

**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**

**Université MOULOUD MAMMERY de Tizi-Ouzou**

**Faculté du Génie de la Construction**

**Département de Génie Mécanique**



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

Option : Construction Mécanique

# **MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES**

« Etude et Conception d'un moule de  
thermoformage pour la nouvelle contre-porte du  
réfrigérateur 350S »

**Proposé par :**

**Mr :** BOUHADA Mohamed (ENIEM)

**Promotrice :**

**Dr :** BAGUENANE Ghalia née BENALIA

**Copromoteur**

**Mr :** DIFELLAH Yahia (ENIEM)

**Réalisé par :**

**Mr :** ALIANE Massinissa

**Mr :** GUESSOUM Fatah

**Promotion : 2015/2016**

# Remerciements

*Au terme de ce travail, nous tenons à exprimer nos plus vifs remerciements à tous ceux qui, de près ou de loin, ont eu un effet sur ce mémoire, tant par leur collaboration scientifique et technique que par leur encouragements ou simplement par leur amitié.*

*Tout d'abord, nous remercions **Dieu** tout puissant qui nous a donné le courage pour terminer ce travail.*

*Ensuite, un très grand merci à Monsieur BOUHADA Mohamed de l'unité froid, qui nous a proposé le thème de notre projet.*

*Notre reconnaissance et notre gratitude s'adressent à Monsieur DIFELLAH Yahia, pour nous avoir dirigé et conseillé ainsi qu'à tout le personnel de l'Unité Préstation Technique de l'ENIEM pour leur aide et soutien pendant la durée de notre stage au sein de l'ENIEM.*

*Nous tenons aussi à remercier notre promotrice, Dr BAGUENANE Ghalia enseignante-chercheur-permanente au département de Génie Mécanique UMMTO pour sa disponibilité et ses orientations tout au long de notre travail.*

*Mes remerciements vont aussi à tous les membres de jury pour avoir accepté d'honorer par leur jugement notre travail.*

# *Dédicaces*

*Je dédie ce travail à :*

*Mes chers parents, que nulle dédicace ne puisse exprimer mes sincères sentiments, pour leur patience illimitée, leur encouragement continu, leur aide, en témoignage de mon profond amour et respect pour leurs grands sacrifices.*

*Chère sœur Katia, pour son soutien.*

*Mon cher grand père CHIKH MOUH.*

*A la mémoire de mon grand-père Ramdane et mes grands-mères Ounissa et Baya.*

*A toute la famille RABAH et ALANE ainsi qu'à tous ceux que j'aime.*

*A mon cher binôme Fatah.*

*Tous mes amis(es) et tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin.*

*Massinissa*

# *Dédicaces*

*Je dédie ce travail à :*

*Mon très cher père et ma très chère mère auxquels je dois tout dans la vie et que je ne remercierai jamais assez pour leurs soutiens, encouragements durant tout mon parcours d'étude.*

*À mes chères sœurs*

*À mon cher frère Mohamed*

*À mon grand-père Baba Amar*

*À la mémoire de mon grand-père Mohamed et mes grands-mères Fatma et Baya.*

*À mon cher binôme Massinissa*

*À tous mes amis et à toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin dans ce travail*

*Fatah*

*Massinissa et Fatah dédient ce travail à toute la promotion de Construction Mécanique 2015 |2016 et sans oublier le groupe des frères de la chambre B1-118 :*

*Allek Amir.*

*Aoudjehane Aziz.*

*Allaoua Rachid.*

*Ben Bachir Madjid.*

*Bourkache Yacine.*

*Ben Aissa Slimane.*

*Belkhir Abdelhakim.*

# SOMMAIRE

---

<b>Introduction générale</b> .....	01
<b>Présentation de l'entreprise</b> .....	02
<b>Chapitre I: Les polymères et leurs mises en œuvre.</b>	
I.1.Introduction.....	11
I.2.Généralités sur les polymères.....	11
I.2.1.Atome et valence atomique.....	11
I.2.2.Pouvoir des liaisons et radicaux des atomes.....	12
I.2.3.Polymérisation des polymères.....	12
I.2.4.Basse molécule et polymère.....	12
I.2.5.Monomère.....	13
I.2.6.Copolymère.....	13
I.2.7.Homopolymère.....	13
I.2.8.Saturation et non-saturation.....	13
I.2.9Masse moléculaire et degré de polymérisation.....	14
➤ Degré de polymérisation.....	14
➤ Masse moléculaire.....	15
I.3.Procédé de synthétisation des polymères.....	15
I.3.1.Polycondensation (formation des résidus) .....	15
I.3.2.Polyaddition (sans formation des résidus) .....	16
I.3.3.Copolymérisation.....	16
➤ Copolymère Statique.....	16
➤ Copolymère Alternatif.....	17
➤ Copolymère-séquence.....	17
➤ Copolymère Greffé.....	17
I.3.4.Polymérisation par fission de la chaîne.....	17
I.4.Structure des polymères.....	18
I.4.1.Polymères linéaires.....	18
I.4.2.Polymères Ramifiés.....	19

# SOMMAIRE

---

I.4.3.Polymères Réticulés.....	19
I.4.4.Polymères Amorphes et Polymères Cristallisés.....	20
I.5.Type des polymères.....	20
I.5.1.Thermoplastiques.....	20
I.5.2.Thermodurcissables.....	20
I.5.3.Elastomères.....	21
I.6.Propriétés des polymères.....	21
I.6.1Propriétés mécanique.....	21
I.6.2.Propriétés chimiques.....	22
I.6.3.Propriétés thermiques et physiques.....	22
I.7.Additifs.....	23
I.7.1.Agent de Renforcement et Matière de Charge.....	23
I.7.2.Agent de Fluidisation.....	23
I.7.3.Stabilisant.....	23
I.7.4.Plastifiant.....	24
I.7.5.Colorant.....	24
I.7.6.Durcissant.....	24
I.8.Procédé de fabrication des matériaux plastiques.....	24
I.9.Matériaux HIPS.....	25
I.9.1.Description.....	25
I.9.2.Caractéristiques principales.....	26
I.9.3.Avantages.....	26
I.10.Mise en œuvre des Polymères .....	27
I.10.1.Thermoplastiques.....	27
I.10.2.Thermodurcissables.....	29
I.11.Avantages et inconvénients des polymères.....	30
I.11.1.Avantages.....	30

# SOMMAIRE

---

I.11.2.Inconvénients.....	30
I.12.Conclusion.....	31
<b>Chapitre II: Procédé de thermoformage</b>	
II.1.Introduction.....	32
II.2.Présentation du Thermoformage.....	32
II.3.Cycle du Thermoformage.....	32
II.3.1.Chauffage.....	33
II.3.2.Formage.....	33
II.3.3.Refroidissement.....	34
II.3.4.Découpage.....	35
II.4.Type de machine du Thermoformage.....	36
II.4.1.Machine du Thermoformage discontinu (Cas de l'ENIEM).....	36
II.4.2.Machine du Thermoformage continu.....	36
II.5.Procédés de Formage.....	37
II.5.1.Thermoformage par Moyens Mécaniques.....	37
II.5.2.Thermoformage par Moyens Pneumatique.....	38
II.5.2.1.Thermoformage sous Vide.....	38
II.5.2.2.Thermoformage sous Pression.....	39
II.5.2.3.Drapage.....	39
II.5.3.Thermoformage par Moyens Mixte.....	40
II.5.3.1.Thermoformage sous vide avec poinçon de pré-étirage.....	40
II.5.3.2.Thermoformage en relief profond sous vide.....	41
II.5.3.3.Thermoformage en bulle sous pression avec pré-étirage.....	43
II.5.3.4.Thermoformage sous pression avec poinçon de pré-étirage.....	44
II.6.Thermo formeuse (Utilisé à l'ENIEM).....	45
II.6.1.Fonctionnement.....	45
II.6.2.Composants de la thermo formeuse.....	45

# SOMMAIRE

---

II.7. Anomalie de fonctionnement.....	47
II.8. Avantages et inconvénients du Thermoformage.....	48
II.8.1. Avantages.....	48
II.8.2. Inconvénients.....	49
II.9. Conclusion.....	49
<b>Chapitre III: Étude et conception</b>	
III.1. Introduction.....	50
III.2. Présentation des composantes du moule.....	51
III.2.1. Pièces Latérales.....	51
III.2.2. Pièces de Coins.....	53
III.2.3. Insert.....	53
III.2.4. Paroi.....	54
III.2.5. Semelle.....	54
III.2.6. Cadre.....	55
III.2.7. Echangeur.....	55
III.3. Dimensionnement de l'échangeur.....	56
III.3.1. Calcul du Flux Total.....	56
III.3.1.1. Calcul du flux de chaleur cédé par convection entre la feuille plastique et le milieu extérieur.....	57
III.3.1.2. Calcul de $\Phi_2$ .....	60
III.3.1.3. Calcul de $\Phi_{pertes}$ .....	61
III.3.2. Dimensionnement de l'échangeur.....	63
III.3.2.1. Donnée du problème.....	63
III.3.2.2. Méthode de calculs.....	63
III.4. Choix des Matériaux.....	66
III.4.1. Aluminium et Alliage d'aluminium (Al Mg5).....	66
III.4.2. Cuivre et ces alliages.....	67

## SOMMAIRE

---

III.5 Conclusion.....	68
<b>Mises en plan.....</b>	<b>69</b>
<b>Conclusion Générale.....</b>	<b>70</b>
<b>Perspectives.....</b>	<b>70</b>

## Liste des figures

---

Figure 1: Organigramme de l'ENIEM .....	06
Figure 2: Organigramme de l'unité froid .....	07
<b>Chapitre I : Les polymères et leur mise en œuvre</b>	
Figure I.1 : Valence atomique.....	11
Figure I.2 : Groupes d'atomes qui possèdent un bras de liaison libre .....	12
Figure I.3 : La Différence entre monomère et polymère .....	13
Figure I.4 : Exemple d'un état saturé .....	14
Figure I.5 : Schématisation de la Molécule de polyéthylène .....	14
Figure I.6 : Formation du nylon 6-6 par réaction entre l'acide hexane-dioïque et l'hexaméthylène-diamine .....	16
Figure I.7 : Formation d'un polymère à partir de la polyaddition d'un monomère .....	16
Figure I.8 : Exemple de la polymérisation par croissance en chaîne par ouverture d'anneau pour produire le polycaprolactone .....	17
Figure I.9 : Polymère linéaire .....	18
Figure I.10 : Homopolymère ramifié (a) et Copolymère ramifié (b).....	19
Figure I.11 : Polymère réticulé avec ponts disulfure relie deux chaînes. ....	19
Figure I.12 : Procédé général. ....	25
Figure I.13 : Plage de thermoformage pour différents types de polymères. ....	26
Figure I.14: Procédé d'injection plastique.....	27
Figure I.15 : Procédé de l'extrusion. ....	27
Figure I.16 : Procédé de thermoformage .....	28
Figure I.17 : Procédé de calandrage.....	28
Figure I.18 : Procédé de moulage par compression .....	29
Figure I.19 : Procédé de Roto moulage.....	30
<b>Chapitre II : Procédé de Thermoformage</b>	
Figure II.1 : Formage male et femelle.....	34
Figure II.2 : Machine du thermoformage discontinue .....	36
Figure II.3 : Machine continue.....	37

## Liste des figures

---

Figure II.4 : Thermoformage sous vide .....	39
Figure II.5 : Thermoformage sous vide avec poinçon de pré-étirage .....	40
Figure II.6 : Thermoformage en relief profond sous vide.....	41
Figure II.7 : Formage male et formage femelle. ....	42
Figure II.8 : Thermoformage en bulle sous pression avec de pré-étirage .....	43
Figure II.9 : Thermoformage sous pression avec poinçon de pré-étirage.....	44
<b>Chapitre III : Etude et Conception</b>	
Figure III.1 : contre porte 350S.....	50
Figure III.2 : Empreinte de la contre porte 350S .....	50
Figure III.3 : Les 05 blocs du moule.....	51
Figure III.4 : Type des pièces latérales. ....	51
Figure III.5 : Porte pièce latérale. ....	52
Figure III.6 : Montage du mécanisme dans la pièce latérale.....	52
Figure III.7 : Pièce du coin réalisé par SOLIDWORKS.....	53
Figure III.8 : Forme complexe .....	53
Figure III.9 : Insert. ....	53
Figure III.10 : Paroi.....	54
Figure III.11 : Semelle. ....	54
Figure III.12 : Cadre de fixation. ....	55
Figure III.13 : échangeur de forme rectangulaire .....	55
Figure III.14 : représentation du flux de chaleur cédé par convection entre la feuille plastique et l'air de soufflage .....	57
Figure III.15 : représentation du flux de chaleur absorbé par le moule .....	61

## Liste des tableaux

---

Tableau N° 01 : Anomalies de fonctionnement et leurs Solutions.....	47
Tableau N° 02 : Les différents matériaux utilisés pour chaque pièce.....	66

## Liste des symboles

---

T : Température	°C ou K
$\lambda$ : Conductivité thermique de matériau	W/m .K
$\phi$ : Flux thermique	W
h : Coefficient d'échange convectif	W/m <sup>2</sup> .K
S : Surface d'échange	m <sup>2</sup>
q : Quantité de chaleur	J
P : puissance thermique ou électrique	W
t : Temps	s
$\dot{V}$ : Débit volumique	m <sup>3</sup> /s
V : Vitesse de fluide	m/s
$\varepsilon$ : Emissivité d'un matériau	Sans unité
$\sigma$ : La constante de Stefan Boltzmann	Sans unité
K : Coefficient d'échange globale	W/m <sup>2</sup> .K
$C_f$ : Coefficient de trainée	Sans unité

# Introduction Générale

## Introduction Générale

---

Dans le monde industriel l'innovation, l'amélioration de la fonctionnalité, le cout de revient, le service après-vente et autres, sont des exemples sur la compétitivité et la qualité d'un produit.

Ses mêmes préoccupations sont exigées dans le processus de création de nouveau produit.

La diversification croissante de l'offre et la demande, exigent une perception de plus en plus exigeante des marchés et des utilisateurs en dépit de l'avancée des outils informatiques qui facilitent l'innovation. La conception est devenue un processus complexe et stratégique qui englobe les aspects fonctionnels, techniques, esthétiques et économiques, en prenant en compte de la culture de l'entreprise, mais aussi les contraintes et les normes liées à la sécurité et à l'environnement.

A l'ENIEM 'on nous a proposé l'étude et la conception d'un moule de thermoformage pour la réalisation d'une contre-porte thermoformée du nouveau réfrigérateur 350 S.

L'étude de ce moule est faite de manière à satisfaire certaines exigences à savoir :

- Intégrer sa réalisation
- Améliorer le désigne intérieur
- Réduire les couts de revient
- Faciliter sa maintenance et son entretien
- Diminuer les temps d'interventions et de réparation

Concernant notre étude :

Nous avons décidé de fractionner le moule en cinq (05) parties facilement démontables et soulevables ne demandant pas de grands moyens de manutention.

Prévu des modifications majeures telles que les vérins d'extraction qui seront remplacés par des pièces rapportées facilement réalisables.

Dans ce projet le travail est réparti comme suit :

Le premier chapitre : Les polymères et leurs mises en œuvre ;

Le second chapitre : Procédés du thermoformage.

Le troisième chapitre : Etude et conception du moule.

Présentation de  
l'Entreprise  
(ENIEM)

## I. Historique

L'entreprise Nationale des industries de l'électroménager (ENIEM) est issue de la restructuration organique de la SONELEC (Société Nationale de Fabrication, de Montage et de Commercialisation des produits électroménagers) et disposait à sa création de :

- Complexe d'Appareils Ménagers (CAM) de TIZI OUZOU, entrée en production en juin 1977.
- Unité Lampes de Mohammedia (ULM), entrée en production en février 1979.

En 1989, l'entreprise ENIEM est devenue une société par actions au capital de 40.000.000DA.

Avec un capital social de 10.279.800.000 DA, détenu en totalité par la société de gestion de participation «Industries Électrodomestique» (INDELEC). Son siège social est à TIZI OUZOU. Ses unités de production issues de l'ex-CAM sont implantées au niveau de la zone industrielle «Aissat idir». Son unité commerciale est située également à la zone industrielle «Aissat Idir». Sa filiale lampes est implantée à Mohammedia.

Le champ d'activité de l'entreprise ENIEM consiste en la conception, la fabrication et la commercialisation des produits électroménagers, ainsi que la prise en charge de la fonction service après-vente.

Actuellement, l'entreprise ENIEM est constituée de :

- La direction générale (DG).
- L'Unité Froid (UF).
- L'Unité Cuisson (UCuis).
- L'Unité Climatisation (UCL).
- L'Unité Prestation Technique (UPT).
- L'Unité Commerciale (UC).
- L'Unité Sanitaire (US).
- La Filiale FILAMP.

L'effectif de l'entreprise (hors FILAMP et l'unité sanitaire) est de 2830

## Présentation de l'Entreprise

---

L'entreprise ENIEM aujourd'hui a une importante gamme de production, ces produits sont :

- Les réfrigérateurs petit et grand modèle (RPM et RGM).
- Le congélateur vertical.
- Le combiné.
- Cuisinières à 4 et à 5 feux.
- Climatiseurs.

Ces produits sont destinés au grand public et la distribution se fait par des agents agréés dont la liste se trouve au niveau de l'unité commerciale (Département Vente).

## II. Situation Géographique

Le complexe, premier fabricant national d'appareils ménagers, il est classé parmi les plus grandes unités de productions industrielles du pays. Son siège social se situe au chef-lieu de la Wilaya de Tizi-Ouzou, à proximité de l'ancienne gare routière.

La superficie totale du complexe s'étale sur 5,5 Hectares.

Les unités de production Froid, Cuisson et Climatisation sont implantées à la zone industrielle Aissat Idir de Oued-Aissi, distante de 7 km du chef-lieu de la wilaya.

La filiale sanitaire est installée à Miliana, wilaya de Ain Defla et la filiale lampe à Mohammadia, wilaya de Mascara.

## III. Objectif social et champ d'activité

ENIEM est leader de l'Électroménager en Algérie, elle possède des capacités de production et une expérience de plus (30) trente ans dans la fabrication et le développement dans les différentes branches de l'électroménager ;

Notamment :

- Les appareils ménagers domestiques.
- Les appareils des collectivités.
- Les lampes d'éclairage.
- Les produits sanitaires.

Elle assure également ;la commercialisation et le service après-vente de ses appareils.

## IV. Principales missions et activités de l'entreprise

### IV.1. Direction Générale

La direction générale est responsable de la stratégie et du développement de l'entreprise. Elle exerce son autorité hiérarchique et fonctionnelle sur l'ensemble des directions et des unités.

### IV.2. Unité froid

La mission globale de l'unité est de produire et développer les produits froids domestiques. Ses activités sont:

- Transformation des tôles.
- Traitement et revêtement des surfaces (peinture, époxy, plastification).
- Injection plastique et polystyrène.
- Fabrication des pièces métalliques.
- Isolation.
- Thermoformage.
- Assemblage.

### IV.3. Unité Cuisson

La mission principale de l'unité est de produire et développer la cuisson à gaz électrique ou mixte et tout produit de technologie similaire.

Ses activités sont :

- Transformation de la tôle.
- Traitement et revêtement des surfaces (Zingage, Chromage, Emaillage).
- Assemblage.

### **IV.4. Unité Climatiseur**

La mission globale de l'unité est de développer les produits de climatisation.

Ses activités sont:

- Transformation.
- Traitement et Revêtement des surfaces (peinture).
- Assemblage.

### **IV.5. Unité Sanitaire**

L'unité sanitaire de Miliana est acquise par l'entreprise ENIEM en l'an 2000.

Elle n'entre pas dans le champ de certification de l'entreprise.

La mission globale de l'unité est de produire et développer les produits sanitaires (baignoires, lavabos ...).

### **IV.6. Filiale Filamp**

L'Unité Lampes de Mohammadia (ULM) qui a démarré en février 1979 pour fabriquer des lampes d'éclairage domestique ainsi que des lampes de réfrigérateurs est devenue filiale à 100% ENIEM le 01/01/1997. Cette filiale est dénommée «FILAMP».



