

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

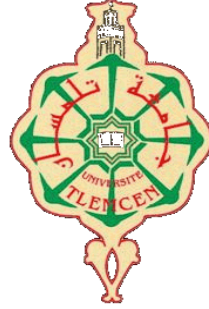
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



## **MEMOIRE**

Présenté pour l'obtention du **diplôme de MASTER**

**En** : Génie industriel

**Spécialité** : Ingénierie de système et Ingénierie de production

**Par** : M<sup>elle</sup>. ABDELGHANI Amel Amina et M<sup>elle</sup>. BENABBOU Wissem

### **Intitulé**

# **Conception et réalisation d'une machine automatisée de thermoformage**

Soutenu publiquement, le 20 / 06 /2023, devant le jury composé de :

M. KAHOUADJI Housseyn	MCB	Université de Tlemcen	Président
M. KADRAOUI Hichem	MCB	Université de Tlemcen	Examinateur
M. SARI Mohammed	EV	Université de Tlemcen	Examinateur
M.GUEZZEN Amine Hakim	MCB	Université de Tlemcen	Encadrant

Année universitaire : 2022 /2023

# *Remerciements*

Nous tenons à exprimer notre gratitude envers Allah, le Tout-Puissant, qui nous a donné la force et la patience nécessaires pour accomplir ce modeste travail.

Nous tenons à exprimer notre sincère gratitude à notre promoteur, Mr. GUEZZEN Amine Hakim, pour ses conseils précieux, sa disponibilité, sa patience et surtout pour toutes les connaissances qu'il nous a transmises tout au long de cette étude de projet.

Mes vifs remerciements vont également aux membres du jury Mr. KAHOUADJI H et Mr. KADRAOUI H et Mr. SARI M pour l'intérêt qu'ils ont porté à nos travail en acceptant de l'examiner.

Notre professeurs Mr. MIRI Sofiane El Hadi, pour ses précieux conseils, ses expertises et ses accompagnements tout au long de nos études. Vous avez été un mentor exceptionnel et nous avons beaucoup appris grâce à vous.

Enfin, nous tenons à exprimer notre gratitude envers toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail.

# *Dédicaces*

En témoignage d'amour et affection, je dédie ce travail avec une grande fierté

À mes très chers parents qui m'ont tout donné pour que je puisse avoir un Parcours honorable tout au long de ma vie, qui m'ont encouragé à aller de l'avant et qui m'ont donné tout leur amour pour prendre mes études. Auxquels je dois ce que je suis, je le dédie à ma chère maman **S. Haouaria**, qui m'a donné l'envie et la volonté de réussir,

Pour mon cher papa **Abdelkader** que dieu te bénisse et prolonge ta vie car tu es la lumière qui éclaircie mon chemin.

À ma chère petite sœur **Hadil**, mes chères frères **Nidal** et **Anis Housseem** pour leur dévouement, leur compréhension et leur grande tendresse, qui en plus de m'avoir encouragé tout le long de mes études, m'ont consacré beaucoup de temps et disponibilité, et qui par leur soutien, leurs conseils et leur amour, m'ont permis d'arriver jusqu'à ici car ils ont toujours cru en moi, merci d'avoir toujours soutenu et merci pour tous les bons moments passé ensemble, et ce n'est pas fini.

A ma grand-père maternels **Maammar** et ma grand-mère **Djemaa** vous nous avez donné tout l'amour qu'un petit enfant peut attendre de ses grands-parents. Vous avez toujours été là pour vos petits-enfants.

A mon oncle maternel **Zine El-Abidine** qui a partagé avec moi tous son connaissance lors de la réalisation de ce travail. Il m'a chaleureusement supporté et encouragé tout au long de mon parcours.

A ma famille et toutes les personnes que j'aime.

A tous mes amis pour leur sympathie, leurs bonnes humeurs et leur soutien.

Que Dieu vous protège.

*Wissem*

# *Dédicaces*

Je dédie ce modeste travail

A mon très cher père **MOHAMMED**, que dieu le garde. Je voudrais te remercier pour ton amour éternel, ta générosité, ta compréhension. Ton soutien fut une lumière dans tout mon parcours.

Je t'aime PAPA

A ma mère **A, FATIHA**, qui m'a encouragé, Ta prière m'ont été d'un grand secours pour mener à bien mes études. Ton amour, ta bienveillance et ta patience ont été mes plus grandes forces tout au long de ces années d'études.

Je t'aime MAMA

A mes chers frères **WASSIM** et **MOUAD** et ma chère sœur **ALIAA** que Dieu les protège et leurs offre la chance et le bonheur.

Je vous aime

Aux plus chères personnes, **ABDELGHANI ZOULIKHA, REGAGGDA MAGHNA**, Votre amour et votre soutien ont été inestimables, et je suis extrêmement reconnaissante de vous avoir comme tantes extraordinaires.

A **Wafaa**, chère sœur avant d'être amie.

A mes chers amis, pour leur amitié, leur soutien et leur présence dans les moments difficiles.

Et enfin, à tous ceux qui croient en moi et en mes capacités, Je suis fier de ce que j'ai accompli.

*Amina*

## Résumé

La conception et la réalisation de la machine automatisée de thermoformage "MiniForm" c'est un processus complexe qui a impliqué plusieurs étapes clés, il était important de déterminer les spécifications de la machine, y compris sa capacité de production, sa taille et ses caractéristiques de fonctionnement. C'était également essentiel de déterminer les matériaux et les technologies nécessaires pour la construire, ainsi que les logiciels et les composants électroniques nécessaires pour automatiser le fonctionnement de notre réalisation. Durant ce travail, nous avons utilisé le logiciel SolidWorks pour la conception de l'ensemble de composants de notre machine. Cela nous a permis de la visualiser en 3D avant sa fabrication. La fabrication a été effectuée en utilisant une combinaison de différentes techniques.

### Mot clés :

Machine automatisée, thermoformage, conception, réalisation, SolidWorks, modélisation, simulation, fabrication.

### Abstract

The design and development of the automated thermoforming machine "MiniForm" was a complex process that involved several key steps. It was important to determine the machine's specifications, including its production capacity, size, and operating characteristics. It was also essential to identify the necessary materials and technologies to build it, as well as the software and electronic components needed to automate its operation. Throughout this work, we utilized SolidWorks software to design the entire set of components for our machine, allowing us to visualize it in 3D prior to manufacturing. The manufacturing process involved a combination of various techniques.

### Key words:

Automated machine, thermoforming, design, production, SolidWorks, modeling, simulation, manufacturing.

### ملخص

كان تصميم وإنجاز آلة التشكيل الحراري الأوتوماتيكية "مينيفورم" عملية معقدة تضمنت عدة خطوات رئيسية. كان من المهم تحديد مواصفات الآلة، بما في ذلك قدرتها الإنتاجية وحجمها وميزات تشغيلها. كما كان من الضروري تحديد المواد والتقنيات اللازمة لبنائها، بالإضافة إلى البرمجيات والمكونات الإلكترونية اللازمة لتحقيق تشغيلها تلقائياً. خلال هذه العملية، استخدمنا برنامج SolidWorks لتصميم جميع مكونات الآلة. هذا سمح لنا بتصورها بتقنية ثلاثية الأبعاد قبل التصنيع. تمت عملية التصنيع باستخدام مزيج من تقنيات مختلفة.

### الكلمات المفتاحية:

الآلة الأوتوماتيكية، التشكيل الحراري، التصميم، الإنتاج، SolidWorks، النمذجة، المحاكاة، التصنيع.

# Liste figures

## Chapitre I :

Figure I.1 : Classification des systèmes de production.....	19
Figure I.2 : Système de production.....	20
Figure I.3 : Structure de base d'une machine d'injection plastique.....	21
Figure I.4 : Buse d'injection du matériau fondu.....	22
Figure I.5 : Extrusion.....	24
Figure I.6: Schéma d'extrusion soufflage.....	25
Figure I.7 : Schéma d'extrusion gonflage.....	26
Figure I.8: Schéma explicatif du thermoformage.....	27
Figure I.9: Principe de rotomoulage.....	28

## Chapitre II :

Figure II.1 : Principe du thermoformage.....	34
Figure II.2: Procédé Twin sheet.....	35
Figure II.3: Moule Positif.....	36
Figure II.4 : Moule Négatif.....	37

## Chapitre III :

Figure III.1 : Quelques possibilités disponibles aux concepteurs via l'outil de CAO SolidWorks.....	44
Figure III.2- Vue d'ensemble en 3D de la machine du thermoformage sous-SolidWorks.....	48
Figure III.3- Position cadre dans le mécanisme en 3D.....	49
Figure III.4- Capture d'écran du cadre sous-SolidWorks.....	49
Figure III.5- Position du système de chauffage dans le mécanisme en 3D.....	50
Figure III.6 Capture d'écran du système de chauffage sous-SolidWorks.....	50
Figure III.7- Position du système de formage dans le mécanisme en 3D.....	51
Figure III.8- Capture d'écran du système de formage sous-SolidWorks.....	51
Figure III.9 - Position du système de contrôle sous-SolidWorks.....	52
Figure III.10 - Capture d'écran du système de contrôle sous-SolidWorks.....	52
Figure III.11 - Position du système de mouvement sous-SolidWorks.....	53
Figure III.12- Capture d'écran du système de mouvement sous-SolidWorks.....	53
Figure III.13- Position du système d'aspiration sous-SolidWorks.....	54
Figure III.14- Capture d'écran du système de mouvement sous-SolidWorks.....	54

## Chapitre IV :

Figure IV.1 : schéma représentant support.....	59
Figure IV.2: Schéma représentant plateau de formage.....	59
Figure IV.3: Schéma représentant moule de formage.....	60
Figure IV.4 :Schéma représentant système de chauffage.....	61
Figure IV.5 : Schéma représentant système de vide.....	61
Figure IV.6: Partie contrôle de la machine « MiniForm ».....	62
Figure IV.7 :Carte Arduino.....	63
Figure IV.8: Logiciel Arduino.....	63
Figure IV.9 : Moteur pas à pas.....	64
Figure IV.10 :Afficheur LCD.....	65
Figure IV.11 : Capteur de température LM35.....	65
Figure IV.12 :Croquis machine de thermoformage.....	66
Figure IV.13 :Croquis machine de thermoformage.....	66

Figure IV.14 : Conception sous SolidWorks de plateau de formage automatisée (le cadre).....	67
Figure IV.15 : Conception sous SolidWorks de plateau de formage automatisée (la porte).....	67
Figure IV.16 : Conception sous SolidWorks de l'assemblage du plateau de formage automatisée.....	68
Figure IV.17 : impression 3D de plateau de formage automatisée.....	68
Figure IV .18 : Composants utilisée pour la construction machine.....	69
Figure IV .19 : Assemblage des pièces.....	70
Figure IV .20 : Intégration des systèmes de chauffage et de refroidissement.....	70
Figure IV .21 : Systèmes de mouvement automatisés.....	71
Figure IV .22 : Installation du capteur.....	71
Figure IV.23 :Schéma électrique sur flitzing.....	73
Figure IV.24 : Exemple de teste de positionnement des feuilles de plastique.....	74
Figure IV.25 : Mise en service et ajustement final.....	75

# Liste d'abréviation

JAT :	Just à temps
LCD :	Liquid Crystal Display "Affichage à cristaux liquides"
ABS :	Acrylonitrile Butadiène Styène
TG :	Transition vitreuse
PMMA :	Poly méthacrylate de Méthyle
PP :	Polypropylène
PS :	Polystyrène choc
PVC :	Polychlorure de vinyle
CAO :	Conception Assistée par Ordinateur
FAO :	Fabrication Assistée par Ordinateur
3D :	Trois dimensions
PCB :	Printed Circuit Board "Carte de Circuit Imprimé" (CCI).
LED :	Light-Emitting Diode "Diode Électroluminescente"
IDE :	Integrated Development Environment "Environnement de développement intégré".



# Table de matière

Introduction générale.....	12
<b>Chapitre I : Généralités sur les systèmes de production .....</b>	<b>14</b>
Introduction .....	15
1 Généralité sur les systèmes de production .....	15
1.1 Production.....	15
1.1.1 Production marchande.....	15
1.1.2 Production non marchande.....	16
1.2 Système.....	16
1.3 Processus de production .....	16
1.4 Système de production.....	16
1.5 Historique du système de production .....	17
1.6 Classification des systèmes de production .....	17
1.6.1 Selon le type de produit et le processus de production .....	17
1.6.2 Selon le volume et la variété des produits fabriqués .....	18
1.7 Schématisation de système de production .....	19
2 Procédés de fabrication .....	20
2.1 Plasturgie .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
2.2 Types de procédés de fabrication .....	20
2.2.1 Injection.....	21
2.2.2 Injection-soufflage .....	22
2.2.3 Extrusion .....	23
2.2.4 Extrusion soufflage .....	24
2.2.5 Extrusion gonflage .....	25
2.2.6 Thermoformage.....	26
2.2.7 Rotomoulage .....	27
Conclusion.....	28
<b>Chapitre II : Thermoformage : principes, processus et application .....</b>	<b>30</b>
Introduction .....	31
1 Présentation .....	31
2 Secteurs et les applications.....	31
3 Principe.....	32

4	Types de thermoformage.....	34
5	Méthodes de conception pour le thermoformage.....	34
6	Moule pour le thermoformage.....	35
6.1	Moule Positif.....	35
6.2	Moule Négatif.....	36
7	Avantages et les limites du thermoformage.....	37
	Conclusion.....	38
	<b>Chapitre III :Conception et dimensionnement d'une machine de thermoformage .....</b>	<b>40</b>
	Introduction.....	41
1	Conception Assistée par Ordinateur (CAO).....	41
1.1	Définition de la CAO.....	41
1.2	Choix de l'outil informatique de CAO.....	41
1.3	Présentation de l'outil CAO utilisé dans le mémoire.....	42
1.4	Présentation SolidWorks.....	42
2	Analyse des besoins et spécifications fonctionnelles de la machine de thermoformage.....	44
3	Présentation du system (thermoformeuse).....	46
3.1	Conception des composants de la thermoformeuse.....	47
	Conclusion.....	54
	<b>Chapitre IV : Réalisation et Evaluation des performances de la machine de thermoformage .....</b>	<b>56</b>
	Introduction.....	57
1	Automatisation de la machine de thermoformage.....	57
2	Le choix des composants pour la réalisation d'une machine de thermoformage.....	57
2.1	Support.....	58
2.2	Plateau de formage.....	58
2.3	Moule de formage.....	58
2.4	Système de chauffage.....	59
2.5	Système de vide.....	60
2.6	Contrôles et automatisation.....	60
3	Présentation des composants clés dans la fabrication de la machine "MiniForm".....	61
3.1	Carte Arduino.....	61
3.2	Logiciel Arduino.....	62
3.3	Un moteur pas à pas.....	63
3.4	Un afficheur LCD.....	63

3.5	Un capteur de température.....	64
4	Construction de la machine automatisée : Processus et défis .....	65
5	Assemblage et intégration des composants de la machine automatisée.....	71
6	Programmation et configuration de la machine automatisée .....	72
7	Tests et optimisation de la machine automatisée .....	72
8	Défis coudefisrants lors de la construction de la machine de thermoformage automatisé 75	
9	Analyse des résultats de la réalisation de la machine automatisé .....	75
10	Considérations techniques lors de la -réalisation de la machine automatisée.....	76
	Conclusion.....	77
	Conclusion générale .....	78
	Références .....	79
	Annexe .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>

# Introduction générale

La conception et la réalisation d'une machine automatisée de thermoformage constitue un domaine d'étude passionnant et essentiel dans l'industrie de la transformation des plastiques.

