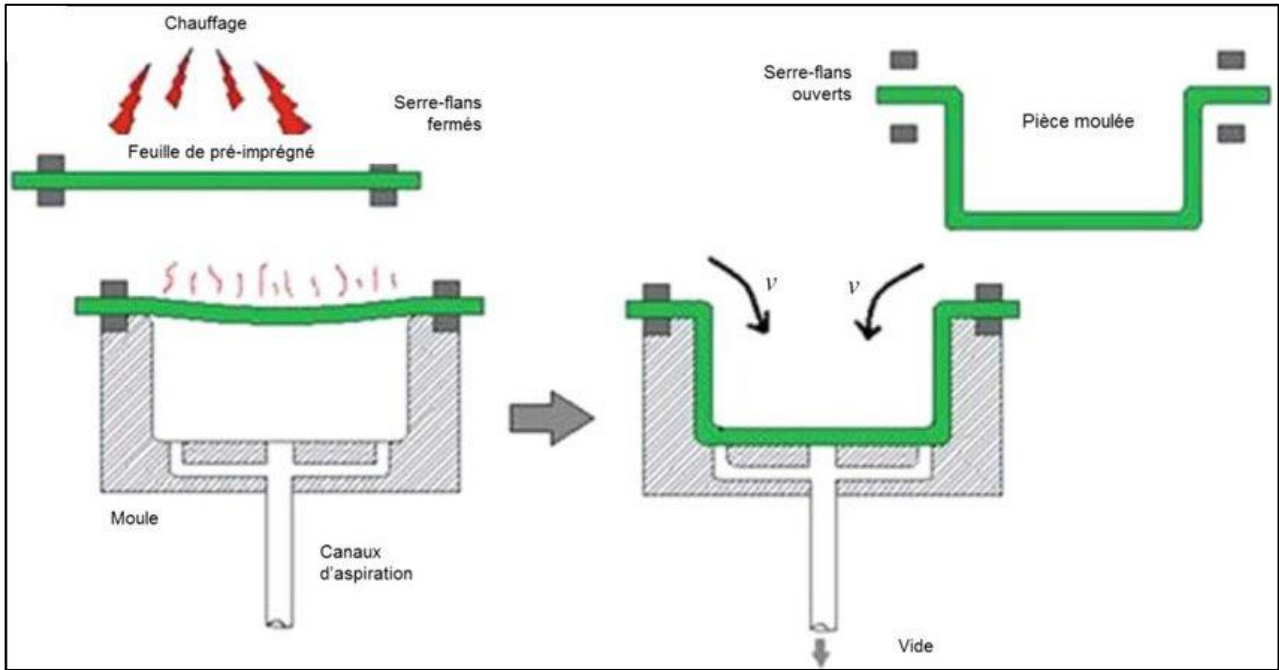


Figure II-3 : thermoformage sous vide avec un moule positif et négatif [31].

II) 3.2.2 Thermoformage sous pression

Le formage sous pression est fondamentalement identique au formage sous vide. Cependant, durant la dernière phase de formage, la plaque chauffée est appliquée contre l'empreinte sous l'action de l'air comprimé. On peut ainsi former une pièce avec des angles vifs, des contre dépouillent et une géométrie complexe. Grâce à ce procédé, on peut obtenir des surfaces texturées sélectives et de faibles rayons. [30]

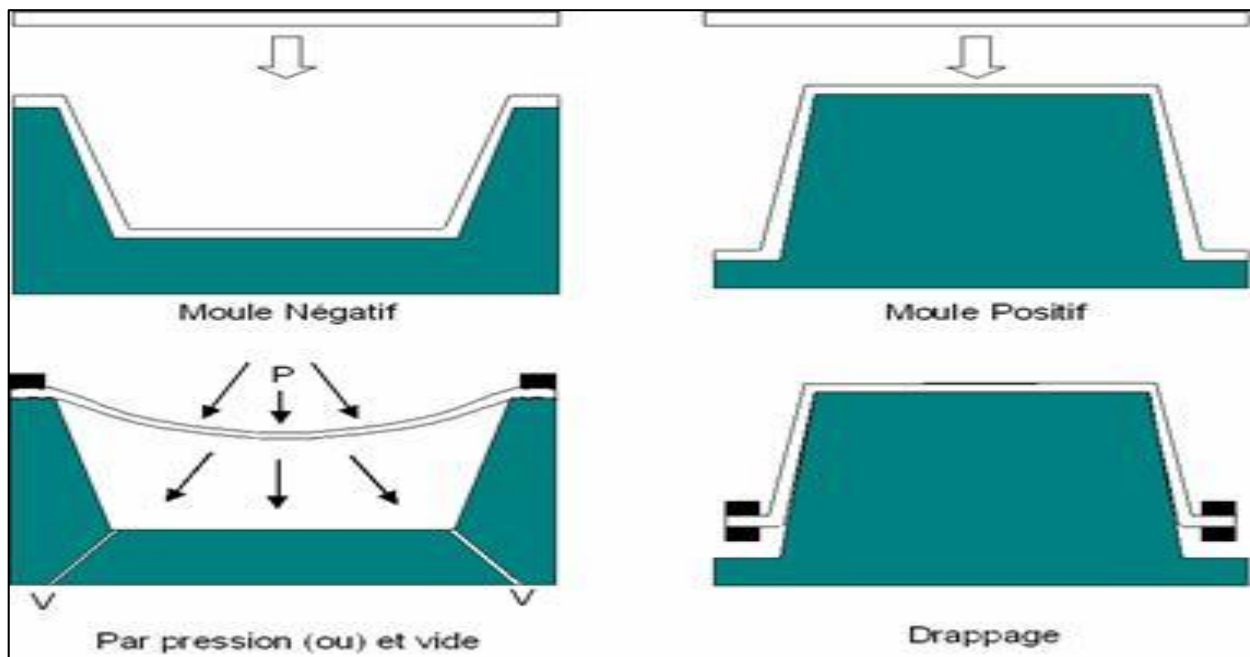


Figure II-4: thermoformage sous pression avec un moule positif et négatif [31].

II) 3.3 Thermoformage mixte (pneumatique et par pistonnage)

II) 3.3.1 Moule négatif assisté par un poinçon

La feuille est dans un premier temps poussée par un poinçon, puis aspirée contre le moule. L'étirement de la plaque est mieux réparti, le temps de formage est diminué et la profondeur de formage peut être plus importante que par formage uniquement pneumatique.

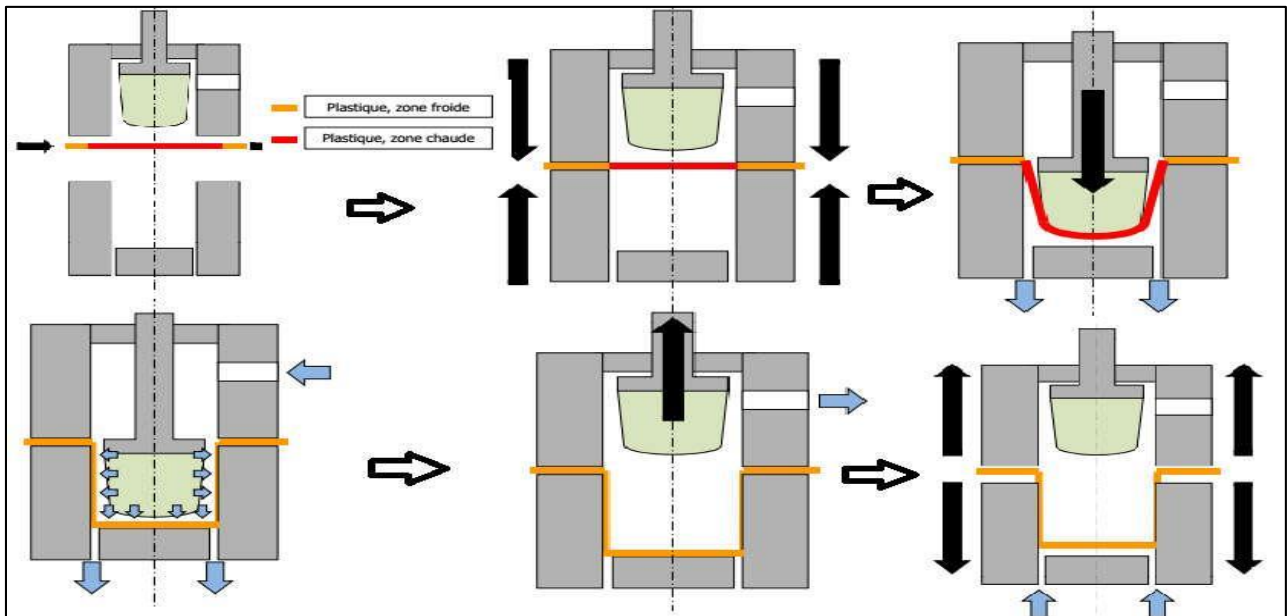


Figure II-5 : thermoformage sous pression avec un moule positif et négatif.

II) 3.3.2 Pistonnage sur moule positif

Cette méthode est généralement utilisée pour les moules à empreintes multiples et rapprochées, elle évite la formation de plis entre les noyaux. On utilise dans ce cas un cadre comme poinçon qui descend entre les noyaux.

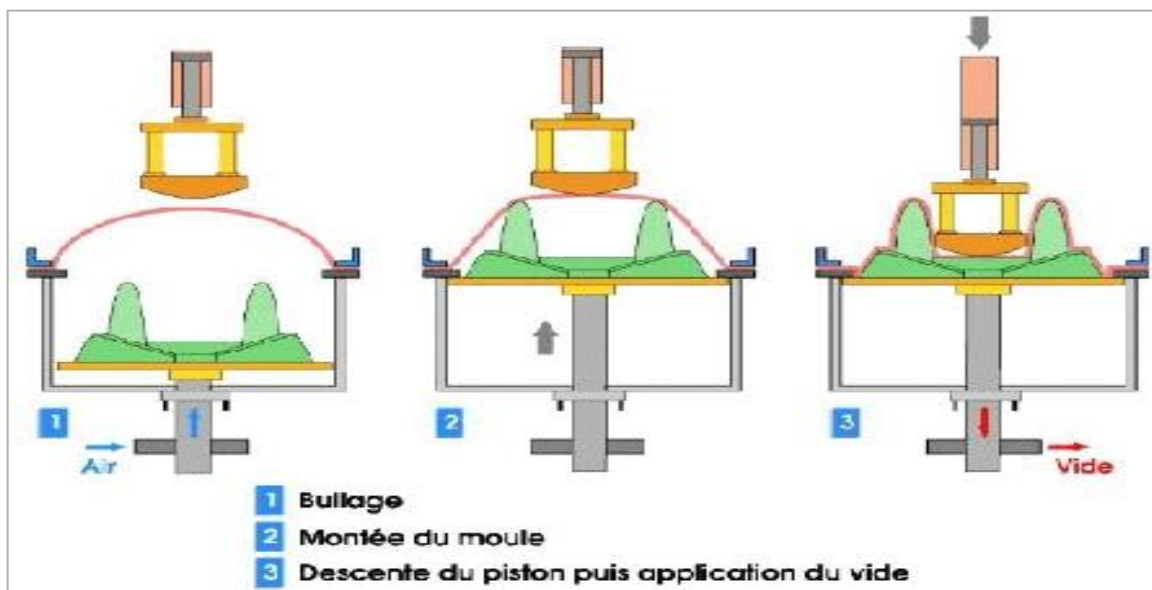


Figure II-6 : pistonnage sur moule positif avec bullage.

**II) 3.3.3 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.

*NB* : L'ensemble des techniques susmentionnées sont souvent utilisées simultanément dans un même processus en particulier dans des installations industrielles hautement automatisées.

**II) 3.3.4 Différences 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

*Tableau II-1 : différence entre moule positif et négatif.*

**II) 4 Les étapes du thermoformage****II) 4.1 Préparation 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. L'épaisseur de la feuille est classée par calibre, La jauge mince a généralement une épaisseur inférieure à 1,50 mm, tandis que le film est inférieur à 0,10 mm. Le calibre épais est supérieure 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. [32]

**II) 4.2 Séchage :**

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.

**II) 4.3 Chargement :**

Les feuilles fines sont généralement «alimentées en rouleaux» en utilisant un processus continu. Les feuilles épaisses prédécoupées ont 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.

**II) 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 de 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 cristallins nécessitent plus d'énergie pour l'augmentation de la température que les matériaux amorphes. Cela varie

encore avec le type et le taux de renforts et même de la couleur de la feuille. L'espace entre la feuille et la source de chaleur est une autre variable importante car la perte de chaleur augmente à mesure que l'espace augmente. L'espacement des éléments chauffants crée encore une autre variable. Par exemple, si des éléments chauffants Calrod sont utilisés et qu'ils sont distants de 100mm, la température de la feuille varie naturellement en fonction de cet espacement. 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.

#### **II) 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.

#### **II) 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 peut être refroidie 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.

#### **II) 4.7 Déchargement**

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.

## II) 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.

## II) 5 Les machines à thermoformer

### II) 5.1 Les types de machines

Il existe trois types de machines de thermoformage: les machines à feuilles mobiles ou à navette, les machines rotatives à feuilles et les machines à alimentation par rouleaux (en continue). Les étapes de processus varient selon les types de machine, bien que toutes les étapes soient incluses dans chaque processus.

#### II) 5.1.1 La machine à navette

Traite une seule feuille à la fois. Il s'agit donc d'un processus lent couramment utilisé pour les volumes faibles ou très gros produits.

#### II) 5.1.2 La machine rotative

Comporte plusieurs cadres de serrage pour feuilles simples, généralement 3 ou 4. Un poste est destiné au chargement et au déchargement. Une autre station contient le système de chauffage et l'autre station contient les processus de formage et de refroidissement.

#### II) 5.1.3 La machine en continu

Incorpore de nombreuses et peut-être toutes les étapes du processus dans une seule machine. Au sein de cette machine, le matériau d'alimentation en rouleau est chauffé, formé, refroidi, ajusté et souvent empilé pour l'emballage. Ce processus est le plus souvent utilisé pour les produits à très fort volume, notamment pour les produits jetables et les emballages. [27]

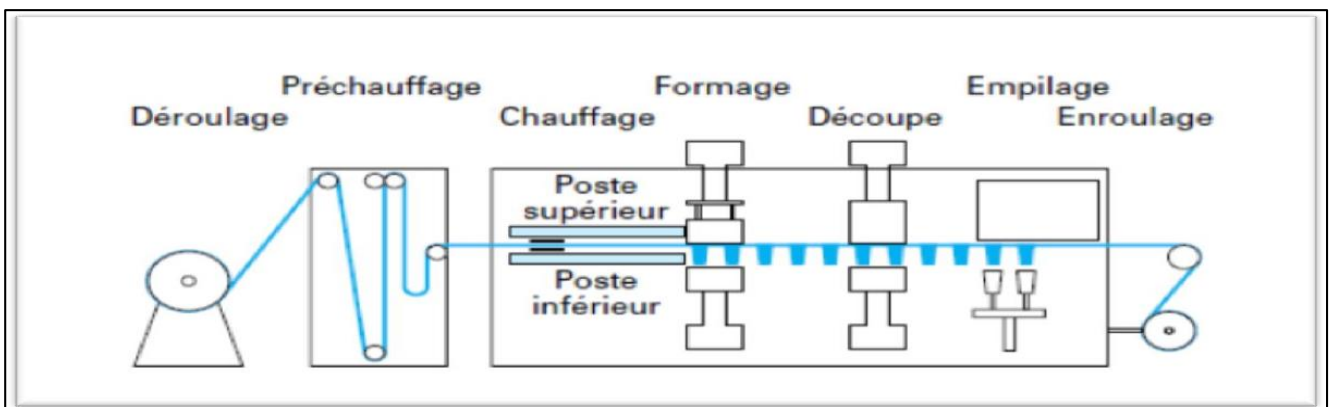


Figure II-7 : thermoformage sur machine en continu.

**II) 5.2 Caractéristiques des machines à thermoformer**

- ✓ Dimensions maximum du cadre de serre-flan
- ✓ Hauteur maximum du moule
- ✓ Puissance des plaques chauffantes ou panneaux radiants (panneaux radiants composés de plusieurs zones)
- ✓ Type de résistances radiantes utilisées:
- ✓ Type mesure de température (thermocouple ou capteur infrarouge)
- ✓ Options possibles: bullage, pistonnage, démoulage par air comprimé
- ✓ Type d'alimentation: (par porte bobine, dévidoir, et découpage)
- ✓ Débit de la pompe à vide. Volume de l'accumulateur de vide

**II) 5.3 Paramètres de réglage d'une machine à thermoformer:**

étape du cycle	Réglages
chauffage de la plaque	Température maximum des radiants pour diminuer le temps de chauffe sans brûler la plaque.
	Temps de chauffage minimum pour obtenir une température suffisante de la plaque à thermoformer sans dégrader le matériau.
Montée de la table	Vitesse rapide pour améliorer le formage de la pièce et diminuer le temps de cycle
Bullage	Réglage du débit et du temps de bullage pour obtenir une hauteur maximum de bulle sans formation de plis sur la pièce
	Le temps doit être court mais avec un grand débit d'air (cadence)
Aspiration	dépression et débit maximum pour former le plus rapidement possible la pièce sans plis ni marque due aux trous d'aspiration (0.5maxi pour une plaque de 1mm)
Retard ventilation	le refroidissement peut commencer lorsque le formage de la pièce est fini
Ventilation	l'orientation et le débit des buses de ventilation doivent être réglés de façon à obtenir un refroidissement uniforme et ne pas marquer la pièce.
	le temps de refroidissement doit être minimum: la pièce ne doit pas se déformer lors du démoulage. Attention la T° d'un moule non régulé n'est pas constante.
Démoulage	Le débit et le temps de soufflage doivent permettre de décoller totalement la pièce avant la descente du moule
Retard descente table	le retard de descente table doit être légèrement inférieur au temps de démoulage La descente du moule doit se réaliser pièce décollée du moule.
Descente table	La première vitesse de descente doit être faible pour ne pas endommager la pièce lors du démoulage, La deuxième sera rapide (cadence).

*Tableau II-2 : Paramètres de réglage d'une machine à thermoformer.*

**II) 6 Le système de chauffage radiant**

La caractéristique principale de tout système de chauffage est qu'il doit distribuer la chaleur uniformément. Les méthodes de chauffage peuvent varier du chauffage simple en four ou sur plaque chaude, aux appareils de chauffage plus sophistiqués : panneaux en céramique à infrarouges, bifaces ou mono-face, à même de chauffer la feuille d'un seul ou des deux côtés simultanément.

Le chauffage à infrarouges constitue la méthode la plus rapide de chauffage des feuilles ou des pellicules plastiques. Il existe un large éventail d'appareils à chauffage radiant : spirales (nichrome), tubes, panneaux en céramique, appareils à quartz et panneaux à gaz ininflammables. Généralement classés par leur densité énergétique, qui s'exprime souvent en *kilowatts par mètre carré* (kW/m<sup>2</sup>). La durée des cycles de chauffage est proportionnellement inverse au coefficient énergétique de l'appareil. Bien que les densités des appareils varient selon l'équipement choisi, les matériaux en eux-mêmes constituent également une variable supplémentaire. Les plastiques qui nécessitent une température de formage élevée, notamment les polycarbonates, sont les plus exigeants, le taux requis s'élevant à 45 kW/m<sup>2</sup>. Le polystyrène et l'ABS, dont les besoins énergétiques sont moindres, requièrent environ 25 kW/m<sup>2</sup>. En ce qui concerne les polymères cristallins, notamment le polyéthylène et le polypropylène, la densité énergétique standard de chauffage varie de 30 à 45 kW/m<sup>2</sup>

Les éléments de chauffage en céramique constituent les appareils de chauffage radiant les plus employés. Ils fonctionnent généralement à une température inférieure à la chaleur rouge (entre 430°C et 650°C) et émettent une chaleur à ondes longues (3,0 à 4,0 microns), aisément absorbée par les thermoplastiques. Ils présentent le léger inconvénient d'avoir une masse thermique élevée, ce qui ralentit leur durée d'échauffement (de 10 à 15 minutes) et leur temps de réaction lorsqu'il est nécessaire d'effectuer des réglages. Certains appareils de formage sous vide disposent maintenant d'une option-émetteurs à quartz. Ces derniers sont constitués d'une résistance en spirale à l'intérieur d'un tube en verre de quartz isolant, qui permet d'éviter tout relâchement. Ce dispositif de chauffage présente une masse thermique moindre ce qui améliore la performance de réaction de l'appareil.

L'émission d'ondes moyennes visibles des appareils à quartz présente également l'avantage d'être efficacement projetée grâce à des réflecteurs, de sorte qu'une grande partie de la chaleur peut être concentrée vers le bas. Le fait que la chaleur à ondes moyennes ne pénètre pas aussi profondément à l'intérieur des thermoplastiques que la chaleur à ondes longues constitue l'inconvénient principal des appareils à quartz. Il est donc nécessaire de redoubler de vigilance lorsqu'ils sont utilisés en conjonction avec des feuilles épaisses.

Même si ces appareils représentent un mode de chauffage très performant, leur efficacité décroît avec le temps et dépend entièrement du type d'appareil utilisé (voir tableau ci-dessous). Si les performances de chauffage diminuent, la feuille met plus de temps à atteindre la température de formage. De surcroît, la longueur d'onde radiante peut osciller vers l'extrémité la moins performante du spectre, phénomène qui se traduit par une diminution de l'absorption calorifique sur une période donnée, même s'il est possible de compenser toute perte d'efficacité par une augmentation de la température de chauffage de l'appareil. Du fait que l'efficacité de l'appareil de chauffage à thermoformage constitue le facteur clé d'un rendement optimal, le remplacement systématique et régulier de tous les éléments, aussi performants soient-ils, est conseillé. [33]

Appareil de chauffage	Performances ( % )		Durée normale d'utilisation (heures)	Performance en fin de vie utile	Performance standard à		
	neuf	Après 6 mois			12 mois	18 mois	24 mois
Spirale, Nichrome	16-18	08-10	1500	11-13	4-4,5	2-2,3	1-1,1
Tubes *	42	21	3000	19	10,5	5,3	2,6
Panneaux céramique	62	55	12-15 000	31-36	49	43	38
Appareil à quartz	55	48	8-10 000	33-36	42	37	32
Panneaux à gaz ininflammables	40-45	25	5-6 000	11-12	13	7	4

**Tableau II-3 : Performances et entretien des appareils de chauffage.**

Performance améliorée de 10 à 15 % par ponçage au papier de verre après 6 mois d'utilisation, gain de performance par remplacement de tous les réflecteurs.

Les plastiques conduisent mal la chaleur. Par conséquent, les feuilles épaisses nécessitent des cycles de chauffage disproportionnellement longs. Le chauffage bifaces de la feuille, que l'on nomme aussi la *méthode-sandwich*, raccourcit la durée des cycles. Il importe également que les appareils soient placés et orientés correctement par rapport à la feuille afin d'éviter tout sur chauffage. Le sur chauffage se caractérise par une modification de la couleur (soit un jaunissement) et l'apparition d'irrégularités en surface. En ce qui concerne les feuilles supérieures à 2,0 mm d'épaisseur, le chauffage des deux côtés de la feuille est obtenu en utilisant des appareils bifaces, qui permettent d'éviter les cycles de chauffage prolongés et le sur chauffage de l'une des surfaces de la feuille.

Le préchauffage des feuilles épaisses (dépassant 3,0 mm d'épaisseur) avant le formage contribue à la réalisation d'un formage de qualité supérieure et à l'optimisation du rendement du cycle de formage. Si la feuille est chauffée simultanément des deux côtés, il n'est pas nécessaire de préchauffer (à l'exception des feuilles dépassant 5,5 mm d'épaisseur). Afin d'éviter toute

dégradation, il est conseillé d'adopter le cycle le plus court possible. La durée du cycle est tributaire de l'efficacité du système de chauffage employé, de l'épaisseur de la feuille, ainsi que de la couleur et de la nature du matériau à former. [34]

## **II) 6.1 Les cycles de chauffage**

Le coefficient de chauffage est proportionnel à l'épaisseur de la feuille.

Lors du chauffage de feuilles ou de pellicules épaisses, la température en surface n'est pas beaucoup plus élevée que la température au centre de la pièce ou que la température moyenne. Les bulles d'air et défauts de surface ne constituent donc pas un souci majeur. Du fait que l'apport énergétique vers la surface de la feuille détermine la longueur du cycle de chauffage, les feuilles minces peuvent être chauffées à une densité énergétique élevée sur un cycle relativement court.

Le coefficient de chauffage des feuilles épaisses est déterminé par la tolérance critique de température en surface avant la formation de bulles d'air et la détérioration de la feuille. Du fait de la sensibilité des plastiques au rayonnement, le chauffage par radiation se limite au 0,25 mm externe de la feuille. La chaleur transmise vers et absorbée par l'enveloppe externe doit être conduite vers le centre de la feuille. C'est ce processus de transmission thermique qui détermine le cycle de chauffage des feuilles très épaisses. L'utilisation d'appareils bifaces, qui permettent de soumettre les deux côtés de la feuille plastique à la chaleur émise, se traduit par une réduction de la durée des cycles de chauffage.

Du fait que les plastiques conduisent mal la chaleur, il est possible que la température en surface des feuilles épaisses atteigne un degré excessif.

En ce qui concerne les feuilles très épaisses, la durée des cycles de chauffage est réglée par la température au centre de la feuille. Par conséquent, le coefficient de chauffage doit être réglé pour éviter le sur-chauffage en surface. Le haut gradient thermique que présentent les feuilles épaisses se traduit par une limitation des densités énergétiques des appareils de chauffage ainsi que des durées de chauffage requises. La feuille doit s'imprégner de chaleur. Par conséquent, il faut prolonger les cycles de chauffage et employer des appareils de chauffage à basse densité énergétique. En règle générale le chauffage des feuilles thermoplastiques doit être proportionnel au carré de l'épaisseur de la feuille, en admettant que tous les autres facteurs soient constants.

De surcroît, après avoir atteint la température de formage et après retrait de la source de chaleur, on laisse généralement un temps de pause pour que les températures atteignent un équilibre uniforme dans toute la feuille. Il s'agit de la période *d'*imprégnation, durant laquelle la température de la feuille se rapproche d'une valeur moyenne (voir Fig. ci-dessous). Le temps d'imprégnation est tributaire de nombreux facteurs, notamment de l'épaisseur de la feuille.