**Figure 1:** Organigramme de l'entreprise ENIEM.

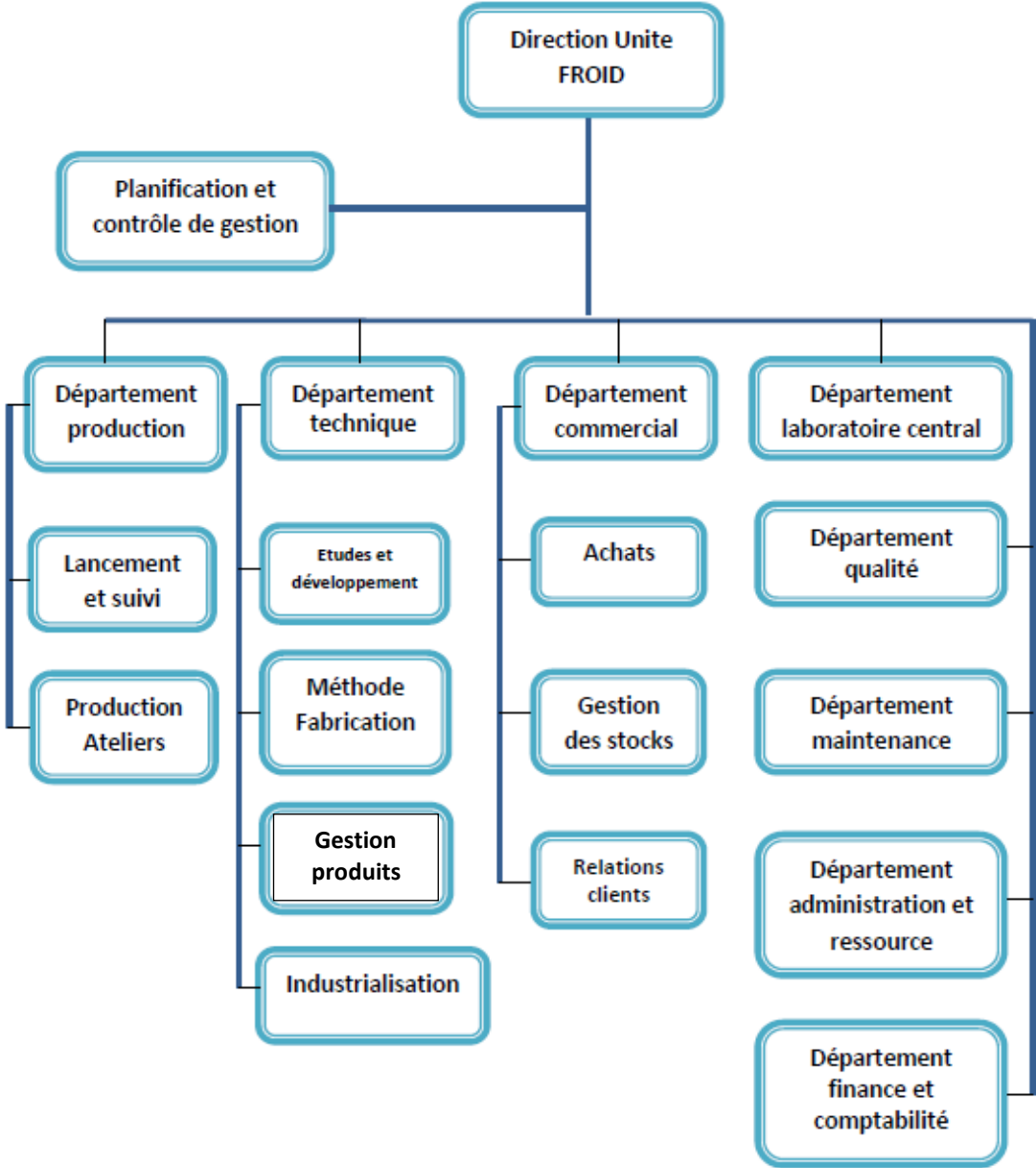


Figure 2 : Organigramme de l'unité froid.

## V. Politique de l'entreprise

ENIEM est certifiée ISO 14001/2004 ENVIRONNEMENT et ISO 9001/2008 QUALITÉ.

### V.1. Politique qualité

L'entière satisfaction durable du client constitue pour l'entreprise l'objectif essentiel. Face aux enjeux économiques, l'ENIEM a mis en œuvre et développé un système de management de la qualité conforme au référentiel international ISO 9001/2008.

Cette politique qualité basée sur l'amélioration continue des processus se manifeste par la volonté de la Direction Générale à :

- Comprendre les besoins présents et futurs de ses clients et y répondre efficacement en mettant à leur disposition des produits et services compétitifs.
- Développer la culture de l'entreprise et le professionnalisme de son personnel.
- Améliorer en continue l'efficacité du système de management de la qualité.

#### V.1.1. Engagement de la direction

Pour mettre en œuvre sa politique, la Direction Générale de l'ENIEM s'engage à :

- Se conformer aux exigences légales et réglementaires en vigueur.
- Appliquer et respecter les dispositions et procédures établies.
- Fournir les ressources nécessaires à l'atteinte des objectifs.

#### V.1.2. Ses objectifs

Pour aboutir les missions précitées, l'ENIEM se fixe les objectifs suivants :

- Accroître la satisfaction des clients.
- Améliorer les compétences du personnel.
- Réduire les rebuts.
- Augmenter la valeur de la production.
- Améliorer le chiffre d'affaire.

## V.2. Politique Environnementale

La politique environnementale de l'ENIEM s'inscrit dans le développement durable en intégrant un management proactif dans le domaine de la protection de l'environnement. Pour y parvenir, l'ENIEM se base sur la prévention de toute pollution, la préservation des ressources, la sensibilisation et la formation, la responsabilité et l'implication de son personnel. Pour cela, l'ENIEM a décidé de s'engager dans une démarche volontaire d'amélioration continue en mettant en place un système de management environnemental selon le référentiel ISO 14001/2004. La direction générale met à disposition les moyens nécessaires à la réussite de ce projet.

### V.2.1. Engagements

- Respecter les exigences légales et réglementaires en vigueur.

Prévenir et maîtriser les risques de pollutions qui peuvent être générés par ses activités.

- Améliorer la gestion des déchets (papier, emballages, consommables informatiques, déchets, des processus...).
- Rationaliser les consommations d'énergies.
- Améliorer la communication avec les parties intéressées (interne et externe).
- Continuer la formation pour améliorer la compétence du personnel.
- Continuer l'amélioration de l'efficacité du Système de Management Environnemental.

- Mener des revues de direction.

### V.2.2. Objectifs et Cibles Environnementaux

Dernièrement en 2012 l'ENIEM a fixé des objectifs et cibles environnementaux :

#### ❖ Objectifs :

En conformité avec sa politique environnementale, l'ENIEM se fixe:

- L'amélioration de la gestion des déchets.
- La rationalisation de la consommation des énergies et fluides.
- La prévention des risques de pollution.
- La sensibilisation des parties intéressées.
- La formation du personnel sur l'environnement.

### ❖ Cibles

- Réduire les déchets générés de 1%.
- Elever le niveau de tri des déchets de 2%.
- Réduire les stocks morts de 4 %.
- Ratio consommation d'eau/Production < 20 M3/tonne.
- Ratio consommation d'énergie électrique/Production < à 635 KWh/tonne.
- Ratio consommation de gaz/Production < à 1,76 k Th/tonne.
- Mesurer les rejets atmosphériques.
- Former 200 agents sur l'environnement.
- Continuer la sensibilisation des fournisseurs, agents agréés et les sous- traitants sur l'environnement.

# Chapitre I

## Les polymères et leurs mises en œuvre

## I.1. Introduction

Les matières plastiques que nous appelons polymères, sont en réalité très variées selon leur structure moléculaire.

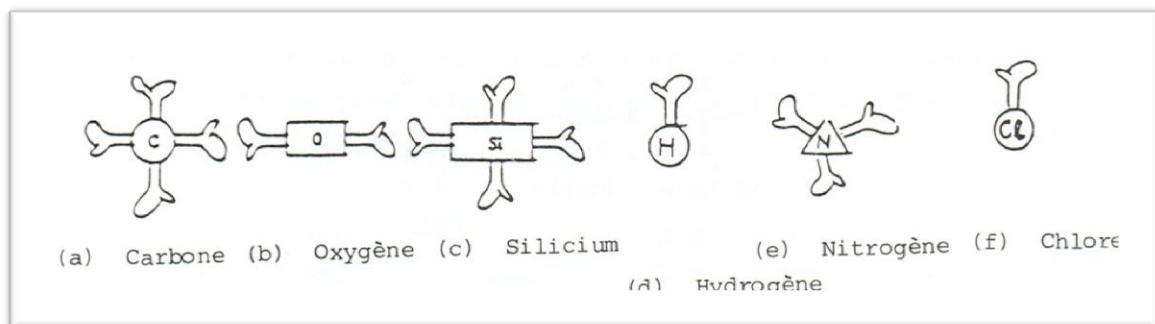
Il existe plus de vingt (20) types de résines plastiques depuis celles rigides jusqu'à celles souples. Les matériaux de ces matières plastiques sont utilisés selon la nature des pièces à réaliser avec différents procédés de mise en œuvre.

## I.2. Généralités sur les Polymères

### I.2.1. Atome et valence atomique

Toutes les molécules sont composées de plusieurs atomes ou au moins d'un atome. Les polymères sont des macromolécules formées par agglomération des éléments relativement peu nombreux tels que : le carbone, l'hydrogène, l'oxygène...etc.

Les matières plastiques ne sont d'autres que celles formées par union complexe de ces éléments atomiques. Le pouvoir de liaison de ces atomes est appelé valence atomique.



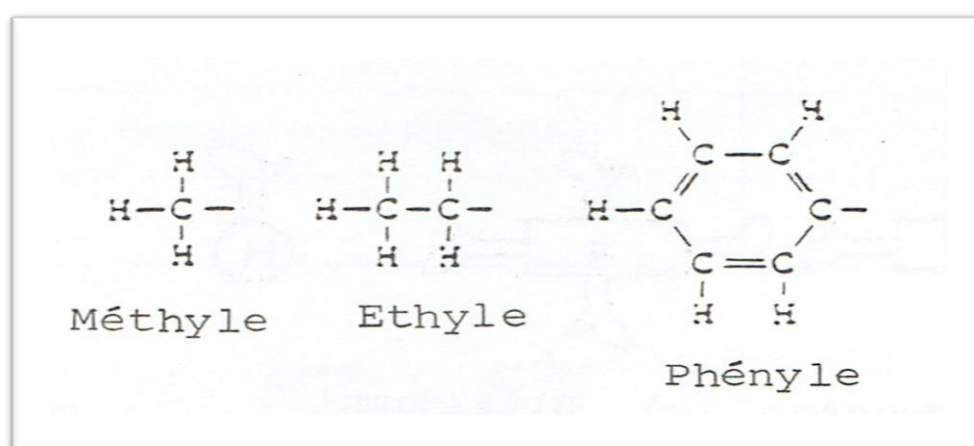
**Figure I.1:** Valence atomique. [1]

Un carbone possède quatre (04) bras de liaison et peut - être lié avec le même nombre d'atomes avec le même nombre de bras. Un oxygène en possède deux (02) et un silicium en a quatre (04). Le nombre de ces bras de liaison correspond à la valence atomique de chaque atome.

### I.2.2. Pouvoir des liaisons et radicaux des atomes

Un atome de carbone possède quatre (04) bras de liaisons, donc le pouvoir de se lier avec quatre (04) bras de liaisons des autres atomes. Toutefois, une fois que la liaison est faite, il perd son pouvoir de liaison en nombre de bras reliés.

Lorsque trois (03) bras de liaisons s'unissent avec d'autres atomes, il reste un seul bras libre. Lorsque tous les quatre (04) bras de liaisons s'unissent avec d'autres atomes, il ne reste plus de bras libre et le pouvoir de liaison devient nul.



**Figure I.2:** Groupes d'atomes qui possèdent un bras de liaison libre. [1]

### I.2.3. Polymérisation des Polymères

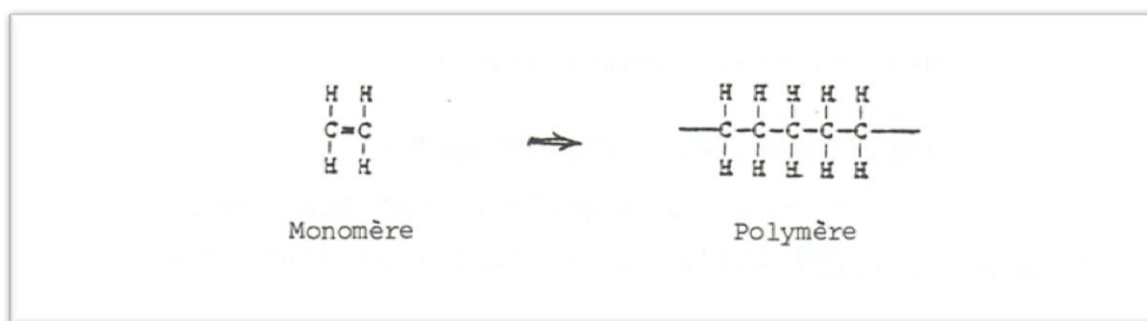
Les polymères sont des macromolécules formées par des atomes unis les uns aux autres par des réactions chimiques.

### I.2.4. Basse Molécule et Polymère

Une molécule est un ensemble d'atomes unis les uns aux autres. Si, le nombre d'atomes est petit, elle est appelée basse molécule et si sa masse moléculaire dépasse 10.000, elle est appelée Polymère. Plus, la masse moléculaire (ou le degré de polymérisation) est grande, meilleures sont les caractéristiques des polymères, tels que les résistances thermique et mécanique, ...etc.

### I.2.5. Monomère

N'importe quel polymère est formé par des liaisons multiples des corps d'une structure plus simple. Ces corps de base sont appelés monomères. Par exemple, le polyéthylène est un polymère formé par l'union de nombreux monomères qui sont les éthylènes.



**Figure I.3:** La Différence entre Monomère et Polymère. [1]

### I.2.6. Copolymère

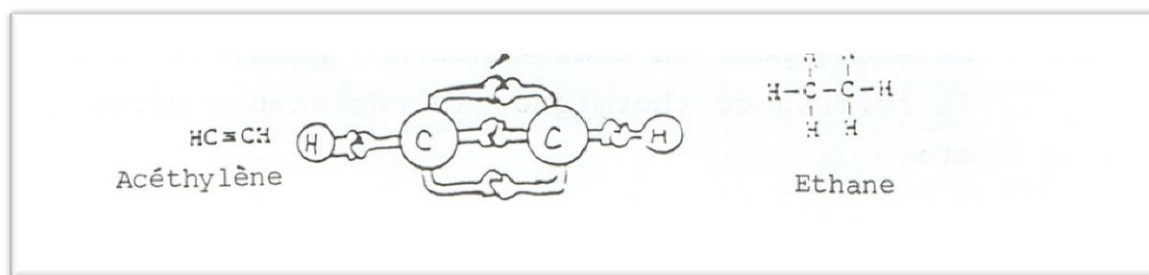
Le copolymère est un polymère formé par des liaisons de plus de deux (02) molécules de natures différentes. Les caractéristiques de ce genre de polymères peuvent-être améliorées par rapport à celles d'un polymère seul.

### I.2.7. Homopolymère

C'est un terme employé pour distinguer les polymères de composition unique des copolymères.

### I.2.8. Saturation et Non-Saturation

Les molécules qui ont une liaison double ou triple peuvent s'unir encore à d'autre molécules ou atomes. Cet état est appelé non-saturé. En outre, un éthane qui est formé par la liaison d'un hydrogène à un éthylène n'a plus de pouvoir de liaison. Cet état est appelé saturé.



**Figure I.4:** Exemple d'un état saturé. [1]

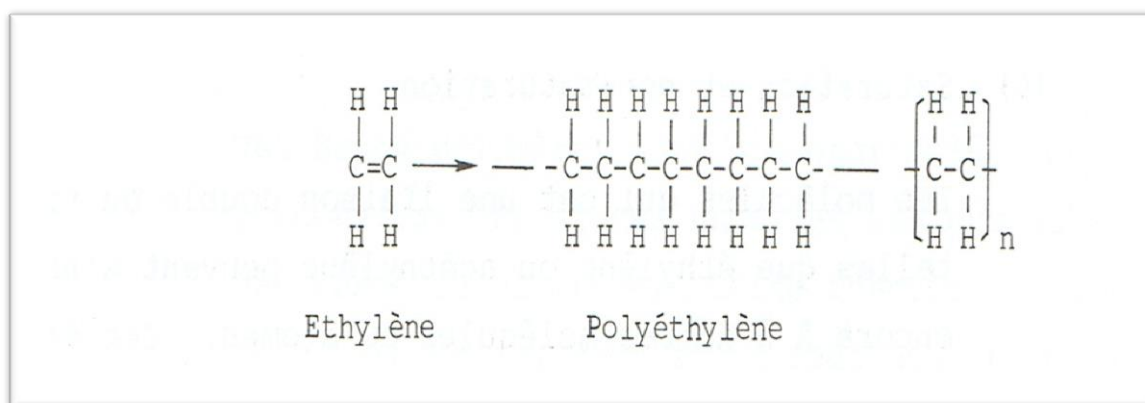
Un acétylène a deux (02) atomes de carbone qui possèdent deux (02) bras de liaisons libres chacun et qui s'unissent par conséquent par trois (03) bras de liaisons. De ce fait, il peut s'unir encore à deux (02) autres éléments avec ses deux(02) bras libres.

## I.2.9. Masse Moléculaire et Degré de Polymérisation

Dans les catalogues des matières plastiques, on utilise les termes **Masse Moléculaire** et **Degré de Polymérisation**. Ces termes sont importants pour comprendre les caractéristiques des matières plastiques.

### ➤ Degré de Polymérisation

Prenons l'exemple d'un polyéthylène. Le polyéthylène est formé par des liaisons enchainées de plusieurs éthylènes. Puisque le polyéthylène peut - être considéré comme groupement de ses éthylènes monomères, il peut - être exprimé par la formule susmentionnée avec « **n** » comme nombre de monomères regroupés. Donc, le polyéthylène est composé d'un nombre « **n** » d'éthylènes monomères, et son degré de polymérisation est par conséquent « **n** ».



**Figure I.5:** Schématisation de la Molécule de Polyéthylène (= **n** Monomères Éthylène). [1]

### ➤ Masse Moléculaire

On calcule d'abord la Masse Moléculaire d'un Éthylène Monomère.

Masse Atomique du Carbone(12) \* nombre de carbone(02) + Masse Atomique d'hydrogène(01)\*nombre d'hydrogènes(04) = Masse Moléculaire d'un éthylène monomère (28).

Comme une molécule de polyéthylène est composée d'un nombre « **n** » de ces monomères, sa masse moléculaire est de **28\*n**. C'est à dire que la masse moléculaire peut -être facilement calculée soit à partir du degré de polymérisation, soit à partir de la masse moléculaire.

Si, la masse moléculaire d'un monomère est exprimée par '**a**' et son degré de polymérisation par '**n**', La masse moléculaire du polymère **M** peut -être exprimée par la formule suivante:

$$M = a * n \quad (1)$$

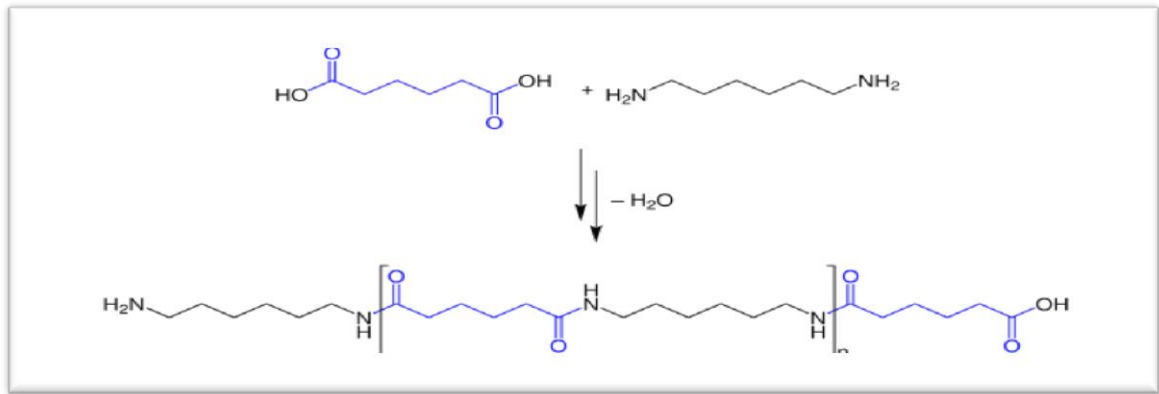
### I.3. Procédé de Synthétisation des Polymères

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 en général (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 pour la réaction de synthétisation des polymères.