Le thermoformage est une méthode de fabrication polyvalente largement utilisée pour produire des pièces en plastique dans différents secteurs tels que l'emballage, l'automobile, l'électronique et bien d'autres. L'automatisation de ce processus présente de nombreux avantages, tels que l'amélioration de l'efficacité, la réduction des coûts de production et la garantie d'une qualité constante des pièces formées.

Ce mémoire de fin d'étude se concentre sur la conception et la réalisation d'une machine automatisée de thermoformage, qui vise à relever les défis techniques et technologiques liés à ce processus. L'objectif principal de ce projet est de développer un prototype efficace, précis et fiable, capable de produire des pièces en plastique de haute qualité de manière automatisée.

Le processus de conception et de réalisation d'une telle machine comprend plusieurs étapes clés, telles que l'analyse des besoins, la conception initiale, la sélection des composants, l'assemblage mécanique, l'intégration des systèmes de chauffage et de refroidissement, les systèmes de mouvement automatisés, la programmation et la configuration, les tests et l'optimisation, ainsi que l'analyse des résultats.

Au cours de cette étude, nous aborderons également les défis courants auxquels sont confrontés les concepteurs et les fabricants de machines de thermoformage, tels que la sécurité, les coûts, la complexité du processus et les exigences spécifiques des applications. Nous explorerons les différentes solutions et approches utilisées pour surmonter ces défis, en mettant l'accent sur l'innovation, la fiabilité et l'efficacité énergétique.

Ce mémoire comporte quatre chapitres :

Le premier chapitre est consacré à la présentation des notions sur les systèmes de production. Un aperçu général sur les systèmes de production, citant l'historique, classification, et les différentes procédés de fabrication.

Ensuite un deuxième chapitre présentant en profondeur la technique de thermoformage.

Quant au troisième chapitre, il relate de manière détaillée les étapes de la conception de la machine sous logiciels SolidWorks cités ci-dessous.

Le quatrième chapitre de ce mémoire aborde en détail la mise en œuvre concrète de la machine de thermoformage et ses différentes étapes de réalisation, depuis la conception jusqu'à la construction effective de la machine.

En conclusion, cette mémoire de fin d'étude vise à fournir une compréhension approfondie de la conception et de la réalisation d'une machine automatisée de thermoformage, ainsi que des principaux défis et solutions associés à ce processus. Nous espérons que cette étude contribuera à l'avancement de l'industrie du thermoformage et fournira des informations précieuses pour les professionnels et les chercheurs intéressés par ce domaine.



# **Chapitre I :**

## **Généralités sur les systèmes de production de plastique**

## Introduction

Durant les années 60, les systèmes de production ont subi des changements notables qui ont modifié leurs fonctionnements. Cette évolution particulièrement importante des systèmes de production et ces techniques sont caractérisées par l'avènement de l'automatisation.

Un système de production fait référence au processus de conversion des matières premières, du travail et du capital en biens et services finis. Cela englobe toutes les étapes et les ressources nécessaires pour produire un bien, de la planification et de la conception à la fabrication, l'assemblage, les tests, l'emballage et la distribution.

Le but ultime d'un système de production est de répondre à la demande d'un produit de manière efficace et efficiente, tout en maximisant les profits et en minimisant les déchets. Il existe plusieurs types de systèmes de production, y compris la production de masse, la production par lots et la production juste à temps (JIT), chacun avec ses propres avantages et inconvénients.

Ce chapitre se divise en deux parties : nous présenterons, dans la première partie, quelques notions de base concernant les systèmes de production, et nous nous intéresserons dans la deuxième partie aux procédés de fabrication plasturgie

## 1 Généralité sur les systèmes de production

### 1.1 Production

La production peut être définie comme les opérations qui transforment des matières premières ou des composants en produits ayant une valeur marchande.

Il existe deux modes de fabrication :

- Production marchande
- Production non marchande

#### 1.1.1 Production marchande

Fait référence à la production de biens et de services qui peuvent être vendus sur le marché à un certain prix, et elle comprend les produits suivants :

- Vendu à un prix économiquement significatif (supérieur à 50% du coût de production)
- Échangé ;
- Pour les paiements en nature, y compris la rémunération des employés ;
- Livrés par une unité locale d'activité de type à une autre unité locale d'activité de type appartenant à la même unité institutionnelle et destinés à la consommation intermédiaire de cette dernière ;
- Ajouté aux stocks de produits finis et de travaux en cours pour une ou plusieurs utilisations antérieures.

Production marchande Peut être divisée en deux catégories :

- Production marchande simple, où les producteurs vendent leurs produits sur le marché ou vendent des services marchands séparément ;
- La production marchande capitaliste lorsque le produit ou le service est la propriété du détenteur des moyens de production, le capitaliste. La production est ensuite vendue comme marchandise afin de réaliser un bénéfice.

### 1.1.2 Production non marchande

Correspond à la fourniture de biens ou de services à titre gratuit ou à un prix n'excédant pas la moitié du coût de production.

Exemples : administrations publiques, associations à but non lucratif et à caractère social, syndicats, partis politiques, fondations humanitaires... (1)

Les activités de production prennent différentes formes et la production peut :

- Etre continue ou discontinue ;
- Etre unitaire, par lot ou de masse ;
- Concerner des fabrications à la commande, pour stockage ou mixte. (2)

### 1.2 Système

Ensemble d'éléments (méthodes, ressources humaines et matérielles, procédures et outils) qui interagissent pour former un tout. Les systèmes peuvent être décrits par leur comportement dans leur environnement, dans l'espace et dans le temps, par le nombre, la nature et les relations de leurs éléments.

Le système est déterminé par les facteurs suivants :

- Ses frontières, c'est-à-dire les critères d'appartenance au système (déterminent si une entité appartient au système ou, au contraire, fait partie de son environnement) ;
- Ses interactions avec son environnement ;
- Sa fonction (définir le comportement des entités qui font partie du système, leur organisation et leurs interactions) ;

Certains systèmes peuvent également avoir une mission (son but et sa raison d'être) ou des ressources, qui peuvent être de nature différente (humaines, naturelles, matérielles, immatérielles, etc.) ;

Un sous-système (module ou composant) est un système qui appartient à un système de niveau supérieur. (3)

### 1.3 Processus de production

Un processus de production est l'ensemble des tâches et des procédures requises par une entreprise pour produire des biens et des services.

Il peut également être compris comme une série d'opérations et de processus nécessaires qui sont planifiés et exécutés en continu pour parvenir au raffinement du produit.

Le processus de production est réalisé par des entreprises qui utilisent les informations et la technologie que les gens utilisent pour fabriquer des produits.

De plus, les entreprises font évoluer leurs processus de production pour répondre aux demandes du marché, qui exigent des produits satisfaisants pour satisfaire les consommateurs. (4)

### 1.4 Système de production

Un système de production peut être défini comme un ensemble de personnes, de machines, d'équipements et d'organisations liés par des documents et des flux d'informations communs dans le but de transformer des matières premières en produits finis. Dans l'analyse du système de production, quatre principaux paramètres de production ont été identifiés : le coût, le temps, la qualité et la flexibilité.



Les systèmes de production sont conçus pour apporter une valeur ajoutée au travail. Les produits qu'elle développe peuvent être : des produits finis destinés à la vente directe, ou des produits intermédiaires entrant dans la fabrication des produits finis. Mais il a tendance à consommer beaucoup d'énergie et de produit, et génère souvent des déchets.

Les systèmes de production peuvent être classés selon la nature et la quantité des produits fabriqués. (5)

### **1.5 Historique du système de production**

Les systèmes de production ont subi des changements majeurs au cours des siècles. Les premiers systèmes de production étaient manuels et artisanaux. Au fil du temps, de nouvelles technologies ont été développées pour améliorer la quantité, la qualité et le coût de production. Voici quelques jalons importants dans l'histoire du système de production :

- Révolution industrielle (1760-1840) : C'est durant cette période que la production industrielle en Europe et en Amérique du Nord a commencé à décoller grâce à l'utilisation de nouvelles machines et à l'amélioration de la production de masse.
- Production de masse (1880-1920) : les designers américains ont commencé à utiliser les principes de la production de masse pour produire de grandes quantités de produits à un coût abordable. Cette approche permet de produire des produits de manière plus efficace et moins chère.
- Juste à temps (1930-1960) : Cette méthode, d'abord pratiquée par Henry Ford, consistait à fabriquer des produits juste à temps pour répondre à la demande des clients. Cela réduit les coûts de stockage et augmente l'efficacité de la production.
- Production à la chaîne (1960-2000) : Cette méthode de production implique l'utilisation de robots pour automatiser certaines tâches, ce qui se traduit par une production plus rapide et plus précise

### **1.6 Classification des systèmes de production**

Le classement des systèmes de production tient compte à la fois du type de produit, du processus de production, ainsi que de la quantité et de la variété des produits fabriqués. Un système de production est une partie intégrante du processus de fabrication qui englobe toutes les fonctions nécessaires à la conception, la production, la distribution et la livraison des produits finis. Il se compose de trois éléments principaux : les entrées, le processus de conversion et les résultats. Les entrées comprennent les matières premières, les machines, la main-d'œuvre, et autres. Les processus de conversion englobent les méthodes de production, qu'elles soient manuelles, mécaniques ou chimiques. Les résultats correspondent aux produits finaux, qu'il s'agisse de pièces ou de services achevés. Fondamentalement, un système de production est le résultat de la combinaison des entrées avec des processus de conversion visant à obtenir des résultats logiques et fonctionnels. Ces systèmes échouent si les arrangements en place ne permettent pas d'atteindre le niveau de résultats souhaité.

#### **1.6.1 Selon le type de produit et le processus de production**

##### **a. Fabrication par processus**

Cette situation se produit lorsque les matières premières qui constituent le produit final ne peuvent pas être dissociées. Ces produits sont créés en suivant des formules et des recettes. Les processus de fabrication utilisés peuvent être continus ou se dérouler sur une période de temps spécifique. Des exemples de ces processus incluent la production de produits chimiques organiques et inorganiques tels que les peintures et les acides, la transformation d'aliments

comme les jus, la fabrication de ciment, de produits pharmaceutiques, de polymères, et bien d'autres.

### **b. Fabrication discrète**

Il s'agit de la production d'unités de produits uniques et distincts, reconnaissables. Le produit final peut être fabriqué à partir d'une seule pièce ou de plusieurs pièces assemblées. Les processus utilisés ne sont pas continus, et chaque processus peut être démarré ou arrêté individuellement, ce qui permet d'avoir des fréquences de production différentes. Ces procédures permettent de suspendre temporairement une zone sans affecter l'ensemble de l'unité de production. Des exemples de ce type de fabrication incluent l'industrie automobile, les équipements électriques et l'électronique grand public.

### **c. Fabrication par projets**

Le système est spécifiquement conçu pour la fabrication de produits extrêmement complexes, volumineux, coûteux et hautement personnalisés, qui nécessitent une durée de production considérable. Par conséquent, la fabrication de ces produits doit être gérée comme un projet à part entière. Dans de nombreux cas, les produits sont fabriqués et installés directement sur leur site final en raison des contraintes de transport. Des exemples de ce type de fabrication incluent la construction de bâtiments, la production de centrales électriques, d'usines chimiques, de bateaux, et bien d'autres.

## **1.6.2 Selon le volume et la variété des produits fabriqués**

### **a. Production de masse**

Cette méthode est employée pour la production en grandes quantités de produits standardisés. Elle se caractérise par un volume élevé et une variété limitée. Les machines utilisées sont alignées en ligne droite, le produit ou le processus est standardisé, et tous les produits finis sont fabriqués de la même manière.

Elle convient à différents types de produits, tels que des fluides en vrac et des granulés (aliments, carburants, produits chimiques), ainsi que des composants solides discrets (équipements et outils industriels, appareils). Cette méthode de production peut être subdivisée en trois types : fabrication continue, processus de fabrication et fabrication répétitive.

La fabrication continue est utilisée pour produire, fabriquer ou traiter des matériaux sans interruption. Les matières premières passent par une série de processus continus jusqu'à ce que le produit final soit obtenu. Le résultat n'est pas une seule unité de produit final, mais une masse de poudre, de liquide ou de gaz. Une large variété de produits est fabriquée en utilisant cette méthode, qui fonctionne généralement 24 heures sur 24, sept jours sur sept, avec une maintenance annuelle ou semestrielle, comme dans les raffineries ou les usines chimiques. Le papier, le ciment, les engrais, les fibres synthétiques et le traitement du gaz naturel font partie de cette catégorie.

Dans le cas du flux de fabrication, le produit est construit en utilisant plusieurs processus distincts intégrés dans une séquence spécifique et équilibrée, de sorte que toutes les étapes soient terminées. Son objectif principal est de réduire la perte de temps entre les étapes d'un processus, ce qui se produit lors de la production par lots. Par conséquent, la taille du lot dans cette catégorie est une unité. Pour gérer la diversité des produits, des éléments similaires sont regroupés en familles de produits, puis une chaîne de production distincte est assemblée pour chaque famille. Par exemple, dans l'industrie automobile, la chaîne de montage divise la ligne de production en sous-ensembles et composants.

D'autre part, les processus de fabrication répétitifs sont utilisés pour les produits dont les procédés impliquent une seule opération réalisée rapidement dans une séquence d'opérations sans délai entre elles. Les bouchons en aluminium, les petites feuilles pour les briquets électriques et le moulage par soufflage des bouteilles en plastique font partie de cette catégorie.

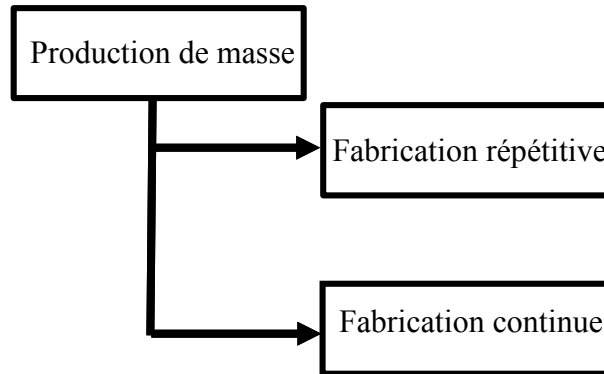


Figure I.1 Classification des systèmes de production

### **b. Production en série**

Dans ce type de production, les produits sont regroupés ou fabriqués par lots et ne sont pas produits de manière continue. Les produits passent d'une étape à l'autre en groupes distincts.