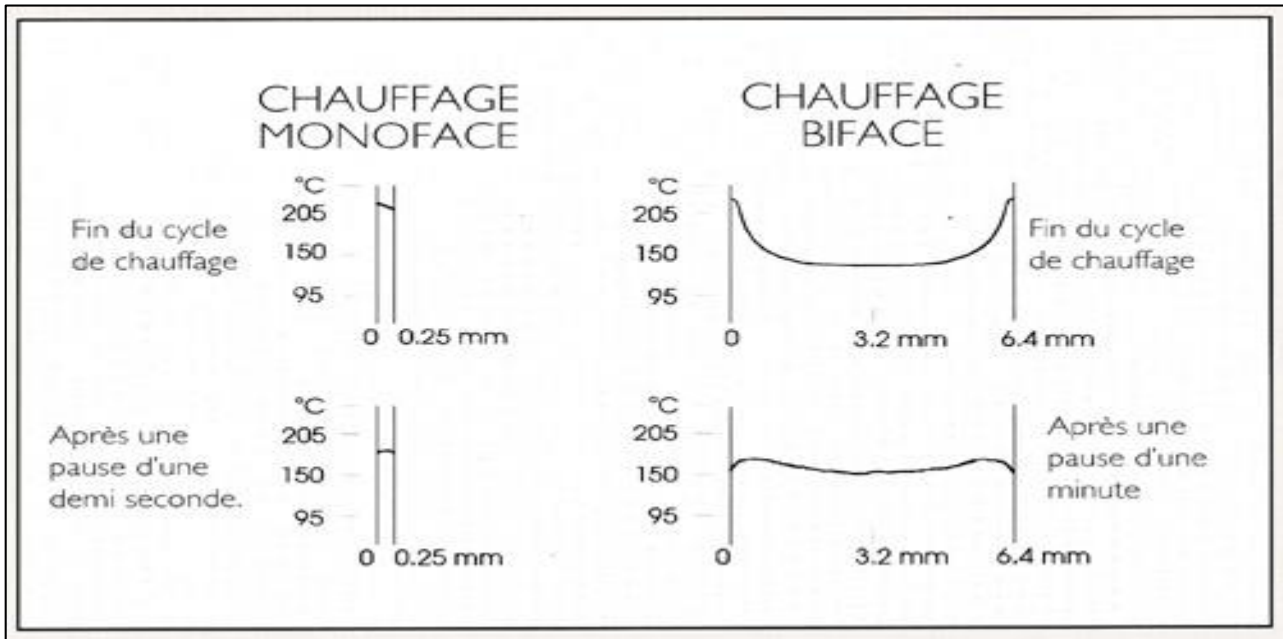


Figure II-8 : Profil-température, feuilles minces et épaisses.

## II) 7 Les Pompes à vide

Une pompe à vide est un type de pompe permettant de faire le vide, c'est-à-dire d'extraire l'air ou tout autre gaz contenu dans une enceinte close, afin d'en diminuer la pression. Les gaz à évacuer sont d'une part ceux présents au début de la mise sous vide (généralement à la pression atmosphérique) et d'autre part ceux émanant de phénomènes tels que le dégazage naturel des parois sous vide (voire de zones qui sont chauffées), de l'évaporation d'un liquide soumis à une pression plus faible, des fuites éventuelles (réelles ou virtuelles), de la perméabilité des joints ou des parois, voire d'introduction volontaire de gaz (lors du bullage par exemple), de l'évaporation de graisse. Une pompe à vide est, par définition (norme NF X 10-501), « un dispositif permettant de faire, d'améliorer ou de maintenir le vide ». On fractionne le vaste domaine des pressions couvert par les techniques du vide en sous-domaines. On peut en distinguer : [35]

- ✓ le vide grossier de  $10^5$  à  $10^2$  Pa ;
- ✓ le vide moyen de  $10^2$  à  $10^{-1}$  Pa ;
- ✓ le vide poussé de  $10^{-1}$  à  $10^{-5}$  Pa ;

Il existe plusieurs types de pompes à vide, à piston, palettes ou membrane, pour un bon choix de pompe en thermoformage il est nécessaire de tenir compte d'un certain nombre de paramètres interdépendants tels que :

- ✓ le débit-volume ou vitesse de pompage ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ).
- ✓ la pression limite d'aspiration (Pa)
- ✓ cadence des cycles (manuels ou automatisés)
- ✓ volume de la chambre à vide et diamètre des événements d'aspiration
- ✓ épaisseur et nature des films à thermoformer...etc.

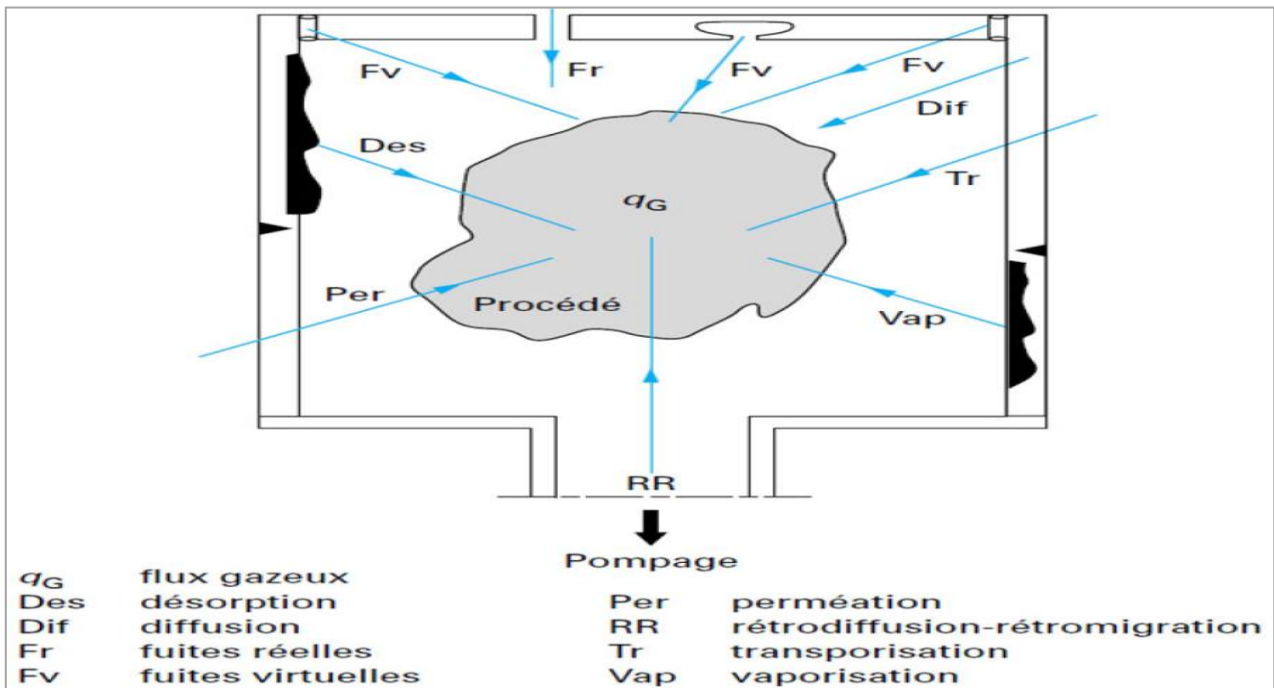


Figure II-9 : Charge de gaz à évacuer.

- ✓ Vaporisation : les molécules à la surface d'un matériau se transforment en gaz (pour les pompes mécaniques, la compression tend à recondenser ces vapeurs ce qui peut dégrader la pompe).
- ✓ Désorption de particules gazeuses adsorbées ou absorbées.
- ✓ Perméation : les gaz passent au travers des solides même si la paroi ne présente aucun trou.
- ✓ Transporisation : passage de gaz au travers de canaux capillaires.
- ✓ Rétrodiffusion : molécules du fluide moteur.

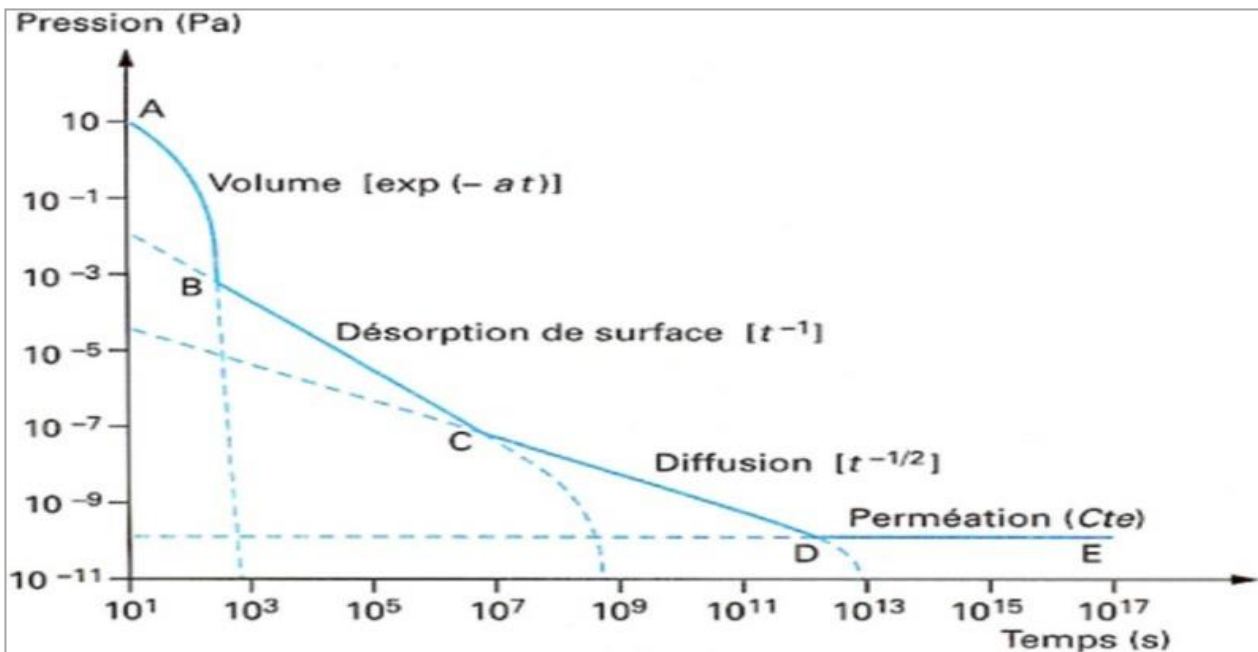


Figure II-10 : Charge des gaz en fonction de l'évolution de la pression.

**II) 7.1 Temps de pompage**

On cherche à évaluer le temps  $t$  nécessaire à l'obtention d'une pression donnée  $P$  à partir de la pression initiale  $P_i$  dans l'enceinte.

On néglige les débits de fuites (fuites réelles, transporisation...).

Pas de flux de traitement (apport de gaz extérieur)

Pas de désorption parois (dégazage solvant)

On montre que dans ces conditions :  $t = \frac{V}{Q_{vi}} \cdot \ln \frac{P_i}{P}$

Où  $V$  est le volume de l'enceinte... en mètre cube ou litre,  $Q_{vi}$  le débit de pompage moyen entre  $P_i$  et  $P$

**II) 8 Moules à thermoformer****II) 8.1 Outillage :**

Les techniques de thermoformage permettent d'utiliser un large éventail d'outillage destiné à la fabrication des moules. Les moules prototypes sont souvent fabriqués en bois, plâtre ou résine. En ce qui concerne les applications à haut débit, on choisit en général des matériaux qui conduisent bien la chaleur, lorsqu'il est impératif de contrôler la température. En général, on sélectionne l'aluminium, facilement coulé et usiné, et qui se prête bien à l'incorporation de spirales de refroidissement. [34]

L'usinabilité de l'aluminium pur est très mauvaise, ce métal est rarement utilisé à l'état pur, les alliages contiennent des éléments d'addition qui améliorent cette caractéristique. Les alliages aluminium-silicium sans adjonction de cuivre s'usinent relativement mal, mais les traitements thermiques (trempe revenu principalement) améliorent considérablement leur aptitude à l'usinage.

Les principales propriétés de l'aluminium sont :

- ✓ Bon conducteur de la chaleur et de l'électricité
- ✓ Faible masse volumique :  $2,7 \text{ kg/dm}^3$
- ✓ Point de fusion :  $658^\circ \text{ C}$
- ✓ Faible module d'Young :  $70000 \text{ N/mm}^2$
- ✓ Faible limite élastique
- ✓ Fort allongement à la rupture (tôles minces, feuilles, papier)
- ✓ Bonne conductibilité (67 % de celle du cuivre).
- ✓ Retrait moyen 1.40 %

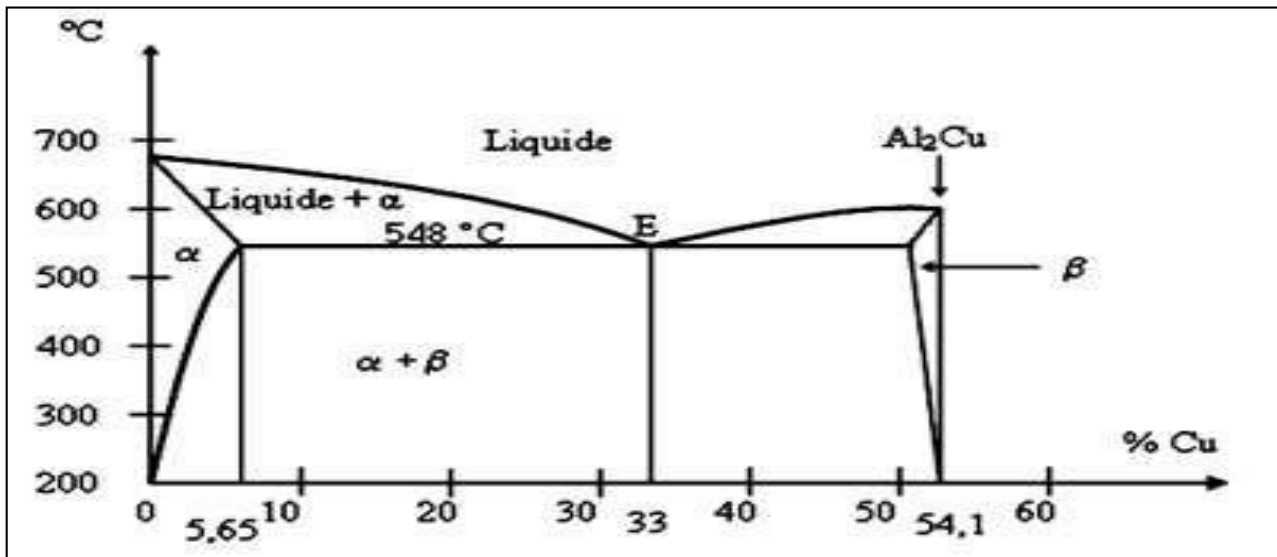


Figure II-11 : Diagramme binaire Al-Cu [36].

**II) 8.2 Cavités à vide**

Les cavités à vide doivent être incorporées au moule à l'extrême contact entre moule et feuille, afin de minimiser les risques de bulles d'air résiduelles qui empêchent d'achever le formage de la pièce. En ce qui concerne les feuilles minces, les cavités doivent avoir un diamètre compris entre 0,25 et 0,40 MM. Pour ce qui est des feuilles épaisses, le diamètre doit être compris entre 1,0 et 1,5 mm ou plus, pourvu que les cavités ne laissent pas de marques ou de défauts sur la pièce formée.

Épaisseur de la feuille (mm)	Diamètre de la cavité à vide (mm)
< 1,5	0, 25
1,5 – 6,0	0,8 – 1,15
> 6.0	< 1,5

Tableau II-4 : diamètre des cavités en fonction des épaisseurs.

**II) 8.3 Angles de dépouille**

Les moules femelles sont plus faciles à démouler que les moules mâles. Au démoulage, certains moules femelles ne nécessitent aucun angle de dépouille sur la surface externe de la pièce, car la pièce peut se retirer d'elle-même. En général, les moules femelles doivent cependant être pourvus d'un angle de dépouille de 2 à 30. Pour faciliter le démoulage, les moules mâles doivent être pourvus d'un angle de dépouille compris entre 5 et 7°.

**II) 8.4 Profondeur d'étirage**

La profondeur de l'étirage est le rapport de l'épaisseur moyenne de la feuille divisé par l'épaisseur moyenne de la pièce moulée. Il s'agit d'un facteur primordial qui détermine l'épaisseur moyenne finale de la pièce formée. En ce qui concerne les étirages moyennement profonds (soit < I:

I), un drapage mâle produira une épaisseur de paroi plus uniforme que le simple formage sous vide femelle. En ce qui concerne les étirages très profonds, ou pour ce qui est des rapports supérieurs à  $I : I$ , il est conseillé d'avoir recours au formage femelle à tampon de renfort, afin d'optimiser la distribution uniforme du matériau (voir tableau II-5).

Technique thermoformage	de	Moule	Rapport épaisseur / largeur
Sous vide		femelle	< 0.5:1
Drapage		mâle	< 1:1
Vide tampon-renfort		femelle	> 1:1

*Tableau II-5 : Epaisseur d'étirage.*

## II) 8.5 Rayons d'angles / concentration de tension

Il a été démontré que la durée de vie utile et la résistance structurelle d'une pièce ne jouent qu'à 30% dans la conception d'une pièce, lorsque le facteur de concentration de tension est élevé. La concentration excessive de tension mécanique est le résultat d'un manque de rayons d'angle adéquats. Dans toute pièce qui présente une entaille, une rainure ou toute dépression transversale, si petite soit-elle, la tension maximale se concentre immédiatement autour de ces secteurs. Minimiser les dépressions transversales abruptes et les angles aigus

Afin d'optimiser la résistance des pièces formées, il suffit d'avoir recours à une bordure ou à des rayons d'angles appropriés. Le rayon doit au moins être équivalent à l'épaisseur de la paroi de la feuille et ne jamais être inférieur à 0,8 MM. Les concentrations de tension sur la pièce moulée sont inversement proportionnelles à la taille du rayon d'angle.

## II) 8.6 Le Retrait des pièces thermoformées:

Le retrait est un facteur primordial et se manifeste sous trois formes :

- ✓ le retrait en moule
- ✓ le retrait post-formage
- ✓ le post-retrait

### II) 8.6.1 Retrait en moule

Lorsque le thermoplastique est chauffé et formé sur moule, un retrait du matériau se manifeste durant le cycle de refroidissement. Après obtention d'une température en surface se prêtant au démoulage de la pièce formée, les dimensions de celle-ci auront légèrement diminué par rapport à ses dimensions de formage. Ce phénomène de retrait en moule varie selon le traitement et les modèles mais aussi selon le matériau employé.

En ce qui concerne le dragage mâle, le retrait est moins critique par rapport aux dimensions finales de pièce. En effet, au refroidissement, le matériau se rétracte sur le moule rigide, ce qui retarde l'effet de retrait. Même si ce procédé présente des avantages en ce qui concerne les dimensions de la pièce finale, les moules doivent être pourvus d'angles de dépouille adéquats afin de soulever la pièce du moule. Inversement, au formage sous vide femelle, le matériau se rétracte du moule.

### II) 8.6.2 Retrait post formage

Après démoulage, la perte de chaleur de la pièce placée à température ambiante fait qu'elle se rétracte à nouveau. En effet, la pièce chaude continue à se rétracter à mesure que le centre ou le noyau du plastique se refroidit. Le retrait ne s'arrête que lorsque la température a atteint un équilibre à l'intérieur de la pièce refroidie.

### II) 8.6.3 Post-retrait

Ce phénomène est associé à la contraction (ou l'expansion) normale d'un objet due à des modifications de température ou d'humidité.

Le retrait s'effectue en quasi-totalité en ce qui concerne les polymères amorphes et à 75% pour ce qui est des thermoplastiques cristallins, dans les quelques heures qui suivent le moulage. Le retrait résiduel de 25 % en ce qui concerne les polymères cristallins se termine après 24 heures, à moins que l'emploi ultérieur d'éléments à haute température ne vienne susciter un nouveau phénomène de cristallisation et de retrait. Environ 50% du retrait s'effectue sur le moule. Le coefficient de retrait est tributaire de la température de formage du matériau, de sa température de transition vitreuse ainsi que de la température du moule. Il est également fonction du degré de cristallinité: les matériaux à haute teneur cristalline se rétractent généralement plus que les polymères amorphes. Les paramètres de retrait standard des pièces en polymères thermoformés sont exprimés dans le tableau ci-dessous.

Polymère	Paramètre de retrait en %
ABS	0.3-0.8
GPPS	0.3-0.5
HIPS	0.5 – 0.6
PMMA	0.3 – 0.8
PVC (rigide)	0.4 – 0.5
PVC (plastifié)	0.8 – 2.5
LDPE	1.6 – 3.0
HDPE	3.0 – 3.5
PP	1.5 – 2.2

*Tableau II-6: Paramètre de retrait des pièces thermoformées.*

**II) 9 Le Serre flan**

Le rôle du serre-flan est de maintenir fermement la plaque à thermoformer pendant son chauffage, résister à un éventuel bullage, au chargement dû à la remontée du moule puis à la dépression générée par le vide.

Pour les opérations de formage où les forces de traction appliquées au matériau sont minimales, les surfaces de serrage peuvent être lisses ou légèrement rugueuses. Lorsque les forces de traction sont supérieures, les forces de serrage nécessaires seraient disproportionnées. Les surfaces de serrage doivent donc être aménagées, en fonction du procédé, de manière à assurer un blocage du matériau pendant le formage tout en ne nécessitant qu'un minimum d'éléments ou de forces de serrage. On doit veiller parallèlement, là où c'est nécessaire, à une bonne étanchéité.

Les forces de serrage nécessaires sont fournies soit par des presses hydrauliques, soit par des éléments de serrage à action mécanique, pneumatique ou hydraulique.

Pour le formage par traction sous pression et certaines méthodes de formage combinées, il est nécessaire d'utiliser des éléments de serrage à ressorts. Ces éléments doivent être si possible construits de manière à contrôler les forces de serrage selon le besoin. Cela peut se réaliser en palier en changeant les ressorts, ou bien de manière continue par une précontrainte des ressorts ou par une régulation électronique. [37]



*Figure II-12 : Pinces pour serrage.*

**II) 10 Calcul de l'épaisseur moyenne d'une pièce**

Il est possible de se faire une idée de l'épaisseur moyenne d'une pièce à partir de l'épaisseur de la plaque utilisée (pour des formes simples). Le calcul est relativement simple, le volume d'un matériau étant le même à température égale :

Si  $V_1$  (volume de la plaque) =  $S_1$  (surface de la plaque)  $\times e_1$  (épaisseur de la plaque)

et si  $V_2$  (volume de la pièce) =  $S_2$  (surface de la pièce)  $\times e_2$  (épaisseur de la pièce)

$$V_1 = V_2 \text{ donc } S_1 \times e_1 = S_2 \times e_2 \text{ alors } e_2 = \frac{S_1}{S_2} \times e_1$$

**II) 11 Domaine d'application**

Le tableau suivant indique quelques domaines d'application du procédé de thermoformage des thermoplastiques

Matière	domaines d'application	avantages et inconvénients	T° de formage	T° de moule	T° de poinçon
A.B.S	carrosserie de voiture, bateau, planche à voile, moto, machine	- faible prix de la matière - facilité de transformation - non auto-extinguible	140-200°	20-95°	80-120°
P.S-B	Idem à A.B.S + emballage de produits alimentaires et articles de consommation	Idem à A.B.S - matière alimentaire sauf pour les matières grasses - faible résistance mécanique	130-200°	20-80°	80-120°
P.S	Produits alimentaires, conditionnement ( blisters, pelliculage )	Idem à A.B.S - matière alimentaire - bonne transparence	110-160°	20-80°	80-120°
P.V.C	Idem à P.S-B + pièces devant résister au feu	Idem à P.S-B - matière auto-extinguible	140-180°	40-46°	60-150°
P.M.M.A	cockpits d'avions, lampadaires déflecteurs d'air pour automobiles, bulles de plafonds, baignoires	- prix de matière élevé - très bonnes propriétés optiques - bonne stabilisation au vieillissement	110-160°	50-65°	80-120°

PC	pièce devant résister à des efforts mécaniques importants: bouclier de C.R.S, panneaux publicitaires, casques, bulles de plafonds, borne signalétique	- très bonnes propriétés mécaniques - prix de matière très élevé - très bonne stabilité au vieillissement et à la chaleur	180-220°	40-150°	
P.P / PE	Carters, boîtiers pour l'industrie chimique feuille de skinpack	- très bonne résistance chimique et thermique. Bonne élasticité - matière alimentaire	160-220°	40-90°	80-030°

*Tableau II.7. Domaine d'application du thermoformage de thermoplastiques.*

## II) 12 Avantages du thermoformage des thermoplastiques

### II) 12.1 Faibles coûts des équipements:

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 inférieur à 1 Bar pour le formage sous vide et inférieur à 10 Bars pour le formage sous pression sans citer le moulage par injection qui se fait à plus de 680 Bars.

### II) 12.2 Faibles coûts 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.

### II) 12.3 Délai, 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.

### II) 12.4 Rapports surface / épaisseur considérable

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

### II) 12.5 Large variété de plastiques disponibles

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

**II) 12.6 Multicouches**

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

**II) 13 Limites et désavantages du thermoformage****II) 13.1 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».

**II) 13.2 Coût 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.

**II) 13.3 Découpe**

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 d'une des 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.

**II) 13.4 Coût du matériau 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.

**II) 13.5 Géométrie limitée**

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.

**II) 13.6 Plage de température utile**

Le thermoformage étant un formage et non un moulage, le produit a une «mémoire 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.

**II) 14 Le thermoformage des composites à matrices thermoplastiques****II) 14.1 Description du procédé**

Les procédés de thermoformage des composites s'appliquent aux pièces minces (différence marquée entre l'épaisseur et les autres dimensions) dont l'épaisseur reste généralement uniforme sur la totalité de la pièce. Ils impliquent la déformation d'une plaque de composite, initialement plane, que l'on appelle le flan. Ainsi, le flan, dont la matrice est à l'état fondu, est alors mis en forme en le comprimant contre la surface d'un moule rigide. La conformation du flan sur le moule définit la géométrie finale de la pièce. Il existe une multitude de procédés de thermoformage des composites qui varient en fonction de la façon dont la déformation du flan s'effectue. Ces procédés figurent sous quatre classes, suivant la façon dont la déformation du flan s'effectue lors du moulage. [24]

**II) 14.2 Le moulage sous vide avec diaphragme (diaphragm forming)**

(Voir illustrations plus haut) Consiste à insérer le flan entre deux diaphragmes de manière à former une enveloppe hermétique. Le vide est ensuite fait à l'intérieur de cette enveloppe. Comme pour tous les procédés de thermoformage des composites, le tout est préchauffé dans un four à une température excédant la température de fusion de la matrice. Le flan est ensuite placé au-dessus de la cavité du moule. Une pression négative (vacuum) est ensuite appliquée à l'intérieur de la cavité du moule et une pression positive (facultative) est appliquée à l'autre surface du flan. Les différences de pression engendrées entre les deux surfaces du flan provoquent la déformation de ce dernier jusqu'à se conformer complètement au moule.