#### I.3.1. Polycondensation (formation des résidus)

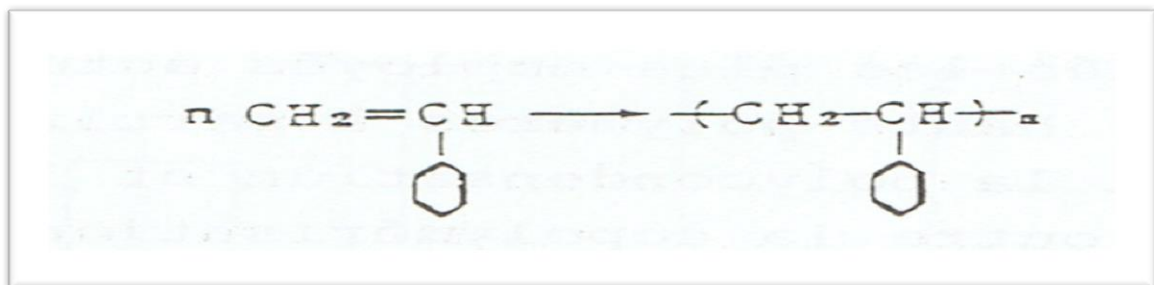
C'est une polymérisation par condensation qui entraîne des réactions chimiques qui provoquent la formation de sous-produits. Les deux monomères en présence donnent naissance à une molécule intermédiaire, laquelle constitue l'élément fondamental qui se répète dans la macromolécule.



**Figure I.6:** Formation du Nylon 6-6 par réaction entre l'acide hexane-dioïque et l'hexaméthylène-diamine. [2]

### I.3.2. Polyaddition (sans formation des résidus)

Les monomères présentent une double liaison Carbone-Carbone (C=C), celle-ci peut s'ouvrir pour devenir (-C-C-), et, à laquelle d'autres monomères peuvent se lier. Par exemple, les styrènes monomères se polymérisent comme suit pour former un polymère.



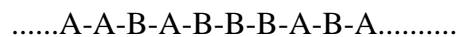
**Figure I.7:** Formation d'un polymère à partir de la polyaddition d'un monomère. [1]

### I.3.3. Copolymérisation

La polymérisation avec plus de deux (02) types de monomères est appelée copolymérisation. Les copolymères formés des matières A et B se divisent en quatre (04) types suivants :

#### ➤ Copolymère Statistique

Les éléments constitutifs des matières A et B sont répartis irrégulièrement dans l'ensemble du copolymère.



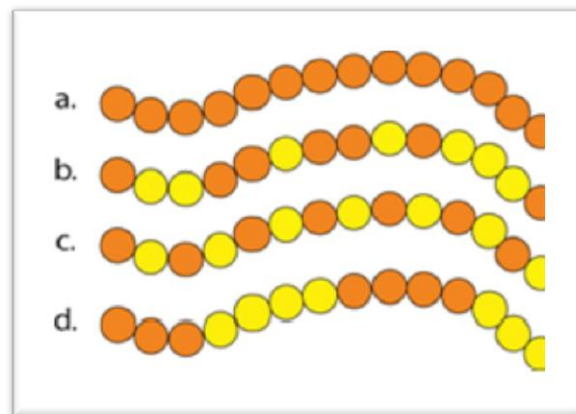


### I.4. Structure des Polymères

Les polymères peuvent présenter des architectures extrêmement variables. Ils peuvent - être linéaires, ramifiés ou réticulés. Le plus souvent, ils sont amorphes, parfois, ils peuvent - être au moins partiellement cristallisés.

#### I.4.1. Polymères linéaires

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



**Figure I.9 :** Polymère Linéaire.[3]

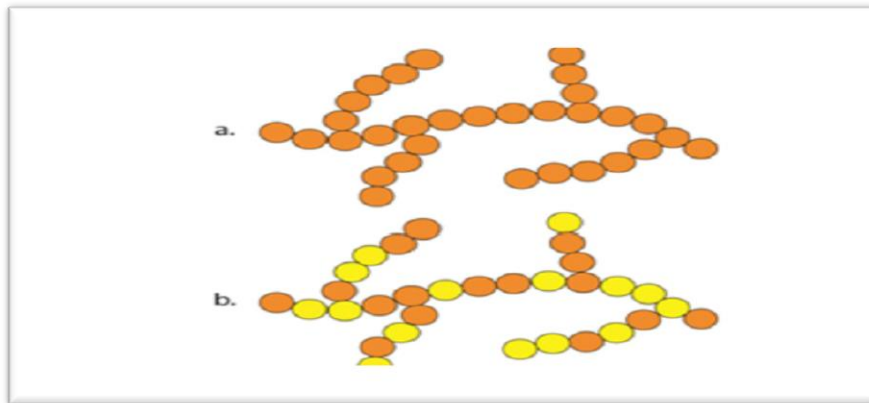
Si, la température s'élève, l'agitation moléculaire qui en résulte va rompre progressivement ces liaisons secondaires. Le matériau va pouvoir s'écouler sous son propre poids. Il présente alors le comportement d'un liquide visqueux.

La température à laquelle se produit cette évolution s'appelle la **Température de Transition Vitreuse**.

La transition vitreuse correspond à l'apparition de mouvements de longs segments de chaînes et marque le passage de l'état vitreux à l'état caoutchouteux.

## I.4.2. Polymères Ramifiés

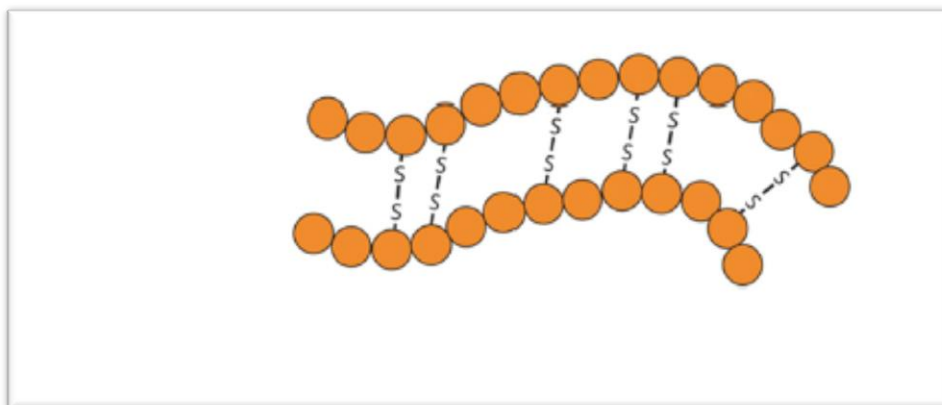
Des chaînes homo-polymériques ou copolymériques peuvent se greffer sur d'autres chaînes au cours de la polymérisation. Au-dessus de la température de transition vitreuse, ces matériaux présenteront un comportement visqueux plus marqué que les polymères linéaires.



**Figure I.10 :** Homopolymère Ramifié (a) et Copolymère ramifié (b). [3]

## I.4.3. Polymères Réticulés

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



**Figure I.11 :** Polymère Réticulé avec ponts disulfure reliant deux(02) chaînes. [3]

### **I.4.4. Polymères Amorphes et Polymères Cristallisés**

Les chaînes macromoléculaires peuvent - être organisées de façon aléatoire dans l'espace et constituer ainsi une phase amorphe. La phase amorphe est, en théorie équivalente à un liquide 'figé', sans ordre moléculaire, à grande distance. Il existe néanmoins des orientations macromoléculaires préférentielles.

Elles peuvent - être rangées régulièrement avec la constitution d'un ordre responsable d'une propriété caractéristique de l'état cristallin : l'aptitude du matériau à diffracter les rayons X, selon des angles définis. Ces structures peuvent aussi être objectivables en lumière polarisée.

Dans un polymère, les deux (02) états ordonnés et désordonnés peuvent exister dans un même matériau qui est alors de nature semi-cristalline.

## **I.5. Type des Polymères**

### **I.5.1. Thermoplastiques**

Ils sont formés à chaud et sans modification chimique, se déforment, sont façonnables sous l'effet de la chaleur, gardent cette forme au refroidissement, ou, ils deviennent souple, malléables et durci. Ce phénomène réversible permet leur recyclage. Les thermoplastiques sont solubles dans des solvants spécifiques, ce qui permet leurs utilisations comme colle et revêtement. Leurs polymères de base sont constitués par des macromolécules linéaires reliées par des liaisons faibles qui peuvent être rompues sous l'effet de la chaleur ou de fortes contraintes. [4]

### **I.5.2. Thermodurcissables**

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

est chauffé. La matière thermodurcissable garde toujours sa forme, en raison de ses liaisons croisées. [4]

### I.5.3. Élastomères

Un élastomère au repos est constitué de longues chaînes moléculaires repliées sur elles-mêmes. Sous l'action d'une contrainte, les molécules peuvent glisser les unes par rapport aux autres et se déformer. Pour que le matériau de base présente une bonne élasticité, il subit une vulcanisation. C'est un procédé de cuisson et de durcissement, qui permet de créer un réseau tridimensionnel plus ou moins rigides sans supprimer la flexibilité des chaînes moléculaires. On introduit dans l'élastomère au cours de la vulcanisation du soufre, du carbone et différents agents chimiques. Différentes formulations permettent de produire des caoutchoucs de synthèse en vue d'utilisations spécifiques. Les élastomères sont employés dans la fabrication des coussins, de certains isolants et des pneus. [4]

## I.6. Propriétés des Polymères

Un polymère comme tout autre matériau, présente des performances et des qualités, qui le rendent très utilisés dans pratiquement tous les domaines. Ces qualités permettent aux constructeurs de faire le choix de polymères à utiliser dans une structure donnée.

### I.6.1. Les Propriétés Mécaniques [5]

#### ➤ Résistance à la Traction

La résistance à la traction varie entre 10 et 80 MPa pour un plastique à l'état compacte entre 200 et 800 MPa pour un plastique renforcé courant.

#### ➤ Résistance à la Compression

On atteint des valeurs de 50 à 100% plus élevées que la résistance à la traction.

#### ➤ Élasticité

La résistance élastique des plastiques est voisine de 3000 MPa. Ce qui situe ces matériaux entre les bois et les caoutchoucs. Certaines charges peuvent amener quelques thermoplastiques à 160 GPa.

### ➤ **Allongement**

Voisin de 150% en général, il peut atteindre 400 à 800% avant la rupture pour certains produits, comme les fils ou les fibres synthétique.

### ➤ **Amortissement**

Les mousses souples ou semi-rigides et les matériaux renforcés constituent d'assez bons amortisseurs de chocs.

### ➤ **Dilatation**

Elle peut - être dix(10) fois supérieure à celle des métaux (cas des thermoplastiques).

## **I.6.2. Propriétés chimiques**

### ➤ **Sensibilité aux agents extérieurs**

Les matières plastiques offrent en général, une bonne résistance aux produits chimiques (acides, solvants). Les plastiques sont insensibles aux bactéries, champignons et parasites.

### ➤ **Humidité**

Certains plastiques absorbent (1 à 4% d'humidité) et provoquent un gonflement néfaste (condensation). Les propriétés mécaniques varient avec le taux d'humidité.

### ➤ **Stabilité Dimensionnelle**

Des gauchissements, des contractions ou des fluages peuvent provenir de l'humidité, de la chaleur ou d'un mauvais stockage.

### ➤ **Imperméabilité**

Ils assurent une bonne barrière aux gaz et à l'eau.

## **I.6.3. Propriétés Thermiques et Physiques [6]**

### ➤ **Inflammabilité**

Elle est particulièrement rapide pour certains cellulosiques, alors que les thermoplastiques ont une combustion lente.

### ➤ **Isolation**

Ceux sont de bons isolants électrique et thermique.

### ➤ **Légèreté**

La densité de la plupart des matières plastiques est comprise entre 0.9 (plus léger que l'eau) et 1.8 (plus lourde que l'eau). Le plus souvent c'est 1.

### ➤ **Transparence**

Certains plastiques ont un coefficient de transmission de la lumière voisin de celui du verre.

### ➤ **Esthétique**

Les couleurs sont variées et les possibilités de mise en œuvre sont nombreuses.

L'aspect lisse du matériau confère à l'objet une impression "désigne".

### ➤ **Entretien**

Ils ont un entretien facile, ne nécessitent aucun traitement de surface et résistent à la corrosion.

## **I.7. Additifs**

Selon le but, les différents additifs utilisés, sont présentés ci-dessous.

### **I.7.1. Agent de Renforcement et Matière de Charge**

Utilisés pour améliorer les propriétés physiques ou électriques.

### **I.7.2. Agent de Fluidisation**

Utilisé pour améliorer les aptitudes au formage.

### **I.7.3. Stabilisant**

#### ➤ **Stabilisant Thermique**

Utilisé principalement pour les stabiliser contre la décomposition thermique au cours de la fabrication et du formage.

#### ➤ **Antioxydant**

Utilisé principalement pour protéger les polymères contre la détérioration par oxydation.

### ➤ **Inhibiteur d'Ultraviolet**

Utilisé pour protéger les plastiques contre la détérioration par photo-décomposition due aux rayons ultraviolets d'une lumière.

### **I.7.4. Plastifiant**

Utilisé pour améliorer les propriétés de fluidité des plastiques afin de faciliter leur formage et pour donner aux produits formés l'élasticité voulue.

### **I.7.5. Colorant**

Utilisé pour obtenir la couleur voulue, sans détériorer les qualités et les propriétés des résines et le pouvoir isolant électrique, ...etc.

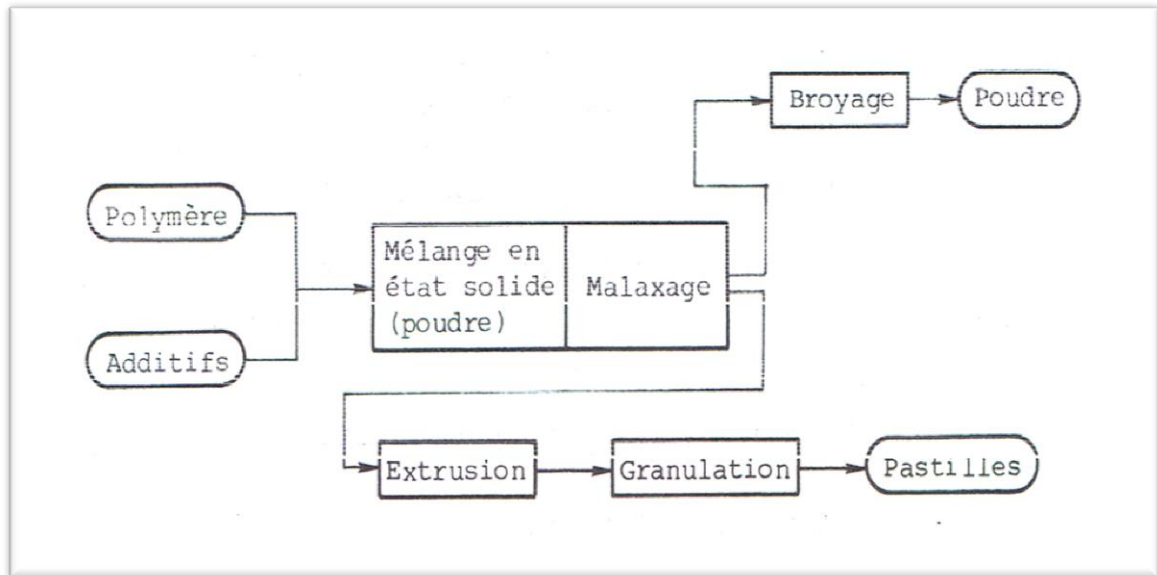
### **I.7.6. Durcissant**

Utilisé pour former la structure réticulée à trois (03) dimensions (solidification) lors du formage des résines thermodurcissables.

## **I.8. Procédé de Fabrication des Matériaux Plastiques**

Des fabricants des plastiques réalisent en principe des matériaux de couleur naturelle comme produit ordinaire (composition standard). Toutefois des résines thermodurcissables sont colorées, en général.

Des matériaux autres que les produits ordinaires, sont fabriqués sur la demande des utilisateurs; Par exemple, la fabrication des matériaux de la couleur demandée par l'utilisateur, des matériaux ayant une propriété spéciale, telle que le pouvoir antistatique.



**Figure I.12 :** Procédé Général. [1]

### I.9. Matériaux HIPS

Le polystyrène "PS" est un polymère thermoplastique obtenu par polymérisation du monomère styrène. Il peut se présenter sous différentes formes [2]:

- Cristal (Homopolymère).
- Choc, HIPS (HI pour High-Impact) ou PS-HI selon la norme EN ISO 1043-1.
- Mousse expansée PSE (EPS pour Expanded polystyrène).
- Mousse extrudée (PSX).

Le polystyrène de base appelé 'PS Cristal' pour son aspect transparent, est une matière dure et cassante, pouvant être colorée. Ses propriétés mécaniques et thermiques peuvent être modifiées par l'ajout des additifs, pour en faire un polystyrène dit "choc" c'est un matériau très facile à transformer.

#### I.9.1 Description

Le polystyrène choc (HIPS) présente un bon équilibre entre la rigidité et la résistance mécanique. Il résiste au choc. Il offre des possibilités de transformation faciles et variées (Thermoformage, Pliage, Découpe, Collage, Soudure...etc.)

**Colles:** L'adhésion d'un polystyrène sur les autres matières est possible, en utilisant une colle.

**Soudure:** La soudure par ultrasons est préférable, mais l'air chaud ou les plaques chauffantes sont également utilisables.

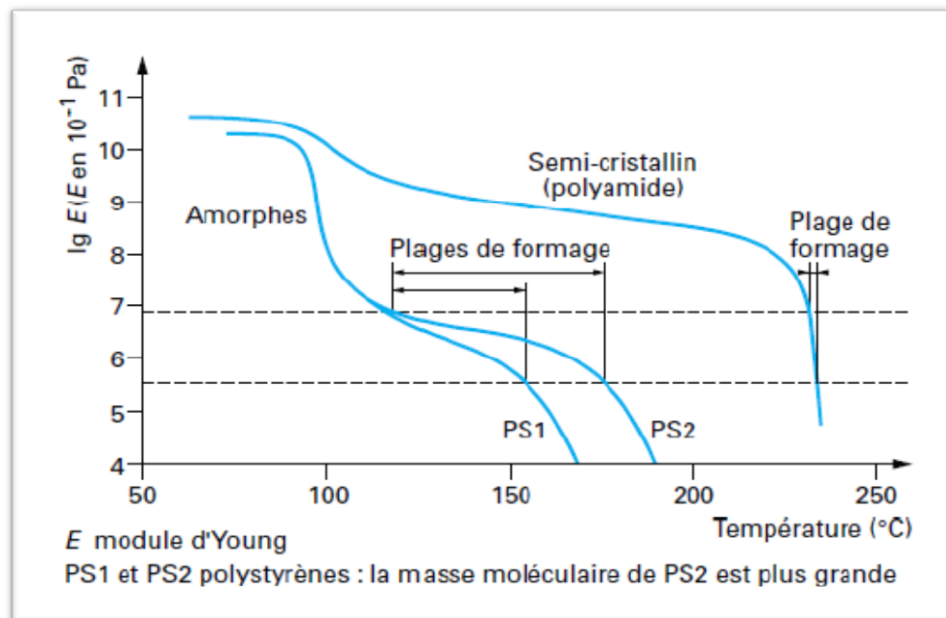
## I.9.2. Caractéristiques Principales

### ➤ Aspects de surface

Le PS peut avoir une finition brillante, satinée, ou mate, il est facilement pigmentable, ce qui offre un large éventail de couleurs et d'effets spéciaux.

### ➤ Thermoformage

Excellente aptitude au thermoformage, il possède une large plage de températures de mise en forme (matériau amorphe).



**Figure I.13 :** Plage de Thermoformage pour différents types de polymères [1].

### ➤ Nettoyage et entretien

Des détergents et savons usuels solubles dans l'eau chaude peuvent - être utilisés pour nettoyer les surfaces polluées.

## I.9.3. Avantages

- Facilement thermo formable.
- Bonne résistance aux chocs.

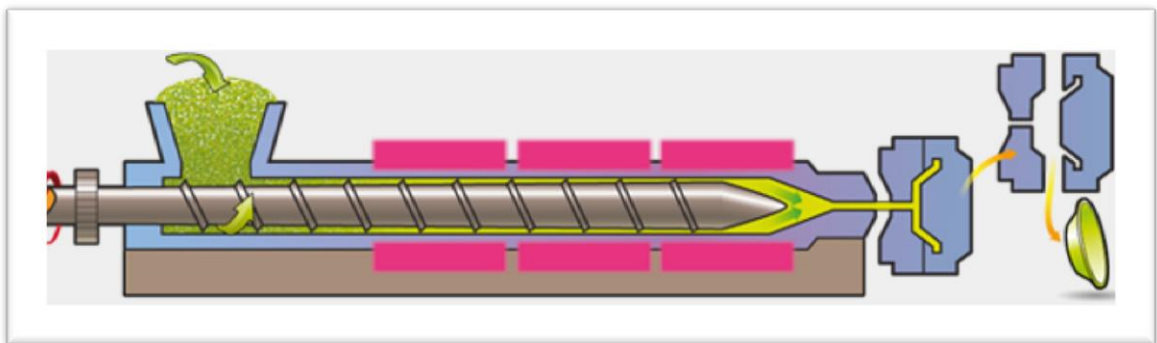
- Très faible absorption d'humidité.
- Produits à 100% recyclable.