Cette méthode est utilisée lorsque le volume de la demande sur le marché n'est pas suffisant pour justifier une production continue. Elle se caractérise par un volume et une variété modérés.

Étant donné qu'il n'est pas nécessaire de produire en grande quantité, des machines polyvalentes sont utilisées, capables de traiter une grande variété de produits similaires.

Des exemples de cette méthode de production comprennent la fabrication de pain et de biscuits, la production de repas et la production de vêtements en série.

### **c. Fabrication sur mesure**

Cette méthode implique la production de produits en petites quantités selon des exigences non standard et des commandes spécifiques des clients. Elle trouve ses origines dans la production artisanale, où les produits fabriqués pour un client peuvent ne pas être commandés à nouveau.

La fabrication sur mesure repose sur l'utilisation de machines polyvalentes réparties dans différents départements. Chaque commande a ses propres exigences techniques qui sont traitées par un processus spécifique sur la machine. Le travail est réalisé comme un projet plutôt que comme un produit standard, avec des matériaux et des comptes adaptés.

La fabrication de rampes pour une maison particulière, la création de compositions florales pour un mariage, la conception d'une campagne publicitaire ou la construction d'une nouvelle usine entrent tous dans cette catégorie. Par conséquent, le volume est réduit et la variété est assez importante. (6)

## **1.7 Schématisation de système de production**

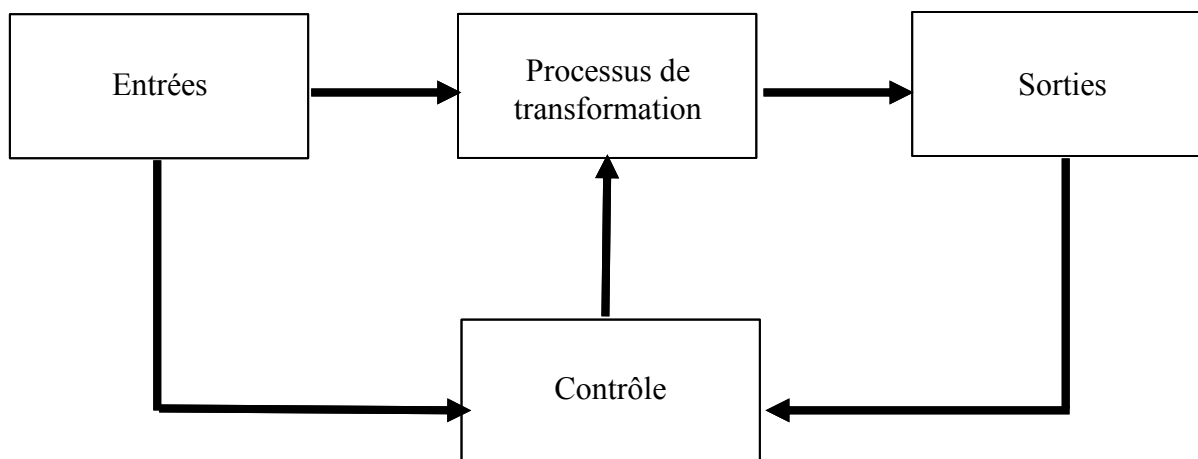


Figure I.2 : Le système de production

Les éléments sont assemblés à l'entrée du système selon un plan de production très précis ou figé.

Sur la base d'une demande donnée, le travail est planifié et dirigé pour fournir le produit ou le service requis. Les managers sont responsables de la planification, de l'organisation et de la gestion des activités de transformation. Ces responsabilités interférentes sont la gestion des ressources humaines, la technique, la finance, les fonctions juridiques, de marché et commerciales, et la comptabilité.

La capacité d'un système à atteindre ses objectifs dépend de la façon dont le système est conçu et géré. La conception d'un système consiste à prédéterminer la combinaison de ses composants. (5)

## 2 Procédés de fabrication plasturgie

### 2.1 Définition

Les plastiques sont largement utilisés comme matériaux de choix pour la fabrication d'une grande variété de pièces et de produits finis, allant des biens de consommation simples aux dispositifs médicaux. Les plastiques constituent une classe de matériaux extrêmement polyvalente, offrant des milliers de combinaisons de polymères possibles, chacune présentant des propriétés mécaniques spécifiques.

Les processus de fabrication utilisant des plastiques ont été développés pour couvrir un large éventail d'applications et de formes de pièces. Les concepteurs et les ingénieurs impliqués dans le développement de produits doivent non seulement maîtriser les capacités de fabrication existantes, mais aussi être conscients des nouvelles avancées en matière de fabrication qui ouvrent de nouvelles perspectives pour les processus futurs. (7)

### 2.2 Types de procédés de fabrication

Dans cette partie seront exposés les procédés les plus courants de fabrication de pièces en plastique, de leur production en petites séries à la production de masse.

Les techniques de transformation du plastique varient en fonction de la nature du polymère et de la destination du produit final. Plusieurs procédés sont régulièrement utilisés pour créer des pièces et des objets en polymère.

Les principaux procédés de production industrielle sont :

- Injection
  - Injection soufflage

- Extrusion,
  - Extrusion soufflage
  - Extrusion gonflage
- Thermoformage
- Rotomoulage

### 2.2.1 Injection

#### a. Présentation et caractéristiques

Le moulage par injection plastique est une méthode de fabrication qui utilise des moules. Des matériaux tels que la résine synthétique (plastique) sont chauffés et fondus, puis injectés dans un moule où ils sont refroidis et façonnés selon la forme désirée. Ce procédé tire son nom de sa similitude avec l'injection de liquides à l'aide d'une seringue. Le processus d'injection plastique se déroule comme suit : le matériau est fondu, versé dans le moule, refroidi, puis le produit final est retiré et fini.

La technique d'injection plastique permet de produire en continu et rapidement de grands volumes de pièces aux formes variées, y compris des profils complexes. C'est pourquoi ce procédé est largement utilisé dans de nombreuses industries pour la fabrication de produits et de marchandises.

Des pièces automobiles, des emballages, des couvercles, des jouets, des dispositifs médicaux, des outils, etc., peuvent être fabriqués à l'aide de ce procédé. Ces objets sont généralement prêts à être utilisés et présentent souvent un petit point d'entrée par lequel le matériau a été injecté.

#### b. Machines d'injection plastique

Il existe une variété de machines d'injection plastique disponibles, notamment des machines motorisées actionnées par servomoteurs, des machines hydrauliques actionnées par moteurs hydrauliques et des machines hybrides qui combinent des servomoteurs et des moteurs hydrauliques. Une machine d'injection plastique est principalement composée d'un dispositif d'injection qui introduit le matériau fondu dans le moule, ainsi que d'un dispositif de serrage qui maintient le moule en place.

Ces dernières années, les machines d'injection plastique ont été équipées de commandes numériques par ordinateur, ce qui a donné lieu à des modèles extrêmement populaires qui permettent une injection à haute vitesse programmée. Par ailleurs, certains processus, tels que la production de plaques de guidage de lumière pour les écrans LCD, nécessite l'utilisation de machines hautement spécialisées.

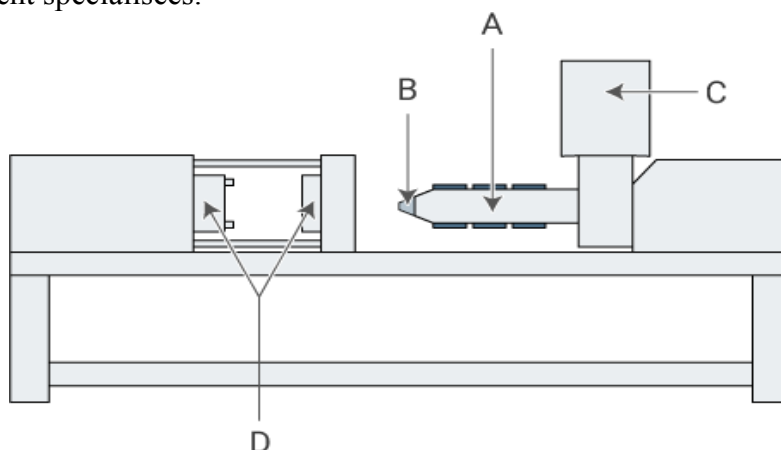


Figure I.3 : Structure de base d'une machine d'injection plastique (8)

- A : Cylindre (chauffe le matériau)
- B : Buse (injecte le matériau fondu)
- C : Trémie (alimente en matériau)
- D : Moule (le matériau est versé dans la cavité du moule entre deux plaques)

### c. Procédé d'injection plastique

Les granulés de résine (pellets) sont introduits dans la trémie, qui sert d'entrée pour les matières premières. Ces granulés sont ensuite chauffés et fondus à l'intérieur du cylindre en vue de l'injection. Le matériau fondu est injecté à travers la buse de l'unité d'injection, passe par un passage appelé carotte, puis est introduit dans le moule via un canal de coulée. Une fois dans le moule, le matériau est refroidi et durci, le moule est ouvert et la pièce est éjectée. Les sections de la carotte et du canal de coulée sont ensuite éliminées pour finaliser le processus de moulage.

La technique d'injection plastique est particulièrement adaptée à la production en série. Cependant, pour fabriquer des produits de haute précision, il est essentiel de prendre en compte des facteurs tels que la sélection des matériaux, la conception du moule, la température et la vitesse d'injection. Ces conditions jouent un rôle crucial dans la réalisation de pièces plastiques précises et de qualité. (8)

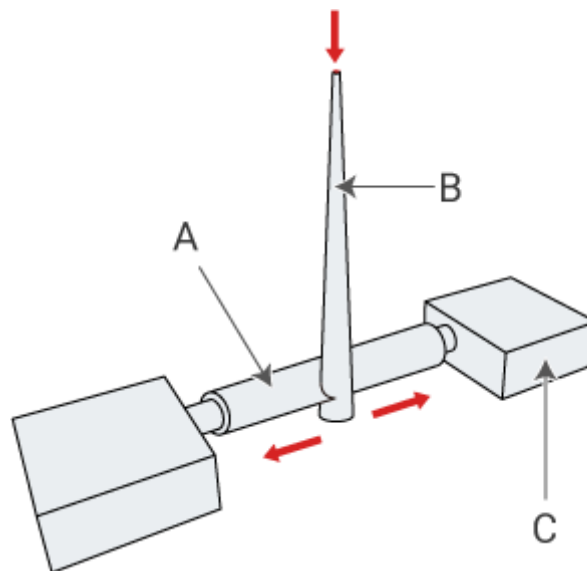


Figure I.4 : Buse d'injection du matériau fondu (8)

Après moulage, les sections des canaux sont coupées pour achever le procédé.

- A : Canal
- B : Carotte
- C : Moule

### 2.2.2 Injection-soufflage

Ce procédé est largement utilisé dans la fabrication de bouteilles et de flacons. Il implique l'utilisation de produits semi-finis obtenus par moulage par injection. Dans le cas des bouteilles d'eau minérale, par exemple, le plastique est préformé avec le goulot déjà formé. Le corps de la paraison est chauffé, puis des tiges étirent la paraison vers le fond du moule. Ensuite, un jet d'air puissant pousse le matériau contre les parois du moule. La préforme prend alors la forme souhaitée, après quoi le moule est refroidi et ouvert pour permettre l'extraction de la bouteille.

Ce processus de soufflage permet de produire une variété de pièces en plastique telles que des bouteilles, des bidons, des fûts, des réservoirs d'huile, des conteneurs, des bonbonnes, des pots, et bien d'autres. Le point clé de ce procédé réside dans l'injection du matériau au fond du récipient, ce qui permet d'obtenir la forme et les dimensions souhaitées.

#### **a. Description du procédé d'injection-soufflage**

Le procédé d'injection-soufflage est essentiellement dédié à la fabrication de bouteilles en polyester. Les étapes du procédé illustrées dans le schéma ci-dessous :

- Chauffage de ces préformes solides dans un four infrarouge.
- Installation de la préforme dans le moule.
- Étirage longitudinal à l'aide d'une canne
- Refroidissement puis éjection de la bouteille formée.

#### **b. Avantages de l'injection soufflage**

- Bonnes propriétés chimiques et mécaniques
- Excellente précision dimensionnelle du goulot injecté
- Pas de traces de découpes
- Plan de joint peu apparent
- Moulage multi-empreintes (jusqu'à 8 empreintes) (10)

### **2.2.3 Extrusion**

L'extrusion est un processus de fabrication continu qui fonctionne de manière similaire à l'injection. Les granulés de matière première sont introduits dans un tube chauffé équipé d'une vis sans fin. Le matériau souple est homogénéisé et poussé à travers une matrice pour prendre la forme désirée. On peut le comparer à une "machine à spaghettis" qui permet de produire des produits semi-finis de différentes formes.

Ce procédé de transformation est utilisé pour fabriquer des produits de grande longueur tels que des profilés pour les portes et les fenêtres, des canalisations, des câbles, des fibres optiques, des tubes, des grillages, des plaques et des feuilles en plastique. Le tube ou le profilé est extrudé en continu, puis refroidi et coupé à la longueur désirée. En superposant plusieurs couches de matière, il est possible de créer des produits dotés de propriétés combinées.

Un aspect clé de ce processus est la création d'un profilé continu, où différentes parties présentent la même forme.

#### **a. Démarche de procédé d'extrusion**

L'équipement de base utilisé dans ce processus est appelé extrudeuse, qui permet de transformer la matière plastique pour lui donner la forme souhaitée. La production se déroule en suivant plusieurs étapes :

- Les granulés ou la poudre de matière plastique sont placés dans une trémie, d'où ils descendent par gravité dans un fourreau.
- La matière plastique est plastifiée grâce à la rotation simultanée d'une vis sans fin et de colliers chauffants. Ce processus chauffe et mélange la matière plastique jusqu'à obtenir une consistance homogène et malléable.
- La rotation de la vis sans fin pousse la matière plastique à travers la tête d'extrusion de la machine. C'est à ce moment que l'outil d'extrusion spécifique entre en jeu pour donner à la matière sa forme finale.