**II) 14.3 L'hydroformage**

On utilise un réservoir muni d'une membrane élastique. Le réservoir est rempli d'un liquide quelconque. Lors de la mise en forme du flan, un poinçon, ayant la forme finale de la pièce, vient presser le flan, à l'état fondu, sur la membrane du réservoir. La pression hydrostatique ainsi générée conforme le matériau à la géométrie du poinçon.

**II) 14.4 Le moulage sur caoutchouc**

Il se divise en 2 types. Le premier est similaire au procédé d'hydroformage, à la différence qu'il emploie un bloc de caoutchouc pour remplacer le réservoir de liquide et la membrane élastique. La conformation est alors assurée par la déformation du caoutchouc et sa rigidité. Le deuxième type de moulage sur caoutchouc est plus près du moulage par thermoformage-estampage. Il emploie un moule bipartite composé d'une matrice rigide et d'un poinçon en caoutchouc. Dans ce procédé, le flan est conformé à la matrice du moule par l'effet de la pression quasi hydrostatique fournie par le poinçon en élastomère, lequel peut subir de grandes déformations.

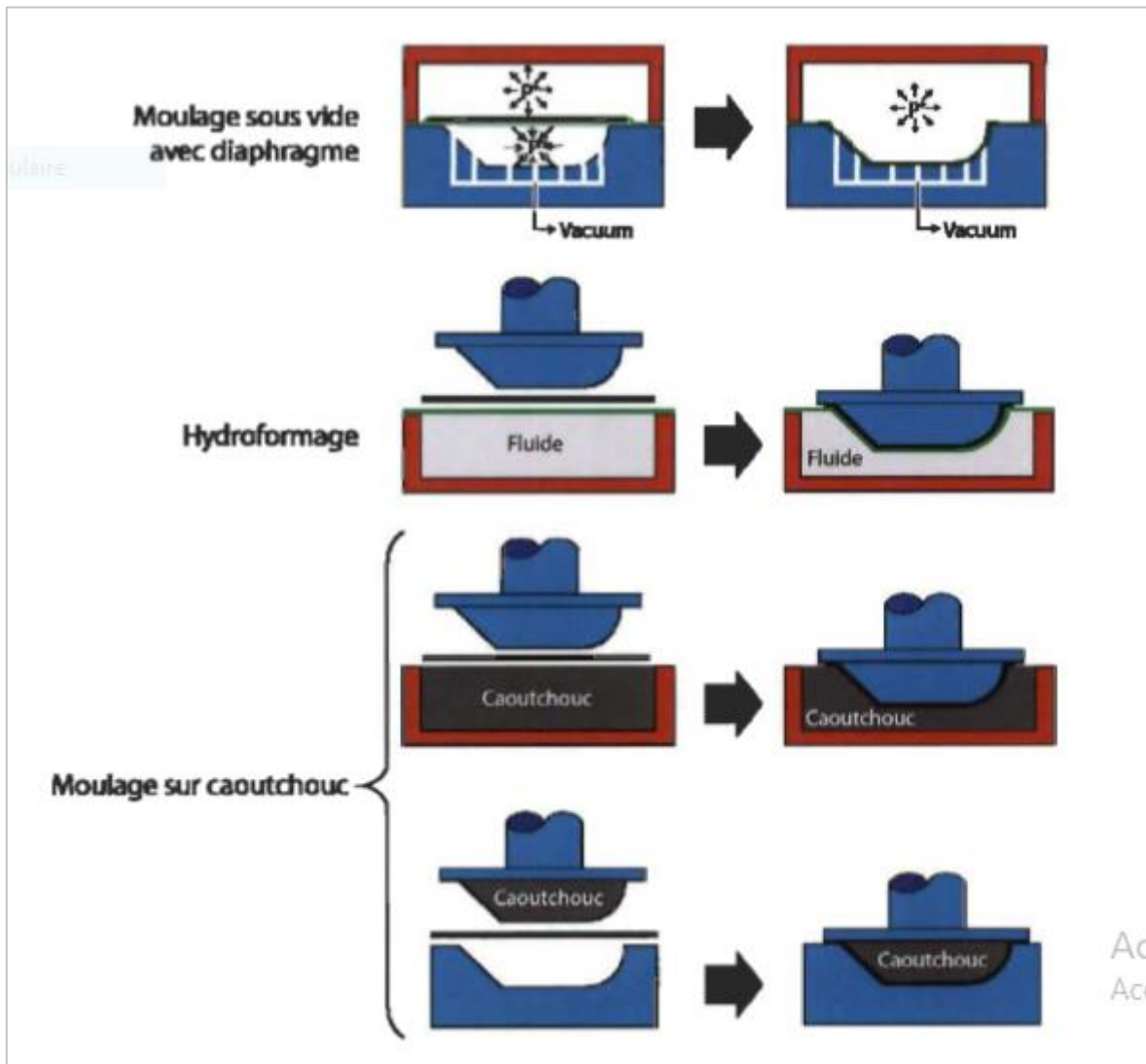


Figure II-13 : Principe du moulage sous vide, hydroformage et moulage sur caoutchouc.

II) 14.5 Le procédé de thermoformage-estampage

Le procédé en soi implique l'utilisation d'un moule rigide bipartite, composé d'un poinçon et d'une matrice. D'abord, le flan est placé dans un cadre support puis est transféré dans un four pour y être préchauffé. La température de préchauffage dépend de plusieurs facteurs, mais elle doit être suffisamment élevée pour fondre complètement la résine thermoplastique. Une fois la température de préchauffage atteinte, le flan est transféré entre le poinçon et la matrice pour y être conformé. Le moule peut être chauffé ou laissé à la température de la pièce. Encore une fois, le choix de chauffer ou non le moule est fonction de nombreux facteurs. Une fois le moule refermé, la pression d'estampage est maintenue pendant un court instant afin de permettre à la matrice thermoplastique de se solidifier. Une fois la pièce suffisamment rigide pour être manipulée, elle est démoulée et rognée. Dans certains cas, l'utilisation d'un système de serrage spécialisé, appelé « serre-flan », est indiquée. Sa fonction principale étant d'induire une contrainte de tension dans le composite, il influence la déformation du matériau sur deux plans: il favorise le réarrangement des fibres par

cisaillement intrapli et réduit les contraintes de compression planes auxquelles sont sujettes les fibres.

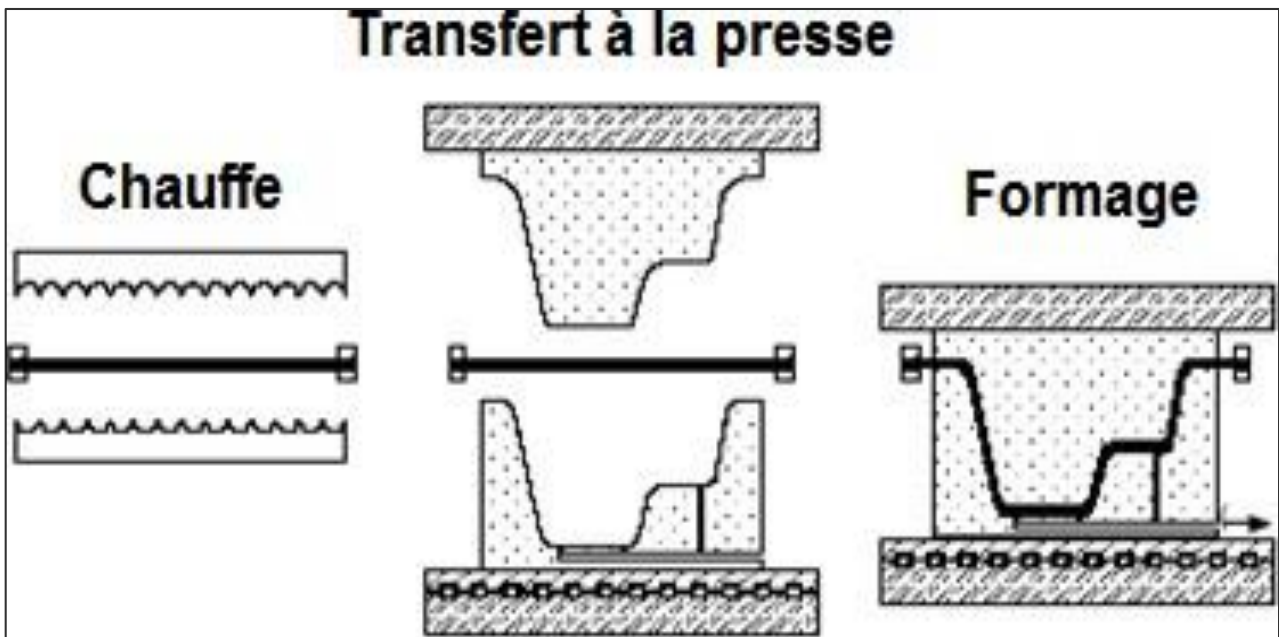


Figure II-14 : Le procédé de thermoformage-estampage.

II) 14.6 Equipements et outillages

Les procédés susmentionnés sont similaires au thermoformage de TP non renforcés, toutefois les montées en température nécessaires à la fusion de la résine et les pressions de formage exigent un équipement plus performant notamment un outillage métallique (moules en acier, pinces, serre flan ...etc.), four de chauffe et presse, ce qui augment substantiellement les couts de revient.



Figure II-15 : Cadre-support avec un flan installé, prêt à être préchauffé.

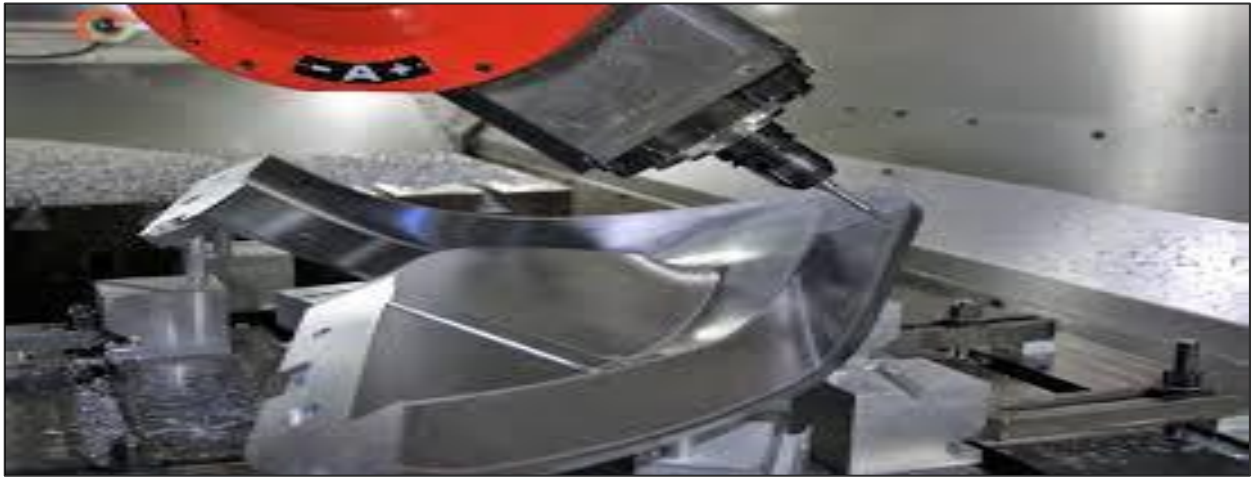


Figure II-16 : Usinage sur CNC d'un moule pour thermoformage .

II) 14.7 La Température de mise en forme

- ✓ Les composites TP à fibres continues nécessitent des températures de mise en œuvre de ~200°C et plus.
- ✓ Pour les composites TP aéronautiques, les températures de mise en œuvre sont de ~300°C et plus.
- ✓ La mise en œuvre des composites TP nécessite l'utilisation de moules chauffés : ~80°C pour le PA6 et ~60°C pour le PP. [19]

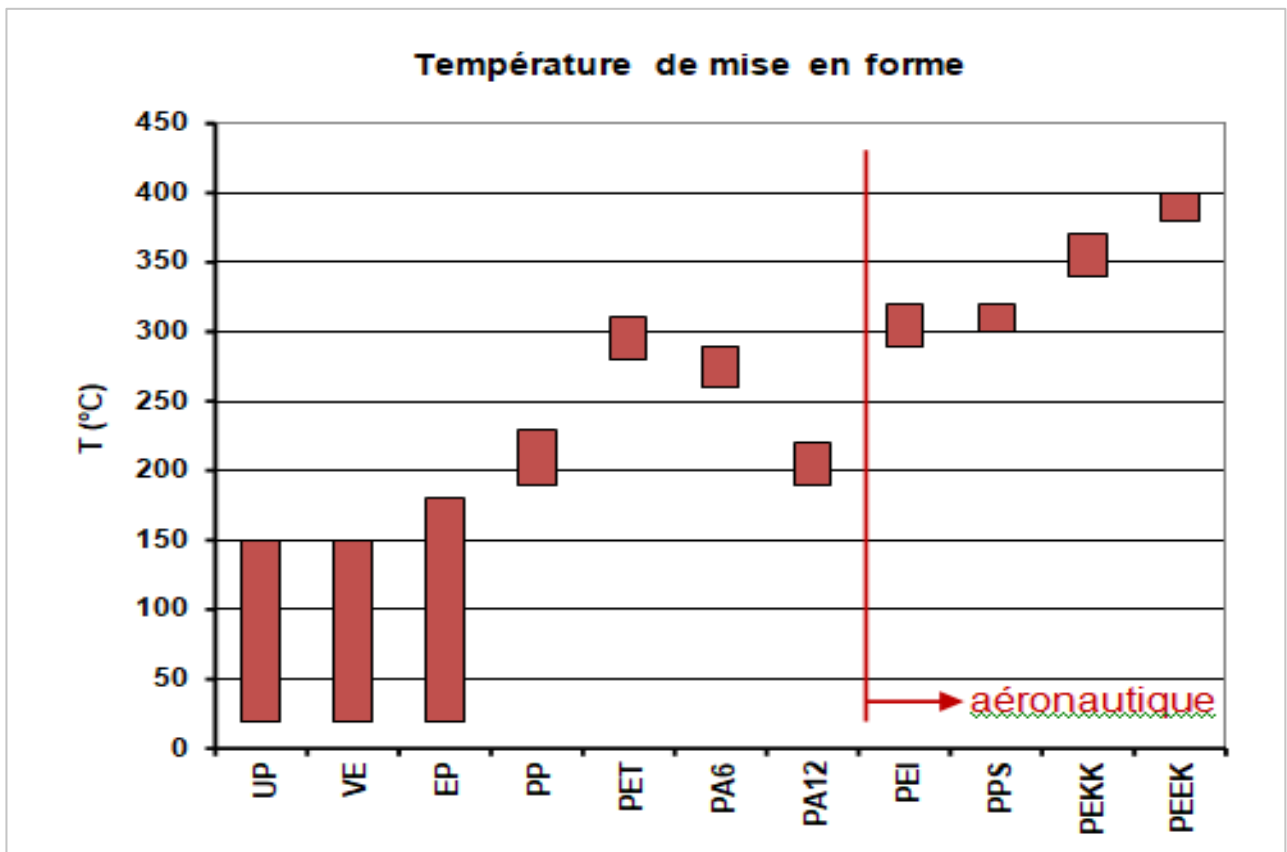
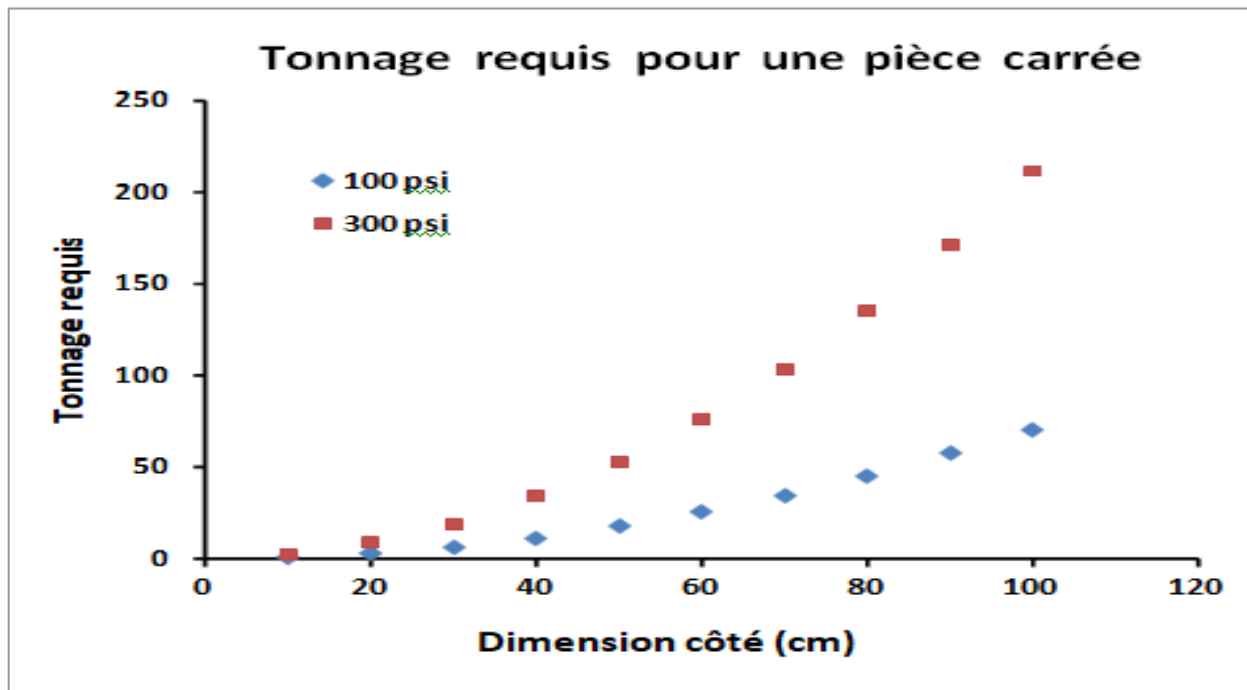


Figure II-17 : Température de mise en forme des composites thermoplastiques à fibres continues.

**II) 14.8 Pression de formage: 100-300 psi (7-20 bars)**

- ✓ Il est Possible de faire de l'estampage en utilisant des presses de relativement bas tonnage, Ex. Presse à "ballons" pour diminuer l'investissement nécessaire.
- ✓ Applications « industrielles » ne nécessitent pas de grandes vitesses de fermeture, Seulement éviter un refroidissement trop important.
- ✓ Applications aéronautiques : Requièrent des vitesses de fermeture de presse rapides pour éviter un refroidissement rapide dû à l'écart important entre la température du matériau et la température ambiante ainsi optimiser le taux de cristallinité et éviter la déconsolidation durant la période de chauffe. [25]



*Figure II-18 : Tonnage requis pour une pièce carrée.*

**II) 14.9 Exemple de plateforme de moulage**

- ✓ Tonnage: 100 tonnes min - 1250 tonnes max
- ✓ Dimension des plateaux: 1.1 m x 1.3 m
- ✓ Four IR: Température maximale: 425 °C
- ✓ Zones de chauffe contrôlées de façon indépendante
- ✓ Dimension maximale des feuilles: 1,2 m x 1,2 m
- ✓ Plateaux chauffants: 425 °C max
- ✓ Temps de maintien: 10 s à 6 heures ou plus



*Figure II-19 : plateforme de moulage, CNRC Canada [19].*

#### II) 14.10 Domaine d'application

- ✓ Aéronautique : Raidisseurs, Pièces intérieures
- ✓ Automobiles : Structures sièges, Compartiments, coussin gonflable...etc.
- ✓ Construction/infrastructure : Panneaux de coffrage, Maisons temporaires, Conduits
- ✓ Électronique : Boitiers téléphones cellulaires.
- ✓ Équipement orthopédique.
- ✓ Militaire : Protection personnelle, Blindages véhicules.
- ✓ Sports et loisirs : Souliers, Équipements de protection, Équipements sports d'hiver...etc.
- ✓ Transport : Jupes aérodynamiques, Murs intérieurs semi-remorques.

#### II) 14.11 Avantages du thermoformage des composites

- ✓ En raison de l'intérêt démontré par l'industrie automobile, plusieurs nouveaux fournisseurs sont apparus au cours des dernières années, les motivations de l'industrie automobile: Réduction de poids, Nouvelles règles en matière de consommation de carburant et d'émission de Gaz à effet de serre.
- ✓ De plus en plus de grandes entreprises du secteur des polymères TP offrent des composites thermoplastiques à fibres continues, l'Utilisation n'est plus réservée à l'industrie aéronautique et autres marchés niches.

- ✓ Courts temps de cycle, Pas d'étape de « réticulation »
- ✓ Des propriétés similaires peuvent être obtenues pour des composites thermoplastiques et des composites thermodurcissables
- ✓ Les TP n'utilisent pas de solvant et sont à 100% polymérisés.
- ✓ Environnement, rejets dans l'air, Gestion des déchets solides, Santé-sécurité
- ✓ Résistance au feu accrue.
- ✓ Tolérance à l'endommagement, au Propagation de fissure, Résistance à l'impact, Résistance à l'abrasion
- ✓ « Recyclabilité », Côté « vert » à ne pas négliger
- ✓ Requier peu de main-d'œuvre
- ✓ Adapté à la production de composites renforcés de fibres de carbone, de fibres de verre et de fibres aramides

#### **II) 14.12 Limites du thermoformage des composites**

- ✓ Encore méconnus par une grande portion de l'industrie des composites.
- ✓ Coût équipement, Coût des moules, Outillages métalliques, Presse/four
- ✓ Nouveaux marchés à développer
- ✓ Nouvelle expertise requise
- ✓ Fini de surface : Encore un problème avec les TP, Peu de façon d'obtenir un fini esthétique.
- ✓ Comme pour les TP non renforcés, le cout du rognage est un inconvénient.
- ✓ Géométrie encore plus limitée que pour les TP non renforcés.

#### **II) 15 Conclusion**

En pratique, le terme générique de thermoformage regroupe un large panel de technologies différentes, plus ou moins complexes et automatisées selon l'application. Il peut s'agir du simple drapage manuel d'une feuille sur une forme (fabrication de baignoires par exemple) jusqu'aux lignes de thermoformage continues à hautes cadences intégrant éventuellement l'extrusion des plaques.

De nombreux paramètres technologiques peuvent contrôler la qualité finale des pièces obtenues : L'outillage (poinçon et moule), nature, géométrie, propriétés tribologiques (rugosité), température, vitesse et course du poinçon, pression et débit de soufflage, la contrainte induite par le serre-flan.

Le plus grand avantage du procédé est la rapidité du cycle et si le thermoformage de thermoplastiques a fait ses preuves en industrie, celui des composites thermoplastiques est très complexe et nécessite de nouvelles expertises.

# Chapitre III

Etude, conception et  
réalisation

**III) 1 Introduction**

Dans ce chapitre nous nous proposerons de réaliser un banc d'essais de thermoformage sous vide car cette technologie à l'avantage d'être très économique. De plus Il se trouve que sa mise en œuvre est à notre portée et ne fait appel qu'à des outils simples et conventionnels. En thermoformage la difficulté réside surtout dans la prédiction du comportement du flan à thermoformer lorsqu'il est soumis à l'action de la température et du chargement. Aussi nous espérons avoir réalisé un outil didactique fort utile à d'éventuelles futures études dans le domaine du thermoformage.

**III) 2 Cahier des charges**

Le dispositif doit répondre au cahier de charge ci-dessous :

- ✓ Thermoformage à vide.
- ✓ Dimensions de la plaque à thermoformer : 500×500 mm.
- ✓ Profondeur du moule 150 mm maximum.
- ✓ Epaisseur : 0.3-2 mm (ce qui couvre un large panel de plaques à thermoformer)
- ✓ Système de chauffage mono-face.
- ✓ Montée en température : le système de chauffage doit être capable de chauffer des plaques en composites.
- ✓ La conception doit permettre d'apporter des modifications futures au dispositif en vue de l'améliorer (chauffage biface, automatisation.....)
- ✓ les parties sensibles doivent être démontables.
- ✓ Des options peuvent compléter le fonctionnement comme le système de refroidissement, démoulage par compression...etc.
- ✓ Le dispositif doit pouvoir assurer l'application simultanée d'un cycle thermique et de pression (T, P, t) sur l'échantillon à élaborer ;
- ✓ L'assemblage du dispositif doit permettre une utilisation facile (montage, introduction des matières premières, extraction de l'échantillon) ;
- ✓ Alimentation électrique en 220 V / 60Hz.
- ✓ Dispositif manipulable par un seul opérateur.

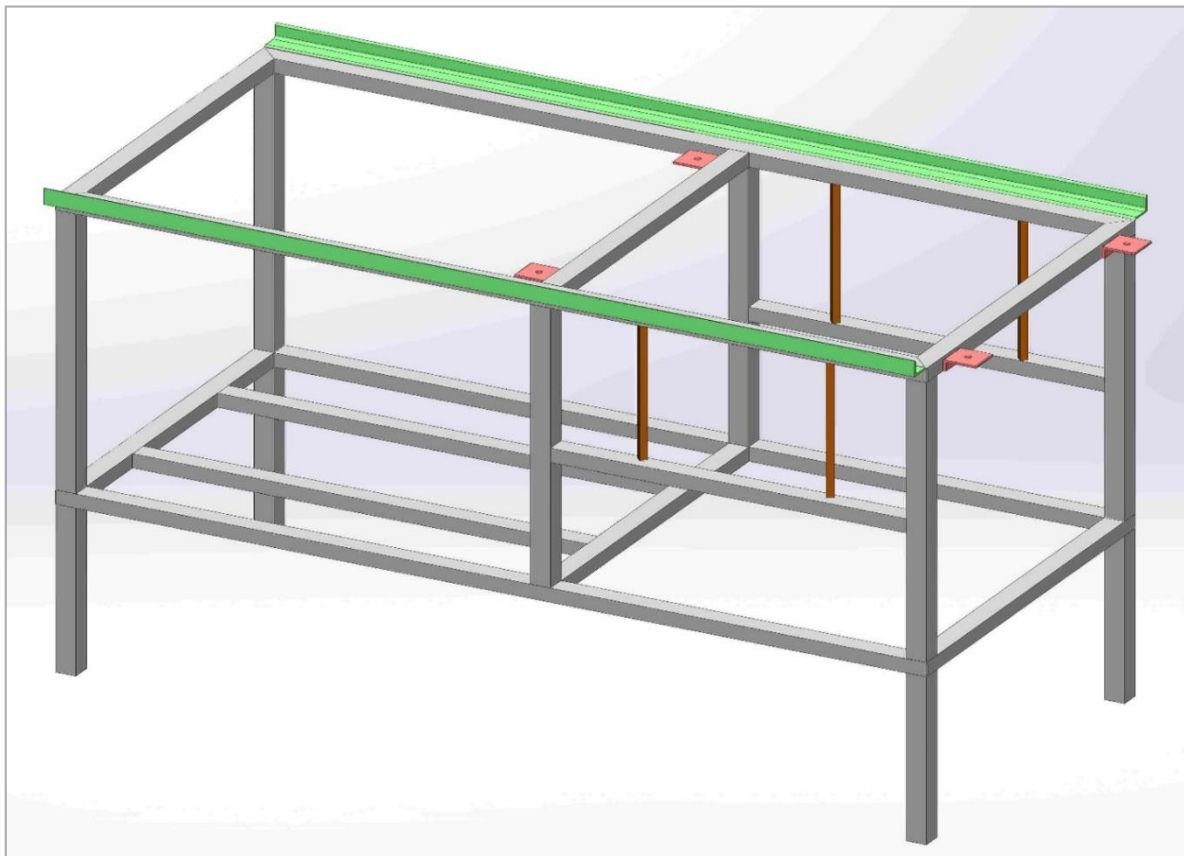
**III) 3 La Conception**

L'ensemble des éléments a été conçu en utilisant le Logiciel de dessin assisté par ordinateur SOLIDWORKS dans sa version 2014 (voir mises en Plan en annexes). Les illustrations suivantes décrivent les différentes parties qui composent notre dispositif :

**III) 3.1 Le bâti**

- ✓ Dimension : 500 x 600 x 1100
- ✓ Il est conçu avec des tubes carrés de 25x25x2mm en acier, assemblés par des cordons de soudure.
- ✓ Il est monté sur des roulettes en plastique pour faciliter son déplacement.
- ✓ Un cadre fixe de dimension 500x500x25mm recevra les plaques à thermoformer.
- ✓ Sur le cadre fixe sont soudées quatre (04) équerres en acier aux quels sont fixés des écrous qui accueillerons les boulons de serrage.
- ✓ Des glissières conçues avec un fer carré sont soudées au bâti à l'endroit de la chambre à vide.
- ✓ Des galets à gorge en acier de 30 mm de diamètre fixées à la chambre à vide vont glisser sur ces glissières
- ✓ L'ensemble galet-glissière servira de guidage en translation verticale pour la chambre à vide.
- ✓ Deux cornières en « L » de dimensions 25 x 25 x 110 mm sont soudées le long de la surface supérieure du bâti, des galets à gorge en acier de 30 mm de diamètre fixées sur l'enceinte thermique rouleront sur ces rails.