### I.10. Mise en œuvre des Polymères

#### I.10.1. Thermoplastiques

##### ➤ Injection Plastique

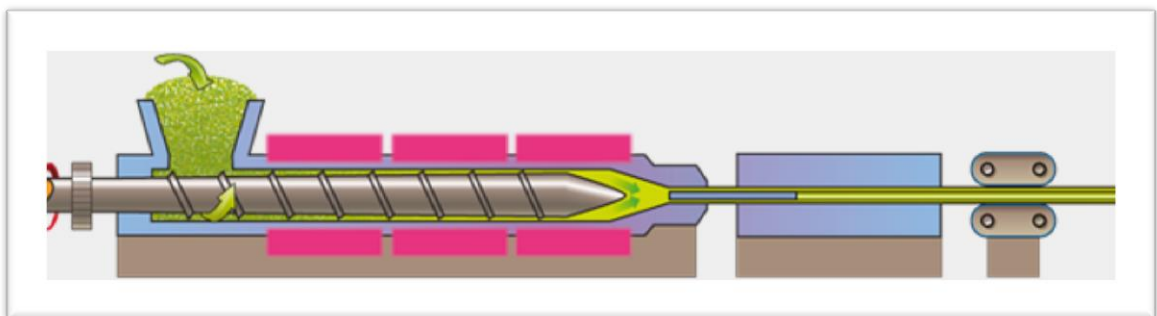
L'injection plastique est un procédé de mise en œuvre des thermoplastiques. Il consiste à ramollir la matière plastique pour l'amener en phase plastique et l'injecter dans un moule pour obtenir la forme désirée, voir la **Figure I.14** suivante.



**Figure I.14** : Procédé d'Injection Plastique.

##### ➤ L'Extrusion

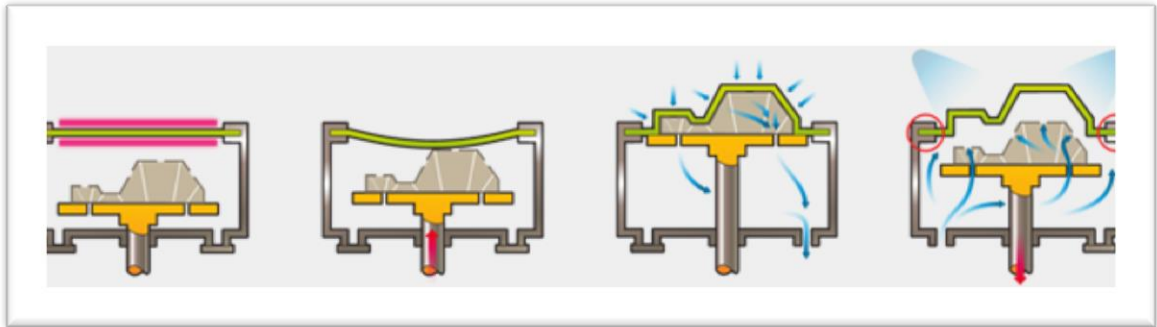
Ce procédé de mise en œuvre en continu permet de transformer les poudres et les granules en tubes ou gaines, profilés, films ou plaques dont la longueur n'est pas limitée. On introduit la matière dans un cylindre chauffant à l'intérieur duquel une vis sans fin la pousse. En avançant, la matière au fond, se comprime, puis passe à travers une filière dont la forme est celle du produit à fabriquer (**Figure I.15**).



**Figure I.15** : Procédé de l'Extrusion.

### ➤ Thermoformage

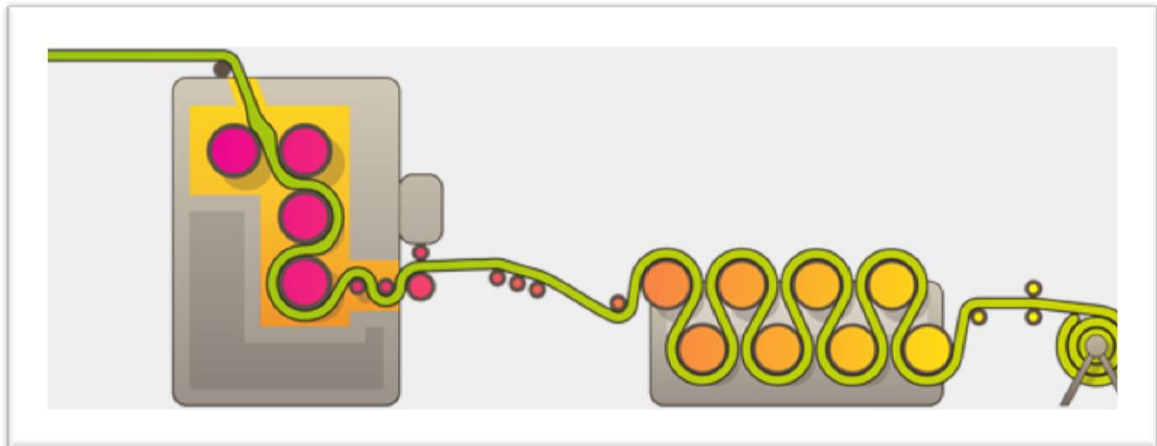
Le Thermoformage est une technique qui consiste à prendre un matériau sous forme de plaque (verre, plastique...), à le chauffer pour le ramollir et à profiter de cette ductilité pour le mettre en forme dans un moule. Le matériau redevient dur lorsqu'il refroidit, en gardant cette forme.



**Figure I.16 :** Procédé de Thermoformage.

### ➤ 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.



**Figure I.17 :** Procédé de Calandrage.

### I.10.2. Thermodurcissables

#### ➤ Moulage par Compression

C'est la technique la plus simple, on utilise soit de la poudre, soit des granulés, ou de la matière pâteuse. Le moulage par compression est le moulage des résines thermodurcissables. Pour réaliser le moulage par compression, il faut disposer d'une presse. Ce moule sera chauffé soit par l'intermédiaire des plateaux eux-mêmes, soit par un dispositif réalisé dans le moule.

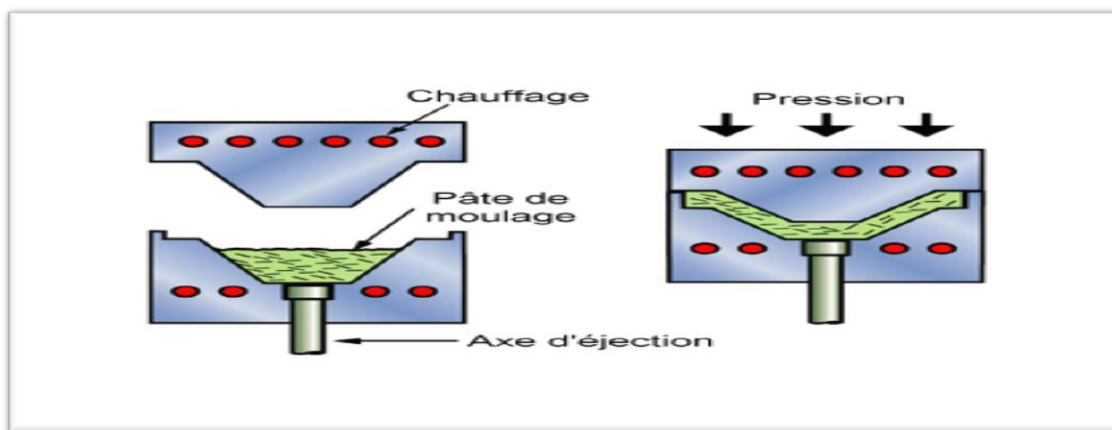


Figure I.17 : Procédé de moulage par compression.

#### ➤ Moulage par Transfert

La presse est constituée par un ensemble composé d'une presse à compression et un cylindre vertical d'injection doté d'un piston opérant dans le pot central de transfert. Le moule porte en son centre le pot de transfert et la matière alimentée par des canaux radiaux, les empreintes multiples du moule fermé.

#### ➤ Roto-Moulage

Le roto moulage est utilisé pour la fabrication d'objets creux de grandes dimensions (0.5 à 50.000 Litres) ou de formes complexes. Les pièces fabriquées ainsi ont l'avantage d'avoir une épaisseur constante allant de 0.75 à 15 mm [7]. On introduit un polymère dans un moule métallique, puis celui-ci est fermé. Ce moule est chauffé et tourne selon deux (02) axes de rotation. Le plastique tapisse alors

## Chapitre I : Les Polymères et leurs mises en œuvre

---

l'intérieur du moule. Après refroidissement et démoulage, on obtient la pièce désirée, voir la Figure ci-dessous. [8]

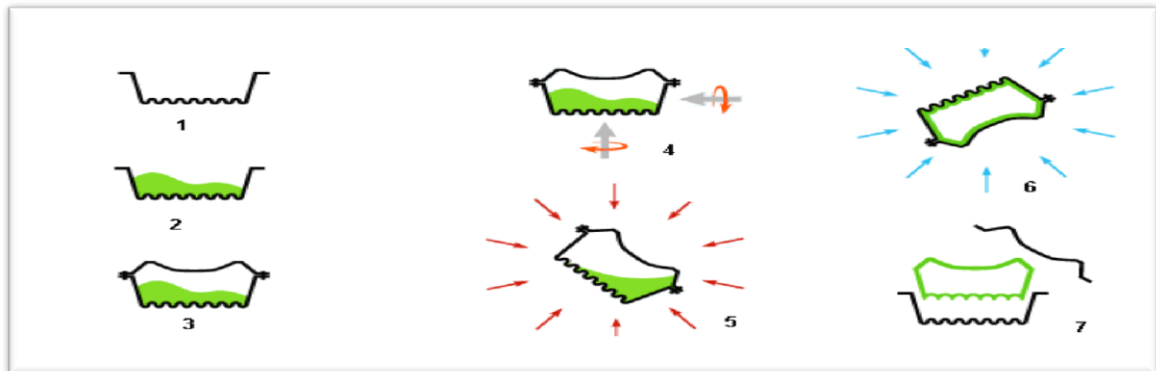


Figure I.18 : Procédé de Roto Moulage.[7]

### I.11. Avantages et Inconvénients des Polymères

#### I.11.1. Avantages

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

#### I.11.2. Inconvénients

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

### **I.12. Conclusion**

Dans ce chapitre, on a conclu que les matières plastiques sont des matériaux très utilisés dans divers domaines, et cela, à cause de leurs propriétés (physique, chimiques et mécaniques) qui répondent aux différentes exigences, telles que leurs poids très légers, leurs états de surface et leurs coûts de revient. De plus, il nous a permis de distinguer les différents types de matières plastiques, leurs procédés d'obtention, et la possibilité de les recycler.

# Chapitre II

## Procédé du Thermoformage

### II.1. Introduction

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 utilisent cette technologie qui a l'avantage d'être économique. Il se trouve que sa mise en œuvre est aussi parfaitement à la portée des amateurs et ne fait appel qu'à des outils simples et déjà à notre disposition.

### II.2. Présentation du Thermoformage

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

En pratique, le terme générique du 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'extraction des plaques (pots de yaourts par exemple). [8]

### II.3. Cycle du Thermoformage

Comme son nom l'indique, le thermoformage est une technique qui consiste à former une pièce en plastique en la soumettant à la chaleur (et à la pression).

La pression peut - être exercée soit par l'évacuation de l'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.

### II.3.1. Chauffage

Le coefficient de chauffage est proportionnel à l'épaisseur de la feuille, lors du chauffage des feuilles, la température en surface n'est pas plus élevée que la température au centre de la pièce. Du fait de l'apport énergétique de la surface de la feuille détermine la longueur du cycle de chauffage, les feuilles minces peuvent - être chauffées à une densité énergétique élevée pendant un cycle relativement court.

La chaleur transmise vers la feuille est absorbée et doit - être conduite vers le centre, 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. Par conséquent, le coefficient de chauffage doit - être réglé pour éviter la surchauffe en surface, donc, il faut prolonger le cycle de chauffage et employer des appareils à basse densité énergétique.

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.

### II.3.2. Formage

Le formage constitue l'étape de traitement au cours de laquelle la feuille est ramollie afin d'emprunter la forme de la coquille du moule. Il existe deux(02) types de base pour obtenir ce résultat:

#### a) Formage sous Vide

La feuille ramollie est rapportée sur le moule scellée étanchement contre le moule, une pompe à vide est alors employée pour évacuer l'air entre la feuille et le moule, cette technique étire et maintient la feuille contre le moule. Seul l'agent de formage, la pression atmosphérique limitée à 1 bar, représente l'inconvénient principal du formage sous vide, il arrive que la pression atmosphérique ne soit pas suffisante au

## Chapitre II: Procédé du Thermoformage

---

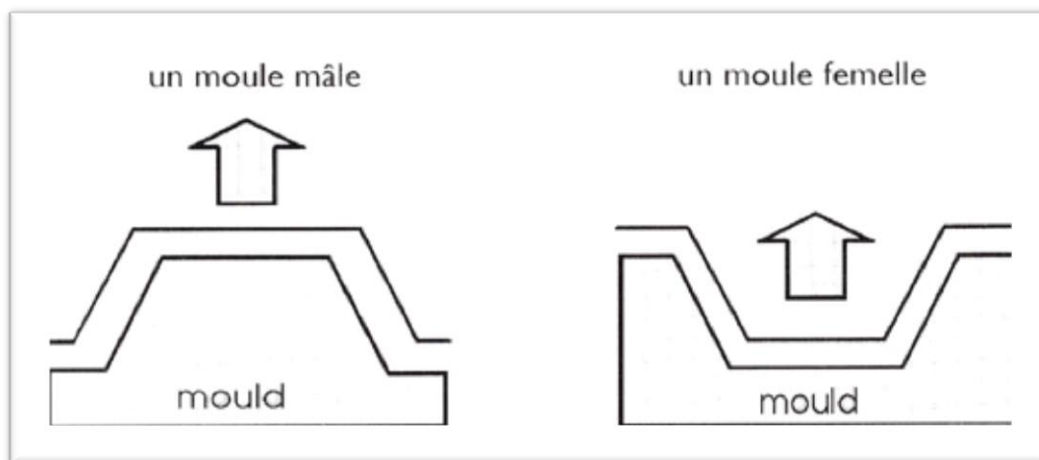
formage dans le cas où la plasticité du matériau est faible, et/ou, il est nécessaire d'obtenir une haute définition de la pièce moulée.

### b) Formage sous pression

Il consiste à pousser et maintenir la feuille contre le moule par l'application de l'air pressurisé. Il est alors généralement nécessaire d'employer une pompe à vide pour évacuer l'air résiduel entre le moule et la feuille.

On dit que le thermoformage est mâle ou femelle selon le sens du drapage qui s'effectue dans des moules convexes (courbés) ou concaves (creux). Les pièces moulées mâles sont des feuilles qui sont formées sur le moule, et, qui par conséquent doivent être soulevées au démoulage. Inversement, les pièces moulées femelles sont formées dans le moule et doivent être extraites du moule au démoulage.

Quelle que soit la méthode adoptée, la pièce est formée soit "sur" un moule mâle, soit "dans" un moule femelle, comme le montre **la Figure II.1** ci - après.



**Figure II.1** : Formage Mâle et Femelle.

### II.3.3. Refroidissement

Suite au formage, la pièce doit être suffisamment refroidie pour pouvoir être retirée du moule sans déformation, ou autres défauts de formage.

L'échelle des températures de ramollissement de la plupart des styrènes se situe entre 90 et 100°C. La température de la feuille doit donc être abaissée à environ 10°C, afin que la pièce formée soit assez rigide pour être démoulée. La durée de ce

## Chapitre II: Procédé du Thermoformage

---

processus est tributaire du système de refroidissement, ainsi que de l'épaisseur de la feuille.

Le refroidissement des pièces s'effectue par suppression d'apport de chaleur au moule, ainsi que par exposition à l'air libre. Il est essentiel de contrôler le taux de retrait de la pièce. Cette étape passe généralement par un réglage de la température du moule.

On peut également refroidir les pièces, en utilisant des ventilateurs à haut débit. Les moules utilisés pour les haut taux de rendement, sont généralement fabriqués en un matériau qui conduit bien la chaleur comme l'aluminium. Un refroidissement trop rapide de la pièce formée peut cependant entraîner d'importantes tensions thermiques qui ont pour conséquence de déformer la pièce et/ou de minimiser ses propriétés physiques. C'est la raison pour laquelle, on laisse souvent les moules à une température comprise entre 35 et 65°C (l'ENIEM travaille à 40° C).

Après le refroidissement, les pièces sont parfois démoulées en intensifiant la pression de l'air à l'intérieur du moule pour soulever la pièce du moule (formage mâle).

### II.3.4. Découpage

Avant de passer au découpage de la pièce, il faut tout d'abord examiner le taux de retrait. Au refroidissement, la pièce se rétracte dans toutes les directions. Le processus de retrait se termine généralement lorsque la pièce est à température ambiante. Cependant, on notera que, selon l'épaisseur de la feuille, le retrait se prolonge sur quelques heures ou plus après le refroidissement.

Le découpage peut - être effectué en moule, particulièrement, en ce qui concerne les productions à haut rendement en conjonction avec des matériaux à haute tolérance. Pour ce qui est de la production de pièces de plus grande taille, ou le rendement est moindre, et/ou, des tolérances critiques sont requises, il est nécessaire d'employer un outillage à découpage spécifique. Pour le découpage en petite quantité, on utilise généralement des cisailles, des scies circulaires ainsi que des couteaux. Lorsqu'il s'agit de quantités plus volumineuses, on utilise des matrices à découpage

## Chapitre II: Procédé du Thermoformage

plus substantielles: Règles en acier, matrice lourdes usinées, toutes employées pour le découpage des feuilles épaisses.

### II.4. Type de machines Du Thermoformage

#### II.4.1. Machine du Thermoformage discontinu (utilisée à l'ENIEM)

Les cycles du thermoformage se déroulent au niveau des différentes machines, en déplaçant la matière d'une machine à l'autre. Cette machine est caractérisée par:

- La surface utile,
- La profondeur du thermoformage,
- La taille et le mouvement possible du poinçon.

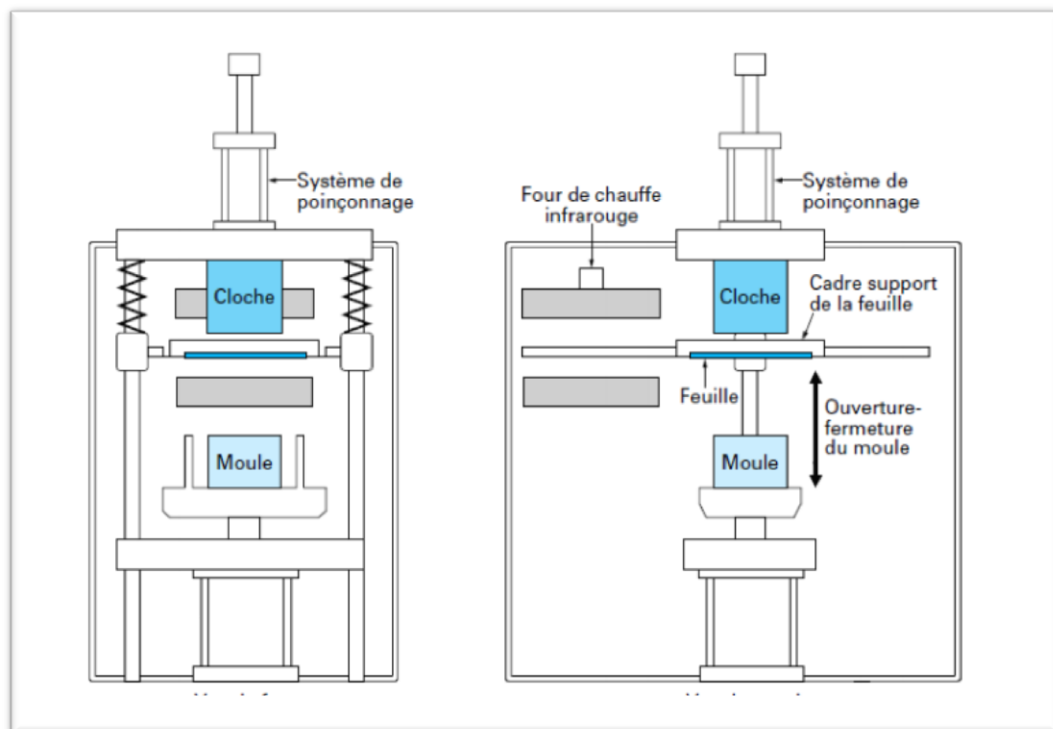


Figure II.2 : Machine du Thermoformage discontinu.[8]

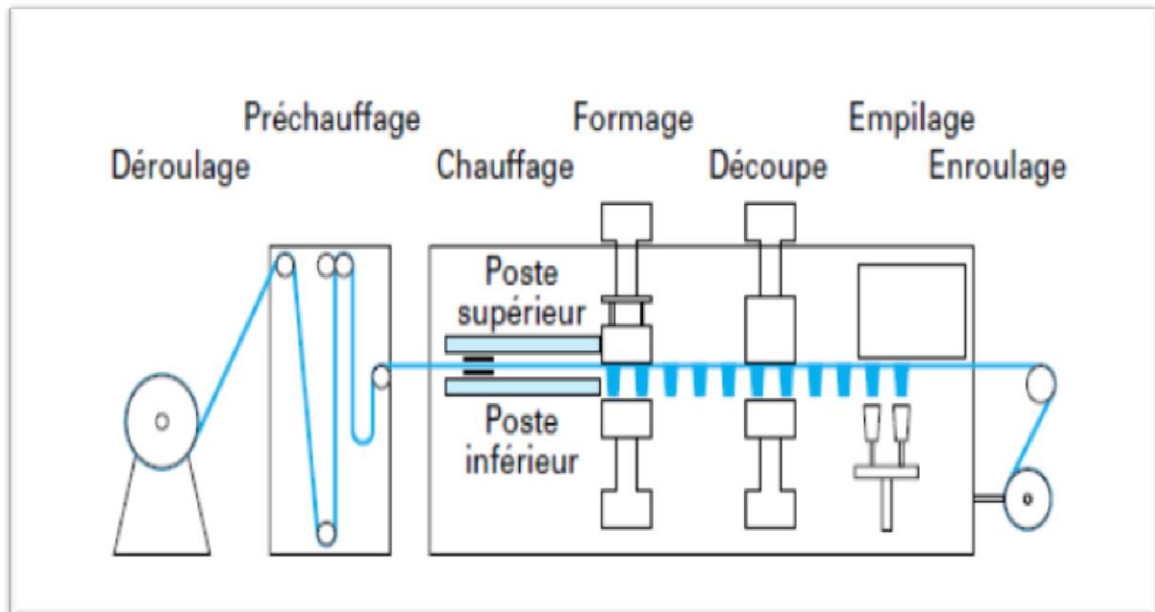
#### II.4.2. Machine du Thermoformage Continu

Au niveau de la thermoformeuse, la matière première passe par quatre (04) étapes successives, elle est caractérisée par :

- La possibilité de découpe intégrée au moule,

## Chapitre II: Procédé du Thermoformage

- Le système de transport de la feuille avec les caractéristiques du moteur,
- Le système de découpe,
- Les mouvements des tables (mécanique ou hydraulique).