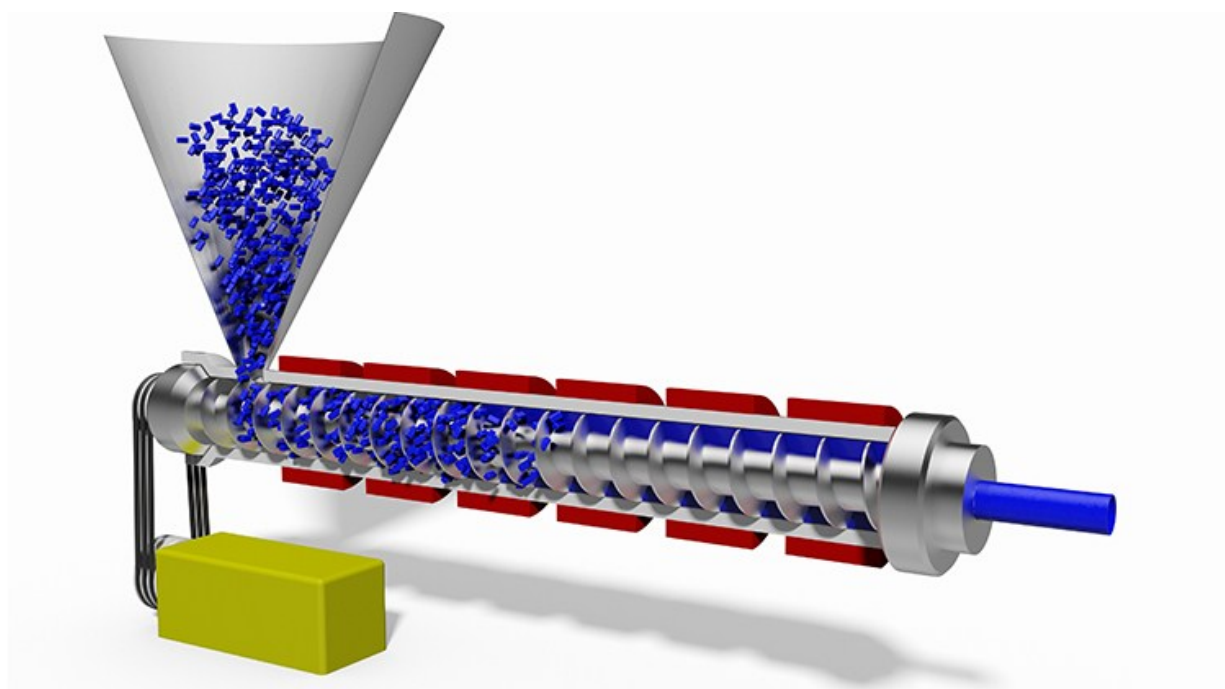


Figure I.5: Extrusion (11)

#### 2.2.4 Extrusion soufflage

Le processus d'extrusion soufflage est utilisé pour fabriquer des objets creux. Il commence par l'extrusion d'un tube solide appelé paraison. Ce tube en plastique chaud est ensuite découpé, puis un moule froid composé de deux parties est fermé autour de celui-ci. De l'air est ensuite injecté dans le matériau à travers une tige de soufflage, ce qui permet au polymère de se plaquer contre les parois intérieures du moule qui se refroidit rapidement. Le processus se termine par le démoulage, la suppression de l'excès de matière et l'élimination des déchets de moulage. En utilisant cette technique, il est possible de fabriquer des pièces telles que des bouteilles, des flacons, des réservoirs et divers récipients. La ligne de soudure se trouve généralement au fond de la pièce.

##### a. Avantages

L'extrusion soufflage permet d'avoir :

- Multiples options d'apparence et de rendu : brillant, mat, doux, transparent, opaque...
- La flexibilité des bouteilles varie pour faciliter la restauration de la formule.
- Les multicouches offrent la possibilité de combiner différentes propriétés de matériaux avec des propriétés barrières, sensorielles et esthétiques.
- Une très grande variété de formes spécifiques peut être fabriquée.

Le processus d'extrusion soufflage comprend cinq étapes principales :

- Extrusion de la paraison : Le matériau plastique est extrudé sous forme d'un tube creux appelé paraison.
- Fermeture du moule : Le moule, composé de deux parties, est fermé autour de la paraison.
- Soufflage de la paraison : De l'air est injecté dans la paraison, ce qui permet au plastique de se conformer aux parois du moule et de prendre sa forme finale.



- Dégonflage et ouverture : L'excès d'air est évacué de la pièce soufflée, puis le moule est ouvert pour libérer la pièce.
- Décarottage et finition : La pièce est retirée du moule, les déchets de moulage sont éliminés et des étapes de finition peuvent être effectuées pour assurer la qualité et la fonctionnalité de la pièce finale.

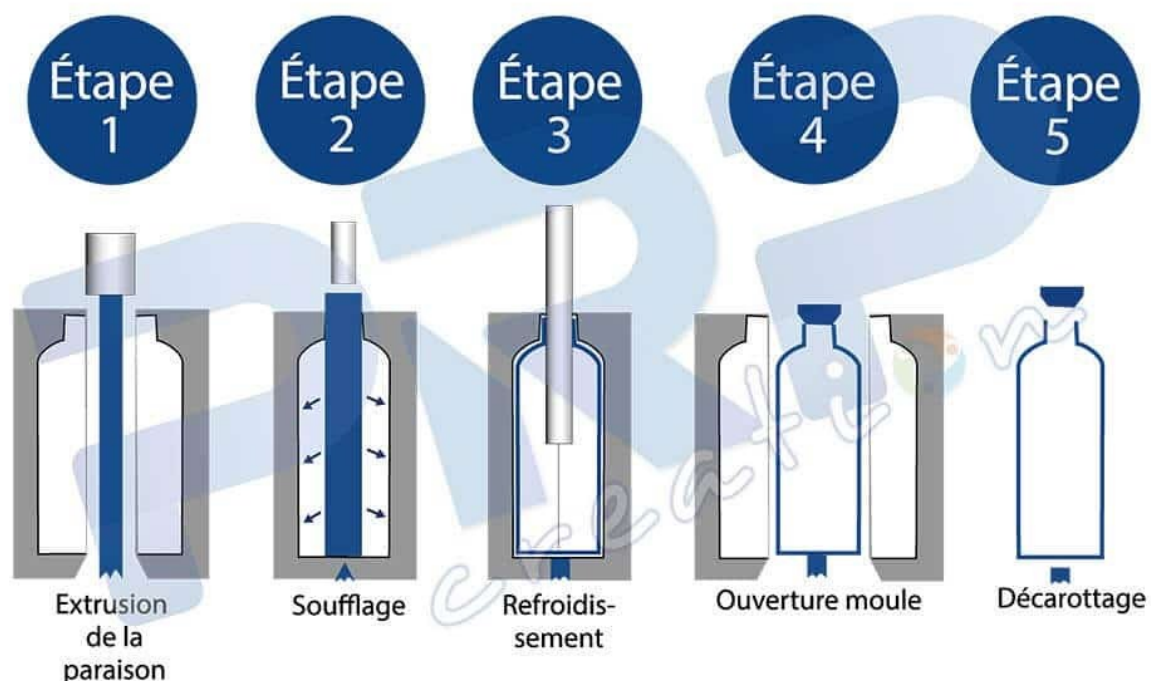


Figure I.6: Schéma d'extrusion soufflage (12)

### 2.2.5 Extrusion gonflage

L'extrusion-gonflage est une méthode dérivée de l'extrusion qui permet la production de films plastiques. Ce processus implique le gonflement d'une enveloppe polymère préformée à l'aide d'air comprimé à la sortie de l'extrudeuse. L'extrudeuse délivre le matériau fondu verticalement, tandis que de l'air comprimé est injecté, provoquant l'expansion du matériau fondu et son élévation sous forme d'une longue bulle de film. Après refroidissement, le film est aplati par des rouleaux pour former une surface plane, puis enroulé sur une bobine. Ce procédé est largement utilisé pour la production de films d'emballage, de sacs poubelles, de sacs de congélation, de poches médicales pour perfusion, ainsi que de feuilles souples et fines utilisées pour les revêtements de serres horticoles.

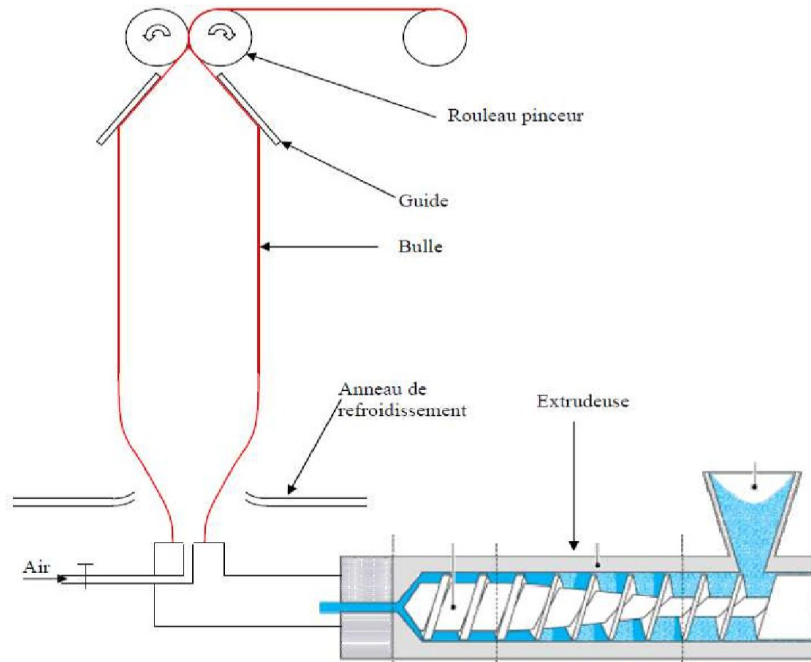


Figure I.7 : Schéma d'extrusion gonflage (13)

### 2.2.6 Thermoformage

C'est un procédé de transformation secondaire dans lequel le matériau est initialement sous forme de plaques, de tubes ou de profilés. Une fois chauffé et ramolli, le matériau est déformé et façonné à l'intérieur d'un moule métallique. Une adhérence parfaite entre le polymère et le moule est obtenue grâce à l'aspiration sous vide ou au plaquage par injection d'air. Cette technique permet la réalisation de pièces à parois fines ainsi que de pièces de grande taille. Les plaques de polystyrène ou d'ABS sont particulièrement adaptées à ce type de procédé de transformation. On utilise cette technique pour fabriquer des objets présentant des formes géométriques simples, tels que des pots de yaourt, des cabines de douche, des baignoires, des composants de carrosserie, des pièces d'emballage, des gobelets, etc.

#### a. Avantages

Le thermoformage présente plusieurs avantages majeurs par rapport à d'autres procédés tels que l'injection. Tout d'abord, il permet de lancer une production relativement rapidement. En effet, la conception et la réalisation des outillages sont plus simples, ce qui facilite grandement la fabrication d'une pièce en série, qu'elle soit de petite, moyenne ou grande envergure, en quelques semaines seulement. De plus, les équipements nécessaires au thermoformage sont moins complexes et donc moins coûteux à mettre en place. En conséquence, le thermoformage se révèle être un procédé particulièrement intéressant et compétitif pour la production en faible volume, offrant ainsi une alternative économique pour la fabrication de pièces en série.

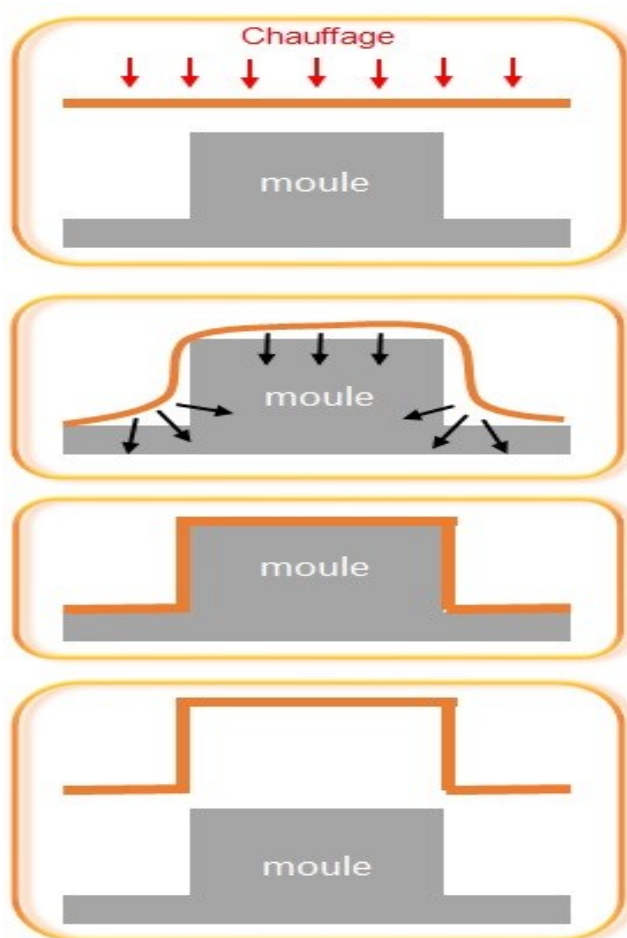


Figure I.8: Schéma explicatif du thermoformage (14)

### 2.2.7 Rotomoulage

Ce procédé, connu sous le nom de rotomoulage, est utilisé pour fabriquer des produits en plastique creux de différentes tailles, allant des petites aux grandes dimensions, et présentant des formes simples ou complexes. Il implique la mise en rotation d'un moule à deux axes, où les particules de plastique sont finement réparties. Le moule est ensuite chauffé, puis refroidi pour obtenir le produit final. Le rotomoulage est utilisé dans de nombreux domaines, tels que la fabrication de réservoirs de stockage, de meubles, de panneaux de signalisation routière, de pièces aéronautiques, de jouets, de toboggans, de parcs pour enfants, de toitures, de kayaks, de planches à voile, de cuves et de conteneurs.

Cinq phases successives composent le procédé de rotomoulage, avant de commencer il est nécessaire de préparer la matière plastique qui se présente sous la forme d'une poudre d'une granulométrie spécifique, cette préparation sera prépondérante pour définir la couleur, la quantité de matière nécessaire et apporter certaines propriétés au produit fini à l'aide d'additifs. Le moule est généralement formé de deux parties un fixe et un mobile.

1. Chargement et fermeture du moule : la première partie de moule est rempli de poudre de plastique et la seconde vient fermer le tout.
2. Mise en rotation : le moule tourne alors sur 2 axes afin de répartir la poudre de façon homogène sur l'ensemble des parois.

3. Chauffage du moule : à l'intérieure d'un four chauffé au moyen de rendre de gaz voire de panneaux infrarouge, le métal du moule transmet la chaleur à la poudre, les grains font progressivement à la température de bonne fusion formant des couches successivement homogène jusqu'à l'obtention de l'épaisseur souhaite, alors que la rotation continue le moule est refroidi à l'aide d'air frais et ou de brouillard d'eau.
4. Solidification de la matière : le refroidissement se fait jusqu'à ce que la matière solidifier soit manipulable, le moule peut maintenant être ouvert.
5. Démoulage de la pièce : on soulève la partie mobile et on extrait la pièce elle et alors prête pour la finition ou l'assemblage.