L'ensemble galet-rail servira de guidage en translation horizontale de l'enceinte thermique.

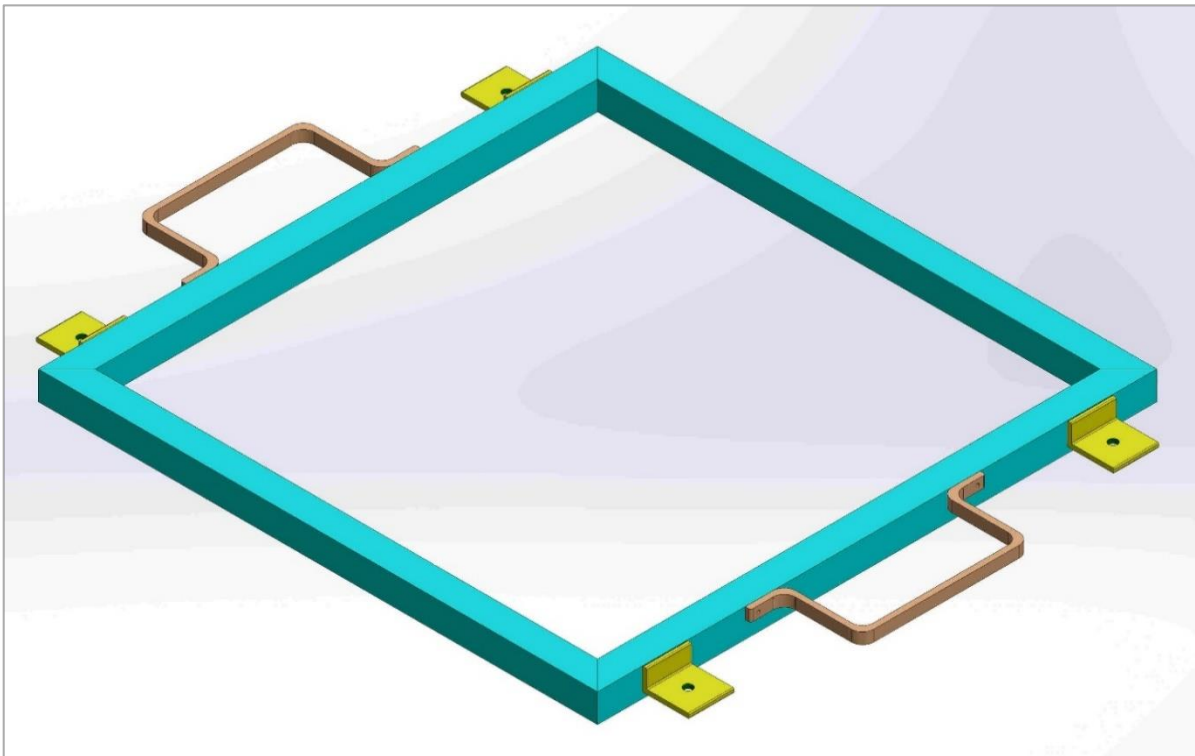


***Figure III-1 : Le bâti.***

**III) 3.2 Le serre-flan**

- ✓ Dimension : 500 x 500 x 25 mm
- ✓ Il est conçu avec des tubes carrés 25 x 25 x 2 mm en acier, assemblés par des cordons de soudure.

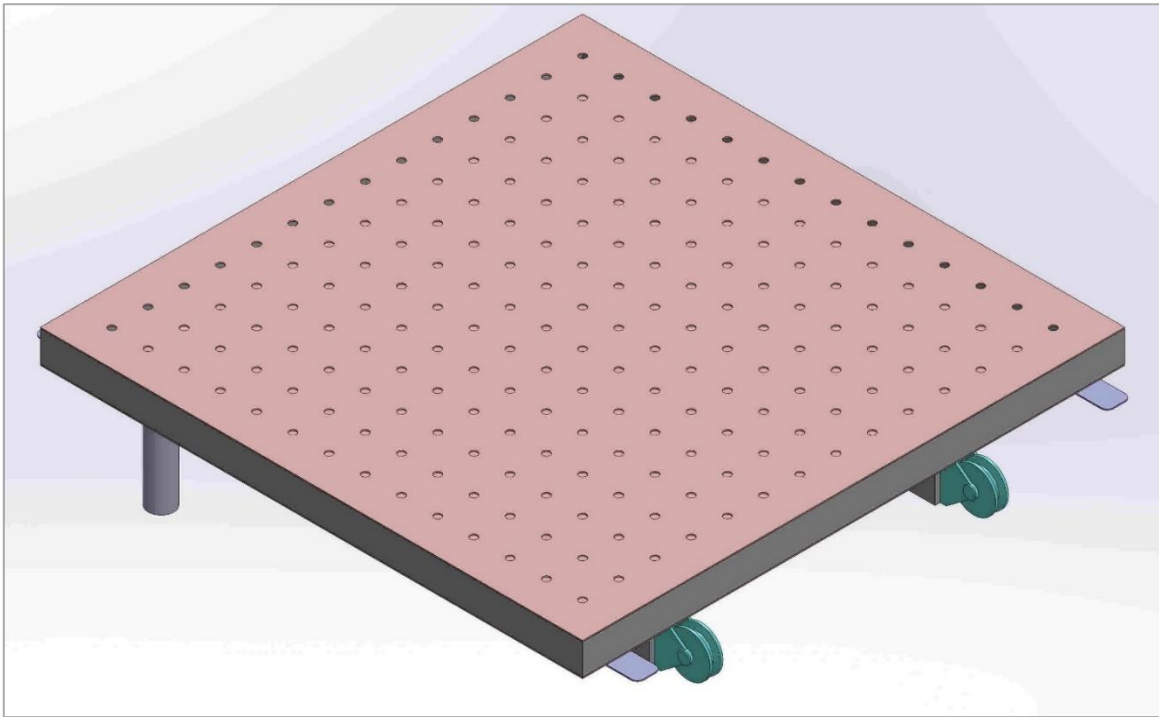
- ✓ Des équerres percées et soudées de chaque coté accueilleront les boulons de serrage.
- ✓ Des poignets de préhension faciliteront sa manipulation.



**Figure III-2 :** *Le serre-flan.*

### **III) 3.3 La chambre à vide / porte moules**

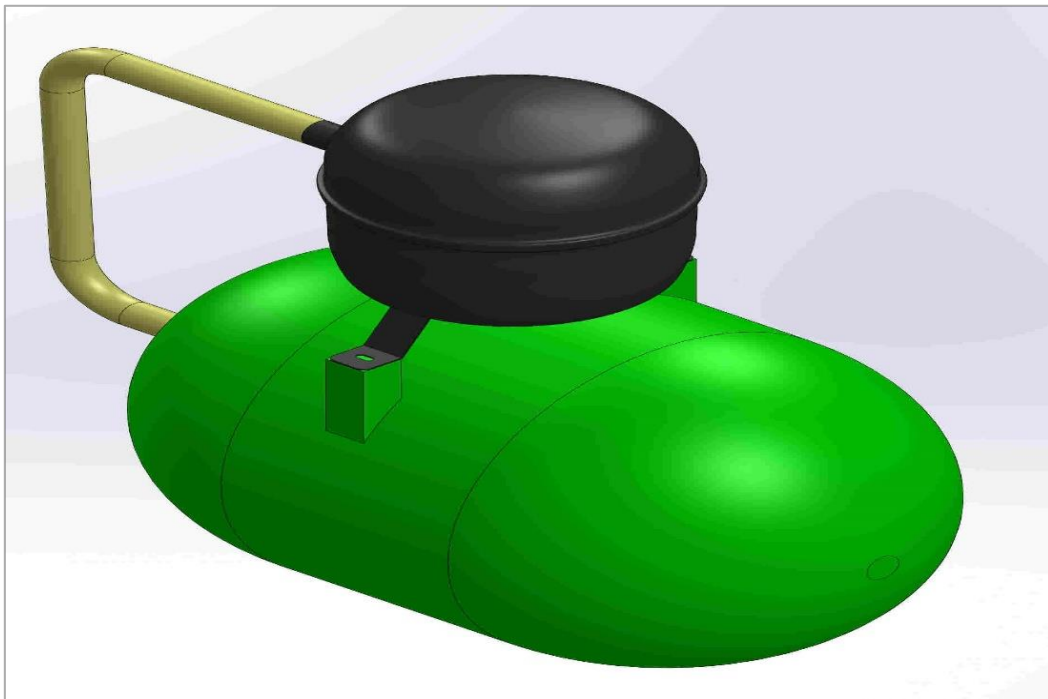
- ✓ Dimension : 449 x 449x25 mm
- ✓ Volume : 4 litres.
- ✓ Les parois latérales sont conçues avec des tubes carre 25 x 25 x 2 mm.
- ✓ La surface supérieure, qui portera les moules, est conçue avec une tôle en acier d'épaisseur 5 mm, comportera 342 trous de Ø5mm symétriquement répartis sur toute la surface pour évacuer l'air par aspiration.
- ✓ La face inférieure est conçue avec une tôle en acier d'épaisseur 5 mm à laquelle est soudé un embout en tube galvanisé de Ø 21mm fileté à son extrémité, Il sera relié au circuit pneumatique et à l'accumulateur de vide par des flexibles à gaz.



*Figure III-3 : La chambre à vide / porte moule.*

### III) 3.4 La pompe à vide muni d'un accumulateur de vide

- ✓ Pompe à vide : le vide recherché est un vide primaire (jusqu'à 1 Pa), permet d'évacuer 99% des gaz en volume (voire plus). Volume 20Litres.

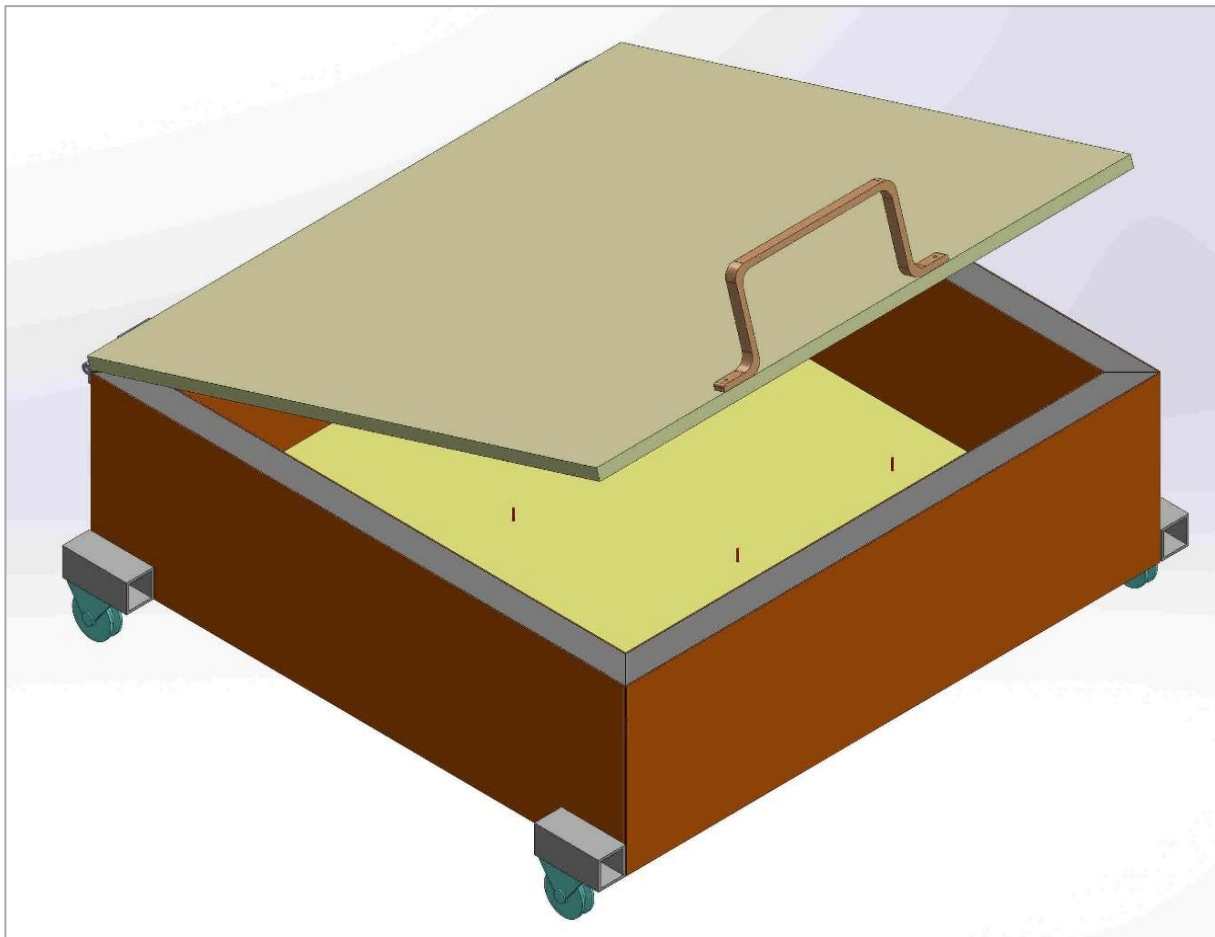


*Figure III-4 : La pompe à vide muni d'un accumulateur de vide.*

### III) 3.5 L'enceinte thermique et les moyens de chauffage :

- ✓ C'est un caisson de dimension : 500 x500 x100 mm.
- ✓ L'ossature est en tube carrée de 25x25x2 mm.

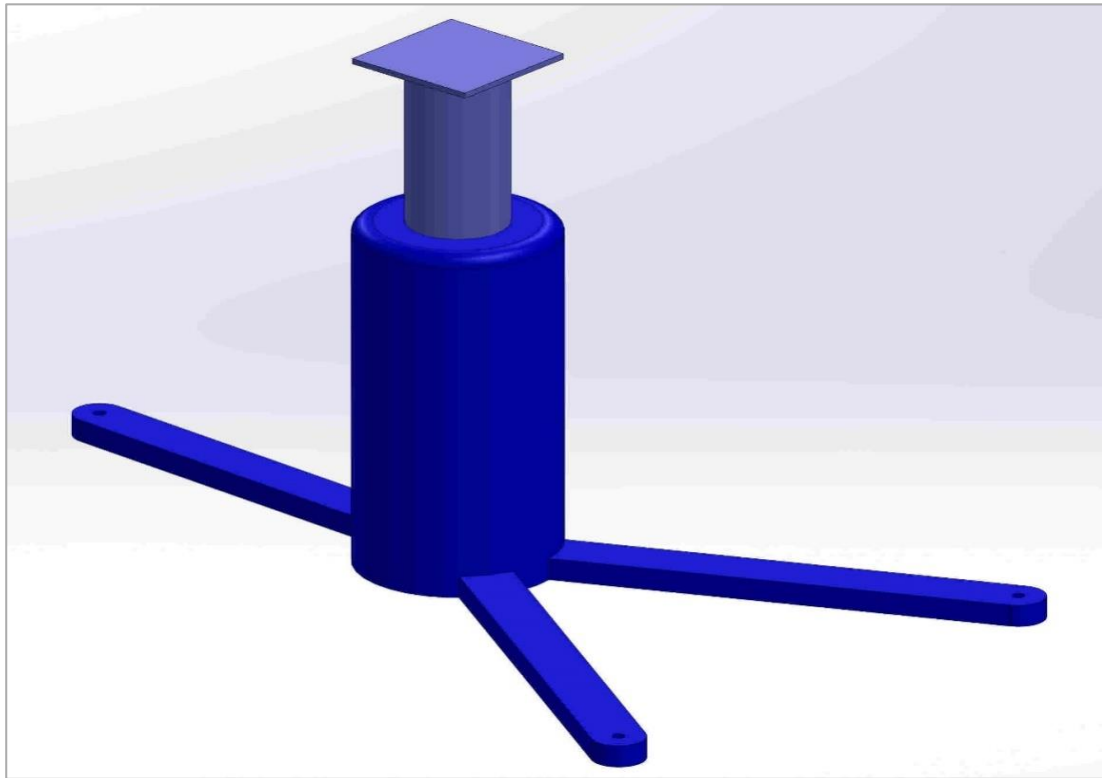
- ✓ Les doubles parois latérales sont en plaque d'acier de 1mm d'épaisseur.
- ✓ A l'intérieur des parois est disposée une isolation thermique en fibre de verre.
- ✓ la face supérieure est une trappe en bois de 16 mm d'épaisseur fixée à l'ossature avec des paumelles de menuiserie. Cette trappe servira d'accès aux éléments de chauffage.
- ✓ La face inférieure est laissée ouverte.
- ✓ Les éléments chauffants sont des radiants en céramique de 600 w.
- ✓ Les radiants sont fixés a une plaque en céramique de dimension 490x490x5 mm amovible en vue du réglage de la hauteur, elles doivent être branchées en parallèle, à l'aide de câble de section 4mm et de cosses en cuivre plates.
- ✓ La plaque en céramique et les radiants sont fixés à l'intérieur de l'enceinte thermique.
- ✓ Elle est munie d'un régulateur thermique avec afficheur analogique il indiquera et régulera la T° pour le préchauffage et chauffage, il sera équipé d'une sonde thermique placée au plus près de la surface du film.



***Figure III-5 : L'enceinte thermique plus les moyens de chauffage.***

**III) 3.6 Le vérin :**

- ✓ Vérin simple effet.
- ✓ Diamètre du cylindre 40 mm.
- ✓ Pression de service 3 bars.
- ✓ Course 200 mm.



*Figure III-6 : Le vérin.*

**III) 3.7 Le circuit pneumatique**

- ✓ Le circuit pneumatique est constitué de Troie (03) flexibles à gaz et d'une vanne d'arrêt.
- ✓ Le premier flexible Ø21 mm relie la pompe à vide à l'accumulateur de vide.
- ✓ le deuxième relie le réservoir à la vanne d'arrêt.
- ✓ le dernier relie la vanne à la chambre-à-vide /porte moule.
- ✓ L'étanchéité est assurée par des joint en plastique et du téflon.

**III) 3.8 Le circuit électrique**

- ✓ Disjoncteur bipolaire 220 V 25 A.
- ✓ Coupe courant.
- ✓ Câble 4 mm.
- ✓ Prise.
- ✓ Cosse plate en cuivre.

**III) 4 Les calculs****III) 4.1 Calcul de la chaleur**

La densité du flux radiatif transmis par rayonnement par les radiants se calcul selon l'équation de Stefan Boltzmann :

$$\varphi = \sigma \varepsilon (T_r^4 - T_p^4)$$

Energie absorbée par la feuille a thermoformer par unité de volume selon les lois de la thermodynamique :

$$\varphi_v = \rho C_v * (T_g - T_p)$$

La quantité de chaleur nécessaire pour élever la température de la feuille a thermoformer jusqu'à sa température de transition vitreuse :

$$Q = m * C_v * (T_g - T_p)$$

Le temps nécessaires pour élever la température de la surface de la feuille a thermoformer d'une épaisseur donnée :

$$t = \frac{\rho * ep * C_v * (T_g - T_p)}{\varphi}$$

$\varphi$  : densité du flux radiatif transmis par les radiant a la feuille a thermoformer [ $W.m^{-2}$ ].

$\varphi_v$  : Quantité de chaleur [J].

$T_r$  : température des radiants [k].

$T_p$  : température de la feuille a thermoformer (ambiante) [k].

$T_g$  : température de transition vitreuse de la feuille a thermoformer [k].

$\sigma_b$  : constante de Stefan Boltzmann égale à  $5.675 * 10^{-8}$  [ $W.m^{-2}.K^{-4}$ ].

$\varepsilon$  : émissivité des radiant et la feuille a thermoformer supposée égale à 0.9.

$C_v$  : capacités calorifiques [ $J. kg^{-1} .K^{-1}$ ].

$\rho$  : masse volumique [ $kg^{-1} .m^{-2}$ ].

$m$  : masse de la feuille a thermoformer [kg].

$ep$  : épaisseur des feuilles de la feuille a thermoformer [m].

**NB** : Le rapport entre le flux total émis par les radiant et le flux qui frappe effectivement la plaque s'appelle facteur de forme. Par définition, ce nombre est compris entre 0 et 1.

**AN :**

*Données*

$T_r = 673$  K.

$T_p = 298$  K.

$T_g = 373$  k.

$\rho = 9.09$   $kg^{-1} .m^{-2}$  pour du HIPS.

$C_v = 2000$   $J. kg^{-1} .K^{-1}$  pour du HIPS.

$m = 0.002273$  kg pour une feuille de HIPS de dimension  $0.5 \times 0.5 \times 0.001$  m.

*Résultats des calculs*

$$\varphi = 10 \text{ kW.m}^{-2}$$

$$\varphi_v = 14 \text{ kJ.m}^{-3}$$

$$Q = 341 \text{ J}$$

### III) 4.2 Calcul de l'isolation thermique

Equation de transfert de chaleur par conduction :

$$\text{div}(\lambda \text{ grad } T) + \rho C_v \frac{\partial T}{\partial t} = 0$$

Equation de transfert de chaleur pour un régime permanent:

$$\lambda \nabla T = 0.$$

On impose une température de parois extérieures égales  $T_a$  :

$$\lambda \leq \varphi \frac{ep}{(T_r - T_a)}$$

$ep$  : épaisseur des parois de l'enceinte thermique[m].

$T_r$  : température à l'intérieur de l'enceinte thermique [K].

$T_a$  : température ambiante (imposée) [K].

$\lambda$  : conductivité thermique de l'isolant [ $\text{W.K}^{-1}.\text{m}^{-1}$ ].

La conductivité de l'isolant utilise doit être inférieure à la valeur  $\lambda$  calculée.

**AN :**

*Données*

$$ep = 0.025\text{m.}$$

$$T_r : 673 \text{ K.}$$

$$T_a : 298 \text{ K.}$$

*Résultats des calculs*

$$\lambda = 0.67 \text{ W.K}^{-1}.\text{m}^{-1}$$

### III) 4.3 Calcul de la dépression

À l'état initial le robinet est fermé, la chambre est à la pression atmosphérique l'accumulateur est sous vide, à l'ouverture du robinet les deux états thermodynamique s'équilibrent :

$$P = P_{atm} \left( \frac{V_c}{V_r + V_c} - 1 \right)$$

$V_c$  volume de la chambre-à-vide [ $\text{m}^3$ ].

$V_r$  volume de l'accumulateur de vide [ $\text{m}^3$ ].

$P$  : dépression [Pa].

$P_{atm}$  : pression atmosphérique [Pa].

**AN :**

*Données*

$$V_c = 0.004 \text{ m}^3$$

$$V_r = 0.02 \text{ m}^3$$

$$P_{atm} = 101325 \text{ Pa}$$

*Résultats des calculs*

$$P = -84437 \text{ Pa} = -0.84 \text{ bar}$$

### **III) 4.4 Calcul du couple de serrage**

*Charge supportée par le boulon*

$$F = 0.9 R_e * S_{eq}$$

$R_e$  : limite élastique du matériau

$S_{eq}$  : section résistante de la tige filetée.

0,9 : taux de charge de 90 % (marge de sécurité de 10 %).

*Couple de serrage du boulon*

$$C = (0.16p + 0.583 f_r d_2 + 0.5f_t D_m)F.$$

$p$  : pas (mm)

$d_2$ : diamètre sur flanc.

$f_r$  : frottement au niveau du filetage

$f_t$  : frottement entre tête (vis) et support (pièce)

$D_m$  : diamètre moyen au niveau de la tête

$F$  : tension de la vis

*Pression du serre-flan*

$$P = F * 4 / S$$

$F$  : tension de la vis

$S$  : du serre-flan.

**AN :**

*Données*

Boulon M10 de class 8.8

$$S = 48219.36 \text{ mm}^2.$$

*Résultats des calculs*

$$F = 26838 \text{ N}$$

$$C = 36 \text{ Nm.}$$

Pour quatre boulons

$$F = 26838 * 4 = 107352 \text{ N}$$

$$P = F / S = 2.23 \text{ MPa}$$

**III) 4.5 Calcul du vérin**

Le diamètre du piston est en rapport direct avec l'effort axial développé par le vérin.

L'effort doit être supérieur à la charge à soulever plus les efforts de contre pression.

D'après les données récoltées sur le model conçu avec SolidWorks, nous avons :

*Calcul du diamètre du piston :*

$$P = Ft/S.$$

$$Ft = M * g.$$

$$Fr = Ft + Ff.$$

$$Fr = 1.1 * Ft.$$

$$S = (\pi * D^2)/4.$$

$$D = \sqrt{(1.1 * 4 * Mg) / (P \pi)}$$

*Ft* : Effort théorique axial.