**Figure II.3** : Machine continue.[8]

### II.5. Procédés de Formage

Il existe plusieurs procédés de formage, on peut les classer en trois (03) groupes:

#### II.5.1. Thermoformage par Moyens Mécaniques

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

Il n'est pas nécessaire que le poinçon soit toujours massif. Lors du formage, les feuilles du 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 des 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.

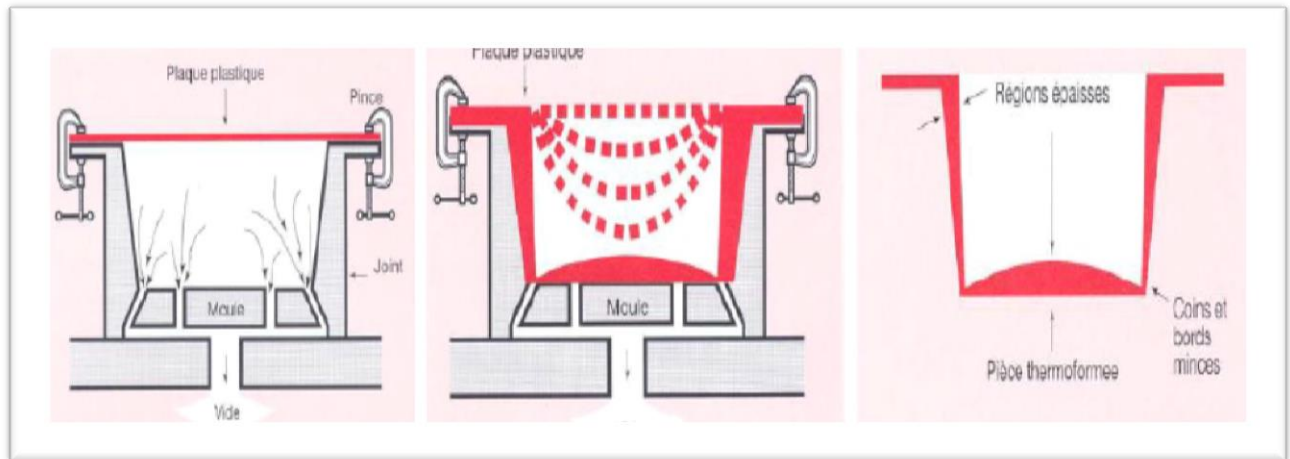
### II.5.2. Thermoformage par Moyens Pneumatiques

La technique du thermoformage pneumatique est la plus utilisée parmi les machines du 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 (0.5mm) 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.

#### II.5.2.1. Thermoformage sous Vide

Cette technique est actuellement la plus utilisée. De nombreux constructeurs ont mis sur le marché des machines automatiques permettant avec des débits importants, d'obtenir le cycle des opérations nécessaires, en continu. Le thermoformage sous vide peut s'effectuer avec deux(02) types de moules, ces derniers sont réalisés en bois ou en alliages coulés, de préférence en alliage léger à couler tel que le zamak (voir **Figure II.4**).

- Moule en creux appelé moule négatif.
- Moule en relief appelé moule positif.



**Figure II.4 :** Thermoformage sous vide.[9]

- (a) Après application du vide dans le moule, une plaque serrée et chauffée est appliquée avec force dans le moule à la pression de l'air.
- (b) La plaque plastique se refroidit au contact du moule.
- (c) Les régions de la plaque qui entrent en contact avec le moule en dernier sont les plus minces.

### II.5.2.2. Thermoformage sous Pression

Le formage sous pression est fondamentalement identique au formage sous vide. Cependant, pendant 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.

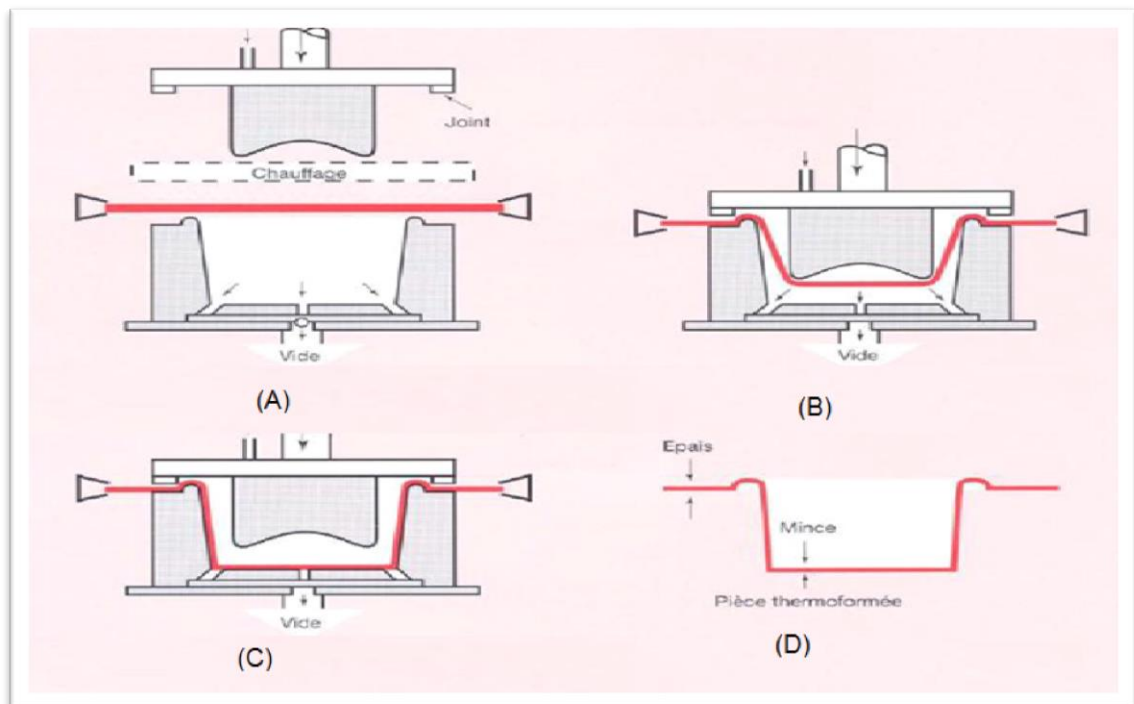
### II.5.2.3. Drapage

Le drapage est similaire au thermoformage sous vide, après que la plaque soit mise sur le cadre et chauffée, elle est étirée mécaniquement, et soumise ensuite à une pression pour la former sur un moule positif.

### II.5.3. Thermoformage par Moyens Mixte

#### II.5.3.1. Thermoformage sous Vide avec Poinçon de Pré-Étirage

Le poinçon, dont les dimensions doivent être de 10% à 20% inférieures à celle du moule, doit être chauffé à une température immédiatement inférieure à la température du thermoformage de la plaque. L'air contenu dans le moule est aspiré, une fois que le moule applique la force nécessaire à la plaque chaude pour qu'elle épouse l'empreinte, et forme ainsi la pièce voulue. (Voir la Figure ci-dessous)

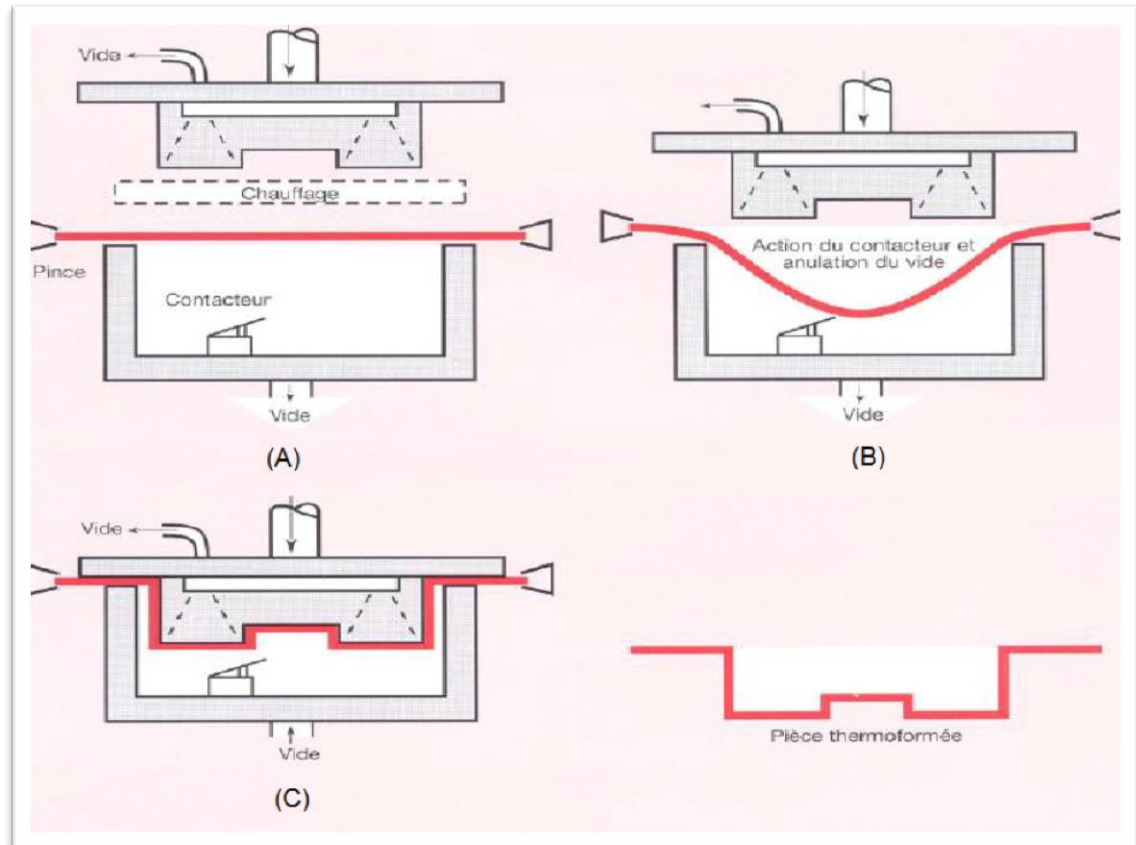


**Figure II.5 :** Thermoformage sous Vide avec Poinçon de Pré-Étirage.[9]

- (A) : Plaque en plastique serrée, chauffée et placée au-dessus de l'empreinte du moule.
- (B) : Le poinçon descend sur la plaque plastique pour la pré-étirer.
- (C) : Dès que le poinçon est en fin de course, le vide est appliqué dans l'empreinte du moule.
- (D) : Les parties du poinçon qui touchent la plaque en premier forment des zones plus épaisses à cause du refroidissement.

### II.5.3.2. Thermoformage en Relief Profond sous Vide

La plaque chauffée est placée au-dessus d'un caisson dans lequel le vide est appliqué pour former une bulle à l'intérieur.



**Figure II.6 :** Thermoformage en Relief Profond sous Vide.[9]

(A) : Plaque en plastique chauffée et tendue sur le caisson à vide de manière à l'obturer hermétiquement.

(B) : La plaque est mise sous forme concave par application du vide sous la plaque.

(C) : Le poinçon est abaissé et le vide est appliqué par son intermédiaire. Simultanément, le vide sous la plaque est annulé par événement.

### Remarque :

**Différence entre un moule négatif et moule positif** (dans le cas d'une pièce carrée)

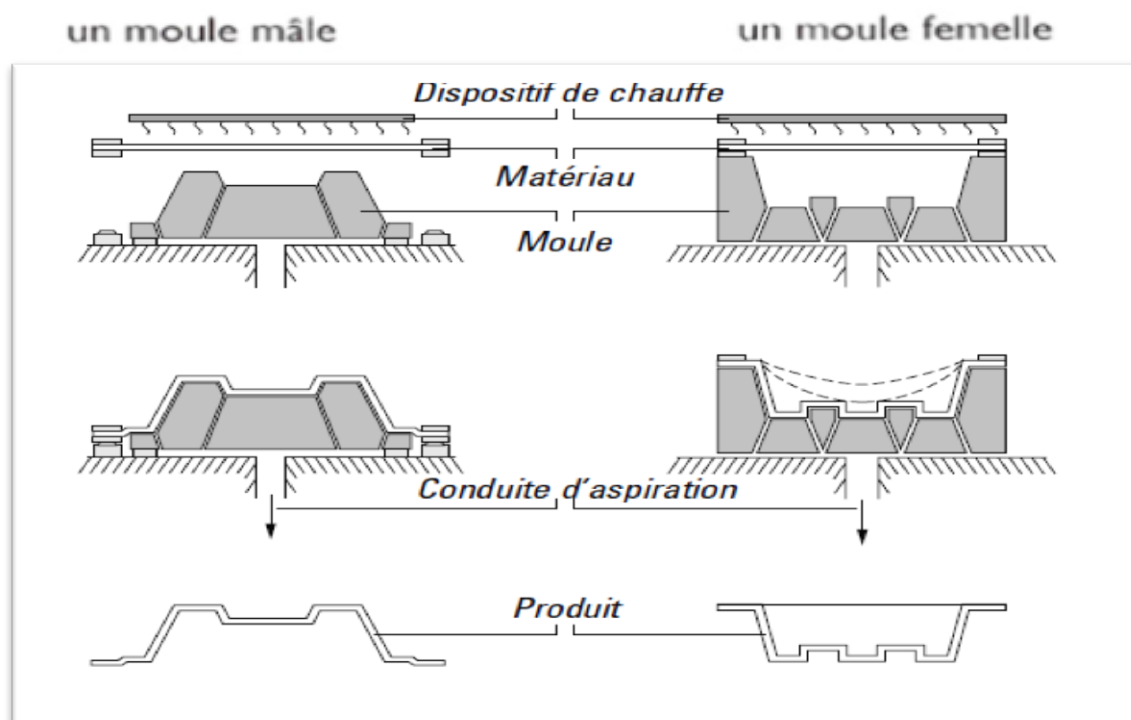
#### ❖ Moule positif

La qualité de la surface extérieure est identique à la qualité de la surface de la plaque avant thermoformage (pas de contact), et la surface intérieure est en fonction de l'état de la surface du moule, risque de traces de démoulage. Le démoulage est difficile pour les pièces profondes ou sans dépouille, car le retrait des pièces se fait sur le poinçon et la quantité d'air aspirée n'est pas importante, donc le formage est rapide.

#### ❖ Moule négatif

La qualité de la surface extérieure est en fonction de l'état de surface du moule par contre la surface intérieure est identique à la qualité de la surface de la plaque avant thermoformage (pas de contact avec le moule), et pour le démoulage il est aisé car le retrait ne provoque pas de serrage sur le moule, et, la quantité d'air aspirée est importante, donc le formage est lent, et, pas de formation de plis sur la pièce dans le cas du moule multi empreintes.

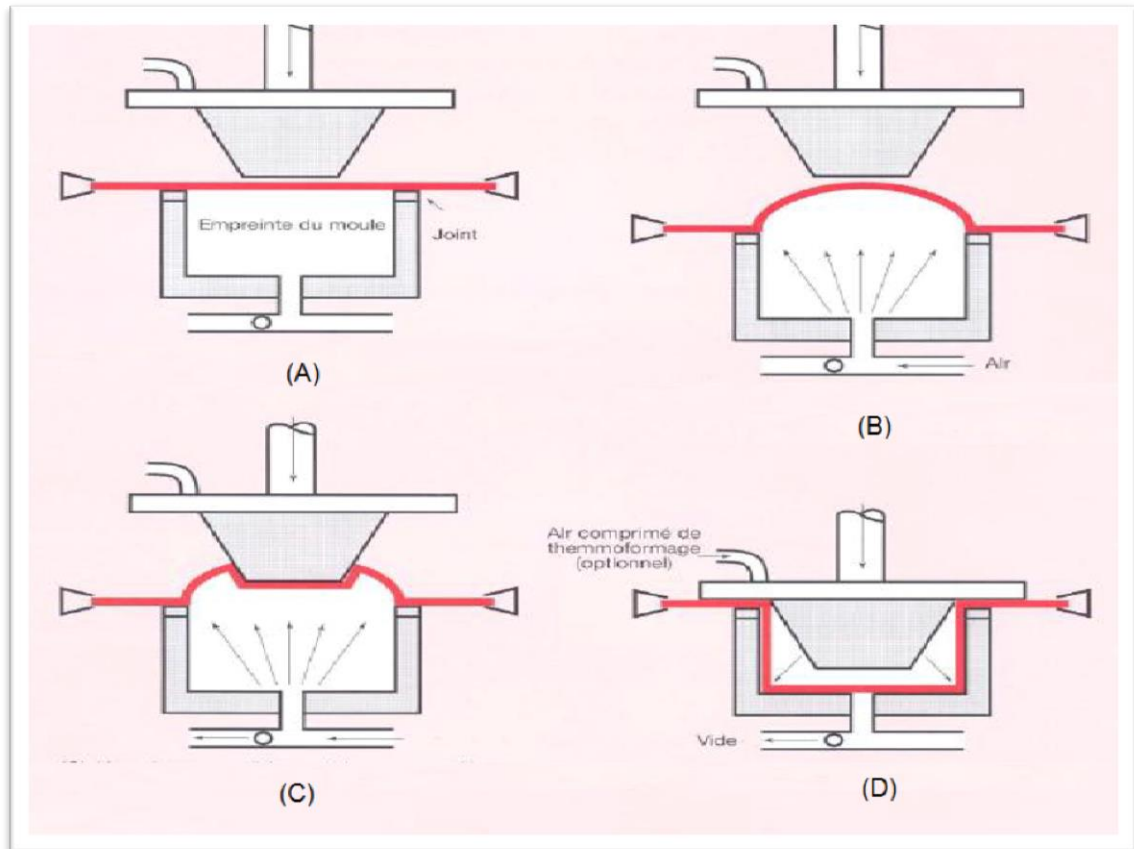
Et pour le coût, le moule négatif est le plus cher.



**Figure II.7 :** Formage Mâle et Formage Femelle.

### II.5.3.3. Thermoformage en Bulle Sous Pression avec Pré-Étirage

On l'utilise lorsque la plaque doit être formée pour donner des articles profonds et dotés d'une bonne régularité d'épaisseur.