Les pièces rotomoulées sont identifiable quotidien et se retrouve dans de multiples secteurs : l'agriculture, l'assainissement, l'éducation et les jouets, l'environnement, l'industrie, le mobilier et la décoration, la santé et sécurité, le sports et loisirs comme le nautisme, le transport et l'urbanisme ....

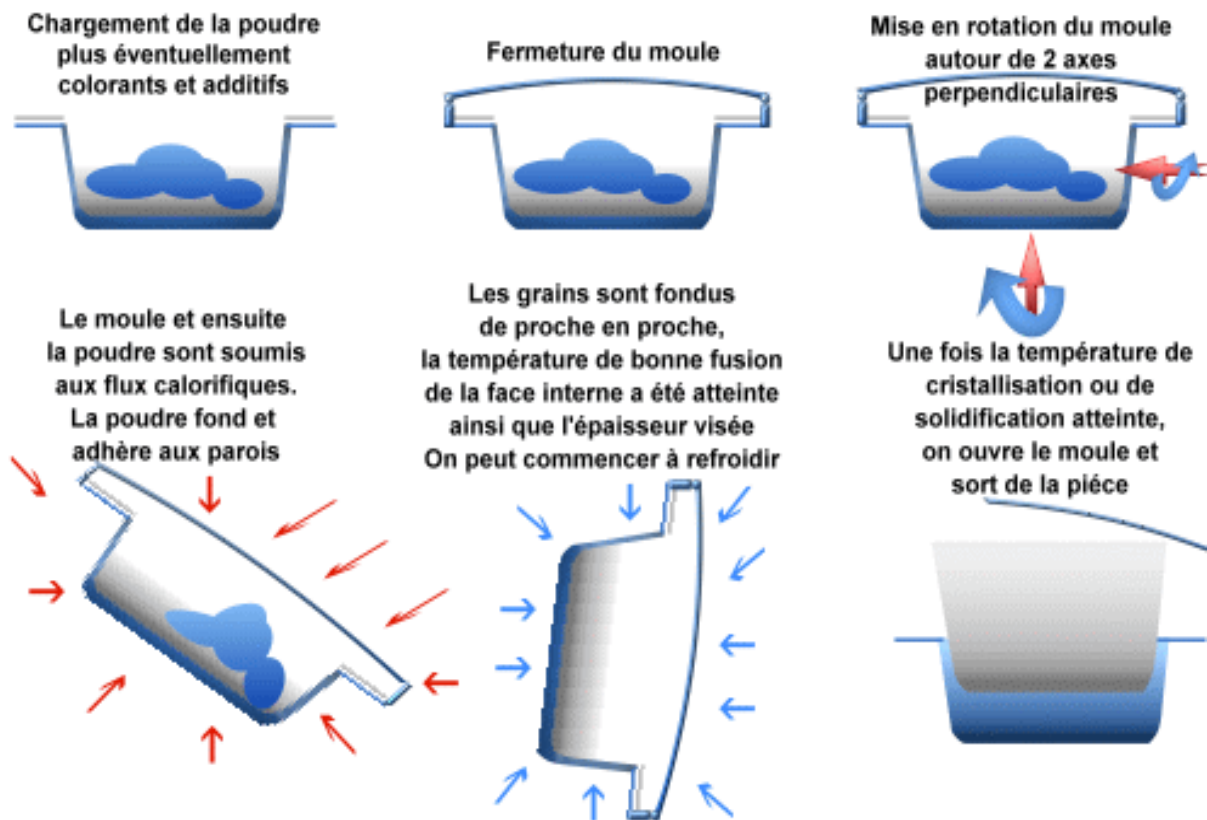


Figure I.9: Principe de rotomoulage (15)

## Conclusion

Nous avons présenté dans la première partie de ce chapitre des généralités sur la production et les systèmes de production et les procédés de fabrication dans la plasturgie.

Cette présentation montre qu'il n'y a pas strictement une méthode de production des pièces plastiques, elle a aussi pour but de délimiter les contours de notre étude, nous nous sommes concentrés dans la deuxième partie sur la présentation et le principe de thermoformage. Nous présenterons aussi les différents techniques utilisées dans le thermoformage et les machines dont la conception nous servira pour entamer la réalisation dans les autres chapitres.



# **Chapitre II**

## **Thermoformage : principes, processus et applications**

## Introduction

Le plastique est disponible dans une variété de tailles et de couleurs, avec une large gamme de propriétés différentes. Cette diversité en fait un matériau idéal pour les fabricants qui souhaitent produire des prototypes et des pièces finales. Le thermoformage est un procédé de fabrication polyvalent qui permet aux fabricants de travailler avec des feuilles de plastique. Dans ce chapitre, nous aborderons les concepts généraux du thermoformage, ses applications sur différents marchés, les divers procédés utilisés, les matériaux et équipements impliqués, les principes d'application, ainsi que les bonnes pratiques à suivre.

### 1 Présentation

Le thermoformage est une technique de transformation des matériaux thermoplastiques qui permet la production industrielle d'une grande variété d'objets tels que des barquettes d'emballage, des pots de yaourt, des baignoires, et bien d'autres. Ce processus se déroule en deux étapes à partir des matières premières. La matière plastique, généralement sous forme de granulés, est transformée en une feuille ou une plaque lors de la première étape grâce à la technique de l'extrusion. Ensuite, la deuxième étape, appelée thermoformage, permet de donner forme à l'objet final.

Le thermoformage offre la possibilité de créer des objets avec une large gamme d'épaisseurs, allant de quelques dizaines de micromètres à plus d'un centimètre. Il permet également de travailler à des cadences de production élevées en utilisant des outillages abordables, ce qui compense le coût des matières premières. Aujourd'hui, le thermoformage est l'un des procédés de transformation les plus importants pour les polymères thermoplastiques. (16)

### 2 Secteurs et les applications

Le thermoformage offre la possibilité de créer des pièces simples et complexes, ce qui en fait une technique polyvalente adaptée à de nombreux secteurs tels que l'aéronautique, la cosmétique, le médical, le transport, l'emballage, et bien d'autres. Voici quelques exemples concrets d'applications : (17)

- Dans l'industrie du transport : fabrication de carénages, de capotages, d'intérieurs de portes, de pare-chocs, de tableaux de bord, de capots de valise, de véhicules utilitaires, de vitres, etc.
- Dans l'industrie en général : production de carénages pour les machines industrielles, de plateaux de manutention, etc.
- Dans le secteur cosmétique : création de présentoirs et d'emballages spécifiques, tels que des supports pour rouges à lèvres.
- Dans l'aéronautique : réalisation de capots de protection, de carters, etc.
- Dans le domaine du mobilier : fabrication de plateaux repas, de sièges, de fauteuils, etc.
- Dans le secteur médical : conditionnement de produits pharmaceutiques, fabrication de carters pour les machines médicales, etc.
- Dans la publicité sur le lieu de vente (PLV) : conception de présentoirs pour des produits alimentaires, de décoration, de livres, etc.
- Pour les enseignes : création de logos accrochés en façade de bâtiments.

- Dans l'emballage : les emballages thermoformés sont largement utilisés pour l'emballage et la protection des produits alimentaires, des jouets, de l'électronique, de l'informatique, etc.

### 3 Principe

Le thermoformage est un procédé qui consiste à chauffer une feuille ou une plaque à une température permettant sa transformation dans un moule qui lui donne la forme souhaitée en utilisant une différence de pression entre les deux surfaces. Une fois refroidi, l'objet conserve sa forme. La mise en forme est généralement réalisée en appliquant de l'air sous pression sur la feuille ou en créant une dépression en dessous, souvent avec l'aide d'un poinçon mécanique. Ce procédé de transformation est moins énergétique et impose peu de contraintes à la feuille. Par conséquent, les matériaux utilisés doivent avoir des propriétés mécaniques réduites, comme une texture caoutchouteuse pour les polymères amorphes ou une température de fusion pour les polymères semi-cristallins.

Le thermoformage repose sur le phénomène de transition vitreuse ( $T_g$ ) des thermoplastiques. Lorsque ces matériaux atteignent leur température de transition vitreuse, ils deviennent caoutchouteux, ce qui facilite leur mise en forme. Une fois refroidis en dessous de leur température de transition vitreuse, les polymères reprennent leur état solide et vitreux. Les polymères les plus couramment utilisés dans le thermoformage et leurs caractéristiques de formabilité sont les suivants :

Polymère	Température de transition vitreuse (C)	Température de fusion (C)	Température du moule (C)	Plage de température de thermoformage (C)	Taux de retrait linéaire (%)
<b>ABS (Acrylonitrile Butadiène Styrene )</b>	90 a 120		82	130 a 180	0,3 a -0,8
<b>PMMA (Polyméthacrylate de Méthyle)</b>	100		90	150 a 190	0,3 a 0,8
<b>PC (Polycarbonate)</b>	50		130	170 a 200	0,6 a 0,8
<b>PET,PETG,CPET (polytéréphtalate d'éthylène , polyester glycolisé )</b>	70	255	60	120 à 170 150 a 180	0,2 a 0,4
<b>HDPE (Polyéthylène à haute densité )</b>	-110	134	71	130 a 185	3 a 3,5
<b>PP (Polypropylène)</b>	5	165	10(transparent)	150 a 165	1,5 a 2,2
<b>PS (Polystyrène choc )</b>	90		80	130 a 182	0,3 a 0,5
<b>PVC rigide (Polychlorure de vinyle )</b>	90		60	100 a 155	0,4 a 0,5

Table II.1 : Les polymères les plus couramment utilisés dans le thermoformage et leurs caractéristiques



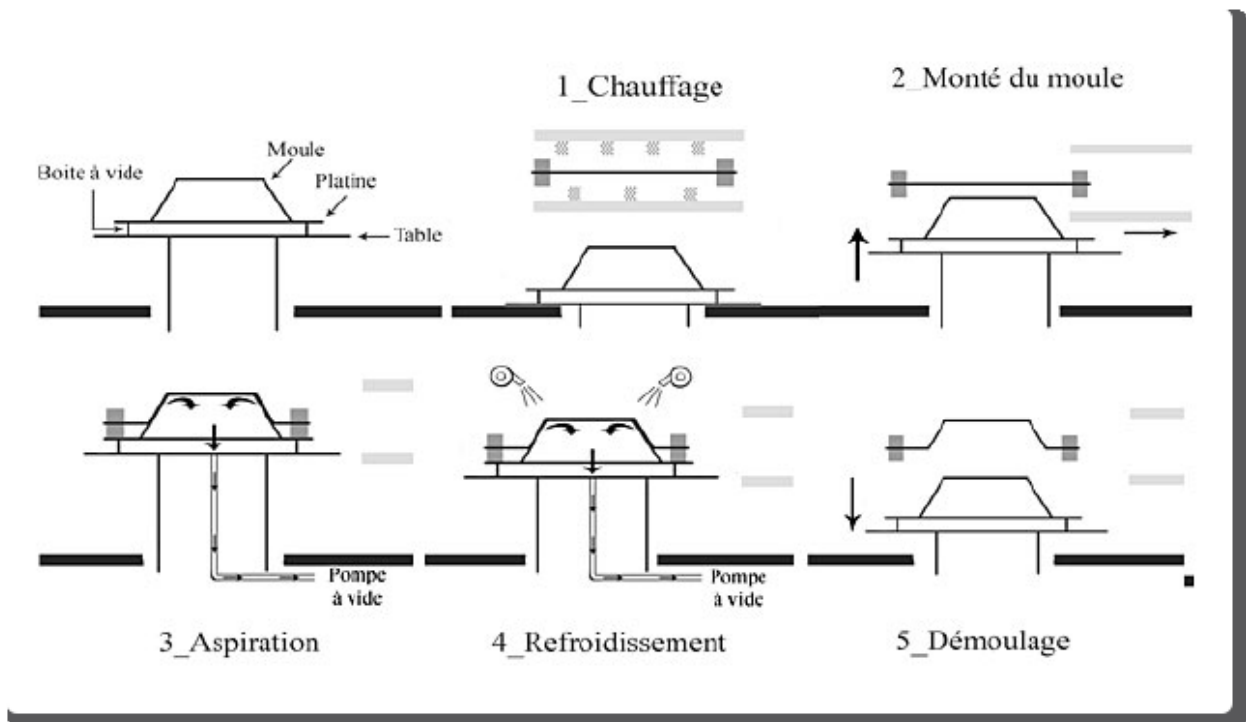


Figure II.1 : Principe du thermoformage

Les différentes étapes du thermoformage par le vide sont (Figure II.1)

- **Chauffage** : La première étape consiste à chauffer une feuille de plastique afin de la rendre malléable. La durée de chauffage doit être ajustée en fonction de l'épaisseur de la feuille, de l'efficacité du système de chauffage, ainsi que de la couleur et de la nature du matériau. Il est essentiel de répartir uniformément la chaleur pour obtenir un résultat optimal. Une fois que la température de thermoformage ( $T_g$ ) optimale du matériau est atteinte, les appareils de chauffage sont retirés et le plateau ainsi que le moule sont positionnés pour le formage.
- **Formage** : Une fois que la feuille est ramollie, elle peut facilement prendre la forme du moule auquel elle est soumise. Les moules mâles (convexes) ou femelles (concaves) permettent d'obtenir les pièces désirées. Ainsi, le plastique malléable prend l'empreinte du moule et acquiert la forme souhaitée.
- **Refroidissement et démoulage** : Une fois la pièce formée, elle est laissée à refroidir tout en restant sur le moule. Ensuite, elle est démoulée et retirée. Le refroidissement est une étape importante pour obtenir un produit conforme. Il est essentiel de permettre à la pièce de refroidir suffisamment afin de la retirer du moule sans déformation, défaut ou adhérence. La durée de refroidissement dépend de l'épaisseur de la pièce et de l'efficacité du système de refroidissement. Il existe trois principales techniques pour le formage :
  - Évacuation d'air : la feuille adhère au moule.
  - Air pressurisé : la feuille est pressée contre le moule.
  - Force mécanique.