*Fr* : Effort réel

*Ff*: Efforts de la contre pression qui est établie dans la chambre opposée pour obtenir un mouvement régulier et des efforts de frottement. On les estime, en usage général à environ 10% de l'effort obtenu (effort théorique).

La course du vérin est fonction de la hauteur du banc moins celle du moule+ l'épaisseur de la chambre à vide et la longueur du vérin au repos. Elle sera de **150mm** max.

**AN :**

*Données*

Poids chambre-a-vide = 25kg

Poids du moule =5 kg

Pour une pression de 3 Bar

*Résultats des calculs*

$$D = \sqrt{(1.1 * 4 * 9.8 * (25 + 5)) / (300000 * 3.14)}$$

$$D = 35.48 \text{ MM}$$

III) 5 Réalisation du dispositif

III) 5.1 Matériaux pour la réalisation

Les tableaux suivant répertorient les différents matériaux et matériels consommables utilisés pour la réalisation des éléments de notre dispositif.

éléments	constituant	désignation	matériaux	quantité	norme
Bâti	ossature	Tube carré 25×25×2	aciers non alliés	13 m	NF EN 10210-2
	rail	Cornière 25×25×2	acier de construction	2,2 m	NF EN 10056-1
	équerre de fixation	Cornière 40×25×5	acier de construction	0,2 m	NF EN 10056-1
	glissière	Fer carré plein 10	acier laminé a chaud	1,2 m	NF EN 10059
	écrous de serrage	écrous hexagonaux M8	aciers	02Pcs	NF EN ISO 4032
Serre-Flan	serre-flan	Tube carré 25×25×2	aciers non alliés	2 m	NF EN 10210-2
	équerre de fixation	Cornière 40×25×5	acier de construction	0,2 m	NF EN 10056-1
	poignée		aluminium	2 Pcs	
	vis de fixation	M10x1.5 qualité 8.8	acier	04 pcs	DIN 933

Tableau III-1 : Matériaux pour la réalisation (a).

éléments	constituant	désignation	matériaux	quantité	norme
enceinte thermique	ossature	Tube carré 25×25×2	aciers non alliés	5 m	NF EN 10210-2
	parois latérales	Tôle en acier galvanisé ep 1mm	acier galvanise	0,6m <sup>2</sup>	EN 1014
	galet	Galet a gorge 30 mm	acier	4 Pcs	
	trappe	plaque en bois 500x 500 x 10	Bois aggloméré	0,25 m <sup>2</sup>	
	isolant thermique	matelas en laine de verre ep 25 mm	laine de verre (0,04 w/k m)	0,3 m <sup>2</sup>	NF EN 13162
	charnière	Charnière de diamètre 6 mm	acier galvanisé	2 Pcs	NF EN 1935
	voute	plaque 450 x 450 x 10	céramique	1 Pcs	ISO/TC 189

circuit électrique	élément chauffant	radiant 6 kW	céramique	6 pcs	
	boulon de fixation	Vis à tête hexagonale partiellement filetées M6	acier	08Pcs	NF EN ISO 4014
circuit électrique	écrous de fixation	écrous hexagonaux M6	acier	08Pcs	NF EN ISO 4032
	rondelle	rondelle M6	acier	08Pcs	ISO 7089
	rivet	rivet 5 mm	aluminium	20 pcs	ISO 15975
	câble				
	disjoncteur bipolaire			01	
	coupe courant			01	
	cosses			30 Pcs	
	prise			01	

**Tableau III-2 : Matériaux pour la réalisation (b).**

éléments	constituant	désignation	matériaux	quantité	norme
Pompe à vide et circuit pneumatique	pompe à vide	compresseur FN 57 Q 12 G		1Pcs	
	Accumulateur de vide	bouteille butane 20 L	acier		
	flexible à gaz				
	joint d'étanchéité				
	téflon				

**Tableau III-3 : Matériaux pour la réalisation (c).**

éléments	constituant	désignation	matériaux	quantité	norme
chambre-à-vide	parois latérales	Tube carré 25×25×2 mm	aciers non alliés	2 m	NF EN 10210-2
	faces inf/ et sup	Tôle d'acier LAC ep 5mm	acier laminés à chaud	0.5m <sup>2</sup>	NF EN 10029
	butée	Fer plat 30×2 mm	acier laminés à chaud	0,2 m	NF EN 10058
	galet	Galet a gorge 30 mm	acier	4 Pcs	

	boulon de fixation	Vis à tête hexagonale partiellement filetées M6	acier	08Pcs	NF EN ISO 4014
	écrous de fixation	écrous hexagonaux M6	acier	08Pcs	NF EN ISO 4032
	rondelle	rondelle M6	acier	08Pcs	ISO 7089
	embout	tube diamètre 21 mm	acier galvanise	0,1 m	EN 10255

**Tableau III-4 : Matériaux pour la réalisation (d).**

**III) 5.2 Matériels consommables**

matériel	norme	quantité
Foret HSS Ø 5	DIN 6537	05 Pcs
Foret HSS Ø 8	DIN 6537	03 Pcs
Foret HSS Ø 10	DIN 6537	01 Pcs
Foret HSS Ø 13	DIN 6537	01 Pcs
Foret à bois Ø 4X50	DIN 6537	01 Pcs
Baguette électrode	NF EN 499	50 Pièces
Disque à tronçonner	EN 12413	15 Pièces
Disque à ébarber	EN 12413	02 Pièces

**Tableau III-5 : Matériels consommable.**

**III) 5.3 Outillage**

✓ Poste à souder à l'arc électrique 220v, 50hz :

Les travaux de soudage sont effectués à l'électrode enrobée (SMAW), les soudures sont faites à plat avec un joint de soudure de  $\leq 2$ mm. L'électrode est rutile R (à base d'oxyde de titane) de Ø 2.5mm, c'est un soudage courant avec des épaisseurs de pièces variant faiblement, les coupes droites et angles grugés (à 45°) sont réalisés avec une meuleuse d'angles munie d'un disque à tronçonner.

Formule de réglage de l'intensité de courant :

$$I = (\text{Ø électrode} - 1) \times 50 = 75 \text{ Ampères}$$

- ✓ En sus d'une Meuleuse d'angles, perceuse portative, étau, scie à bois, clés pour serrage, pince, marteau, mètre ruban, équerre ...etc
- ✓ Sans oublier l'indispensable équipement de sécurité : lunettes, masque avec verre teinté, gants...etc.
- ✓ Plieuse de tôle : nous avons profité de la présence d'une plieuse de tôle manuelle au laboratoire LECMM du département pour plier des tôles d'acier d'épaisseur 1mm pour couvrir notre dispositif.
- ✓ Une couche de peinture est appliquée au pinceau en vue de préserver le métal de la rouille

**III) 6 Réalisation des moules**

L'aluminium et ses alliages est le matériau indiqué pour la réalisation de moules permanents pour le thermoformage, sa faible masse volumique, son aptitude au moulage, son usinabilité et son abondance sous forme de déchets à recycler offrent beaucoup de possibilités au thermoformeur.

Comme l'idée de départ était de compliquer les formes en optant pour un modèle réduit d'une voiture aux lignes épurées et le masque d'un personnage célèbre de Comics, l'usinage fut une option à écarter car il aurait nécessité des moyens dont nous ne disposons pas notamment un centre d'usinage à commandes numériques.

L'idée du moulage en sable par gravité et à la main s'est imposée tout naturellement pour sa relative facilité de mise en œuvre et la disponibilité du matériel, notamment des déchets en alliage d'aluminium issus des Travaux pratiques effectués par les étudiants au niveau du hall de technologie. Voici plus en détail les étapes suivies :

**III) 6.1 Le modelage**

Les deux modèles saupoudrés de talc pour faciliter leur démoulage sont disposés à l'intérieur des boîtes à carapaces, il faut toujours dimensionner les boîtes en fonction des dimensions du modèle en veillant à laisser assez d'espace à remplir en sable pour la solidité du moule négatif et ainsi reproduire les formes extérieures du modèle.

**III) 6.2 Préparation du Sable de moulage**

Le sable est concassé et tamisé avant d'être malaxé et mélangé dans une auge avec les apports d'eau et d'adjuvants, un sable de fonderie est souvent réutilisable par régénération.

Les sables utilisés en fonderie doivent répondre à un certain nombre d'impératifs :

- ✓ Reproduire fidèlement la pièce modèle.
- ✓ Avoir une surface aussi fine que possible.
- ✓ Ne pas se désagréger lors de l'extraction du modèle.
- ✓ Résister à la température de coulé élevé du métal.
- ✓ Résister à l'érosion par le métal liquide, lors de la coulée.
- ✓ Ne pas s'opposer au passage des gaz produits pendant la coulée.
- ✓ Résister suffisamment aux efforts de retrait du métal.
- ✓ Permettre un décochage aisé.
- ✓ Les moules sont faits en « *sable à vert* ». Le moulage à vert est la méthode la plus largement utilisée : il consiste à utiliser un moule constitué de sable argileux humide comprimé. L'expression « *à vert* » indique que le moule n'est ni séché ni étuvé.

Le sable utilisé est le même que celui de fonderie de fonte mais avec des proportions différentes des constituants qui sont :

- ✓ Pour une préparation :

1% d'argile  
(6%) d'eau  
De La silice pure

### **III) 6.3 Le moulage**

Le sable est disposé en couches successives sur le modèle, chaque couche est comprimée et tassée à l'aide d'une planche avant l'ajout de la suivante jusqu'au remplissage, la couche supérieure est arasée pour assurer une meilleure assise au moule une fois retourné et le modèle extrait soigneusement.

Un moule positive doit être creux à l'intérieur en vue de l'alléger, cette étape peut être réalisée par usinage après la coulée ou en incorporant un noyau au moule.

La figure III-7 représente les empreintes en sable dans les boîtes à carapace après extraction des modèles :



**Figure III-7 : moules en sables.**

### **III) 6.4 La fusion et la coulée**

L'opération consistant à couler la fonte d'une poche dans un moule demande une certaine habileté, mais n'entraîne pas de complication ( voir figure III-8).

Lorsque le métal est prêt, c'est-à-dire lorsque :

La température de coulée est atteinte et contrôlée (cette température dépend de l'alliage et des formes de la pièce à réaliser).

La composition chimique de l'alliage est conforme selon les exigences.

**NB.** Dans la présente étude nous n'avons pas d'exigences particulières sur la composition chimique de l'alliage puisque l'important était d'obtenir une coulée qui reproduirait fidèlement les formes des modèles.

Après avoir porté le métal en fusion à 900°C, une marge de plus de 100°C nous prémunissait d'un refroidissement trop rapide lors de l'étape du remplissage à la louche. Nous avons écumé le bain pour le débarrasser des impuretés (crasse, résidus de combustion des huiles de lubrification...etc.). La louche devait contenir assez de métal en fusion pour remplir le moule d'une traite, le versement doit être continu.



*Figure III-8 : Fusion et coulée.*

### **III) 6.5 Décochage et ébavurage**

Quand le moule est suffisamment refroidi, on décoche la pièce moulée en cassant le moule en plusieurs parties. On recueille alors une pièce brute qui exige d'être dessablée. L'ébarbage sert à éliminer le réseau des canaux d'arrivée du métal liquide (Système de coulée et d'alimentation), les bavures, les excroissances du métal (masselottes) avec une meuleuse d'angles munie d'un disque à ébarber. Pour un meilleur fini nous avons procédé à un ponçage à la main avec du papier abrasif.



**Figure III-9 :** moules obtenus après décochage.

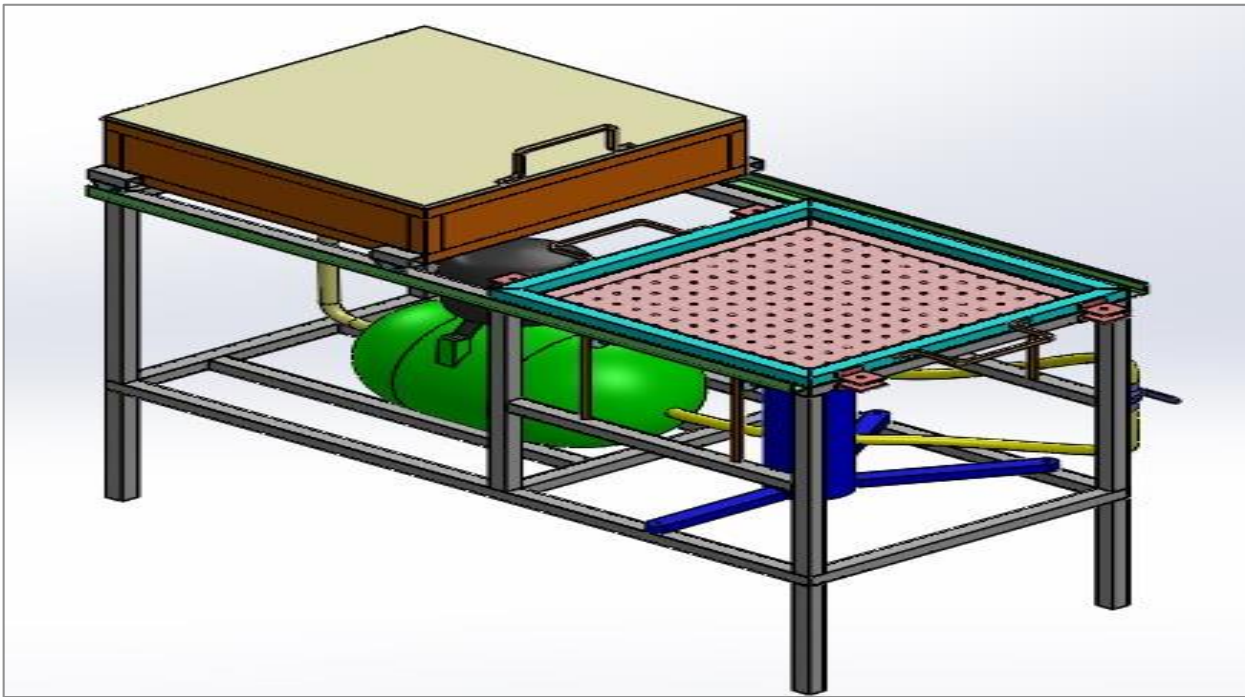
### **III) 7 Présentation de la machine**

La figure suivante illustre le résultat final après montage de tous les éléments constitutifs, avec branchement des circuits électriques, pneumatiques et installation du régulateur thermique.

#### **III) 7.1 Principe de fonctionnement**

- ✓ brancher la prise de courant à la source de courant.
- ✓ mettre en position fermée la vanne d'arrivée d'air et allumer la pompe à vide, attendre quelques minutes pour que le vide se fasse dans l'accumulateur de vide.
- ✓ Avec l'enceinte thermique en position arrière et la chambre-à-vide en position haute, positionner le moule sur cette dernière.
- ✓ Placer ensuite la table en position basse on appuyant dessus et en tirant simultanément vers le haut le levier qui actionne le vérin.
- ✓ Placer la feuille a thermoformer par-dessus le cadre de fixation.
- ✓ Positionner le serre-flan par-dessus le cadre de fixation et la plaque.
- ✓ Faire passer les boulons de serrage à travers les équerres de fixations et serrer fermement à l'aide d'une clé à fourche 17
- ✓ Tirer l'enceinte thermique vers l'avant, par-dessus la plaque.
- ✓ Mettre le coupe courant sur position d'allumage, attendre jusqu'à ce que la feuille a thermoformer chauffe, il va s'assouplir et commencer à se détendre (respecter le temps de maintien).
- ✓ Renvoyer délicatement l'enceinte thermique en position arrière afin de vérifier la souplesse du plastique, Continuer à chauffer jusqu'à ce qu'il soit suffisamment souple pour être formé. Ensuite, renvoyer complètement le chauffage à l'arrière.

- ✓ Faire monter la chambre-à-vide en tirant vers le haut le levier du vérin jusqu'à ce qu'elle bute contre le cadre de fixation.
- ✓ Mettre en position ouverte la vanne d'arrêt, l'air contenu dans la chambre-à-vide et au-dessous la feuille a thermoformer va être aspiré vers l'accumulateur de vide alors la feuille a thermoformer se plaquera instantanément sur le moule.
- ✓ Laisser refroidir quelques instants, puis fermer la vanne d'arrêt.
- ✓ Enfin, desserrer les boulons de fixation et retirer la pièce finie



***Figure III-10 : capture écran de la machine conçue par SOLIDWORKS.***



***Figure III-11 : photo de la machine réalisée.***

**III) 8 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons mis à profit nos connaissances en fabrication mécanique et nous espérons avoir montré qu'avec une bonne méthodologie et un minimum d'outillage le constructeur peut palier à bien des besoins, ici l'intérêt fut de réaliser un banc d'essais de thermoformage de plaque thermoplastiques indispensable à une étude sérieuse du procédé.

# Chapitre IV

Etude expérimentale et  
simulation numérique

#### IV) 1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons mener une étude expérimentale où nous allons mettre à l'épreuve le dispositif réalisé, la difficulté qui s'est présentée à nous dès le début était l'impossibilité de caractériser de la manière la plus exhaustive possible notre matériaux d'étude en l'occurrence des feuilles thermoplastique HIPS ou Polystyrène choc (High Impact Styrene) 2400x1000 mm et d'épaisseur 1mm, fabriquées localement sans autres indications ou fiche technique. Nous avons pu laborieusement effectuer un test de traction. Sur notre dispositif, le seul paramètre que nous pouvions varier fut la température, De plus la quantité des échantillons disponibles limitait le nombre d'essais.

Pour étayer cette modeste étude, nous avons imaginé un modèle numérique moule-feuille à thermoformer-serre flanc. Le modèle a été implémenté dans le logiciel de calcul par éléments finis ABAQUS pour étude de la distribution des contraintes et des déformations de la pièce thermoformée.

#### IV) 2 Présentation du matériau

Le polystyrène atactique est un matériau transparent et fragile que l'on nomme communément polystyrène « cristal ».

Pour améliorer ses propriétés mécaniques, on a recourt à un renforcement de la matrice thermoplastique par des nodules d'élastomères. Ainsi le polystyrène « choc » est un mélange composé d'une matrice polystyrène cristal dans laquelle sont dispersés des nodules d'élastomère, généralement du polybutadiène. Les propriétés mécaniques telles que la résistance aux chocs et l'allongement à la rupture sont ainsi améliorées, mais la rigidité et la transparence diminuent.

Le tableau suivant fournit un exemple de fiche technique (notamment utilisée par le service contrôle qualité de l'entreprise ENIEM) indiquant les différentes caractéristiques et les normes d'essais pour des feuilles en PS choc destinées au thermoformage, elle nous sert ici d'élément de comparaison et d'indications. [32]

Caractéristiques	Critères	Unités	Normes
Couleur			RAL 9003
Rm : (résistance à la rupture)	18	N/mm <sup>2</sup>	ISO 527
E : Module d'élasticité à la traction	>1400	N/mm <sup>2</sup>	ISO 527
A% : Allongement au point de rupture	>30	%	ISO 527
T°:de ramollissement Vicat B/50 (50°C/5Kg)	90	C°	ISO 306
Choc IZOD (éprouvette entaillée)	>70	KJ/m	ISO 180
Choc Charpy (éprouvette entaillée)	7	KJ/m <sup>2</sup>	ISO 179
Densité	1.04 ±0.01		ISO 1183

**Tableau IV-1:** Fiche technique pour feuilles HIPS destinées au thermoformage [39].

IV) 3 L'essai de traction :

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

IV) 3.1 Découpe et préparations des éprouvettes :

Les éprouvettes ont été découpées selon la norme « ISO-527 » au niveau de l'atelier central de l'entreprise ENIEM où un montage poinçon-matrice monté sur une presse manuelle comme montré sur la « Figure IV-2 » a été conçu pour la découpe à l'emporte-pièce d'éprouvettes normalisée.

Les éprouvettes ont été découpées suivant trois sens et aux dimensions montrées en « Figure IV-1 »

- ✓ Sens longitudinale (sens de la Longueur ou sens L ou 0°)
- ✓ Sens transversal (sens T ou 90°)
- ✓ Suivant un angle de  $\pm 45^\circ$  aux sens Let T

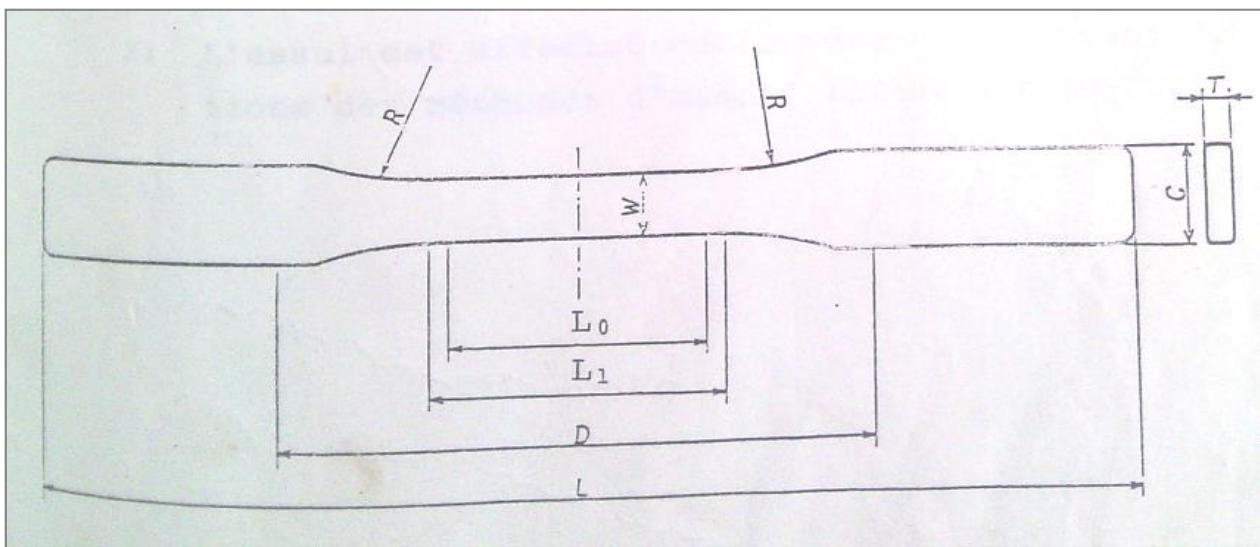


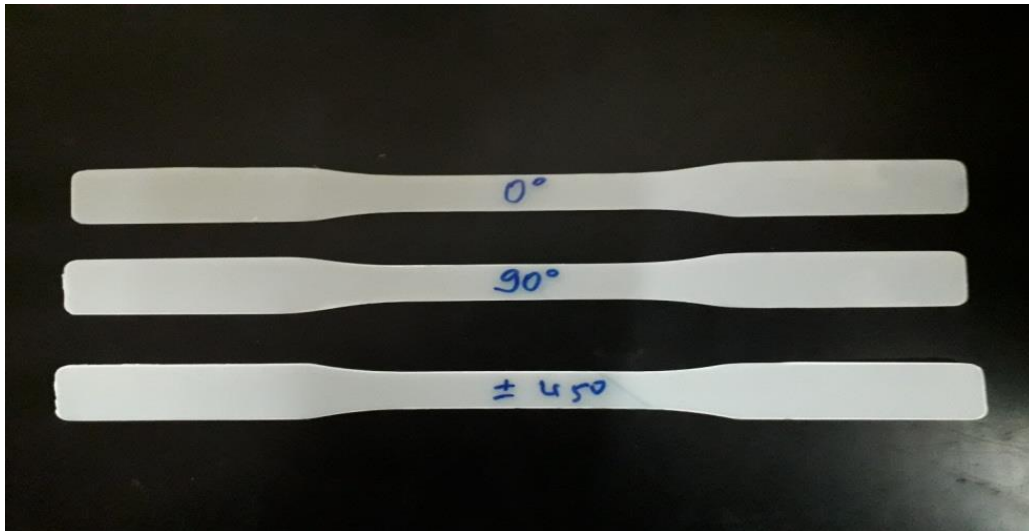
Figure IV- 1: Dimensions des éprouvettes de traction ISO-527 .

Signe	Rubriques	Dimensions	tolérances
C	Largeur de la partie large	19.0	$\pm 0.5$
W	Largeur de la partie étroite	12.0	+0.5 -0
L1	Longueur de la partie étroite	57.2	$\pm 0.5$
L0	Distances entre les lignes de repère	50.8	$\pm 0.5$
D	Distance entre les pinces	114.0	-
L	Longueur totale	> 216	-
R	Rayon	> 76	+5 -0

Tableau IV-2 : Dimensions des éprouvettes normalisées.



*Figure IV-2: Montage poinçon-matrice sur presse (atelier centrale ENIEM).*



*Figure IV-3: Sens de découpe des éprouvettes.*

Après découpe, les éprouvettes ont été ébavurées au papier abrasif et mesurées au pied à coulisse, on avait droit à trois (03) essais par sens à une seule vitesse de chargement, nous en avons sélectionné neuf (09), leurs dimensions sont reportées sur le tableau suivant.

Sens	N° EPr.	Epaisseur (T) (mm)	Largeur (C) (mm)	Section (S) (mm <sup>2</sup> )
0°	01	1.05	12.00	12.60
	02	0.95	12.00	11.40
	03	1.05	12.00	12.60
90°	01	1.01	12.60	12.72
	02	1.02	12.60	12.85
	03	1.02	12.60	12.85
±45°	01	1.01	12.57	12.69
	02	1.03	12.63	13.00
	03	1.01	12.53	12.65

*Tableau IV-3 : dimensions des éprouvettes.*

**IV) 3.2 Caractéristiques de la machine de traction :**

Les essais de traction ont été réalisés sur une machine de traction marque RM100 « Figure IV-4 » 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. Les mesures de la force appliquée sur l'éprouvette ainsi que le déplacement au cours de l'essai sont générées sur feuille millimétrée.

Pour notre étude, nous avons effectué des essais de traction uni-axiale à une même vitesse qui est de 6mm/min et à une température de 23°C pour tous les sens.



*Figure IV-4 : machine de traction RM 100.*

**IV) 4 Résultats des essais de traction**

Les moyennes des caractéristiques mécaniques des essais sont présentées dans le tableau qui suit et leur comportement mécanique par les courbes d'évolution contraintes en fonction des déformations.