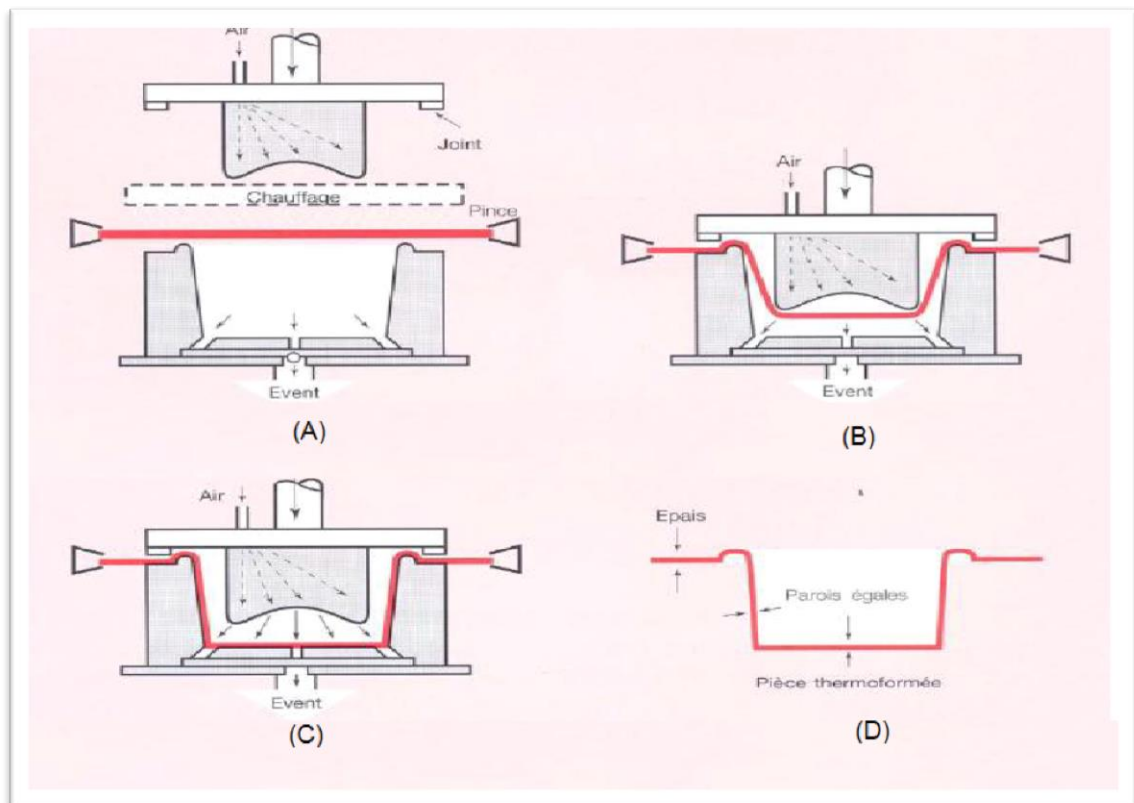


**Figure II.8 :** Thermoformage en Bulle Sous Pression avec de Pré-Étirage.[9]

- (A) : La plaque de plastique chauffée est posée étanche sur l'empreinte.
- (B) : De l'air est introduit pour gonfler la plaque sous forme d'une bulle à étirage régulier.
- (C) : Poinçon sensiblement du même profil que l'empreinte appuie sur la bulle et la fait pénétrer par la force dans le moule
- (D) : Lorsque le poinçon atteint son point bas, le plastique est poussé contre les parois du moule par application du vide. De l'air peut être introduit par le haut pour aider au thermoformage.

### II.5.3.4. Thermoformage Sous Pression avec Poinçon de Pré-Étirage

Un poinçon pousse la plaque dans une empreinte, l'air comprimé envoyé par l'intermédiaire d'un poinçon applique ensuite une force sur la plaque contre les parois du moule. Pour améliorer la distribution de la matière, on joue sur la forme et la vitesse du poinçon.



**Figure II.9 :** Thermoformage sous Pression avec Poinçon de Pré-Étirage.[9]

(A) : Plaque en plastique serrée, chauffée est placée au-dessus de l'empreinte du moule.

(B) : Quand le poinçon entre en contact avec la plaque, la zone située sous la plaque est désaérée

(C) : Lorsque le poinçon est en fin de course et ferme hermétiquement le moule, le plastique est plaqué avec force contre le moule par de l'air comprimé envoyé par l'intermédiaire du poinçon.

(D) : Le thermoformage sous pression avec poinçon de pré-étirage permet d'obtenir des produits d'épaisseurs de parois régulières.

### II.6. Thermo-Formeuse (utilisée à l'ENIEM)

#### II.6.1. Fonctionnement

La feuille est mise en place dans le châssis de serrage du premier poste de la chaîne par le chargeur de feuille. Le châssis de serrage tourne à 120° dans le sens des aiguilles d'une montre pour chauffer la feuille au radiateur en céramique pendant un temps et la ramollir. Après le chauffage, le châssis de serrage tourne dans le même sens de 120° pour passer la feuille au poste de formage. [8]

La feuille subit ici, le soufflage d'air pour avoir la même épaisseur sur toute sa surface. Le poinçon de la matrice de formage sous vide descend et la matrice monte au même temps. L'air intérieur de la matrice est alors aspiré pour donner à la feuille la forme voulue, et puis, la feuille est refroidie par des ventilateurs et le refroidisseur à travers la matrice. Le châssis de serrage tourne alors de 120° au premier poste.

La pièce formée est enlevée du châssis et transférée sur la chaîne suivante par le déchargeur.

Au début, le moule est à une température inférieure à 40°C. Dès que la machine démarre, de l'eau chaude passe par le circuit de refroidissement pour le chauffer, et, le réglé à une température constante de 40°C. Lorsque la pièce chauffée par des résistances bifaces à 320°C, placée sur le moule, automatiquement, la température de ce dernier augmente, le thermostat va la détecter et va demander de l'eau froide pour la rabaisser jusqu'à 40°C.

#### II.6.2. Composants de la Thermo-Formeuse

##### ➤ Chargeur des feuilles

Aspirer les feuilles posées sur la table d'empilement de feuilles, une par une et les transférer au châssis de serrage du premier poste de la machine de formage sous vide.

##### ➤ Chargeur de pile de feuille

Décharger la table d'empilement de la palette vide et la recharger de la palette chargée de feuilles.

➤ **Table d'empilement de feuilles**

Pour faciliter le chargeur de feuilles à aspirer les feuilles, maintenir à la même hauteur, le niveau supérieur de la pile des feuilles.

La table monte ou descend pour se décharger de la palette vide et se charger de la palette chargée de feuilles.

➤ **Déchargeur (système pneumatique)**

Décharger le premier poste de la machine de formage sous vide, les pièces formées et les transférer sur la chaîne suivante.

➤ **Réservoir de stockage tampon**

Stocker de l'air comprimé

➤ **Régulateur**

Régler la pression de l'air comprimé.

➤ **Unité de refroidissement d'eau**

Régler la température des pièces formées.

➤ **Changeur de matrice (système pneumatique)**

Remplacer la matrice

➤ **Pompe à vide.**

Aspirer sous vide l'air intérieur de la chambre de formage de la matrice

### II.7. Anomalie de Fonctionnement

Problèmes	Cause possibles	Solutions
La machine ne fonctionne pas	1-mauvaise alimentation 2-fusibles défectueux 3-interrupteur principale non enclenché	1-brancher la machine 2-vérifier ou changer les fusibles 3-appuyer sur le bouton marche après avoir branché la machine 4-consultez un électricien
Les résistances ne chauffent pas	1-mauvaise alimentation 2-fusibles défectueux 3-le bouton de régulation de chauffe est sur OFF 4-un fil est déconnecté 5-une résistance est cassée	1-brancher la machine 2-vérifier ou changer les fusibles 3-mettre le bouton de régulation de chauffe sur FULL 4-vérifier ou changer les résistances 5-vérifier la connexion des fils 6-consultez un électricien
Perte de vide	1-la pompe à vide ne fonctionne pas 2-la pompe à vide fonctionne mal 3-les grenouillères ne pressent pas suffisamment la matière sur le joint (mauvaise étanchéité) 4-le joint supérieur est coupé ou comprimé (mauvaise étanchéité) 5-le joint collé sur le périmètre du plateau mobile est coupé, comprimé ou décollé (mauvaise étanchéité) 6-le joint est en bon état, il est bien collé, il dépasse de 2mm environ du bord métallique du plateau mobile mais n'est pas comprimé	1-brancher la machine *vérifier ou changer les fusibles *mettre le bouton de pompe à vide sur ON *consultez un électricien 2-changer ou nettoyer le filtre et les clapets (après approximation 1 an) 3-desserrer l'écrou de blocage de la vis de pression -ajuster en fonction de l'épaisseur de la matière afin de presser convenablement le joint- bloquer l'écrou 4-changer le joint 5-recoller le joint avec la colle. 6-le joint doit être comprimé de 1mm lorsque

	7-un tuyau est coupé ou déconnecté	le plateau mobile est en position haute-changer le joint s'il est coupé ou ne granite pas une étanchéité suffisante 7-le système de levier est déréglé, démonter la plaque métallique située à l'arrière de la machine-régler la vis du système de levier afin de permettre une compression du joint de 1mm 8-démonter la plaque mécanique située à l'arrière de la machine. Vérifier l'état et la connexion des tuyaux des changer si nécessaire
La minuterie ne fonctionne pas	1-mauvaise alimentation 2-fusibles défectueux Minuterie en heures	1-vérifier l'alimentation 2-vérifier ou changer les fusibles 3-mettre la minuterie en seconde

**Tableau N°01 : Anomalies de Fonctionnement et leurs Solutions.**

Important: Avant tout démontage débrancher la machine. [10]

## II.8. Avantages et Inconvénients du Thermoformage

### II.8.1. Avantages

Pour les avantages qui sont très nombreux, à l'exemple de la:

- Possibilité de formage de grandes pièces.
- Fabrication de pièces facilement, avec un temps moindre, de bonne qualité et un cout de revient pas élever par rapport aux machines à injection plastique utilisées avant les thermo-formeuses.
- Procédé de moulage sans investissement majeur en outillage.
- Offert en plusieurs couleurs et textures.

### II.8.2. Inconvénients

Les inconvénients de l'utilisation du thermoformage sont limités à la réduction des épaisseurs au niveau des angles de la pièce une fois formée , mais sans incidence sur le produit fini.

### II.9. Conclusion

Le thermoformage se trouve en concurrence avec l'injection et l'extrusion-soufflage. Les applications où elles sont le plus en concurrence sont les barquettes et les gobelets pour l'injection, et les flacons pour l'extrusion soufflage.

La température de mise en forme est la différence majeure entre le thermoformage et ces deux procédés (l'injection et l'extrusion-soufflage) qui utilisent directement la matière première qui est transformée à l'état fondu par contre le thermoformage nécessite un semi-produit (feuille généralement extrudée) à l'état caoutchouteux.

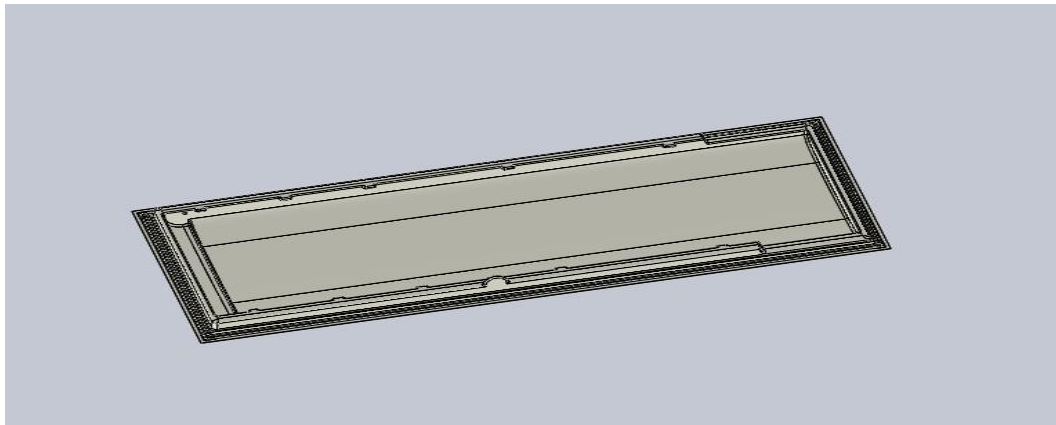
# Chapitre III

## Etude et Conception

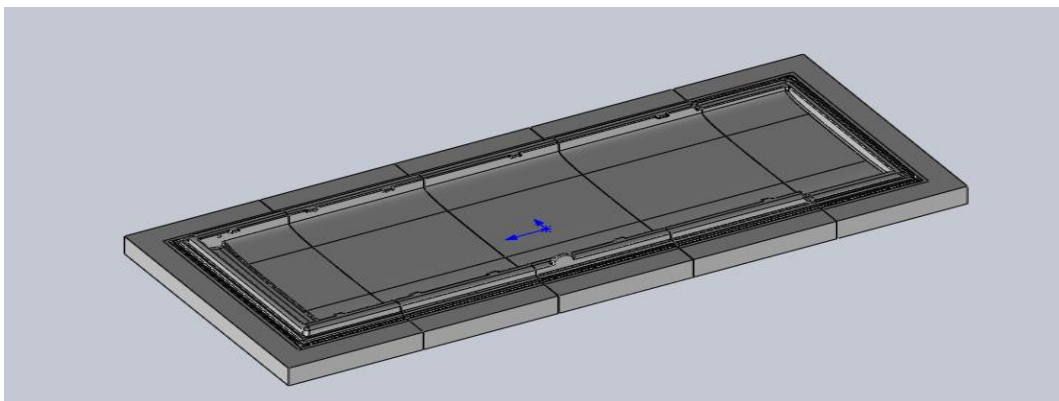
### III.1. Introduction

On obtient l’empreinte d’un moule de thermoformage à partir de modèle à réaliser (La contre porte 350S).

Les **Figures III.1** et **III.2**, montrent les formes de la contre porte à confectionner et son empreinte.



**Figure III.1** : Contre porte 350S

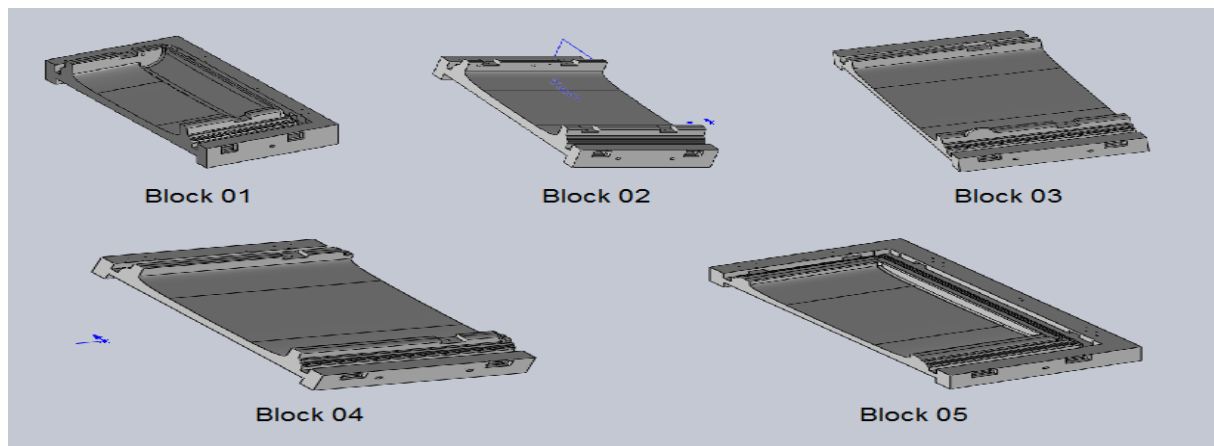


**Figure III.2** : Empreinte de la contre porte 350S.

L’empreinte contient plus de (300) trois cent trous de diamètre 0.8 mm pour assurer le soufflage et l’aspiration de l’air.

### III.2. Présentation des composantes du moule

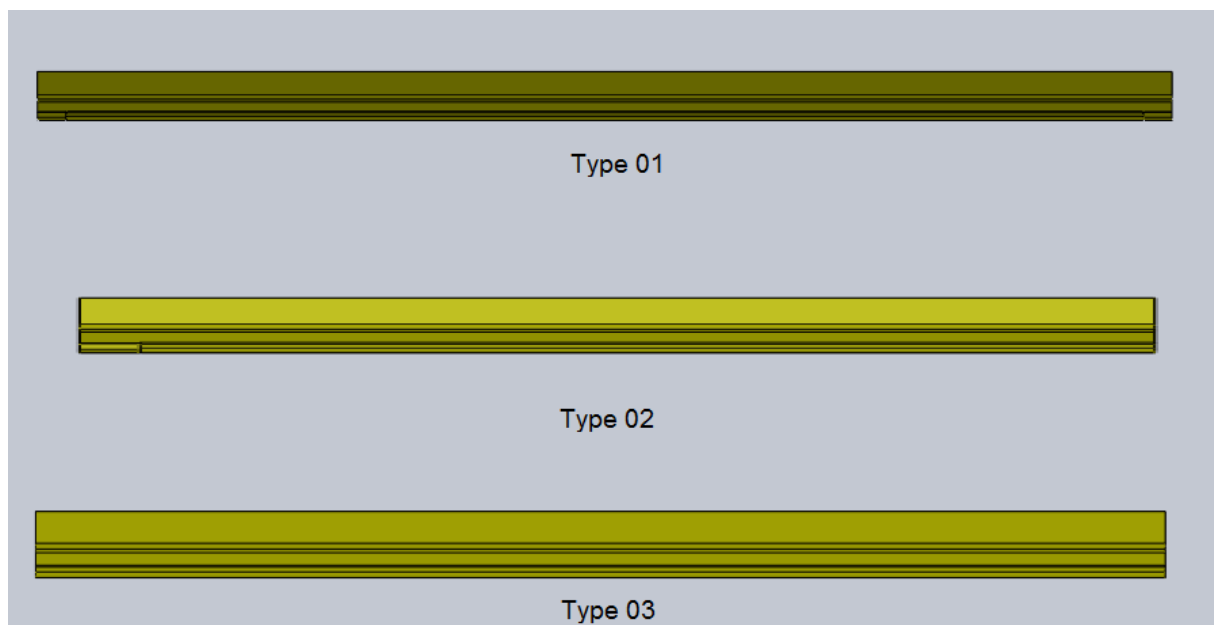
Pour cette conception, nous avons réalisé les cinq (05) blocs composants le moule et les deux (02) types de pièces rapportées (latérale et de coin), par le logiciel Solidworks afin de pouvoir les réaliser après leurs dimensionnement.



**Figure III.3:** Les cinq (05) blocs du moule réalisés par Solidworks.

#### III.2.1. Pièces Latérales

Selon la position et la forme, nous avons trois (03) types de pièces latérales à concevoir aussi par Solidworks.

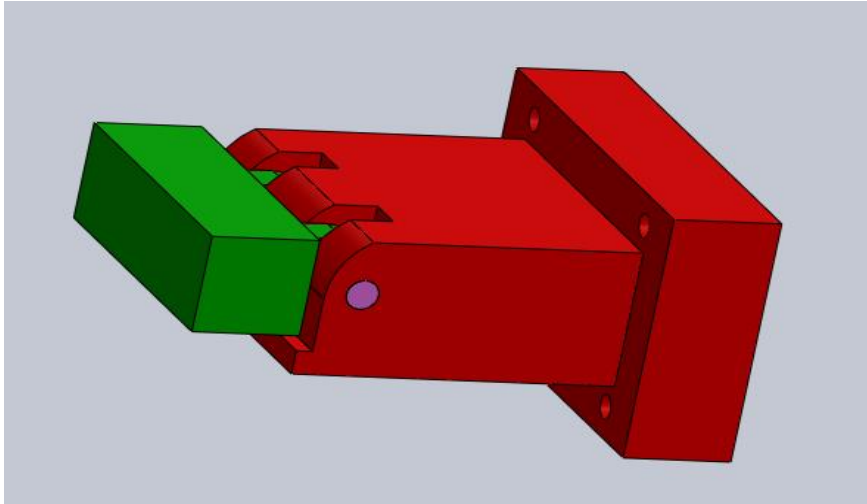


**Figure III.4 :** Type des Pièces Latérales

## Chapitre III : Etude et Conception

---

Ces pièces ont un mouvement de rotation afin de permettre l'éjection de la contre porte en évitant sa détérioration. Pour avoir ce mouvement, on a besoin d'un mécanisme qu'on a conçu nous-même, (voir la **Figure III.5**)

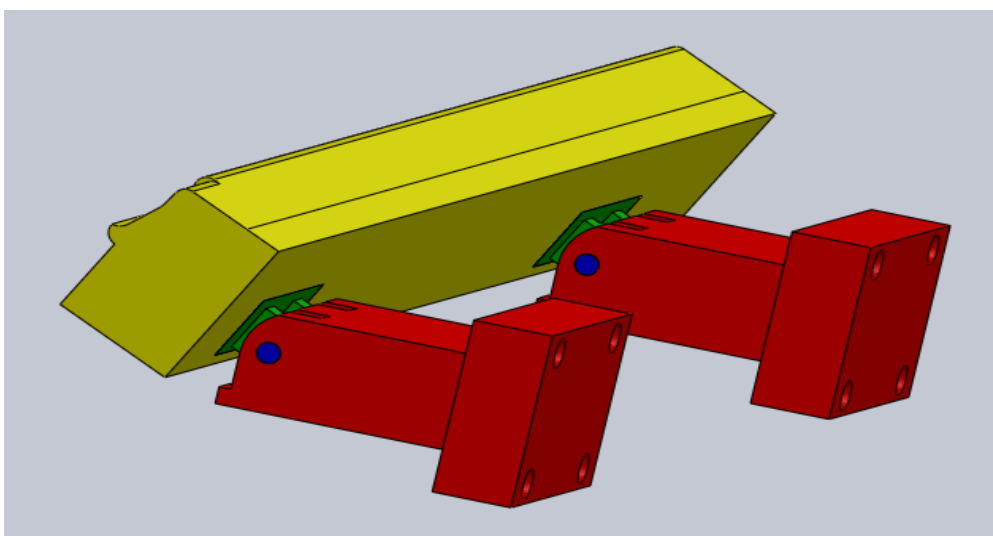


**Figure III.5** : Porte pièce latérale conçue par Solidworks.

Ce mécanisme aide la pièce rapportée à faire un mouvement de rotation pour éviter l'adhérence de la pièce finie sur l'empreinte, qui induit l'écrasement de cette partie précise. Ce mécanisme se décompose en deux (02) parties :

- La partie fixée à la pièce rapportée (bras de couleur vert).
- La partie fixée par quatre (04) vis à l'empreinte (porte bras de couleur rouge).