#### 4 Types de thermoformage

Les techniques de thermoformage les plus fréquemment utilisées utilisent des moules à motifs pour transformer une feuille de plastique en une pièce finie. Parmi celles-ci, on retrouve :

- Le formage sous vide : Dans cette technique, le vide est créé entre la matière et le moule, ce qui force la matière à prendre la forme du moule sous l'effet de la pression atmosphérique (environ 1 bar).
- Le formage sous pression : Cette méthode utilise une pression de 3 à 4 bars (à l'aide d'air comprimé) pour façonner la matière en chassant l'air entre la matière et le moule. Cette approche permet une meilleure précision des contours et une répartition plus uniforme des épaisseurs, mais elle nécessite une installation plus coûteuse et l'utilisation d'air comprimé, qui est également plus coûteux que le vide.
- Le formage par moules mâle/femelle : Cette méthode est similaire à l'emboutissage ou à la compression à chaud, où la matière est déformée en utilisant des moules mâle et femelle.
- Le formage double-coque (Twin sheet) : Ce procédé permet de réaliser simultanément deux parties d'une pièce creuse et de les souder. Pour cela, le piston supérieur est également équipé d'une pompe à vide et fonctionne de la même manière que la partie inférieure. (18)

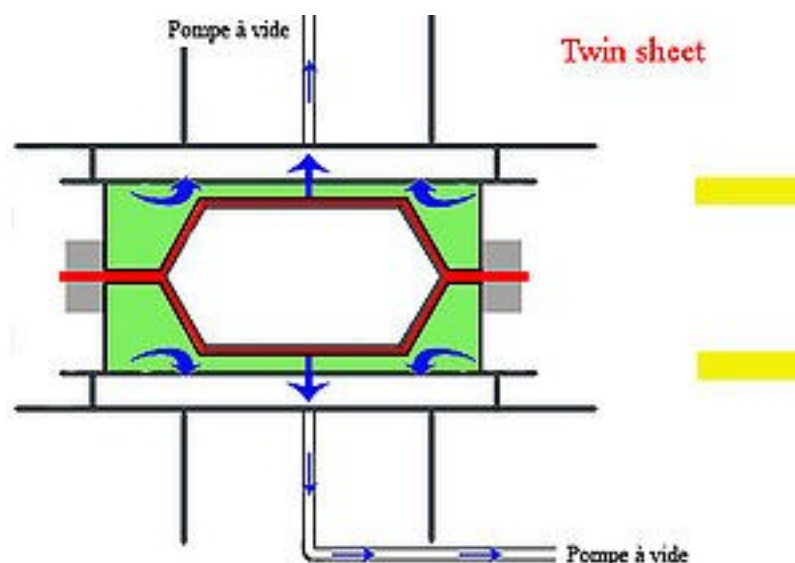


Figure II.2: Procédé Twin sheet (19)

Selon les machines, il envisageable de préchauffer les plaques pour diminuer le temps de cycle.

#### 5 Méthodes de conception pour le thermoformage

La conception pour le thermoformage est un aspect important de la production de pièces en plastique à partir de feuilles de plastique plates. Une bonne conception peut améliorer la qualité et la rentabilité du processus de thermoformage. Dans cette section, nous allons passer en revue quelques méthodes de conception clés pour le thermoformage.

- Évaluation de la géométrie de la pièce : La première étape de la conception pour le thermoformage consiste à évaluer la géométrie de la pièce et à déterminer si elle est

adaptée pour le processus de thermoformage. Il est important de considérer la taille et la forme de la pièce, ainsi que les angles et les courbes, pour déterminer la faisabilité de la production.

- Sélection des matériaux : La sélection du matériau est une étape importante dans la conception pour le thermoformage. Les propriétés du matériau, telles que la flexibilité, la résistance, la transparence et la résistance à la chaleur, doivent être prises en compte pour garantir la qualité de la pièce et sa fonctionnalité.
- Conception du moule : Le moule est l'élément clé de la production de pièces en thermoformage. La conception du moule doit être précise et répondre aux exigences de la pièce produite. La conception du moule doit tenir compte de l'épaisseur de la feuille de plastique, de la taille et de la forme de la pièce, ainsi que des propriétés du matériau.
- Optimisation des paramètres du processus : L'optimisation des paramètres du processus, tels que la température, la pression et la vitesse, est un aspect important de la conception pour le thermoformage. Les paramètres du processus doivent être ajustés pour s'adapter aux propriétés du matériau et à la forme de la pièce, afin de garantir la qualité et la rentabilité du processus.

En conclusion, la conception pour le thermoformage est un aspect crucial du processus de production de pièces en plastique à partir de feuilles de plastique plates. Une bonne conception peut améliorer la qualité et la rentabilité du processus de thermoformage en prenant en compte la géométrie de la pièce, la sélection des matériaux, la conception du moule et l'optimisation des paramètres du processus.

## 6 Moule pour le thermoformage

Les moules sont généralement en aluminium mais peuvent être en résine époxydes pour de petites séries, voire en bois pour la fabrication d'échantillons. Les pièces sont réalisées avec des moules positifs ou négatifs.

### 6.1 Moule Positif

La production et l'usinage de ces moules sont simples et économiques. Le thermoformage utilisant ces moules est également connu sous le nom de "drapage" car la feuille préchauffée est drapée sur le moule grâce à la pression atmosphérique externe. L'air entre le moule et la feuille est ensuite aspiré par une pompe à vide.

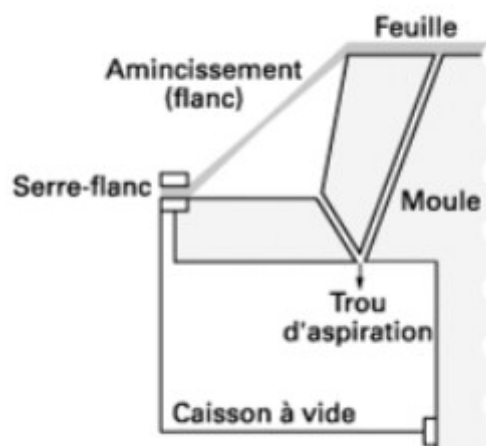


Figure II.3: Moule Positif (20)

Par exemple, dans le moule représenté, l'épaisseur de la partie supérieure de l'objet est légèrement inférieure à l'épaisseur initiale de la feuille, tandis que les côtés sont très étirés et très minces. La forte épaisseur au sommet est due au refroidissement de la feuille en contact avec le moule. Cela entraîne une augmentation des propriétés mécaniques à cet endroit, et la déformation se produit principalement sur les côtés qui restent encore chauds. Le frottement entre la feuille et le moule empêche également la déformation de la partie supérieure. Le chauffage du moule permet une répartition plus uniforme des épaisseurs, mais cela réduit les cadences de production car le refroidissement prend plus de temps. L'augmentation des rayons de raccordement des différentes faces du moule permet également de réduire les variations d'épaisseur sans compromettre les cadences de production

## 6.2 Moule Négatif

Dans ce cas, le moule est positionné au niveau de la plaque, et la matière se répand ensuite sur celui-ci sous l'effet de la pression ou du vide. Le moule est conçu avec une cavité percée de petits orifices permettant l'évacuation de l'air emprisonné entre la feuille et le moule. Pour déformer la feuille, on utilise généralement une pression d'air. Dans les cas de thermoformages profonds, on utilise souvent des poinçons mécaniques en plus de la pression d'air. La fabrication de ce type de moule est plus coûteuse que pour un moule positif, car il faut généralement enlever plus de matière, notamment dans le cas des moules en métal (généralement en aluminium). Le démoulage s'effectue facilement grâce au retrait des produits pendant le refroidissement. Les angles de dépouille sont donc faibles, de quelques degrés, et les angles de raccordement peuvent être vifs. Le formage négatif est le plus couramment utilisé pour des applications telles que les barquettes, les pots, les gobelets et les films d'emballage. Pour les applications nécessitant des épaisseurs de feuille plus importantes, on utilise le formage positif, comme c'est le cas pour les baignoires, les cuves et les portes de réfrigérateur. Un moule peut être négatif avec des parties positives (et vice versa).

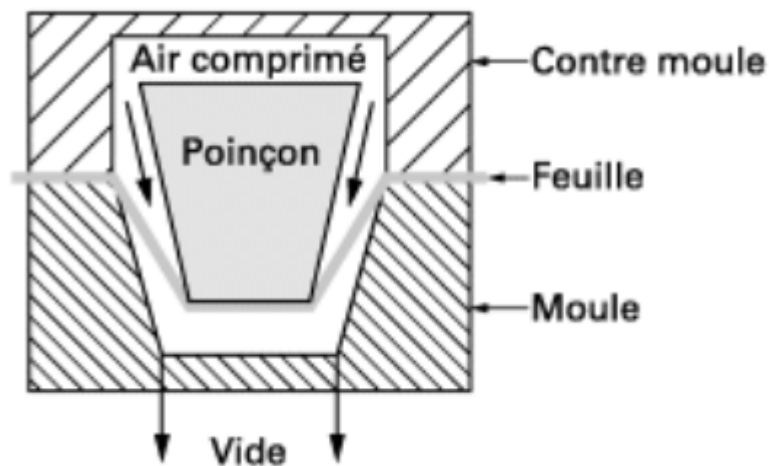


Figure II.4 : Moule Négatif (20)

## 7 Avantages et les limites du thermoformage

Un des avantages du thermoformage repose sur le faible coût des outillages. En effet, le thermoformage requiert un investissement de départ minime par rapport à d'autres techniques de transformation. En plus du faible coût des outillages, lorsqu'il y a des chutes, le plastique est broyé afin d'être réutilisé pour les pièces suivantes. L'utilisation de la matière est donc optimale. (16)

Ainsi, Il est rapide, efficace, ce qui le rend particulièrement adapté à la production de pièces en plastique en grande quantité. En outre, il permet de produire des pièces avec des finitions de surface lisses et uniformes, et peut être utilisé pour créer des formes très complexes. (7)

Ensuite, le thermoformage permet le lancement d'une production de manière rapide et donc l'obtention de pièces dans des délais relativement courts. La rapidité de production de cette technique participe à sa compétitivité.

D'un point de vue environnemental, le thermoformage joue également un rôle important car il permet de créer des emballages solides et durables, notamment dans le domaine alimentaire. Des emballages qui permettent aux aliments de durer plus longtemps et donc de limiter le gaspillage alimentaire.

Le thermoformage a néanmoins quelques inconvénients : il est parfois difficile de prévoir l'étalement de la matière plastique sur le moule. Une contrainte qui doit donc être anticipée en amont de la production.

Aussi, le processus peut être limité par la taille de la feuille de plastique utilisée, ce qui peut limiter la taille de la pièce qui peut être produite. De plus, le processus peut être limité par les propriétés du matériau utilisé, ce qui peut limiter les types de pièces qui peuvent être produites.

Pour évaluer les performances de la machine de thermoformage, il est nécessaire de prendre en compte plusieurs aspects tels que la vitesse de production, la qualité du produit fini, la durabilité de la machine, la fiabilité, la sécurité, la consommation d'énergie et le coût de maintenance.

La vitesse de production est l'un des indicateurs les plus importants pour mesurer les performances de la machine de thermoformage. La machine doit être capable de produire un grand nombre de pièces en peu de temps sans compromettre la qualité du produit fini. La qualité du produit fini doit être uniforme et sans défauts, ce qui nécessite une bonne maîtrise de la température, de la pression et du temps de cycle.

La durabilité de la machine est également un critère important car elle permet de garantir une production régulière sur une longue période. Une machine qui nécessite des réparations fréquentes ou qui tombe en panne régulièrement aura un impact négatif sur la productivité et la rentabilité.

La fiabilité et la sécurité de la machine sont également essentielles, car tout dysfonctionnement ou accident peut causer des pertes financières importantes et mettre en danger la sécurité des travailleurs.

La consommation d'énergie est un autre aspect important car une machine de thermoformage qui consomme trop d'énergie peut avoir un impact négatif sur les coûts de production et sur l'environnement.

En termes d'amélioration possibles, il peut être intéressant de moderniser la machine de thermoformage en utilisant des technologies plus avancées telles que la commande numérique ou l'intelligence artificielle. Cela permettrait d'optimiser les paramètres de production en temps réel, d'améliorer la précision et la qualité des pièces produites et de réduire les temps d'arrêt.

Il est également important de maintenir régulièrement la machine pour garantir un fonctionnement optimal. Un programme de maintenance préventive peut être mis en place pour

détecter les problèmes avant qu'ils ne deviennent critiques et pour prolonger la durée de vie de la machine.

Enfin, l'utilisation de matériaux plus durables et écologiques peut contribuer à réduire l'impact environnemental de la production et améliorer la qualité du produit fini.

### **Conclusion**

L'objectif de ce chapitre est de donner une meilleure compréhension du procédé de thermoformage.

Ce procédé est l'un des importants processus de fabrication de pièces en plastique dans de nombreux secteurs industriels. Il offre une production rapide, efficace et économique de pièces avec des finitions de surface lisses et uniformes, et peut être utilisé pour créer des formes très complexes.

Cela nous amènera à essayer de faire une conception de notre machine sur logiciel SOLIDWORKS dans le chapitre suivant.



# **Chapitre III**

## **Conception et dimensionnement d'une machine de thermoformage**



## Introduction

La conception représente la phase créative essentielle d'un projet d'ingénierie, dont le but principal est de développer un système ou un processus répondant à un besoin spécifique tout en prenant en compte les différentes contraintes. Cette étape permet de définir suffisamment le système pour qu'il puisse être installé, fabriqué, construit, opérationnel, et qu'il réponde aux exigences du client.

La Conception Assistée par Ordinateur / Fabrication Assistée par Ordinateur (CAO/FAO) est une technologie qui exploite des outils matériels et logiciels pour la conception et la fabrication de pièces mécaniques. Cette technologie évolue vers une intégration et une interaction de plus en plus poussées entre la conception et la fabrication, avec pour objectif ultime l'automatisation de l'industrie.

Dans ce chapitre, notre travail consiste à concevoir une machine de thermoformage en utilisant le logiciel SolidWorks. Nous commencerons par présenter ce logiciel, puis nous décrirons ses dimensions, ses composants et les différentes vues associées à notre conception.

### 1 Conception Assistée par Ordinateur (CAO)

#### 1.1 Définition de la CAO

La définition de la Conception Assistée par Ordinateur (CAO) englobe un ensemble d'outils logiciels et de techniques informatiques qui soutiennent les concepteurs dans la conception et le développement de produits. Un logiciel de CAO se compose généralement de quatre éléments principaux, qui peuvent être organisés comme suit :

- Le modelleur géométrique : Également appelé "planche à dessin", est une partie fondamentale d'un logiciel de CAO. Elle contient les composants géométriques de base tels que des points, des droites, des cercles, des ellipses, des plans, des sphères, des cylindres, des cônes, des courbes, des surfaces, des surfaces de révolution, des surfaces de balayage, etc. Elle intègre également les composants topologiques tels que des sommets, des faces, des arêtes, des orientations, des coïncidences, des intersections, des soustractions, des unions, etc.
- L'outil de visualisation comprend deux parties distinctes :
  - Un ensemble d'applications : Permettant de calculer les grandeurs géométriques (distance, inertie, volume, masse, etc.) et d'accomplir les fonctions métiers telles que l'assemblage de pièces, la production de plans, la simulation d'usinage, le moulage, le fraisage, etc.
  - De plus, il comporte également un contrôleur qui a pour rôle de gérer et d'exploiter les interactions entre les trois outils mentionnés ci-dessus. (21)

#### 1.2 Choix de l'outil informatique de CAO

Pour la modélisation géométrique des différentes pièces de notre machine de thermoformage, nous avons choisi d'utiliser le logiciel de CAO SolidWorks en raison de sa disponibilité et des connaissances que nous avons acquises lors de notre formation.