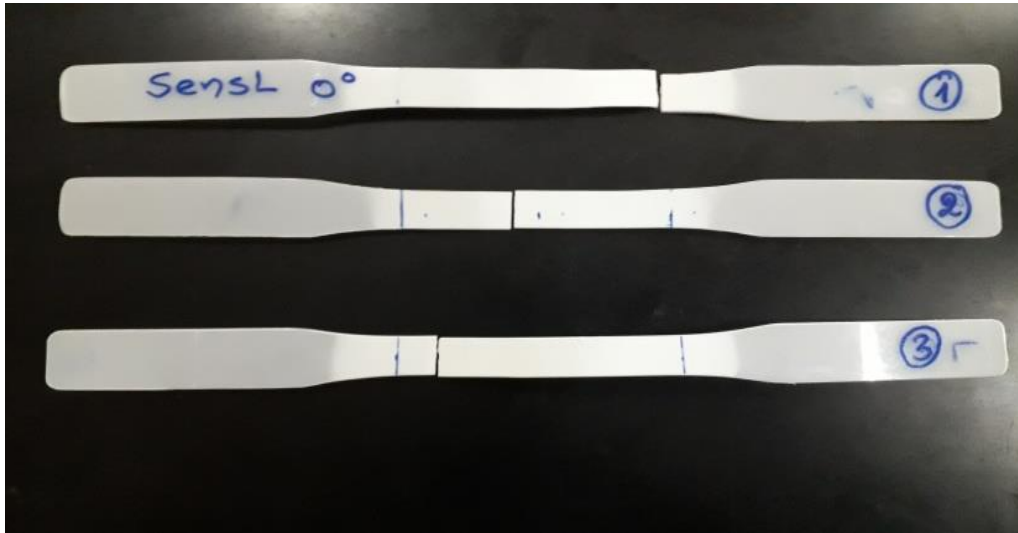


Figure IV-5 : Eprouvettes 0° après essai.

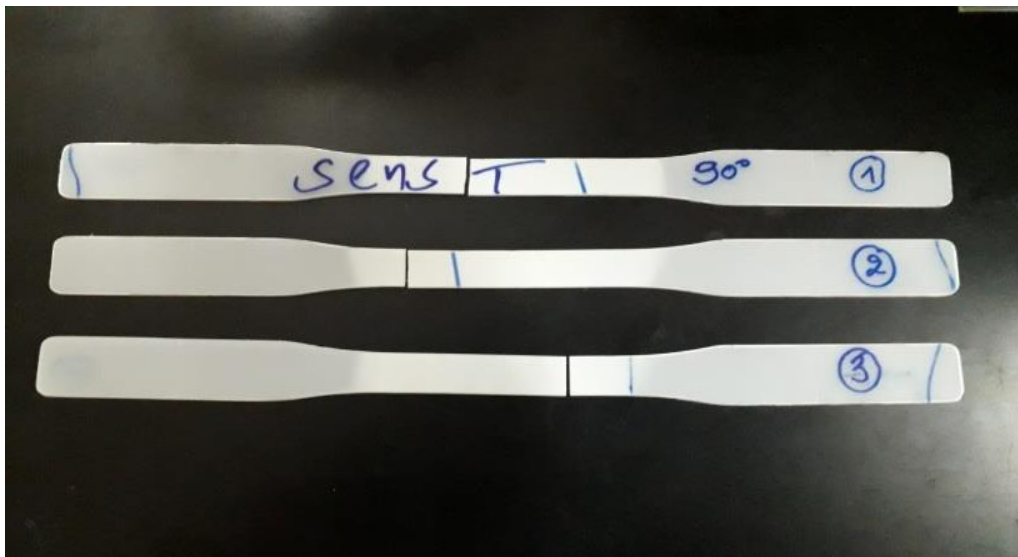


Figure IV-6 : Eprouvettes 90° après essai.

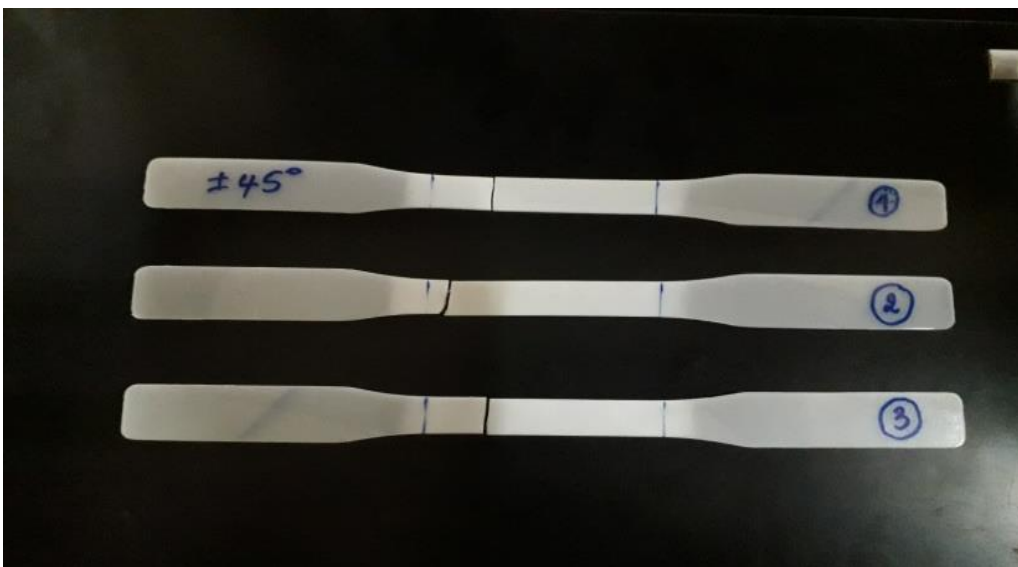


Figure IV-7 : Eprouvettes ±45° après essai.

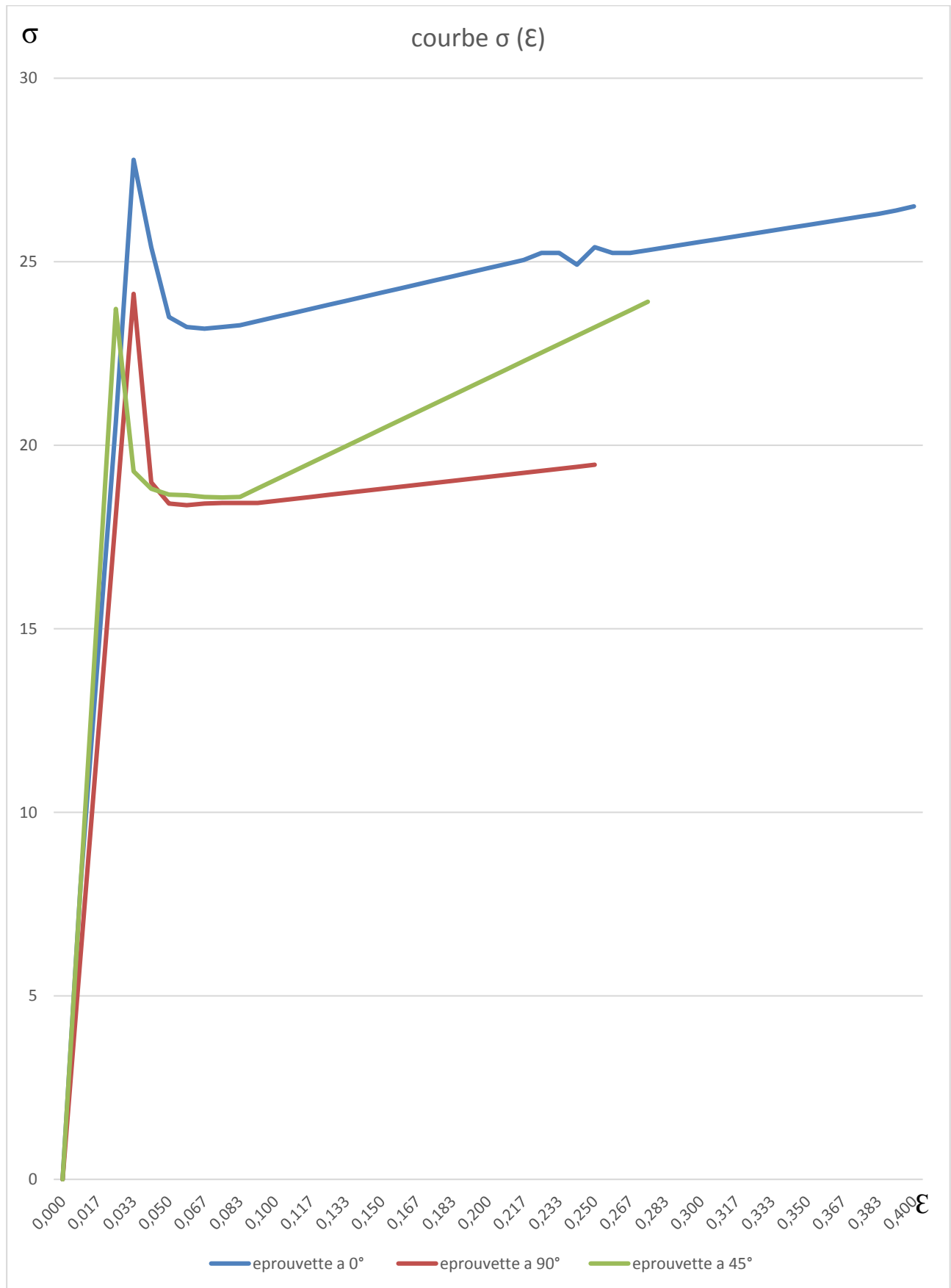


Figure IV-8 : courbes  $\sigma$  ( $\epsilon$ ) expérimentales des éprouvettes.

Tableau résumant les résultats pour les éprouvettes

Sens éprouvette	$\sigma_y$ (MPa)	$\sigma_r$ (MPa)	E (MPa)	$R_m$ (MPa)	$\epsilon_y$	$\epsilon_r$	A%
0°	27.77	26.50	833.33	66.26	0.033	0.40	26
90°	24.64	19.47	739.22	78.41	0.033	0.025	24
±45°	23.91	23.91	956.57	70.09	0.025	0.027	24
Moyenne Isotropie	25.44	23.29	843.04	71.58	0.030	0.030	24.66

**Tableau IV.4** : Caractéristiques mécaniques des éprouvettes en traction.

$\sigma_y$  : Contrainte au seuil d'écoulement

$\sigma_r$  : contrainte à la rupture

E : Module d'élasticité

$R_m$  : résistance à la rupture

$\epsilon_y$  : déformation au seuil d'écoulement

$\epsilon_r$  : déformation à la rupture

A% : allongement pourcent.

#### IV) 5 Analyse des résultats

Les neuf courbes obtenus présentent toutes un profil d'un matériau à comportement plastique. Elles comportent deux régions de déformation distinctes, à savoir élastique et plastique.

La zone élastique ou la zone avant le crochet de contrainte associé au seuil d'écoulement, la contrainte est directement proportionnelle à la déformation et suit la loi de Hooke.

La zone plastique commence peu après le point d'écoulement haut, on assiste à la l'apparition d'une bande appelée striction caractérisée par la diminution de la section de l'éprouvette. S'en ensuit une zone de durcissement, juste après le point d'écoulement bas, lorsque la striction s'est propagée sur la totalité de l'éprouvette.

Le point de rupture se situe à la fin de cette zone.

En superposant les courbes obtenues pour la différente orientation des éprouvettes on a constatés quelles sont presque confondues, ce qui suggère que notre matériaux initialement a des propriétés isotropes.

Les valeurs prise pour les différentes contraintes et modules de résistance sont les moyennes calculées d'après neuf courbes. Une première moyenne pour les éprouvettes de même orientation puis une moyenne globale des trois différentes orientations.

**IV) 6 Etude expérimentale de l'effet de la température sur l'épaisseur**

Afin de mettre à l'épreuve notre dispositif et étudier le comportement du matériau d'étude avec la variation de la température, nous avons entrepris d'effectuer trois (03) essais à trois (03) températures différentes, les paramètres constants sont :

- ✓ Température du moule : 25°C
- ✓ Vitesse de remontée table : 0.2 m/seconde
- ✓ Pression d'aspiration :-0.84 bar

**IV) 6.1 Essai à T= 70° C**

A = 70 °C comme montré sur la « Figure IV-9 » la feuille commence à ramollir mais n'entre pas encore dans le domaine du thermoformage, le matériau est encore suffisamment rigide pour résister aux déformations imposées par la remontée du moule et l'effet de l'aspiration, le drapage n'est pas complètement assuré.

Notons encore que la température du moule et de la plaque sont à l'ambiante, nous ne pouvons que supposer que le refroidissement (solidification de la feuille) par conduction est accéléré.



**Figure IV-9 : Essai à T= 70° C.**

**IV) 6.2 Essai à T= 90°C**

Nous avons délibérément laissé la feuille chauffer au-delà de sa T<sub>g</sub>, d'une part pour relever expérimentalement à l'œil et au toucher une T° intermédiaire qui est de 80 ± 5 °C optimale pour thermoformer le matériau d'étude et d'autre part pour évaluer le comportement de la feuille à des températures élevée.

A = 90 °C la feuille est chauffée au-delà de sa T° de transition vitreuse, cela se traduit par un ramollissement très important de la feuille, par un virage de la couleur vers un aspect transparent,

l'épaisseur de la feuille diminue brutalement, la feuille s'est complètement affaissée, comme le volume de la feuille est constant, une diminution de l'épaisseur induit une augmentation de la surface. La remontée du moule provoque un effet de pli, la feuille est repliée sur elle-même, la « Figure IV-10 » illustre ce phénomène, la pièce obtenue est de mauvaise qualité, de plus elle présente une fragilité accrue.

En montant la température d'une décade, les phénomènes cités plus haut sont accentués, le matériau est complètement ruiné au-delà de 100°C « Figure IV-11 ».



***Figure IV-10 : Essai à  $T= 90^{\circ}C$ .***



***Figure IV-11 : Essai à  $T= 120^{\circ}C$***

IV) 6.3 Essai à  $T = 80^{\circ} \pm 5^{\circ}C$

C'est la  $T^{\circ}$  pour laquelle nous avons obtenu le meilleur résultat « Figure VI-12 », l'épaisseur de la feuille varie faiblement, les excroissances sous forme de plis sont minimales et n'affectent pas la géométrie de la pièce obtenue qui présente ici les mêmes propriétés du matériau avant formage.



Figure VI-12 : Essai à  $T = 80^{\circ} \pm 5^{\circ}C$ .

IV) 6.4 Résultats expérimentaux et observations:

Les pièces thermoformées en étés découpée en longueur comme montré sur la « figure VI-13 », et les épaisseurs mesurées au micromètre et reportées sur le « tableau VI-5 »,

Température	Epaisseur mm			Moyenne
	Point 1	Point 2	Point 3	
70°C	1.01	0.95	1.01	0.99
80±5°C	0.80	0.75	0.90	0.82
90°C	0.40	0.45	0.60	0.48
100°C	0.20	0.10	0.25	0.18

Tableau VI-5. Tableau des épaisseurs des pièces thermoformées

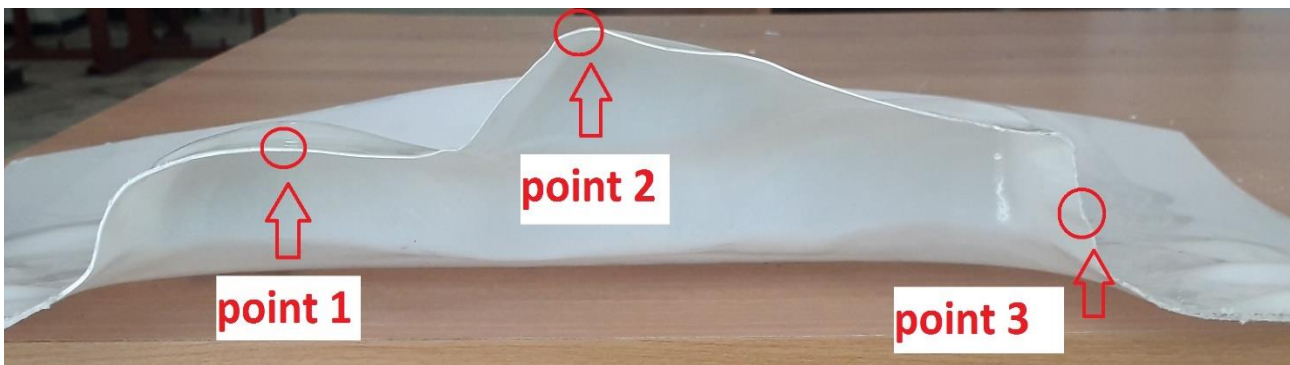


Figure VI-13 : coupe de la pièce.

✓ Distribution des épaisseurs

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, nous relevons sur la « *Figure VI-13* » que le point 2 est le point où la feuille est la plus étirée et l'épaisseur la plus faible.

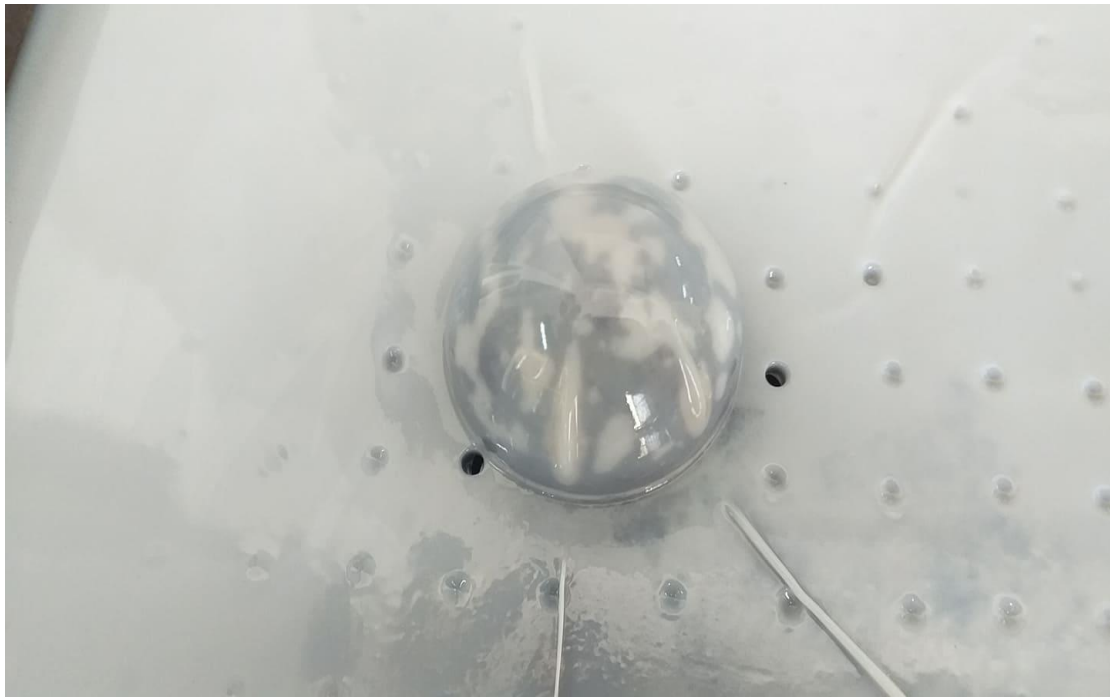
✓ *Absence de bullage* (avant remontée du moule et application du vide)

Le bullage a pour but d'uniformiser l'épaisseur de la feuille d'une part et un meilleur drapage sur le moule d'autre part.

L'installation d'un système de compression à air peut avoir le double effet d'assurer le bullage avant formage et aider par compression au démoulage post formage.

✓ *Effet conjugué d'une température élevée et de l'aspiration*

La « *Figure IV-14* » illustre l'effet de l'aspiration avec une section donnée des trous d'aspiration (ici au Ø 5mm), la feuille trop chaude est transpercée par la dépression générée par le vide, un régulateur de pression est un manomètre s'avèrent indispensables à un fonctionnement optimale du dispositif.



***Figure IV-14 : Effet conjugué d'une température élevée et de l'aspiration***

✓ Le démoulage

Le démoulage des pièces finies s'avère difficile, il s'agit là d'une vérification, le démoulage sur moules positifs est un problème inhérent au procédé du thermoformage sous vide, une difficulté accentuée par les formes complexes de notre moule.



***Figure IV-15 : Démoulage***

✓ Le rognage

Il faut toujours veiller à dimensionner la taille des feuilles à thermoformer en fonction de la pièce à obtenir, cette précaution a aussi l'avantage d'économiser de la matière à rogner comme illustré dans la « *Figure IV-16* ».



***Figure IV-16 : Matière rognée.***



*Figure IV-17 : Pièce obtenue après rognage.*

✓ L'état de surface :

La pièce thermoformée reproduit fidèlement les formes et l'état de surface du moule utilisé, elle reproduit également les défauts du moule comme montré sur la « *Figure IV-18* », une bonne conception des moules conditionne la qualité des pièces finies.



*Figure IV-18 : L'état de surface.*

IV) 7 Simulation numérique

IV) 7.1 Introduction :

Afin d'évaluer numériquement la distribution des contraintes et des déformations sur les pièces thermoformées. Nous avons implémenté un modèle dans le logiciel de calcul par éléments finis ABAQUS/ EXPLICIT. La géométrie du modèle est représentée sur la « Figure IV-19 » Dans la simulation, nous avons considéré le moule (dôme) comme un corps rigide. La feuille est de dimensions identiques au montage expérimentale (500mm×500mm×1.mm) est modélisée comme une coque isotrope déformable a comportement hyperelastique maintenue par deux cadres qui servent de serres-flan. [40]

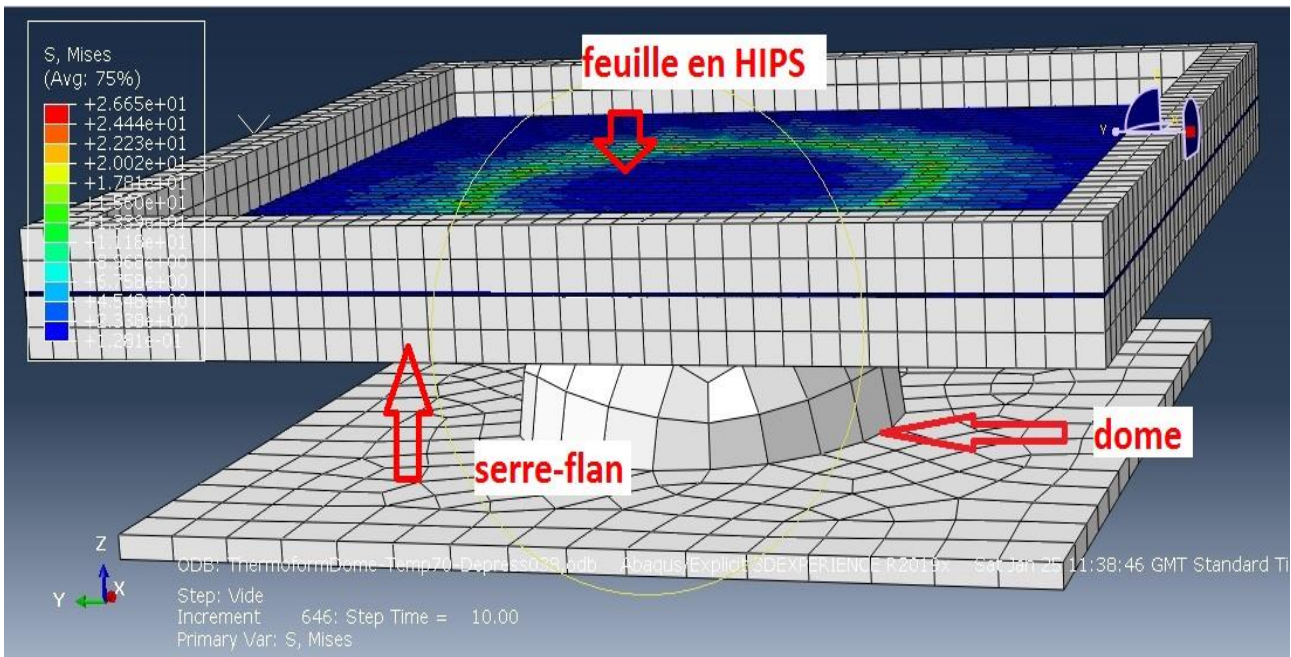


Figure IV-19 : modèle implémenté en ABAQUS.

Cette analyse est une analyse thermomécanique mais pas élastoplastique. En température de thermoformage le HIPS montre un comportement non linéaire hyperélastique en plus de son comportement viscoélastique.

Le model utilisé dans cette analyse est hyperélastique donc les propriétés élastiques n'ont pas été introduites. La réponse hyperelastique est modélisée selon le model d'Ogden.

L'énergie de déformation est exprimée par :

$$U = \sum_{i=1}^N \frac{2\mu_i}{\alpha_i^2} (\lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i} - 3) + \sum_{i=1}^N \frac{1}{D_i} (J^{el} + 1)^{2i}$$

$\lambda$  : déformations principales

$\alpha_i, \mu_i, D_i$  : propriété se matériaux

Les valeurs introduites sont présentées dans le tableau ci-dessous :

Table 2 The material properties of HIPS

Property	Value	Property	Value	
Heat transfer	0.13 (J.s <sup>-1</sup> .m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )	Density	0.909 (g/cm <sup>3</sup> )	
Heat capacity	2 (kJ.K <sup>-1</sup> .Kg <sup>-1</sup> )	T <sub>g</sub>	373 °K	
Linear thermal expansion	6-8 × 10 <sup>-5</sup> K <sup>-1</sup>	WLF equation parameters	C <sub>1</sub> =10.49, C <sub>2</sub> =65, T <sub>ref</sub> =417°K	
Prony series parameters		Ogden model parameters		
i	μ <sub>i</sub> (MPa)	α <sub>i</sub>	g <sub>i</sub>	τ <sub>i</sub>
1	0.17435	1.85226	0.54669	28.44
2	0.10469	0.01498	0.32094	115.16
3	0.52915	-0.02208	0.0820113	1790.2

Tableau VI-6. Fiche technique du HIPS.

IV) 7.2 Présentation des résultats :

Les simulations ont été effectuées à différentes valeurs de la dépression et de la température, Les simulations ont été effectuées en deux temps :

Premier temps : remontée du moule jusqu'à formage de la pointe du dôme (au point numéro 4 représenté sur la « Figure IV-23 »).

Deuxième temps : application de la dépression pour assurer le drapage et compléter le formage.

Les figures qui suivent nous renseignent sur les effets observés.