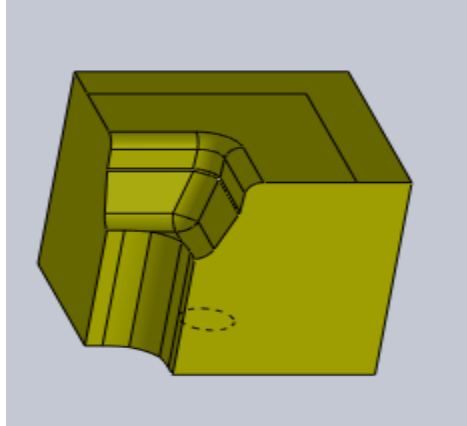
Ces deux (02) pièces sont assemblées avec une goupille.



**Figure III.6** : Montage du mécanisme dans la pièce latérale réalisé par Solidworks.

### III.2.2. Pièces de Coins

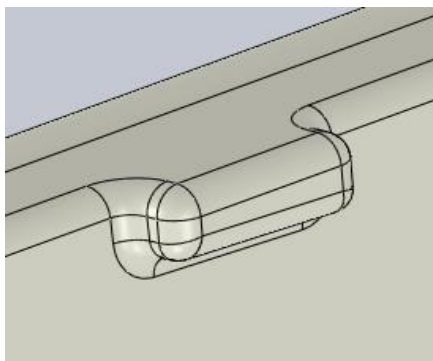
Ces pièces sont fixées sur les blocs avec des vis M10 CHC, elles permettent le guidage des pièces latérales pour avoir un bon fonctionnement.



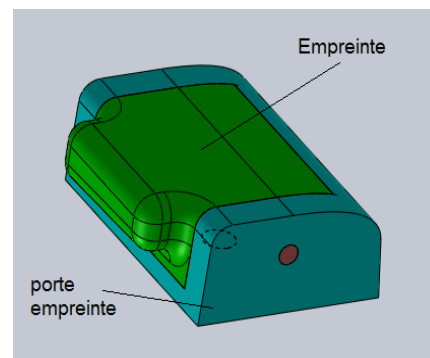
**Figure III.7 :** Pièce du coin réalisée par Solidworks.

### III.2.3. Insert

Pour obtenir la forme qui est représentée dans **Figure III.8**, nous avons utilisé un mécanisme qui montré sur la **Figure III.9**, qui a un mouvement de rotation par rapport à l'horizontal pour éviter la détérioration de la pièce à ce niveau, lors du démoulage.



**Figure III.8:** Forme complexe.



**Figure III.9 :** Insert.

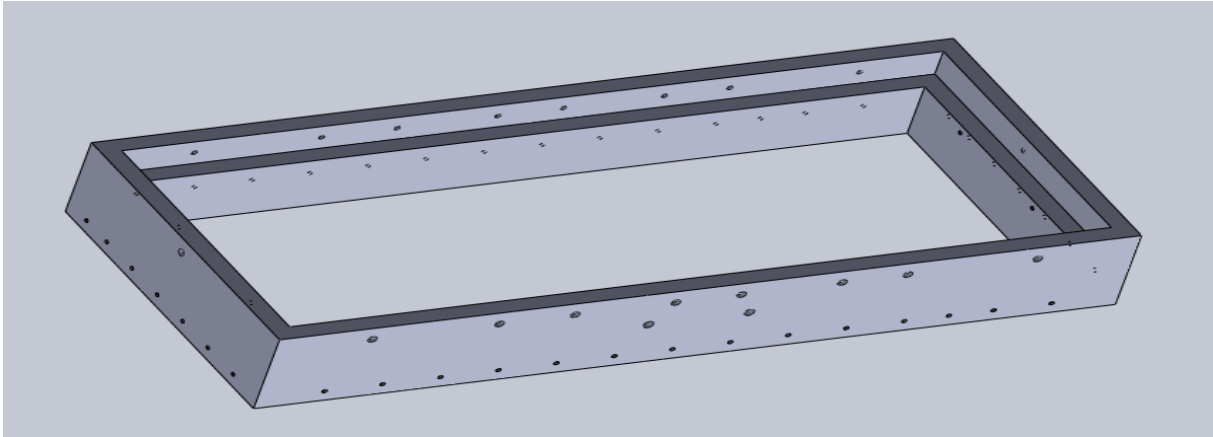
Ce mécanisme se compose de deux (02) parties, empreinte et porte empreinte (exécuté par Slidworks).

- Empreinte.
- Porte empreinte.

Le porte empreinte est fixé sur le bloc par une vis au-dessous, assemblé avec l'empreinte de l'insert avec une goupille afin de permettre la rotation de l'empreinte insert.

### III.2.4. Paroi

Afin de rassembler toutes les pièces du moule, nous avons conçu une cage qui permet de positionner et fixer ces pièces entre elles, muni d'un joint d'étanchéité, pour un bon fonctionnement et former une chambre fermée.



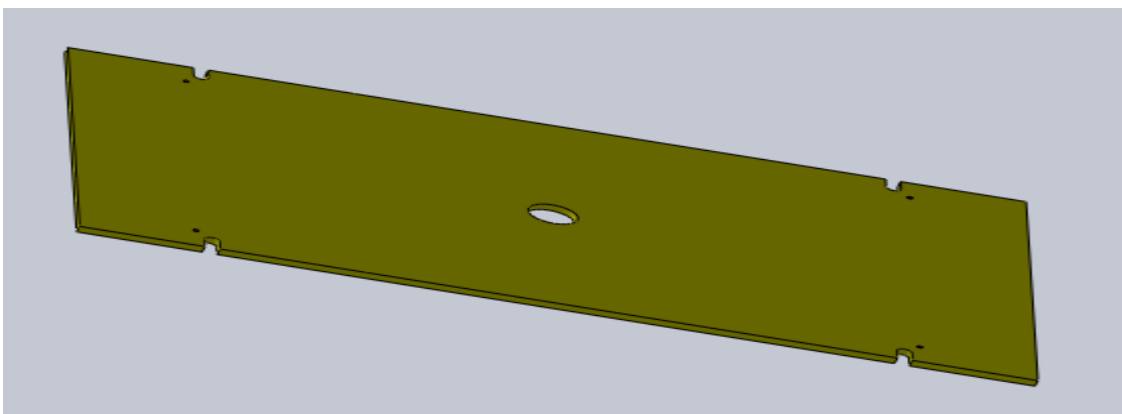
**Figure III.10:** Paroi effectué par Solidworks.

### III.2.5. Semelle

Cette semelle est la base du moule, elle nous permet :

- Un bon positionnement de la matrice par les quatre (04) tenons de guidage.
- Une bonne fixation de la matrice par les pattes de serrages à la table inférieure de la machine.

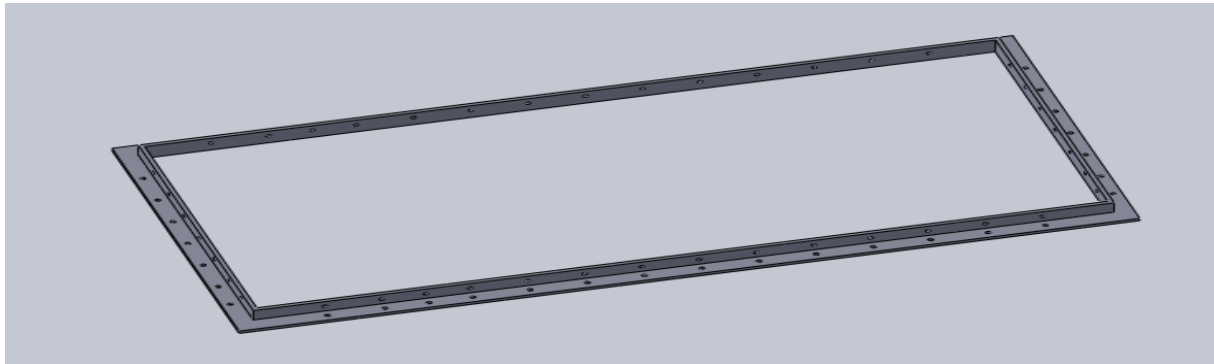
Elle possède un trou permettant le passage d'air, Soufflage/Aspiration.



**Figure III.11 :** Semelle réalisée par Solidworks.

### III.2.6. Cadre

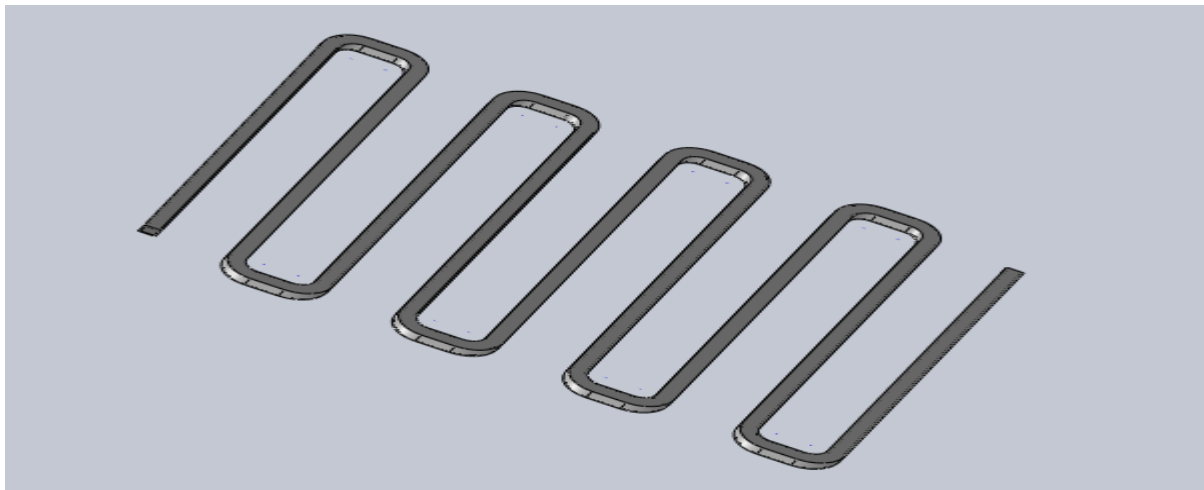
Il nous assure le blocage de la paroi avec la semelle (réalisée par Solidworks).



**Figure III.12 :** Cadre de fixation accompli par Solidworks.

### III.2.7. Echangeur

L'échangeur est placé en contact avec la face inférieure de l'empreinte, qui absorbe la quantité de chaleur évacuée par la feuille chauffée; Par conduction vers l'intérieur de l'échangeur et par convection vers l'eau. L'échangeur a pour rôle le maintien du moule à une température égale à 40°C. Si la température du moule est au-dessus de 40 °C ; l'eau froide est à  $T = 20^{\circ}\text{C}$  passe dans l'échangeur. Et vice-versa, dans le cas d'un réchauffage, l'eau chaude entre avec une température de 80°C.



**Figure III.13 :** Échangeur de forme rectangulaire défini par Solidworks.

### III.3. Dimensionnement de l'Échangeur

L'échangeur de chaleur doit évacuer une quantité de chaleur issue de l'opération de formage sur le moule. Pour évaluer les échanges thermiques qui s'y produisent, nous avons eu recours à la méthode de Calcul du Bilan Thermique.

#### III.3.1. Calcul du Flux Total

Le calcul du flux total est fait en tenant compte des hypothèses suivantes :

- La chaleur cédée par convection par la feuille en HIPS et par conduction par le moule amputé du flux de chaleur perdu par les faces latérales du moule est totalement récupérée par l'eau circulant à l'intérieur de l'échangeur de chaleur (serpentin en bronze)
- Au point de contact entre la feuille et le moule, le flux de chaleur se transmet instantanément vu les faibles épaisseurs du moule et de la feuille, ainsi que la valeur de  $\lambda$  qui est élevée.
- Les conductivités thermiques de la feuille de HIPS ( $\lambda_f$ ) et du cuivre ( $\lambda_c$ ) ainsi que celle du moule ( $\lambda_m$ ) ne varient pas avec la température.
- Le régime d'écoulement de l'eau à l'intérieur du serpentin est permanent.
- Dès que la feuille de HIPS arrive sur la matrice (moule), elle est immédiatement soufflée par de l'air à l'aide d'une pompe à vide, et puis, aspirée après un temps  $t_s=1,3s$  pour sa mise en forme.

L'équation (1) ci-dessous donne la formule du flux total :

$$\Phi_{tot} = \Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_{pertes} \quad (1)$$

$\Phi_{tot}$  : Le flux de chaleur total cédé par la feuille de HIPS et l'air d'aspiration au moule.

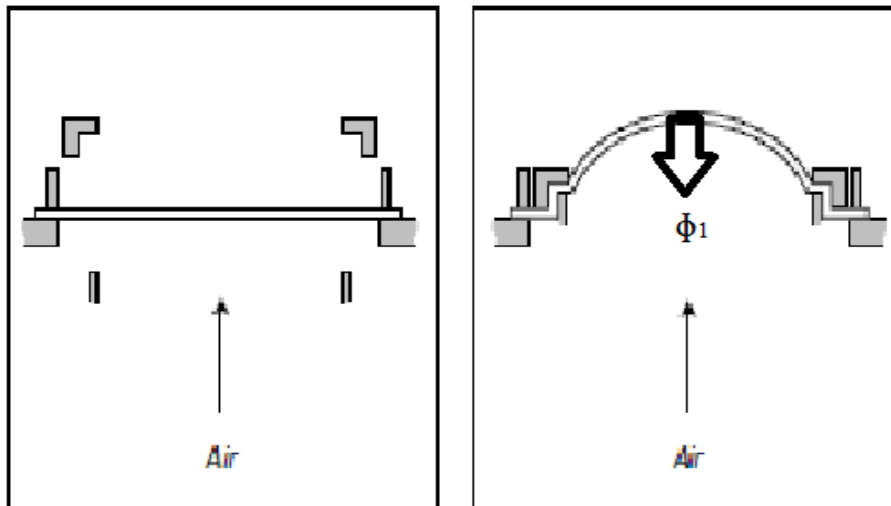
$\Phi_1$  : Le flux de chaleur cédé par convection par l'air d'aspiration au moule.

$\Phi_2$  : Le flux de chaleur cédé par la feuille de HIPS par conduction avec le moule.

$\Phi_{pertes}$  : Le flux de chaleur cédé par la feuille de HIPS par convection et rayonnement par les parois latérales et la paroi inférieure du moule à l'air ambiant.

### III.3.1.1. Calcul du Flux de Chaleur $\phi_1$ cédé par convection entre la feuille plastique et le milieu extérieur

La **Figure III.14** présente le Flux de Chaleur cédé par convection entre la feuille plastique et l'air de soufflage.



**Figure III.14** : Représentation du Flux de Chaleur cédé par convection entre la feuille plastique et l'air de soufflage.

Le flux  $\phi_1$  est donné par la formule suivante :

$$\phi_1 = hcv \cdot S_f (T_{if} - T_{ff}) \quad (2)$$

Avec:

$hcv$  : Coefficient de convection, (en  $W/m^2.K$ ) ;

$S_f$  : Surface d'échange entre la feuille et l'air, (en  $mm$ ).

$T_{if}$  : Température de la feuille chauffée avec des résistances en céramiques avant le soufflage, (en  $^{\circ}C$ ).

$T_{ff}$  : Température de la feuille après soufflage, (en  $^{\circ}C$ ).

- **Calcul du  $T_{if}$  :**

La chaleur émise par les résistances en céramiques par effet Joule est totalement récupérée par la feuille par conduction en absence de pertes de sorte que :

$$q = -\frac{\lambda_f}{e_f} (T_f - T_{if}) \quad (3)$$

## Chapitre III : Etude et Conception

---

$$dq = p \cdot dt \quad (4)$$

$$q = \int_0^t p \cdot dt = 4 \cdot 41 = 164 \text{ KJ} \quad (5)$$

Avec :

$q$  : La chaleur produite par les résistances, (en KJ).

$p$  : La puissance électrique des résistances (en KW).

$t$  : Le temps de réchauffage égale à 41 s.

$T_f$  : Température de la feuille avant le réchauffage (en °C).

$\lambda_f$  : Coefficient conductif de la feuille égal à 0.15 (en W/m .K).

$e_f$  : Epaisseur initiale de la feuille (en mm).

$$T_{if} = q * \frac{e_f}{\lambda_f} + T_f \quad (6)$$

$$T_{if} = 164 * 10^3 * \frac{1.8 * 10^{-3}}{0.15} + 25$$

$$T_{if} = 121^\circ\text{C}$$

- **Calcul de  $T_{ff}$  :**

L'application du bilan thermique sur l'air de soufflage et la feuille, se traduit par :

La chaleur émise par le solide en l'occurrence la feuille de HIS est totalement récupérée en l'occurrence l'air, et on obtient l'égalité suivante :

$$\rho_f * V_f * C_f * \frac{dT}{dt} = hc * S_f * (T - T_{ea}) \quad (7)$$

Telle que :

$\rho_f * V_f * C_f * \frac{dT}{dt}$  : Représente la chaleur cédée par la feuille pendant un temps  $dt$

$hc * S_f * (T - T_{ea})$  : Représente la chaleur reçue par convection par l'air de soufflage

En utilisant la méthode de séparation de variable, nous obtenons :

Comme :  $dT = d(T - T_{ea})$

$$-\frac{dT}{T-Tea} = -\frac{hc*Sf}{\rho_f*V_f*C_f} dt \quad (8)$$

$$\frac{d(T-Tea)}{T-Tea} = \frac{hc*Sf}{\rho_f*V_f*C_f} dt \quad (9)$$

$$\log((T - Tea)) = \frac{hc*Sf}{\rho_f*V_f*C_f} * t + C \quad (10)$$

Le calcul de la constante  $C$  est issu de l'application de la condition initiale à l'équation

$$t = 0 \Rightarrow T = Tif$$

En remplaçant  $t=0$  dans l'équation (10)

$$C = \log(Tif - Tea)$$

D'où

$$\log \frac{(T-Tea)}{(Tif-Tea)} = \frac{hc*Sf}{\rho_f*V_f*C_f} * t \quad (11)$$

Ce qui implique :

$$T(t) = \exp \left[ -\frac{hc*Sf}{\rho_f*V_f*C_f} t \right] (Tif - Tea) + Tea \quad (12)$$

La pompe à vide a un débit volumique ( $\dot{V}$ ) égale à 0.0133 m<sup>3</sup>/s qui débite une quantité d'air à la température  $T_a=25^\circ\text{C}$  par une surface constituée de  $n = 304$  trous, de  $\phi=0.8\text{mm}$  placés sur toute la surface du moule (la matrice).

Le calcul de la vitesse de l'air au contact de la feuille passe par le calcul de la section totale des trous de soufflage de l'air.

Soient :

$S_{T,tr}$  : La section totale des trous de Soufflage /Aspiration, (en mm<sup>2</sup>).

$S_{tr}$  : La section d'un trou de Soufflage / Aspiration, (en mm<sup>2</sup>).