SolidWorks est un logiciel de CAO 3D qui est largement utilisé par plus de 6 millions d'ingénieurs dans le monde pour transformer leurs idées innovantes en projets réussis.

En travaillant avec SolidWorks, nous sommes en mesure d'améliorer de manière significative notre processus de développement et de fabrication de produits tout en réduisant les délais et les coûts de développement. Le logiciel SolidWorks offre une suite complète de solutions de développement de produits, y compris la conception, la simulation, l'estimation

des coûts, les tests de fabricabilité, la FAO, la conception écoresponsable et la gestion des données. Cela en fait un outil de choix pour les ingénieurs à travers le monde.

### **1.3 Présentation de l'outil CAO utilisé dans le mémoire**

Le logiciel de CAO SolidWorks a été choisi pour la modélisation 3D de la solution proposée en raison des avantages suivants :

- Facilité d'utilisation
- Puissance du logiciel
- Possibilité d'enregistrer dans différents formats
- Possibilité de concevoir des pièces en 2D ou en 3D, de les assembler et de les mettre en plan
- Possibilité d'animer et de simuler les mécanismes
- Possibilité d'être utilisé comme outil de CFAO.

### **1.4 Présentation SolidWorks**

SolidWorks est le logiciel de CAO 3D le plus populaire pour la modélisation de solides et de surfaces. C'est un outil robuste et puissant de CAO/FAO qui offre bien plus que la simple définition géométrique d'ensembles mécaniques. En effet, c'est une plateforme pluridisciplinaire complète pour la modélisation et l'optimisation des couples produit-process. Avec la capacité de gérer et de manipuler des modèles, des solides et des surfaces complexes, SolidWorks est utilisé dans de nombreux secteurs nécessitant une grande précision, tels que l'aéronautique, la construction, l'automobile, le ferroviaire, l'horlogerie, l'électronique, la fabrication, la robotique et l'énergie.

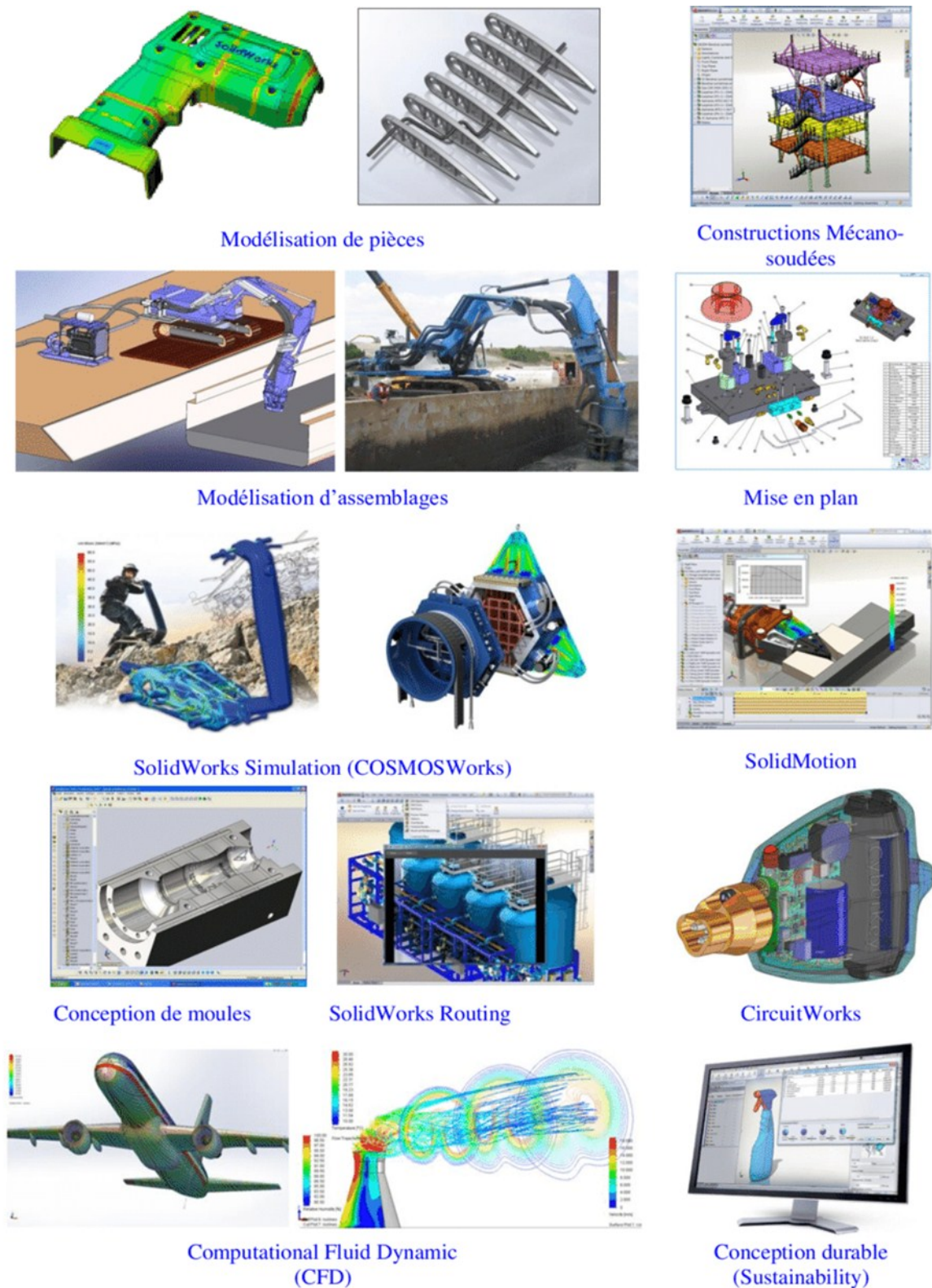


Figure III.1 : Quelques possibilités disponibles aux concepteurs via l'outil de CAO SOLIDWORKS. (22)

## 2 Analyse des besoins et spécifications fonctionnelles de la machine de thermoformage

L'analyse des besoins et spécifications fonctionnelles de la machine de thermoformage est une étape cruciale dans le processus de conception de la machine. Elle permet de définir les besoins des utilisateurs et les fonctions que la machine doit remplir, ainsi que les contraintes techniques, économiques et environnementales à respecter.

Voici les étapes clés pour l'analyse des besoins et spécifications fonctionnelles de la machine thermoformage :

Les questions clés à se poser incluent :

- Quel est le volume de production attendu ?

Le volume de production attendu pour notre petite machine de thermoformage peut varier en fonction de nombreux facteurs tels que la taille des produits à fabriquer, la vitesse de production, la complexité des moules et des processus de fabrication, la durée de fonctionnement de la machine, etc.

Cette machine de thermoformage peut produire entre 60 et 120 pièces par heure, selon le modèle et les spécifications techniques.

Il est important de noter que le volume de production dépendra également de la capacité de la machine, de la qualité des matières premières utilisées et de l'efficacité de la gestion de la production. Par conséquent, il est important de prendre en compte tous ces facteurs avant de déterminer le volume de production attendu pour une machine de thermoformage spécifique.

- Quels sont les types de produits à thermoformer (taille, forme, matériau) ?

Les types de produits que l'on peut thermoformer avec cette machine de thermoformage dépendent de la taille maximale de la feuille de plastique et de la taille maximale du plateau de formage que la machine peut gérer. En général, les petites machines de thermoformages sont utilisées pour fabriquer des produits de petite à moyenne taille, tels que des emballages, des contenants et des plateaux pour l'industrie alimentaire, médicale, et d'autres industries similaires.

Le matériau le plus couramment utilisé pour les petites machines de thermoformage le polypropylène (PP).

Le polypropylène est souvent utilisé pour les produits qui nécessitent une résistance chimique élevée, tels que les emballages pharmaceutiques.

En termes de forme, les produits thermoformés peuvent varier considérablement en fonction des besoins spécifiques des clients et des applications. Les produits courants fabriqués sur des petites machines de thermoformage incluent des barquettes de fruits, de légumes, de viande et de poisson, des plateaux pour aliments surgelés, des gobelets en plastique, des boîtes pour plats à emporter et des pièces pour l'industrie électronique.

- Quelles sont les exigences en termes de qualité du produit final (aspect, précision dimensionnelle, etc.) ?

Les exigences en termes de qualité du produit final pour une petite machine de thermoformage peuvent varier en fonction des besoins du client et des exigences spécifiques du produit à thermoformer. Cependant, il y a des caractéristiques communes que la plupart des produits thermoformés doivent avoir pour répondre aux normes de qualité attendues. Voici quelques critères courants de qualité qui peuvent être requis :

- ✓ Aspect : Le produit final doit avoir une apparence esthétique et uniforme, sans imperfections sans défauts telles que des bulles d'air, des marques de brûlure ou des rayures, des taches.
- ✓ Précision dimensionnelle : Les dimensions et les contours du produit final doivent être précis et conformes aux spécifications requises. Tout écart peut compromettre la fonctionnalité du produit final.
- ✓ Résistance : Le produit final doit être suffisamment résistant pour résister aux conditions d'utilisation et de stockage prévues.
- ✓ Propriétés physiques : Les produits thermoformés peuvent nécessiter certaines propriétés physiques telles que la résistance à la chaleur, la résistance chimique, la transparence, l'élasticité ou la rigidité pour répondre aux besoins de l'application.
- ✓ Performance : Le produit final doit fonctionner de manière optimale pour remplir les exigences prévues de son utilisation.
- ✓ Sécurité : Le produit final doit être sûr pour son utilisation prévue et ne doit pas comporter de risques pour les utilisateurs.
- ✓ Compatibilité alimentaire : Les produits thermoformés destinés à l'emballage alimentaire doivent être conformes aux normes de sécurité alimentaire et aux réglementations en matière de matériaux en contact avec les aliments.
- ✓ Marquage : Les produits thermoformés peuvent nécessiter un marquage permanent pour permettre la traçabilité ou l'identification, qui peut être effectué par des étiquettes ou des techniques de marquage laser ou d'impression.

Ces exigences de qualité peuvent être atteintes grâce à une conception et une fabrication soignées de la machine de thermoformage, ainsi qu'à une sélection appropriée des matériaux et des procédés de thermoformage.

- Quel est le budget disponible pour la conception et la fabrication de la machine ?

Le budget disponible pour la conception et la fabrication d'une petite machine de thermoformage automatisé peut varier considérablement en fonction de plusieurs facteurs, tels que la complexité de la machine, les fonctionnalités requises, le niveau de qualité, le niveau d'automatisation, le volume de production attendu et les matériaux utilisés.

### **Spécification des fonctions :**

Une fois que les besoins des utilisateurs sont compris, il est temps de définir les fonctions que la machine doit remplir. Les fonctions principales d'une machine de thermoformage incluent :

- ✓ Le chauffage de polypropylène (PP).
  - En général, la plage de température de chauffage typique pour le PP se situe entre 160°C et 220°C.
- ✓ Le formage de polypropylène (PP).
  - Le formage de polypropylène (PP) est un processus de fabrication utilisé pour transformer ce type de plastique thermoplastique en une forme souhaitée. Les techniques courantes de formage de PP incluent le moulage par injection, le moulage par soufflage, le thermoformage, le moulage par

compression et le moulage par rotation. Chaque technique de formage a ses avantages et est utilisée pour produire différents types de produits en PP.

### **Identification des contraintes techniques**

Cette étape consiste à identifier les contraintes techniques qui doivent être prises en compte dans la conception de la machine. Les contraintes techniques peuvent inclure :

- Les exigences en matière et de sécurité
- Les contraintes de poids et de portabilité
- Les exigences en matière alimentation électrique et de connectivité
- Les exigences en matière de conformité réglementaire et de certification

### **Définition des spécifications fonctionnelles**

À partir des informations recueillies dans les étapes précédentes, il est possible de définir les spécifications fonctionnelles de la machine de thermoformage. Les spécifications fonctionnelles doivent être claires, précises et mesurables. Elles doivent inclure des détails tels que :

- Les températures de chauffage et de refroidissement requises
- Les dimensions maximales des produits finis
- Les temps de cycle de production
- Les exigences de qualité pour le produit fini

En résumé, l'analyse des besoins et spécifications fonctionnelles de la machine de thermoformage est une étape essentielle pour s'assurer que la machine sera capable de répondre aux exigences des utilisateurs et de fonctionner de manière efficace et durable. Cela permet également de réduire les risques d'erreurs de conception et de coûts imprévus.

## **3 Présentation du system (thermoformeuse)**

Notre Thermoformeuse "MiniForm" est une machine de thermoformage de bureau conçue pour permettre aux utilisateurs de créer rapidement et facilement des moules et des prototypes à partir de feuilles thermoplastiques. Elle utilise une technologie de chauffage à infrarouge pour chauffer le matériau thermoplastique, puis utilise une pompe à vide pour étirer et presser le matériau contre un moule ou une forme préalablement créée. La "MiniForm" doit permettre la production des pièces en petites quantités et nous souhaiterons l'utiliser dans divers domaines tels que la fabrication de produits électroniques, la conception de packaging, la production de modèles et prototypes, etc.

La "MiniForm" est composée d'une voûte chauffante, de deux serres flan pour maintenir la matière plastique, d'une pompe à vide et de moules interchangeables (selon le produit à fabriquer).

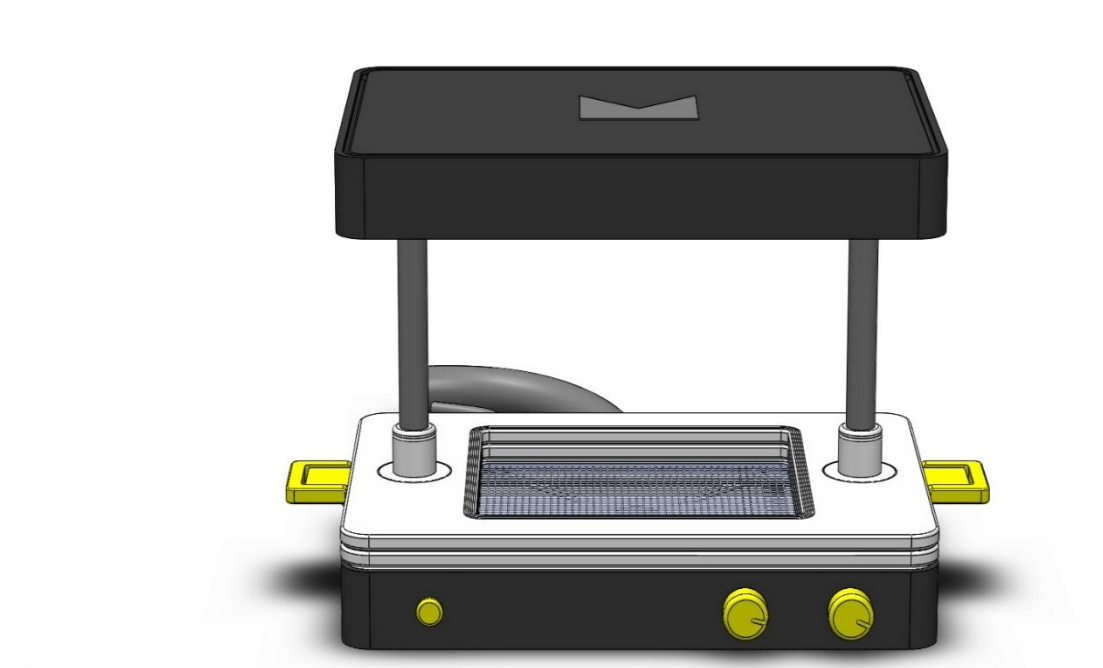


Figure III.2- Vue d'ensemble en 3D de la machine du thermoformage sous-SolidWorks.