IV) 7.2.1 Effet de la dépression

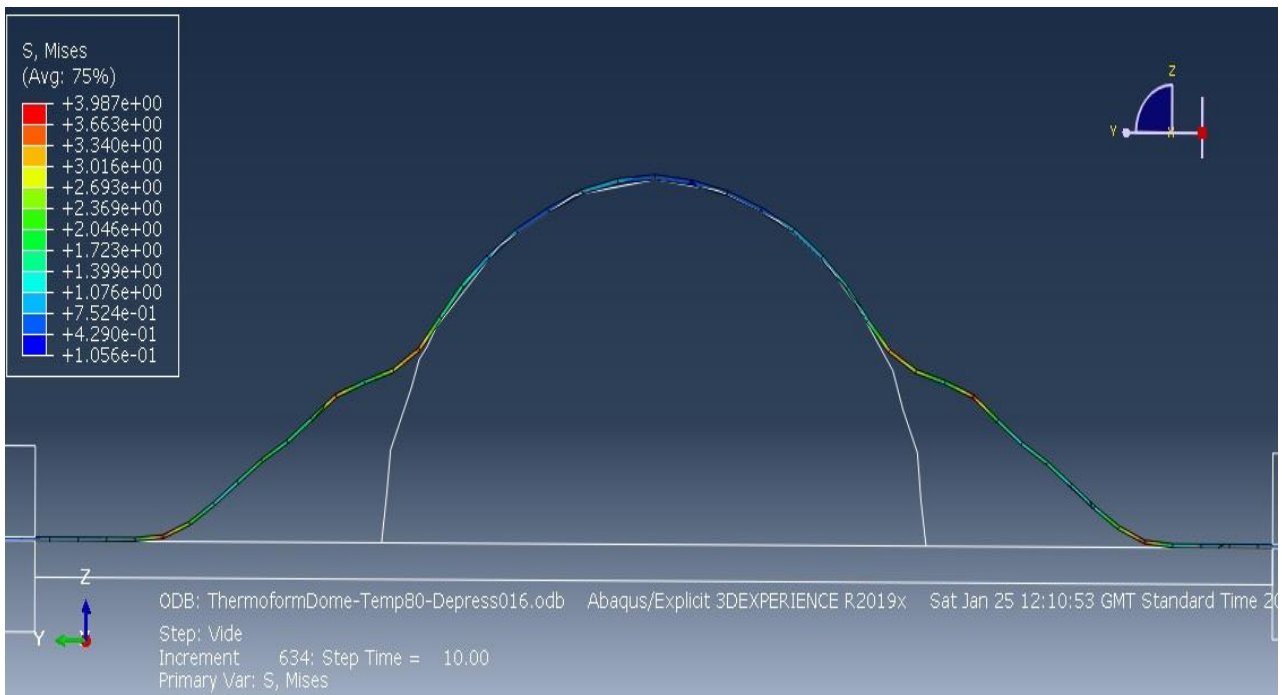


Figure IV-20 : coupe d'une pièce formée à 80°C et à une dépression de -0.16 bar.

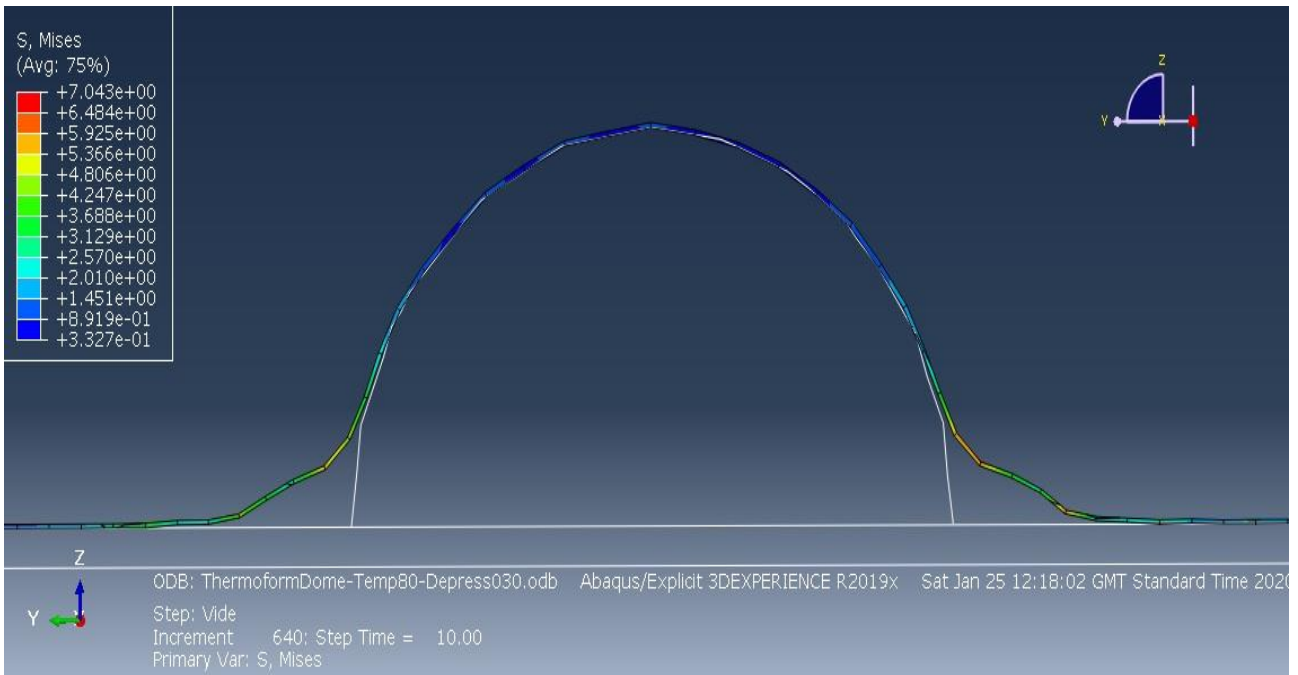


Figure IV-21 : coupe d'une pièce formée à 80°C et à une dépression de -0.30 bar.

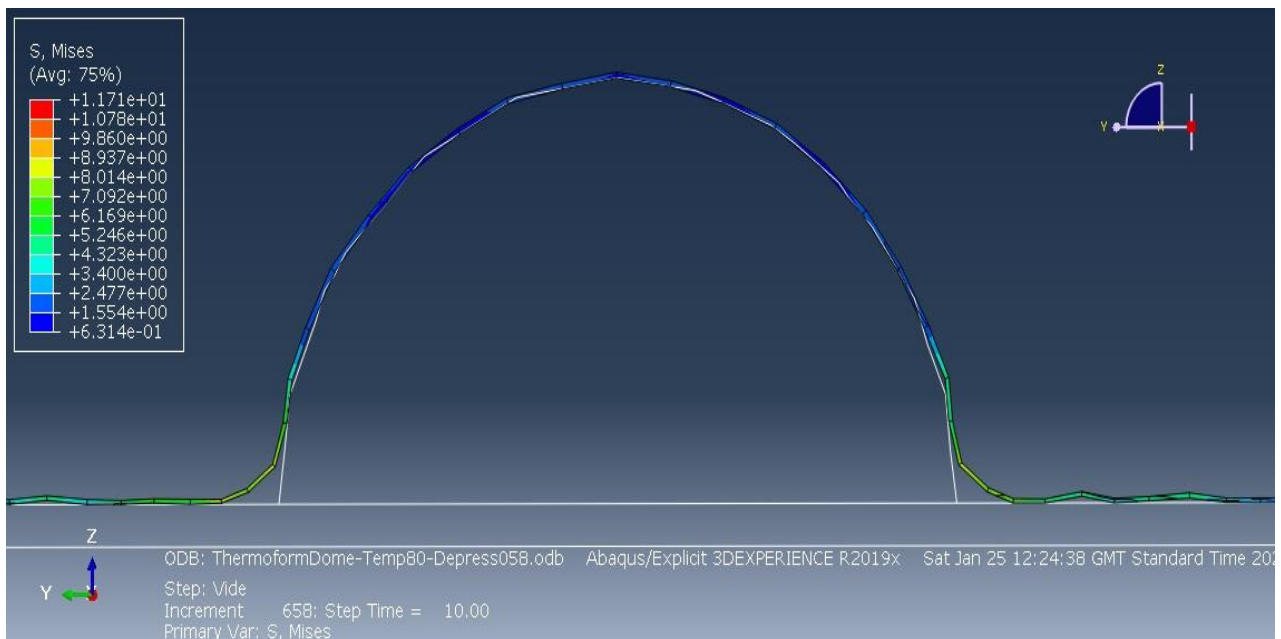


Figure IV-22 : coupe d'une pièce formée à 80°C et à une dépression de -0.38 bar.

On a observé d'après les coupes réalisées sur les modèles « Figures IV-19, 20 & 21 » que pour une température fixe de 80 °C et à des dépressions supérieures à « -0.038 bar » la pièce n'est pas plaquée complètement contre les parois du dôme, c'est-à-dire que les pièces ne sont pas complètement formées, tandis que pour des pressions inférieures à « -0.38 bar » les pièces sont complètement formées.

On peut conclure que la dépression doit être  $\leq -0.38$  bar

IV) 7.2.2 Distribution des contraintes et des déformations

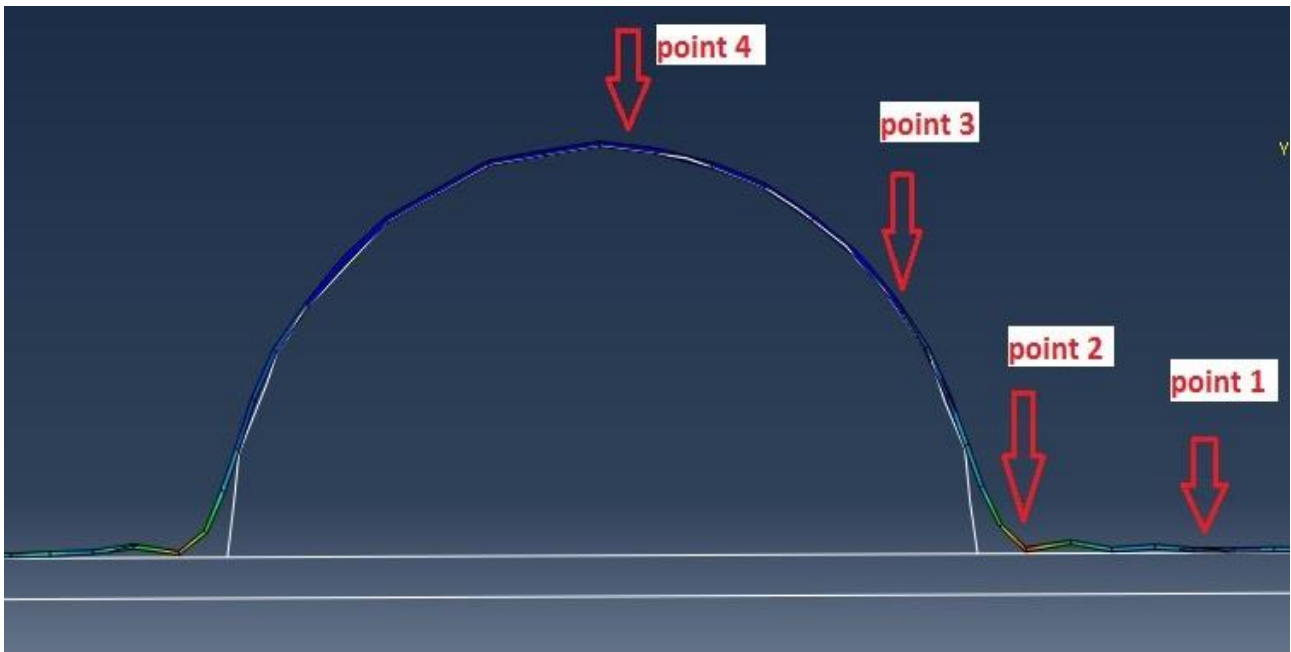


Figure IV-23 : coupe d'une pièce formée à 100°C et à une dépression de -0.38 bar.

Les « Figures IV-24,25 » indiquent que la distribution des déformations est croissante du point le plus bas (point N°1) au point le plus haut (point N°4) résultat de la remontée du moule puis de l'application du vide, le point 4 indique l'endroit où les déformations de la plaque sont les plus importantes

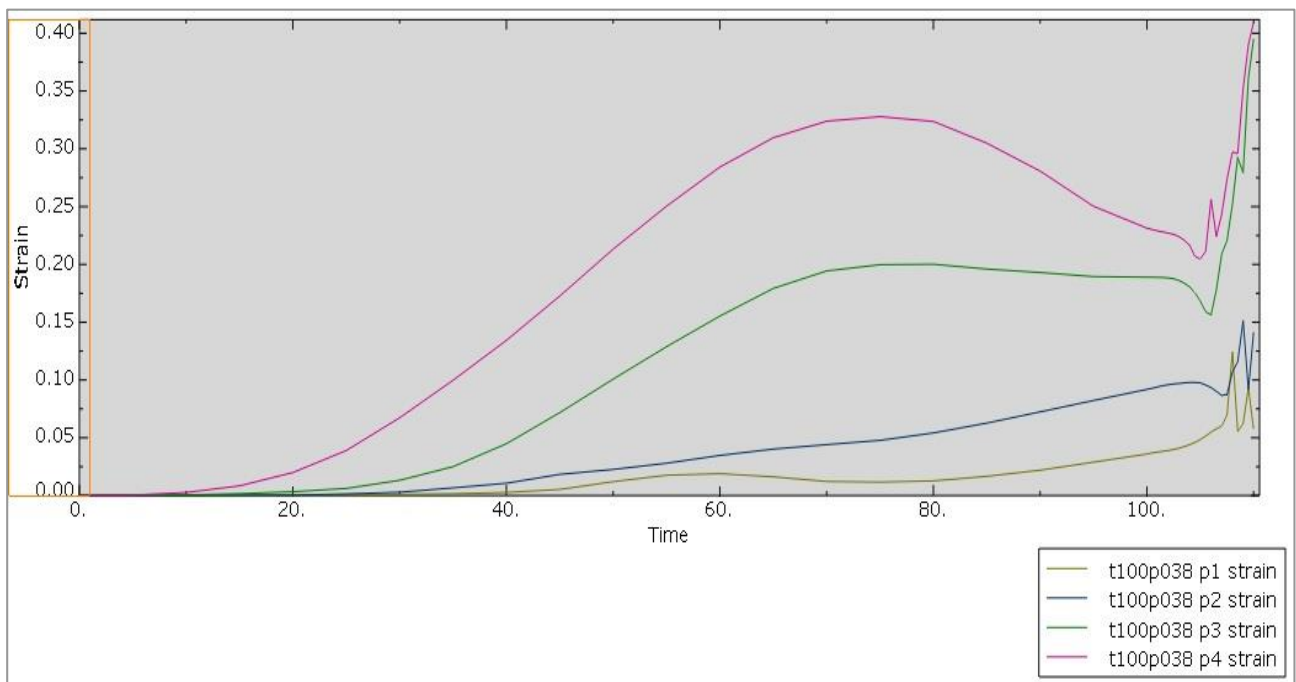
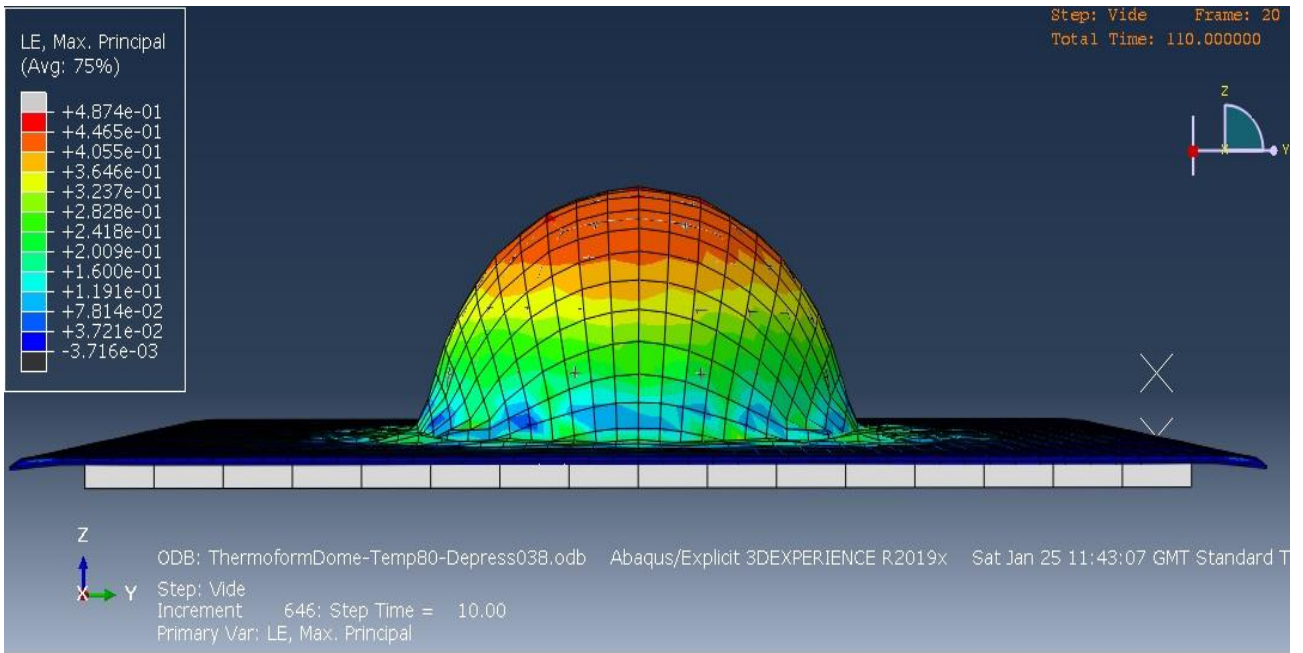
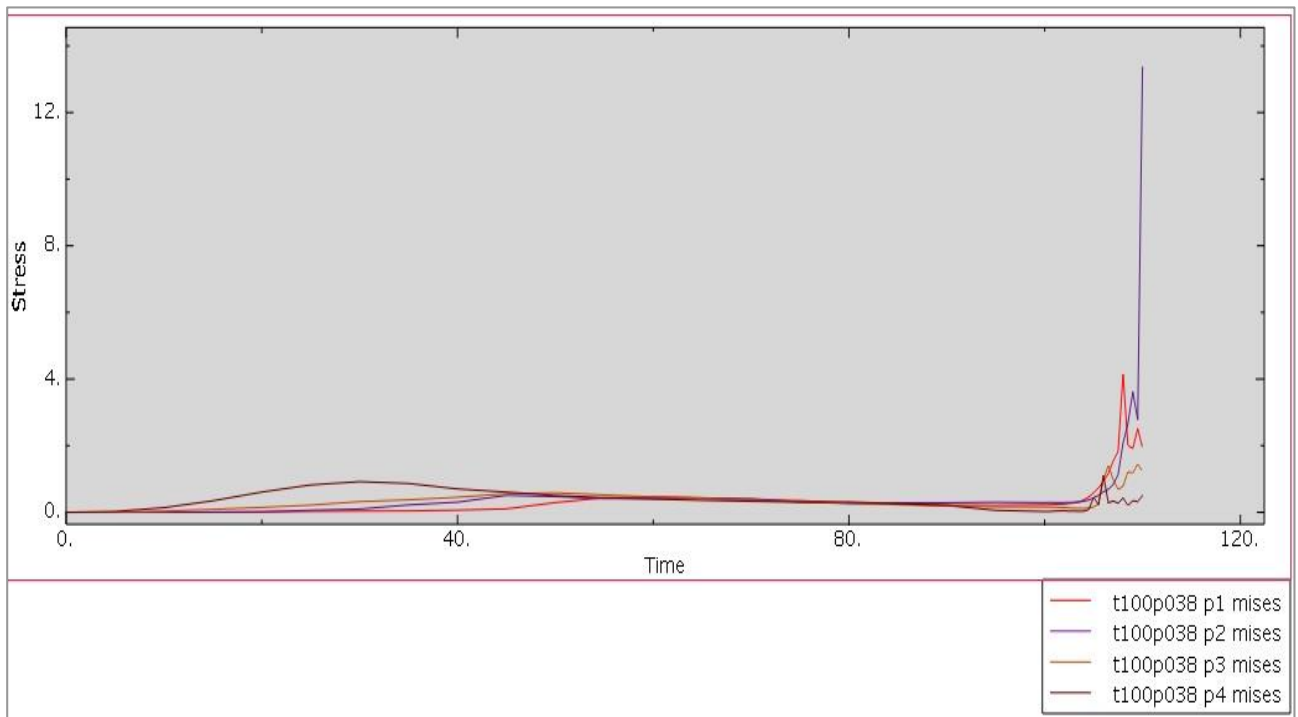


Figure VI-24. Distribution des déformations pour une pièce formée à 100°C et à une dépression de -0.38 bar.



**Figure VI-25.** Distribution des déformations pour une pièce formée à 100°C et à une dépression de -0.38 bar

Les « Figures IV-26,27 » mettent en relief la distribution des contraintes sur la pièce formée, les point N°3 et N°4 indiquent les endroits où la dépression induit le moins de contraintes, le point N°2 au pied du dôme est l’endroit où les contraintes sont le plus concentrées car le drapage n’est pas complètement assuré avant l’application du vide, la dépression génère donc en ce point plus de contraintes, le point N°1 est un point intermédiaire.



**Figure VI-26.** Distribution des contraintes pour une pièce formée à 100°C et à une dépression de -0.38 bar.

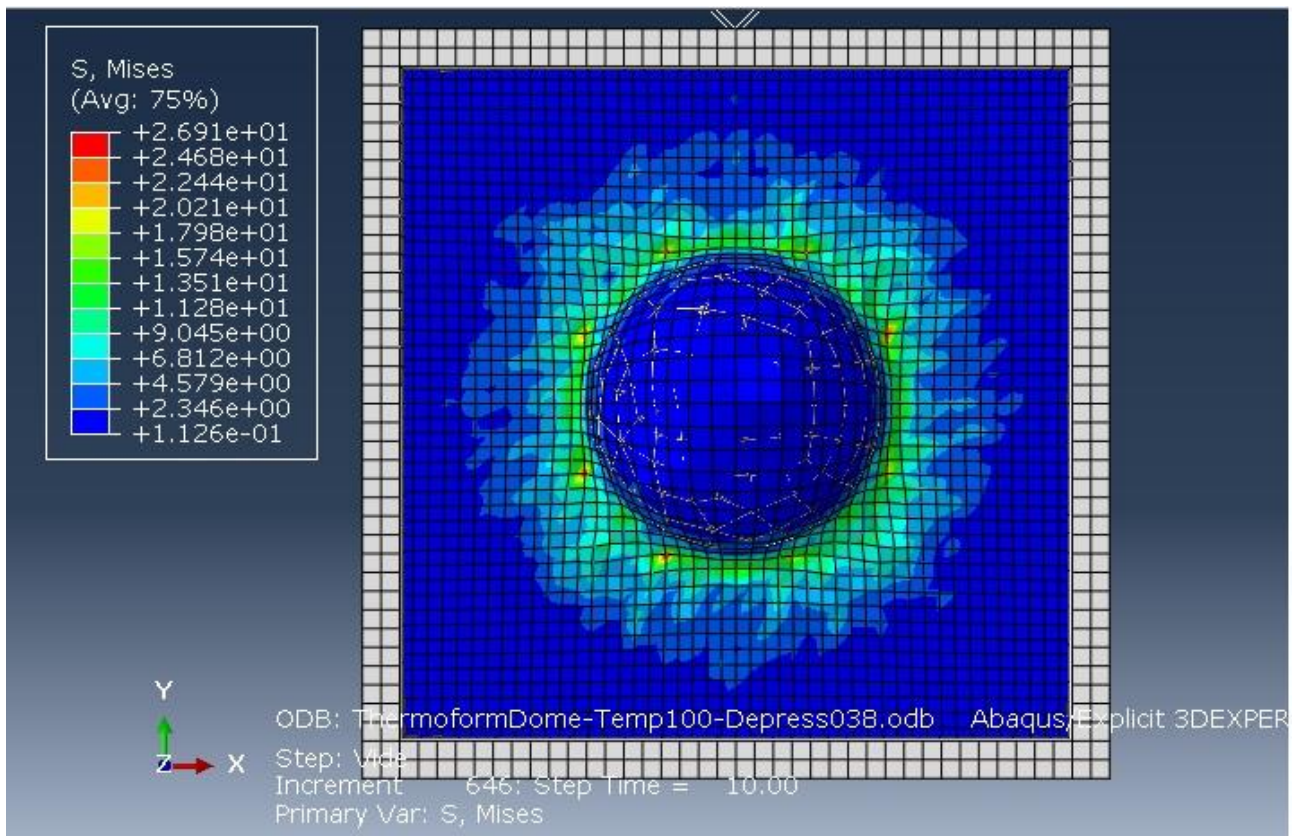


Figure VI-27. Distribution des contraintes pour une pièce formée à 100°C et à une dépression de -0.38 bar.



Figure IV-28 : essai réalisé sur un dôme.

**IV) 8 Conclusion :**

Dans ce chapitre nous avons mis à l'épreuve le dispositif réalisé, l'expérimentation nous a permis de mettre en exergue l'influence de plusieurs paramètres sur le processus de thermoformage sous vide comme la température de formage et l'effet de la dépression.

Il convient en thermoformage de caractériser au mieux le matériau à thermoformer en vue de cerner son comportement rhéologique.

Nous avons mené ensuite une étude numérique et proposé un modèle hyperélastique pour modéliser le comportement du polystyrène choc dans les conditions de thermoformage sous vide. Le modèle proposé permet de prédire la déformée et la distribution des contraintes de manière satisfaisante. La prochaine étape consiste à prendre en compte le frottement et les transferts thermiques entre la feuille et le moule pour compléter et affiner le modèle.

# Conclusion générale et perspectives

## **1. Conclusion générale et perspectives**

L'objectif de ce travail est une meilleure compréhension du procédé de thermoformage via l'étude des processus physiques impliqués dans la déformation de la feuille thermoplastique ou du flan composite à matrice thermoplastique. Malgré l'apparente simplicité de l'application finale, le thermoformage est en fait un procédé technique, difficile à optimiser, dans lequel le matériau subit de très grandes déformations. Plusieurs paramètres interviennent dans le procédé et déterminent la qualité du produit final comme la température, le type de polymère, la pression du vide, la vitesse d'avance du moule, le type de matériau du moule, la température du moule...etc. La multitude des paramètres rend la modélisation de ce procédé très complexe. Le recours à la simulation numérique est alors nécessaire dès la phase de conception pour prédire les différents paramètres du procédé et ainsi minimiser la phase de réglage.

Dans un premier temps nous avons présenté quelques notions générales sur les matériaux thermoformés, avant de décrire le procédé de thermoformage.

Dans le second temps, nous avons buté sur l'incapacité de continuer notre étude sans outil d'expérimentation, nous avons donc entrepris de concevoir et de réaliser avec des moyens sommaires un banc d'essai de thermoformage sous vide de feuilles thermoplastiques et procédé au moulage en sable et coulée de moules en aluminium.

Le banc réalisé nous a permis d'effectuer des essais sur des feuilles HIPS et d'étudier expérimentalement l'effet de la température sur la distribution des épaisseurs des pièces thermoformées sous vide, la simulation numérique nous a offert ensuite l'occasion d'apprécier la distribution des contraintes et des déformations induites en implémentant un modèle dans le logiciel de calcul par éléments finis ABAQUS.

Notre étude expérimentale n'est qu'une première approche et il conviendrait de développer un programme plus complet.