Telle que :

$$S_{tr} = \pi * \frac{\phi^2}{4}$$

## Chapitre III : Etude et Conception

---

$$ST, tr = Str * n$$

$n$  : Le nombre de trous de Soufflage / Aspiration

$$S_{tr} = 0.5 \text{ mm}^2 \quad \text{et} \quad S_{T,tr} = 152 \text{ mm}^2$$

La vitesse de l'air au soufflage  $V_a$  est calculée comme suit :

$$\dot{V} = S_{T,tr} \cdot V_a \quad \text{D'où} \quad V_a = \frac{\dot{V}}{S_{T,tr}}$$

Avec  $\dot{V}$  : Le débit volumique de l'air soufflé et aspiré par la pompe à vide.

$$\dot{V} = 0.0133 \text{ m}^3/\text{s} \quad \Rightarrow \quad V_a = 87.5 \text{ m/s}$$

Par application de la corrélation ci-dessous pour un écoulement de l'air en convection forcée sur une plaque sans rayonnement ; on aboutit aux résultats suivants :

$$hc = 7.15 * Va^{0.78}$$

Application Numérique:

$$hc = 7.15 * 87.5^{0.78} \quad hc = 233.92 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

$t=1.3\text{s}$  (temps de soufflage).  $Cf=2000$  (coefficient de Trainée),  $Vf=1753245 \text{ mm}^3$  (volume de la feuille). Avec  $t$  et  $Cf$  sont des données.

D'où

$$T_{ff} = \exp \left[ - \frac{233.92 * 1665 * 585 * 10^{-6} * 1.3}{2000 * 1050 * 1753245 * 10^{-9}} \right] (121 - 25) + 25$$

$$T_{ff} = 113.58 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\phi_1 = 233.92 * 974025 * (121 - 113.58)$$

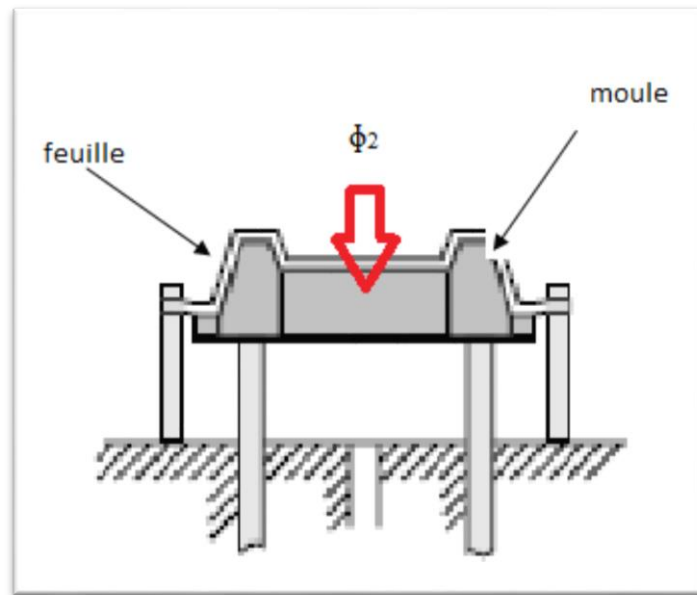
$$\phi_1 = 1690.6 \text{ W}$$

$\rho_f$  : La masse volumique de la feuille est égale à  $1050 \text{ Kg/m}^3$

### III.3.1.2. Calcul de $\phi_2$

## Chapitre III : Etude et Conception

Le moule au contact de la feuille plus chaude que sa surface reçoit un flux de chaleur  $\phi_2$  par conduction, (voir la **Figure III.15**) ci-dessous :



**Figure III.15** : Représentation du Flux de Chaleur absorbé par le moule.

Et ce flux se traduit par la relation (9) suivante :

$$\phi_2 = -\frac{\lambda_f \cdot S'_f}{e_f} (T_{mm} - T_{ff}) \quad (13)$$

$$S'_f = 986910 \text{ mm}^2$$

D'où

$$\phi_2 = -\frac{0.15 \cdot 986910 \cdot 10^{-6}}{1.81 \cdot 10^{-3}} (40 - 113.58)$$

$$\phi_2 = 6051.4 \text{ W}$$

### III.3.1.3. Calcul de $\phi_{pertes}$

Le flux de chaleur perdu par le moule à l'air ambiant s'exprime par :

$$\Phi_{pertes} = \Phi_{cv} + \Phi_r \quad (14)$$

$\Phi_{cv}$  : Représente le flux total cédé par le moule à l'air ambiant par ces faces latérales par convection ;

$\Phi_r$  : Représente le flux de chaleur cédé par rayonnement avec les parois du moule

➤ **Calcul de  $\Phi_{cv}$**

Le flux  $\Phi_{cv}$  sera calculé comme suit :

$$\Phi_{cv} = h_{ca} \cdot S_{T.pl} \cdot (T_{mp} - T_{aa}) \quad (15)$$

Avec :

$h_{ca}$  : Coefficient d'échange convectif Moule-Air, ( $h_{ca} = 28.5 \text{ W/m}^2\text{°C}$ )

$S_{T.pl}$  : Surface d'échange entre l'air et le moule, (en  $\text{mm}^2$ ).

$T_{mp}$  : Température des parois latérales du moule, (en  $^{\circ}\text{C}$ ).

$T_a$  : Température ambiante de l'air, (en $^{\circ}\text{C}$ ).

**Calculons la surface d'échanges totale  $S_{T.pl}$  :**

$$S_{T.pl} = S_{1.pl} + S_{2.pl} = [2 * (725 * 150)] + [2 * (1690 * 150)]$$

$$S_{T.pl} = 724500 \text{ mm}^2$$

Ce qui implique :

$$\Phi_{cv} = 28.5 * 724500 * 10^{-6} * (40 - 25)$$

$$\Phi_{cv} = 305.72 \text{ W}$$

➤ **Calcul du  $\Phi_r$  :**

$$\Phi_r = h_r \cdot S_{T.pl} \cdot (T_{mm} - T_{aa}) \quad (16)$$

Tel que :  $h_r$  représente le coefficient d'échange par rayonnement qui s'obtient par la relation suivante :

$$h_r = \varepsilon \cdot \sigma (T_{mm} + T_{aa})(T_{mm}^2 + T_{aa}^2) \quad (17)$$

Où  $\varepsilon$  : Emissivité de l'aluminium égale à 0.11

$\sigma$  : La constante de Stefan Boltzmann égale à  $5.67 \cdot 10^{-8}$

$$h_r = 0.711 \text{ W/m}^2\text{K}$$

D'où 
$$\Phi_r = 7.72 \text{ W}$$

À partir de là, on déduit  $\Phi_{pertes}$  qui représente le flux total cédé par les parois du moule par convection et rayonnement à l'air ambiant.

Application Numérique :

$$\Phi_{pertes} = 305.72 + 7.72 = 313.44 \text{ W}$$

De l'équation (1), on déduit  $\Phi_{tot}$  :

$$\Phi_{tot} = 7428.56 \text{ W}$$

### III.3.2. Dimensionnement de l'Échangeur

La phase de dimensionnement consiste principalement à déterminer la surface d'échange, nécessaire au transfert du flux de chaleur de la matrice vers l'eau de refroidissement, ce qui nécessite la connaissance des paramètres géométriques ainsi que les propriétés du fluide en l'occurrence l'eau. Cette détermination peut- être faite par la méthode des Bilans Thermiques, quand on est en présence d'un échangeur à un seul fluide et cela moyennant les hypothèses suivantes :

- L'échangeur est sans pertes.
- Le coefficient d'échange global sera considéré constant le long de la surface d'échange

#### III.3.2.1. Donnée du Problème

Le problème consiste à extraire un flux de chaleur  $\phi_{tot}$ , issu de la matrice au moyen d'un serpentin rectangulaire d'une surface intérieure (16/14) mm et d'une épaisseur de 2 mm

## Chapitre III : Etude et Conception

---

véhiculant de l'eau comme agent caloporteur à une température d'entrée  $T_{ee}=20^{\circ}\text{C}$  et un débit de l'eau égal à 30 L/min.

Pour cela, une étude thermique (dimensionnement) s'impose.

### III.3.2.2. Méthode de Calculs

L'établissement des relations passe en général par une hypothèse essentielle :

- Le coefficient d'échange global  $K$  est admis comme étant constant tout au long de l'échangeur.

$$\phi = K . S . \Delta T \quad (18)$$

La détermination du coefficient  $K$  et de la différence de température  $\Delta T$  dépend de la direction de l'écoulement ; le coefficient de transmission de la chaleur  $K$  dépend essentiellement de l'échange superficiel de la chaleur ou de la vitesse de l'écoulement.

À côté de la condition principale d'absorber un flux de chaleur avec des températures données. Des conditions secondaires, Comme la réduction de la perte de charge ou la limitation d'une dimension constructive, nécessitent d'être étudiées. Il faut remarquer que le calcul des échangeurs ne peut tout d'abord donner que des valeurs indicatives sur les dimensions des surfaces d'échange ou sur le flux qui peut - être échangé. En effet, les coefficients d'échange de chaleur ne peuvent être calculés avec une précision suffisante d'après les relations (corrélations) indiquées dans la partie Bilan Thermique ; Que dans des conditions d'écoulement du fluide nettement définies et des enceintes d'écoulement géométriques simples.

- Détermination du coefficient d'échange global  $K$  :

$$K = \frac{1}{\frac{1}{h'c} + \frac{e}{\lambda e}} \quad (19)$$

$h'c$  : Coefficient d'échange convectif égal à  $8881.6 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$

$\lambda e$  : Le coefficient d'échange conductif du serpentín en bronze égal à  $0.58 \text{ W/m} \cdot \text{K}$

$e$  : Epaisseur de l'échangeur est égale à 2 mm

## Chapitre III : Etude et Conception

---

Application Numérique :

$$K = \frac{1}{\frac{1}{8881.6} + \frac{10^{-3}}{0.58}}$$

$$K = 544.45 \text{ W/m. K}$$

- **Calcul de la longueur totale du serpent**

De l'équation (14) :

$$Se = \frac{\Phi_{tot}}{K \cdot (T_{se} - T_{ee})} \quad (20)$$

Ce qui implique :

$$Se = \frac{\Phi_{tot}}{K \cdot (T_{se} - T_{ee})} = \frac{7428.56}{544.45 \cdot (60 - 20)}$$

$$Se = 0.37 \text{ m}^2$$

$$Se = P * L$$

D'où

$$L = \frac{Se}{P}$$

$$L = \frac{0.37}{2 * (16 + 14) * 10^{-3}} = 6.17 \text{ m}$$

- **Calcul du pas**

$$L_{tp} = L - (L_e * N_e)$$

Avec :

$L_{tp}$  : Longueur totale des pas, (en mm).

$L_e$  : Longueur d'étage, (en mm).

$N_e$  : Nombre d'étages égale à 8.

Application Numérique:

$$L_{tp} = 6.17 * 10^3 - (580 * 8)$$

$$L_{tp} = 1530mm$$

Ce qui implique :

$$p = \frac{L_{tp}}{N_e} = 190 mm$$

### III.4. Choix des matériaux

Un matériau est la forme marchande d'une matière première choisie en raison de ces propriétés d'usage spécifiques et mise en œuvre par des techniques appropriées pour l'obtention d'un objet de géométrie donnée à fonction préméditée. [19-20]

Le **Tableau N° 02** suivant, nous montre les différents matériaux utilisés pour chaque pièce :

**Tableau N° 02** : Les différents matériaux utilisés pour chaque pièce :

Pièces	Matériaux
Bloc [1-5]	Al Mg 5
Pièces rapportées latérales	Cu-Zn
Pièces d'angles	Cu-Zn
Parois	Al Mg 5
Semelle	C 35
Cadre	C 35
Echangeur	Bronze
Porte échangeur	Al Mg 5
Empreinte insert	Cu-Zn
Porte empreinte insert	Cu-Zn
Bras	Cu-Zn
Porte bras	Cu-Zn

#### III.4.1. Aluminium et Ses Alliages (Al Mg5)

Les alliages d'aluminium sont divisés en deux grandes catégories : les alliages de fonderie, qui sont élaborés en tenant compte de leurs propriétés à l'état liquide afin de produire des pièces de fonderie saines, et les alliages de corroyage élaborés en tenant compte plus particulièrement de leur capacité à être mis en forme à l'état solide.[19-20]

Nous avons opté pour cet alliage (Al MG 5) pour sa disponibilité au niveau de l'entreprise et parce qu'il présente diverses propriétés qui permettent à la réalisation du moule.

- Sa température de fusion est 660 °C et celle de d'ébullition 2467°C environ.
- Sa caractéristique la plus importante est sa faible densité 2.7g/m<sup>3</sup> à température ambiante.
- Il est très ductile, ce qui facilite son usinage et sa mise en forme.
- L'aluminium se distingue par sa résistance élevée à la corrosion à cause de la formation à sa surface d'une couche protectrice (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) avec le temps.

### III.4.2. Cuivre et Ses Alliages

C'est un métal rouge plus ou moins foncé. Il est très bon conducteur de la chaleur et de l'électricité (le second après l'argent)

- Température de fusion : 1083°C.
- Masse volumique: 8.9 kg/dm<sup>3</sup>.

La structure est de type Cubique à Faces Centrées (CFC), ce qui le rend très ductile et très malléable. Il s'écrouit facilement. La résistance à la corrosion est bonne. L'oxydation à l'air commence vers 500°C.

Il est souvent employé sous forme d'alliage.

- Laitons ;
- Bronze.

Pour les pièces rapportées, on a opté pour le Laiton Cu-Zn, pour le cas des alliages industriels, le pourcentage de zinc se situe entre 4 et 45%, il est caractérisé par:

- Très facile à usiner.
- Utilisé dans des pièces soumises à l'usure ou aux chocs.
- Moins chère que le bronze.
- Se prête à la mise en forme et à l'usinage de précision.
- bonne résistance à la corrosion.

Pour le circuit de refroidissement, on a utilisé le Bronze :

- Les bronzes sont employés en mécanique pour leur bonne qualité de frottement (palier de vilebrequin, coussinets etc.....). leur bonne résistance favorise aussi leur emploi.
- Le moulage et la mise en forme du bronze, est la plus employée à cause de leurs propriétés de mouillabilité mais aussi parce que l'usinage est difficile.

- Les alliages de la première qualité sont employés pour réaliser de la robinetterie, des accessoires de tuyauterie.

### III.5. Conclusion

À partir de ce chapitre, on peut déduire que pour une bonne conception d'un moule de thermoformage, le concepteur doit suivre toutes les étapes nécessaires :

- Enumérer les composants du moule ;
- Choix des matériaux ;
- Étude Thermique du Bilan ;
- Dimensionnement ;
- Toutes ces étapes sont impératives pour le bon fonctionnement du moule.

# Les Mises en plan

# Conclusion Générale

## Conclusion Générale

---

Le procédé de fabrication des différents Moules de Thermoformage ne cesse d'évoluer au fil des années. Il permet d'obtenir des produits sous diverses formes selon les besoins et de bonne qualité, selon les normes industrielles et environnementales.

L'étude et la conception du Moule du Thermoformage proposé par l'ENIEM, nous a permis de faire un travail de recherche dans un domaine vaste que nous découvrons pour la première fois. Cela, nous a permis d'élargir nos connaissances dans le domaine de la conception et la gestion de projet dans le secteur industriel.

La conception est réalisée en utilisant le logiciel de conception assisté par ordinateur (CAO) Solid Works et nous a permis de déterminer les caractéristiques dimensionnelles et géométriques des différents composants du moule.

Enfin, ce travail nous a donné une occasion de connaître le vaste terrain de la conception dans le milieu industriel.

Cette étude permettra à l'entreprise :

- De réduire les coûts de revient du moule, habituellement acheté à l'étranger en devises.
- De faciliter son montage et son démontage grâce au fractionnement en cinq (05) parties.
- L'intervention rapide dans sa maintenance.
- Gain de temps dans sa manutention.

Nous souhaitons que notre étude contribuera à la réalisation de ce moule, car tous les éléments nécessaires sont disponibles et accessibles à l'ENIEM qui possède un atelier de fabrication avec tous les Moyens Humains et Techniques (Machines et autres) qui sont disponibles.

Nous remercions notre promotrice et l'équipe de l'ENIEM pour sa confiance et sa collaboration perpétuelle, en nous aidons à compléter la formation académique par un travail d'expertise à l'échelle industrielle.

### **En Perspectives**

On espère que ce travail servira à l'ENIEM et les prochaines promotions d'étudiants de notre département Génie Mécanique pour réaliser d'autres moules pour d'autres pièces (afin d'éviter leurs achats en devises) pour une autonomie et économiser de la devise (en encourageant le tous National).

## Les unités

---

Pa (pascal) : unité SI (Système international d'unités) de contrainte et de pression.

MPa( mégapascal) :  $1 \text{ MPa} = 1\,000\,000 \text{ Pa} = 1\,000\,000 \text{ N}\cdot\text{m}^{-2} = 1 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$

GPa (gigapascal) :  $1 \text{ GPa} = 1\,000\,000\,000 \text{ Pa} = 1\,000\,000\,000 \text{ N}\cdot\text{m}^{-2} = 1 \text{ kN}\cdot\text{mm}^{-2}$

M (mètre) : unité SI de longueur.

mm (millimètre) :  $1 \text{ mm} = 1 \times 10^{-3} \text{ m} = 0,001 \text{ m}$ .

M<sup>2</sup> (mètre carré) : unité de mesure d'aire.

M<sup>3</sup> (mètre cube) : unité de mesure de volume.

°C (degré Celsius) : unité de l'échelle de température Celsius.

° (degré) : unité d'angle.

W (watt) : unité internationale de puissance ou de flux énergétique (dont le flux thermique).

$1 \text{ W} = 1 \text{ J/s}$

Kilowatt (kW), soit 1 000 watts.

J (joule): unité pour quantifier l'énergie.

Seconde(s) : unité de mesure du temps.

## Liste des abréviations

---

PS : un polymère thermoplastique obtenu par polymérisation du monomère styrène.

HIPS : (HI pour High-Impact) ou PS-HI selon la norme EN ISO 1043-1.

PSE : (EPS pour Expanded polystyrène) : Mousse expansée.

PSX : Mousse extrudée.

CFC : Cubique à Faces Centrées

Zamak : alliage de zinc, d'aluminium et de magnésium et de cuivre.

## Bibliographie

---

- [1] : Tokio Nakayama: Connaissances générales sur les matériaux, Toshiba corporation. N° du document 09-03-999-99-202. (Techniques professionnelles). Fournie par ENIEM.
- [2]:Document fourni par ENIEM.
- [3] :P. Weiss: La chimie des polymères, Société francophone de biomatériaux dentaires 2009-2010.
- [4]:Matière plastique: Edition Tec et doc Jean Bost (1 et 2).
- [5]:Injection plastique. Edition Lincher Jérôme.
- [6]:J.Lignon.R maillebuav : Étude de matériau II. Matériau non ferreux/2003.
- [7] : D. Gridaine : Mise en œuvre des polymères, 2010.
- [8]: manuelle de fonctionnement de la thermo formeuse. Fournie par ENIEM.
- [9] : Adolf Illig : Pratique du thermoformage, Hermès science publication. mai 1993. CM 36.
- [10]: Manuelle de maintenance. Fournie par ENIEM.
- [11] :F. Kreith : Transmission de la chaleur et thermodynamique, Masson et Co, 1967.
- [12] :H. Reitscel et W. Reiss : Traité de chauffage et de climatisation, Dunod. 1995.
- [13] : Michel Dupeux, Aide-mémoire de science des matériaux, 3<sup>ème</sup> Édition, Dunod, février 2013
- [14] : Michel Dupeux : Aide-mémoire de science des matériaux, Dunod, mai 2004.

## Les Mises en plan

---

Planche n° 01 : Dessin d'ensemble.

Planche n° 02 : Bloc 01.

Planche n° 03 : Bloc 02.

Planche n° 04 : Bloc 03.

Planche n° 05 : Bloc 04.

Planche n° 06 : Bloc 05.

Planche n° 07 : Pièce rapportée 01.

Planche n° 08 : Pièce rapportée 03.

Planche n° 09 : Pièce rapportée 04.

Planche n° 10 : Pièce rapportée 05.

Planche n° 11 : Pièce rapportée 06.

Planche n° 12 : Pièce rapportée 08.

Planche n° 13 : Pièce rapportée 07.

Planche n° 14 : Empreinte insert.

Planche n° 15 : Porte insert.

Planche n° 16 : Insert.

Planche n° 17 : Goupille 30 mm.

Planche n° 18 : Bras.

Planche n° 19 : Porte bras.

Planche n° 20 : Porte pièce rapportée latérale.

Planche n° 21 : Détail S.

Planche n° 22 : Pièce rapportée 02.

Planche n° 23 : Goupille 40 mm.

Planche n° 24 : Serpentin.

Planche n° 25 : Porte échangeur.

Planche n° 26 : Paroi.