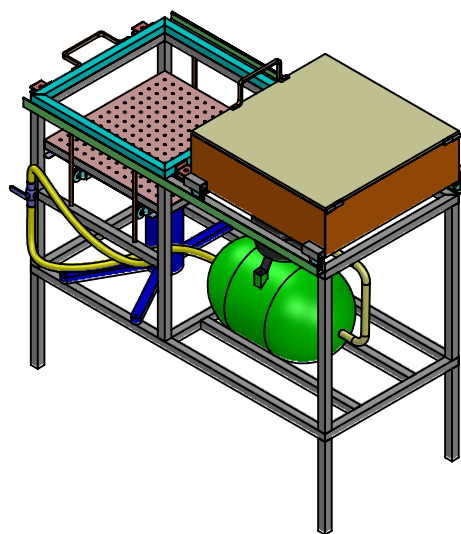
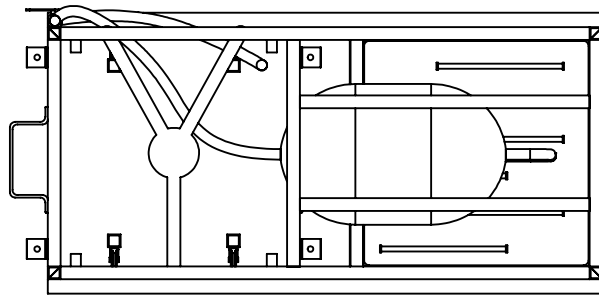
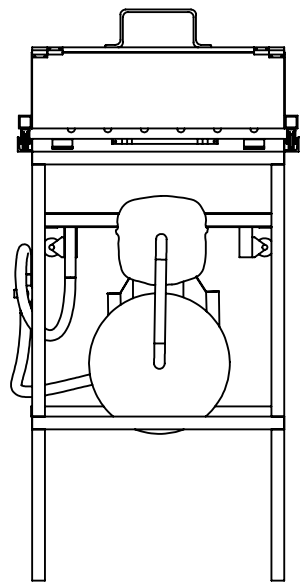
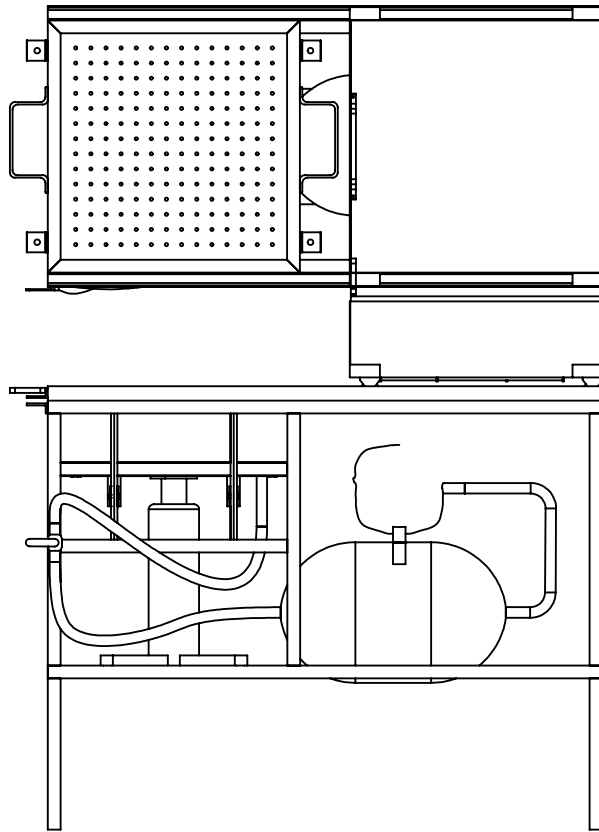
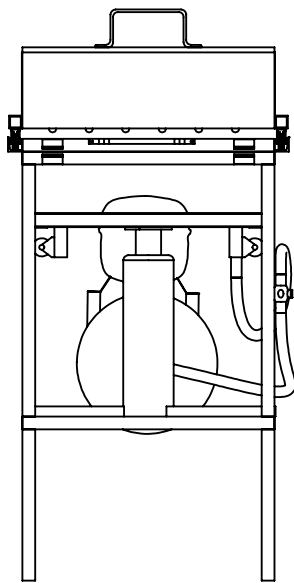
- ✓ Nous préconisons d'améliorer les performances du banc réalisé en installant un système de régulation de pression afin notamment d'intégrer une fonction bullage.
- ✓ Il serait intéressant d'étudier les effets d'autres paramètres tels que l'influence du type des radiants choisis (ex sur la dégradation du matériau lors du chauffage), et la caractérisation des interactions moule/matière/serre-flan du point de vue tribologique, thermique, cinématique...etc.
- ✓ Il serait tout aussi intéressant d'expérimenter les comportements d'autres types de thermoplastiques en thermoformage sous vide notamment ceux issus du recyclage de déchets ménagers ou industriels.

## ***Conclusion générale et perspectives***

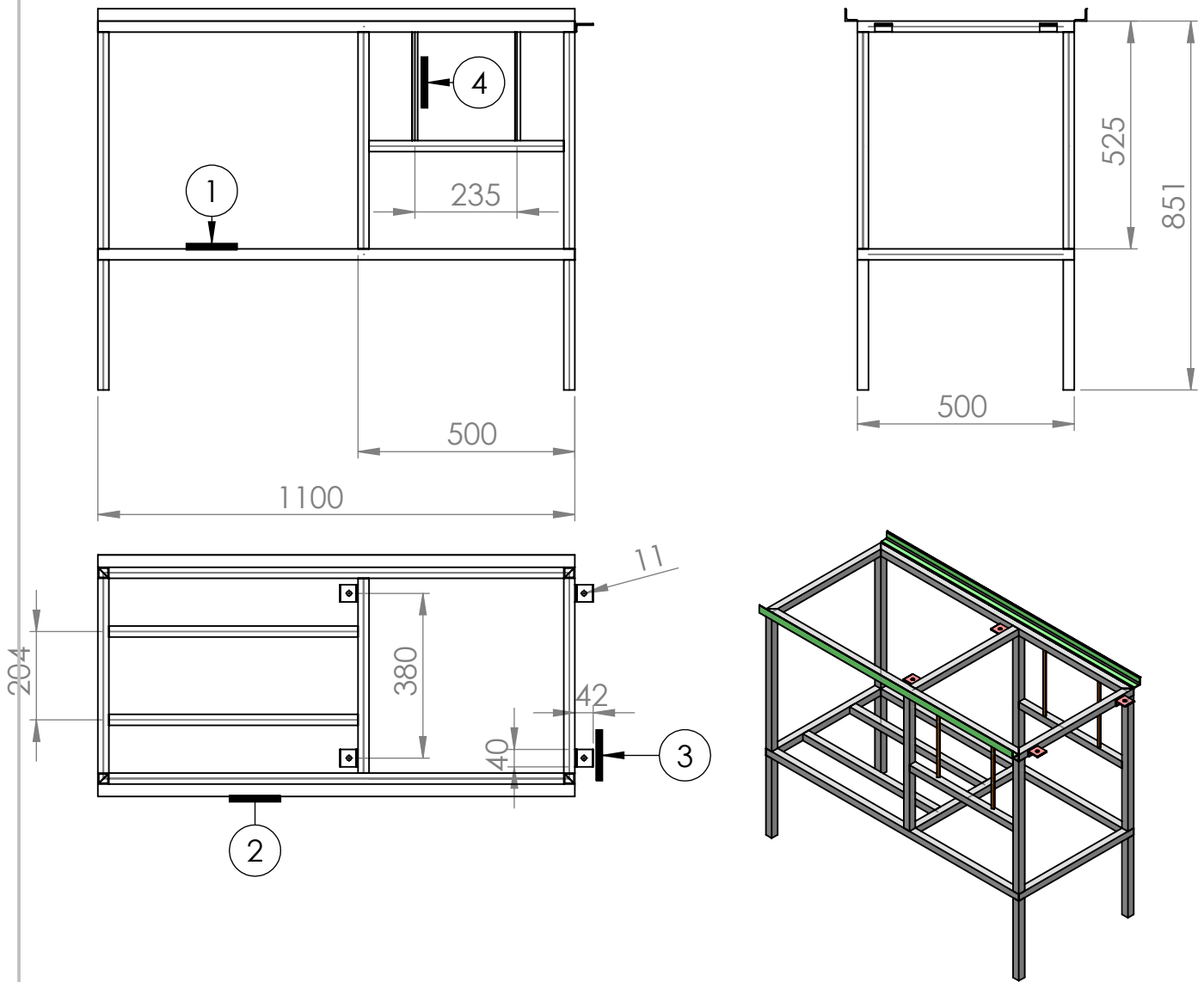
---

- ✓ Nous encourageons vivement le recours à la modélisation et à la simulation numérique, c'est là une étape importante pour l'optimisation du procédé de thermoformage et éviter ainsi des méthodes de type Essais-Erreurs longues et coûteuses.

# Mises en plan



echelle 1:1	UMMTO Dept GC	M.Oukaci M.Messaoud
	<b>DISPOSITIF DE THERMOFORMAGE</b>	24/01/2020
Format A4	Dispositif de thermoformage	M2 CM



5	écrous de serrage	écrous hexagonaux M8	aciers	02Pcs	NF EN ISO 4032
4	glissière	Fer carré plein 10	acier laminé a chaud	1,2 m	NF EN 10059
3	équerre de fixation	Cornière 40×25×5	acier de construction	0,2 m	NF EN 10056-1
2	rail	Cornière 25×25×2	acier de construction	2,2 m	NF EN 10056-1
1	ossature	Tube carré 25×25×2	aciers non alliés	13 m	NF EN 10210-2
N	element	désignation	matériaux	quantité	norme

echelle 1:1

UMMTO Dept GC

**M.Oukaci**  
**M.Messaoud**



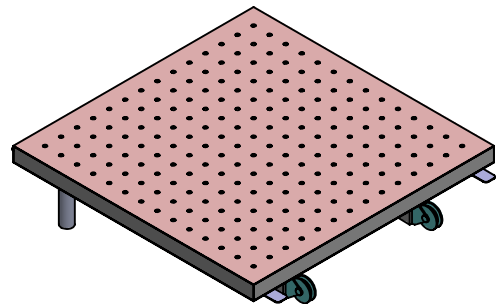
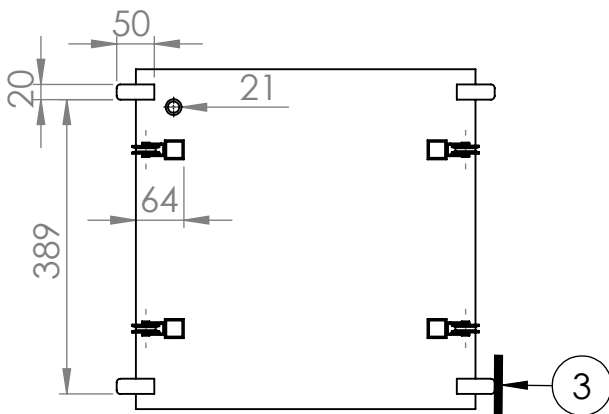
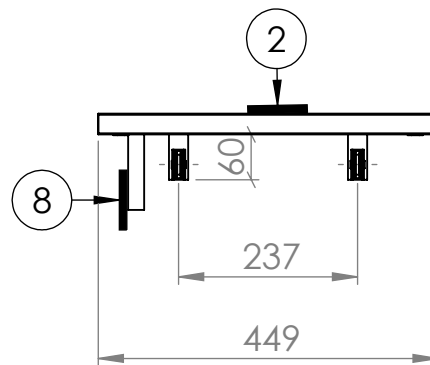
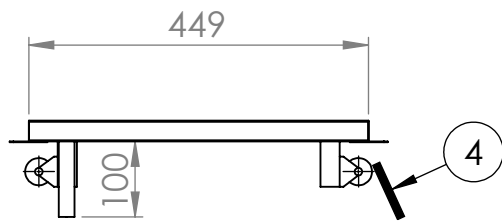
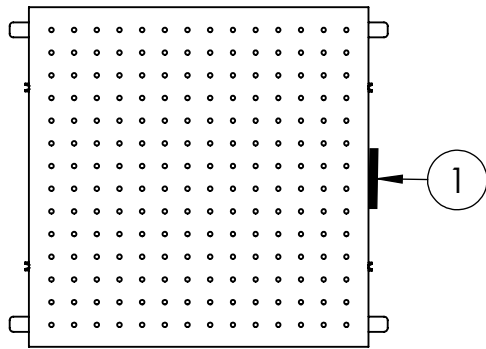
**BATI**

24/01/2020

Format A4

**Dispositif de thermoformage**

M2 CM



8	embout	tube diamètre 21 mm	acier galvanise	0,1 m	EN 10255
7	rondelle	rondelle M6	acier	08Pcs	ISO 7089
6	écrous de fixation	écrous hexagonaux M6	acier	08Pcs	NF EN ISO 4032
5	boulon de fixation	Vis à tête hexagonale partiellement filetées M6	acier	08Pcs	NF EN ISO 4014
4	galet	Galet a gorge 30 mm	acier	4 Pcs	
3	butée	Fer plat 30×2 mm	acier laminés à chaud	0,2 m	NF EN 10058
2	faces inf/ et sup	Tôle d'acier LAC ep 5mm	acier laminés à chaud	0.5m2	NF EN 10029
1	parois latérales	Tube carré 25×25×2 mm	aciers non alliés	2 m	NF EN 10210-2
N	element	désignation	matériaux	quantité	norme

echelle 1:8

UMMTO Dept GC

**M.Oukaci**  
**M.Messaoud**



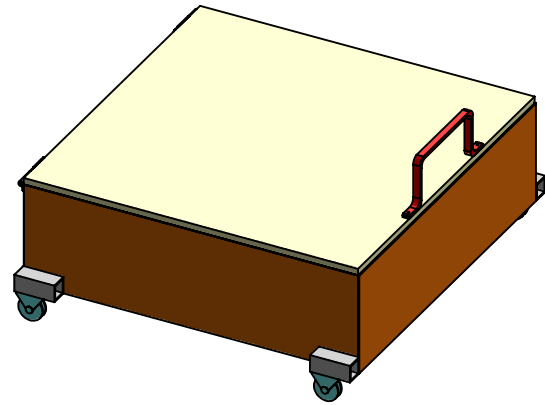
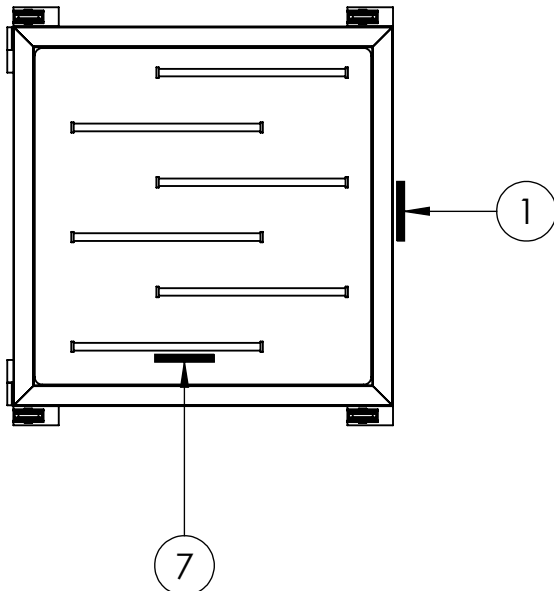
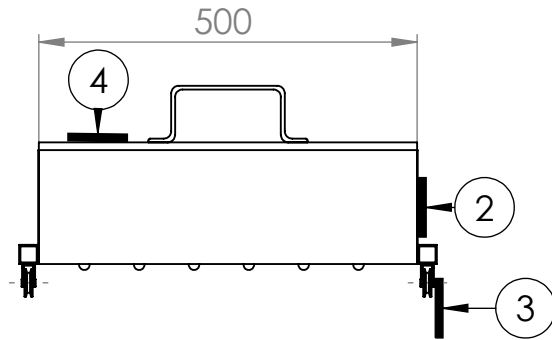
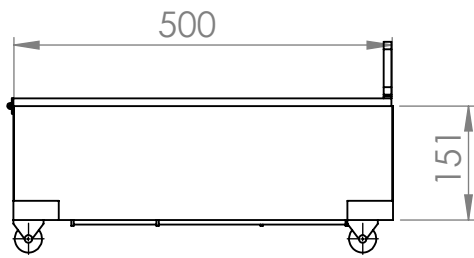
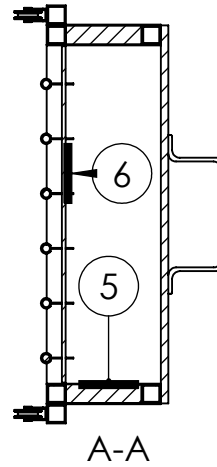
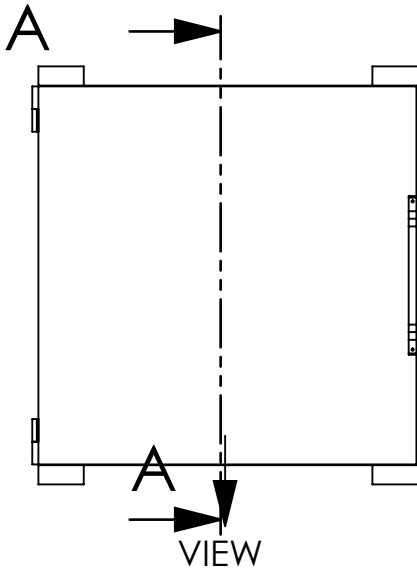
**CHAMBRE VIDE**

24/01/2020

Format A4

Dispositif de thermoformage

M2 CM



7	élément chauffant	radiant 6 kW	céramique	6 pcs	
6	voute	plaque 450 x 450 x 10	céramique	1 Pcs	ISO/TC 189
5	isolant thermique	matelas en laine de verre ep 25 mm	laine de verre (0,04 w/k m)	0,3 m2	NF EN 13162
4	trappe	plaque en bois 500x 500 x 10	Bois aggloméré	0,25 m2	
3	galet	Galet a gorge 30 mm	acier	4 Pcs	
2	parois latérales	Tôle en acier galvanisé ep 1mm	acier galvanise	0,6m2	EN 1014
1	ossature	Tube carré 25×25×2	aciers non alliés	5 m	NF EN 10210-2
N	constituant	désignation	matériaux	quantité	norme

echelle 1:1

UMMTO Dept GC

M.Oukaci  
M.Messaoud

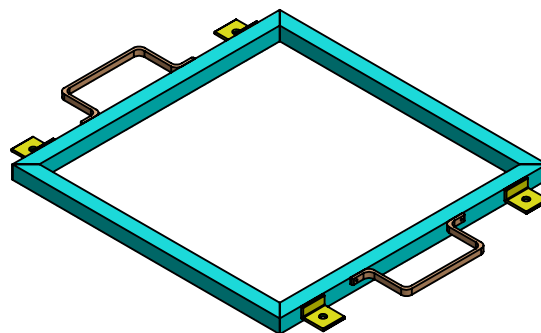
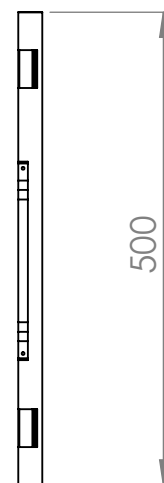
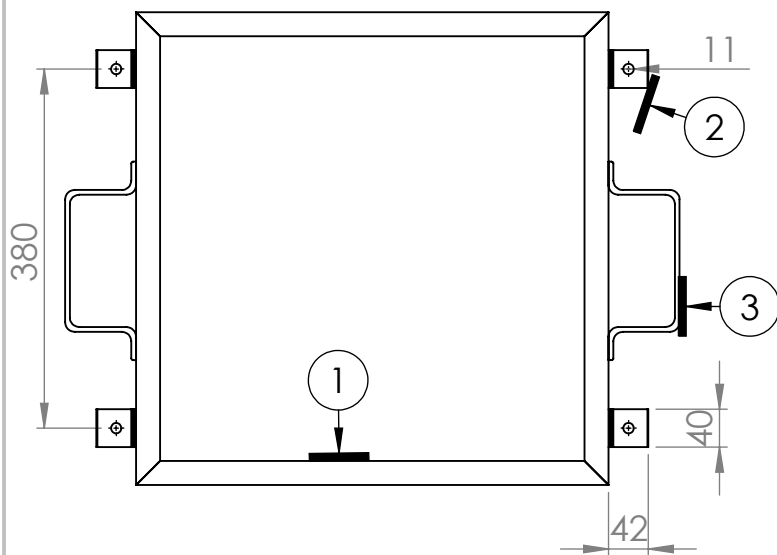


**ENCEINTE THERMIQUE**  
Dispositif de thermoformage

24/01/2020

Format A4

M2 CM



4	vis de fixation	M10 x 1,5 qualité 10.9	acier	04 pcs	DIN 933
3	poignée		aluminium	2 Pcs	
2	équerre de fixation	Cornière 40×25×5	acier de construction	0,2 m	NF EN 10056-1
1	serre-flan	Tube carré 25×25×2	aciers non alliés	2 m	NF EN 10210-2
N	element	désignation	matériaux	quantité	norme

echelle 1:8

UMMTO Dept GC

**M.Oukaci**  
**M.Messaoud**



**SERRE FLAN**

24/01/2020

Format A4

Dispositif de thermoformage

M2 CM

# Références bibliographiques

- [1] Matière plastique: Edition Tec et doc Jean Jean Bost (1 et 2). 2eme Edition 1992
- [2] [www.aquaportail.com](http://www.aquaportail.com)
- [3] Structure moléculaire et morphologie des polymères Auteur(s) : Michel FONTANILLE, Yves GNANOU. 1ere Edition 1994
- [4] P. Weiss: La chimie des polymères, Société francophone de matériaux dentaires 2009-2010.
- [5] Abdoun SLIMANI Université des sciences et de la technologie d'Oran Algérie - Magister 2010
- [6] Courbe polymères C. G'Sell. Instabilités de déformation pendant l'étirage des polymères solides, Revue de Physique Appliquée, 1085–1101, 1988.
- [7] J.Lignon.R maillebuav : Étude de matériau II. Matériau non ferreux/2003.
- [8] D. Gridaine : mise en œuvre des polymères, 2010.
- [9] BILLON, N., Comportement des polymères. In : La mise en forme des matériaux, 20 ans de recherche au CEMEF.
- [10] Imane Belyamani. Développement d'un matériau thermoplastique biodégradable et hydrosoluble à base d'une protéine du lait. Autre. Université Jean Monnet - Saint-Etienne, 2011.
- [11] Roland FORTUNIE. Comportement Mécanique des Matériaux. Ecole Nationale Supérieure des Mines. Saint-Etienne
- [12] S. CANTOURNET. Bases Physiques Quantitatives Des Lois De Comportement Mécanique. ParisTech. 2012.
- [13] Propriétés des thermoplastiques - Tableaux comparatifs Auteur(s) : Michel BIRON 1ere Edition 2007
- [14] HENRY, J. F., Caractérisation thermique des matériaux d'emballage (PET,PS) mis en œuvre lors des procédés de mise en forme (soufflage bi – étirage, thermoformage) par thermographie IR, Session n°3 : Serquigny, 19 et 20 juin 2003, LTP, Université de Reims
- [15] Techniques de l'ingénieur, Auteur(s) : Jean-François AGASSANT, Robert HINAULT Publie le 10 janv. 2001
- [16] Adolf Illig : Pratique du thermoformage, Hermès science publication. mai 1993.
- [17] Aliza Erner. Étude expérimentale du thermoformage assisté par poinçon d'un mélange de polystyrènes. Chimie. École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2005.
- [18] M. Guillemot et C. Patrascu INRS, Métrologie des polluants, Expertise et conseils techniques, (metropol@inrs. Version 2- Avril 2019
- [19] BLOC-D\_David-Trudel-Boucher\_CNRC\_Thermoplastiques-fibre-continue-1.pdf
- [20] **Gornet**. Généralités sur les matériaux composites. Engineering school. 2008.
- [21] D. Gay. Matériaux composites. Hermès, 1991

- [22] Marie-Barbara Heman Contribution à l'étude des interphases et de leur comportement au vieillissement hygrothermique dans les systèmes à matrice thermodurcissable renforcés de fibres de verre. Physique [physics]. Université du Sud Toulon Var, 2008. Français
- [23] F. DAL MASO et J. MÉZIÈRE Calcul des propriétés élastiques des tissus utilisés dans les matériaux composites, Copyright C 1998, Institut français du pétrole.
- [24] ÉVALUATION EXPÉRIMENTALE DU PROCÉDÉ DE THERMOFORMAGE-ESTAMPAGE D'UN COMPOSITE PEEK/CARBONE CONSTITUÉ DE PLIS UNIDIRECTIONNELS présenté par: LESSARD Hugues
- [25] Bénédicte BONNET Comportement au choc des matériaux composites pour applications automobiles. Thèse Doctorat, École Nationale Supérieure des Mines de Paris (2005).
- [26] JAMMET, J. C., Thermoformage, Techniques de l'ingénieur, 1998, AM, AM3660.
- [27] ILLIG, A., Pratique du thermoformage, Paris : Hermes Science Publication, 1999.
- [28] JEAN BAL THERMOFORMAGE
- [29] L'industrie française de l'emballage en chiffres, édition 2000, Ministère de l'économie, des finances et de l'industrie (données du Service des Statistiques Industrielles SESSI).
- [30] <http://plasturgiejp.free.fr/atelier%20plasturgie/thermoformage/cours%20sur%20le%20thermoformage.pdf>
- [31] Guilbaud N. Le thermoformage, 30 applications. La Gaude: Guilbaud édition, 2002,
- [32] Aliza Erner. Étude expérimentale du thermoformage assisté par poinçon d'un mélange de polystyrènes. Chimie. École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2005.
- [33] H. Reitschel et W. Reiss : Traité de chauffage et de climatisation, Dunod. 1995.
- [34] [www.thermoformage.com](http://www.thermoformage.com) **Editeur** SAS RBL Plastiques Rue du Président Wilson  
44110 CHATEAUBRIAN
- [35] JAMMET, J. C., Thermoformage, Techniques de l'ingénieur, 1998, AM, AM3660.
- [36] Jonathan IDRAC COMPORTEMENT ÉLECTROCHIMIQUE D'ALLIAGES MODÈLES BINAIRES ALUMINIUM-CUIVRE.
- [37] Evonik Röhm GmbH Kirschenallee 64293 Darmstadt Allemagne
- [38] F. Kreith : Transmission de la chaleur et thermodynamique, Masson et Co, 1967
- [39] Document fourni par ENIEM.
- [40] H. Amirabadi Department of Mechanical Engineering, University of Birjand, Birjand  
97175-615, Iran e-mail: hoamirabadi@yahoo.com
- [41] [www.Vis-express.fr](http://www.Vis-express.fr)