### 3.1 Conception des composants de la thermoformeuse

La conception des composants de la thermoformeuse est une étape cruciale dans le processus de fabrication. Elle doit être réalisée avec une grande précision et une attention particulière aux détails. Les composants doivent être conçus pour être robustes, fiables et durables afin de résister aux conditions difficiles auxquelles ils seront soumis lors du fonctionnement de la machine.

Dans cette partie, nous présentons la conception des différentes pièces de la machine automatisée du thermoformage. Pour mieux expliquer ce mécanisme, nous allons présenter les différentes pièces en 3D, en utilisant la partie –Pièce- du logiciel SolidWorks version 2013, puis la partie Assemblage.

L'interface du SolidWorks est très lisible, simple et facile, à manipuler ses fenêtres, son menu, ses palettes et ses icônes, de conception en 2D (esquisse) ou en 3D (fonction).

En somme, la conception des composants de la thermoformeuse est une étape clé pour garantir la performance, la fiabilité et la sécurité de la machine. Elle nécessite une grande expertise en ingénierie, une attention particulière aux détails et une collaboration étroite entre les différents départements impliqués.

La machine de thermoformage "MiniForm" se compose de plusieurs parties, chacune remplissant une fonction spécifique dans le processus de thermoformage. Voici les principales parties de la machine :

- Conception du cadre : Le cadre est la structure principale qui soutient toutes les autres parties de la machine et assure la stabilité et la rigidité nécessaires pendant le processus de thermoformage.

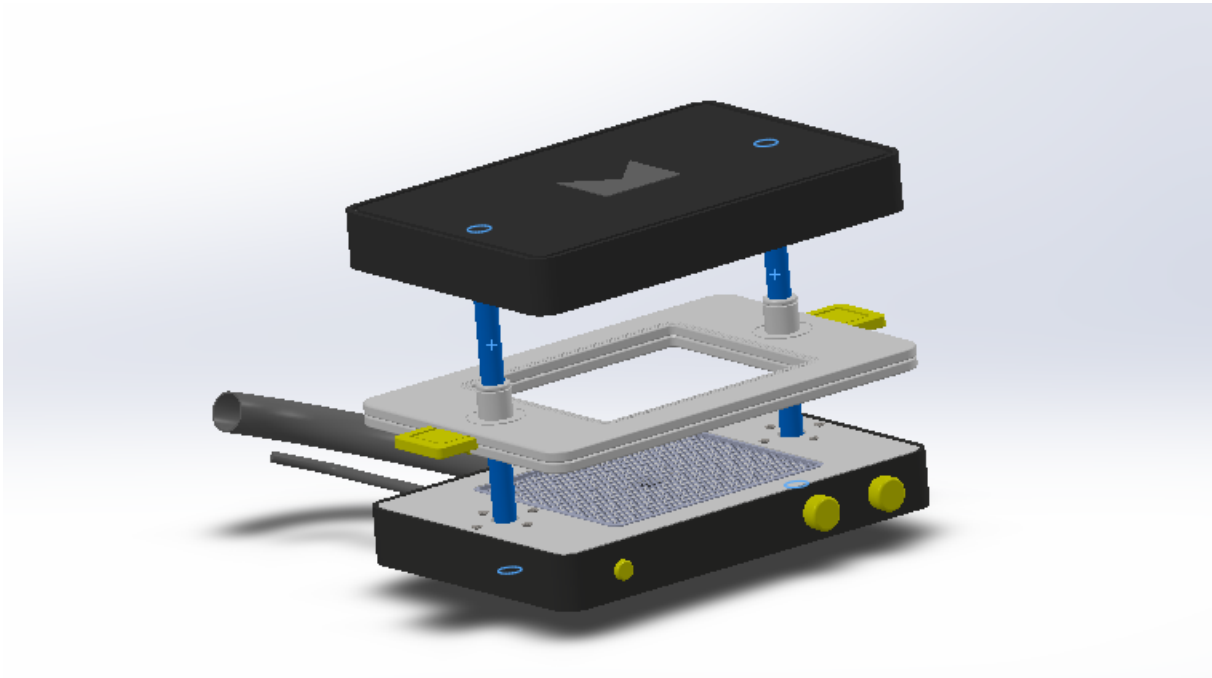


Figure III.3- Position cadre dans le mécanisme en 3D.

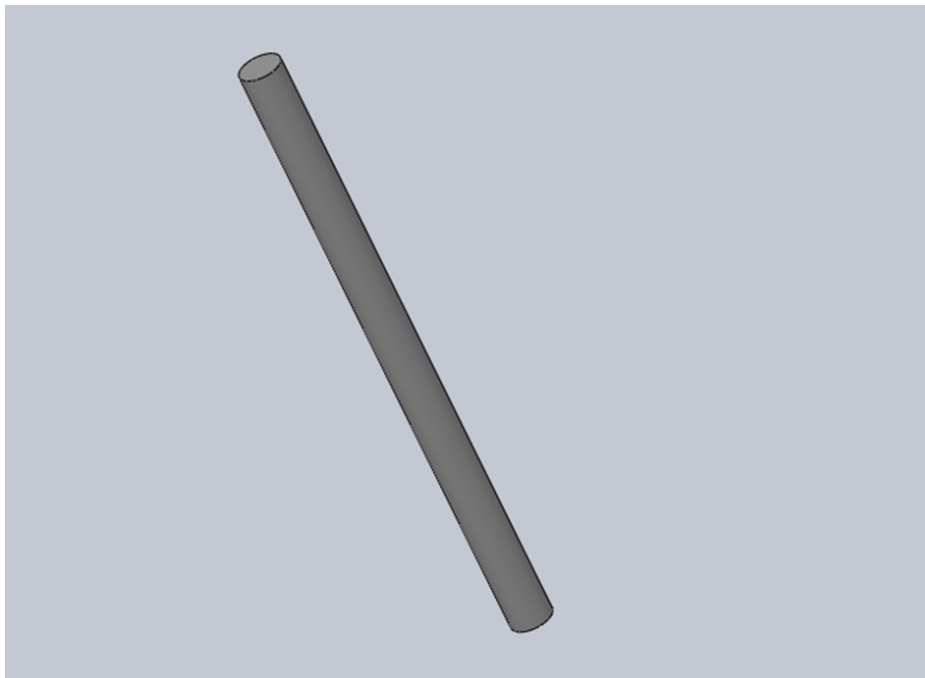


Figure III.4- Capture d'écran du cadre sous-SolidWorks.

- Conception de système de chauffage : Cette partie représente l'organe principal autour duquel les feuilles de plastique sont chauffées à la température appropriée avant le processus de formage.



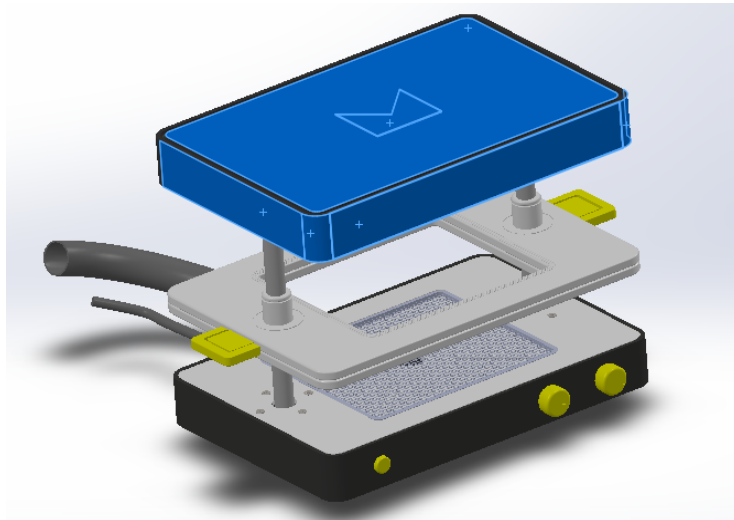


Figure III.5- Position du système de chauffage dans le mécanisme en 3D.

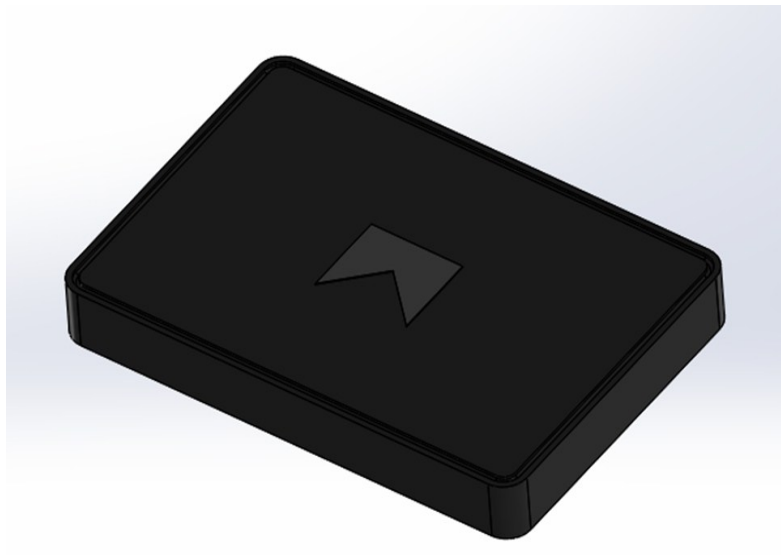


Figure III.6- capture d'écran du système de chauffage sous-SolidWorks.

- Conception du système de formage : Cette partie est responsable de former le matériau en utilisant un moule de formage qui peut être conçu sur mesure pour chaque application.

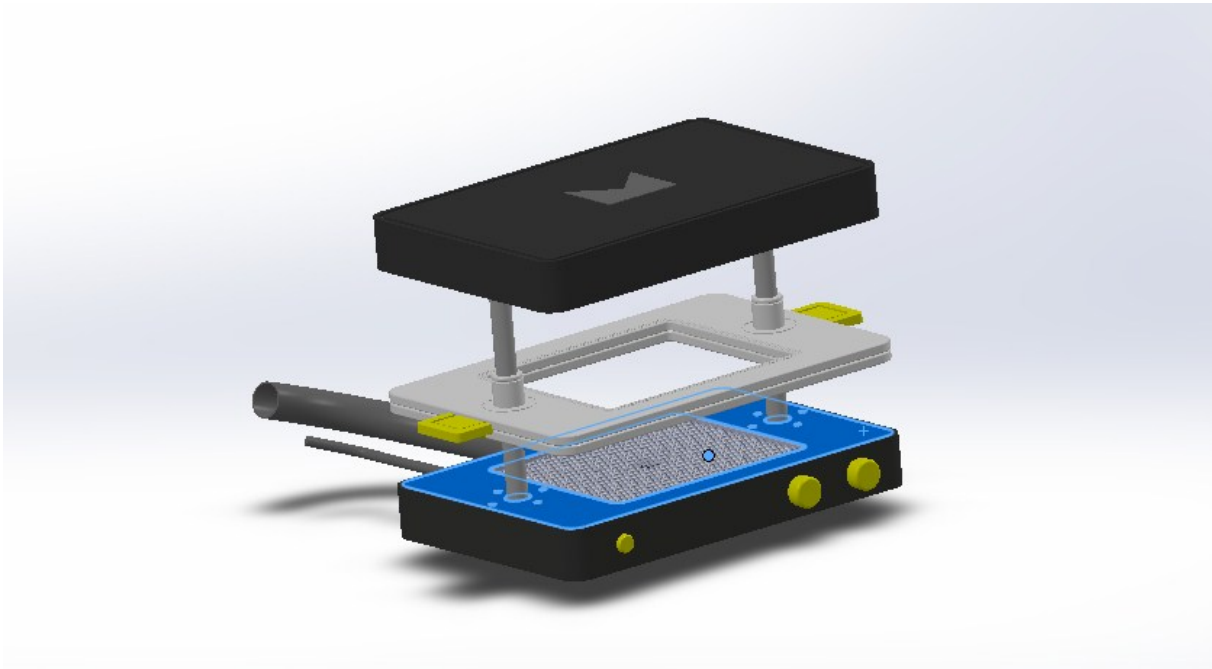


Figure III.7- Position du système de formage dans le mécanisme en 3D.

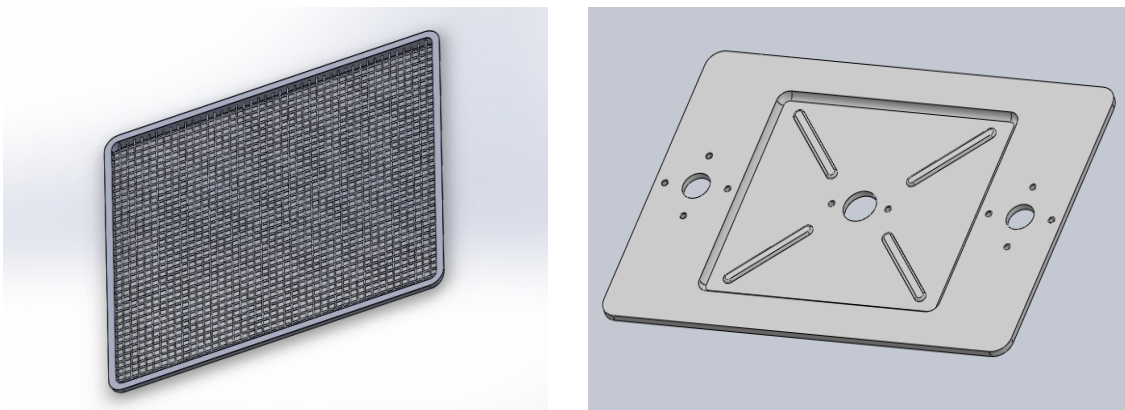


Figure III.8- capture d'écran du système de formage sous-SolidWorks.

- Conception du système de contrôle : permettent de superviser et de réguler les différentes opérations de la machine. Il est responsable de la gestion des paramètres de fonctionnement tels que la température, la pression, la vitesse, etc. Le système de contrôle assure ainsi un fonctionnement précis et fiable de la machine, permettant d'obtenir des résultats de thermoformage de qualité.

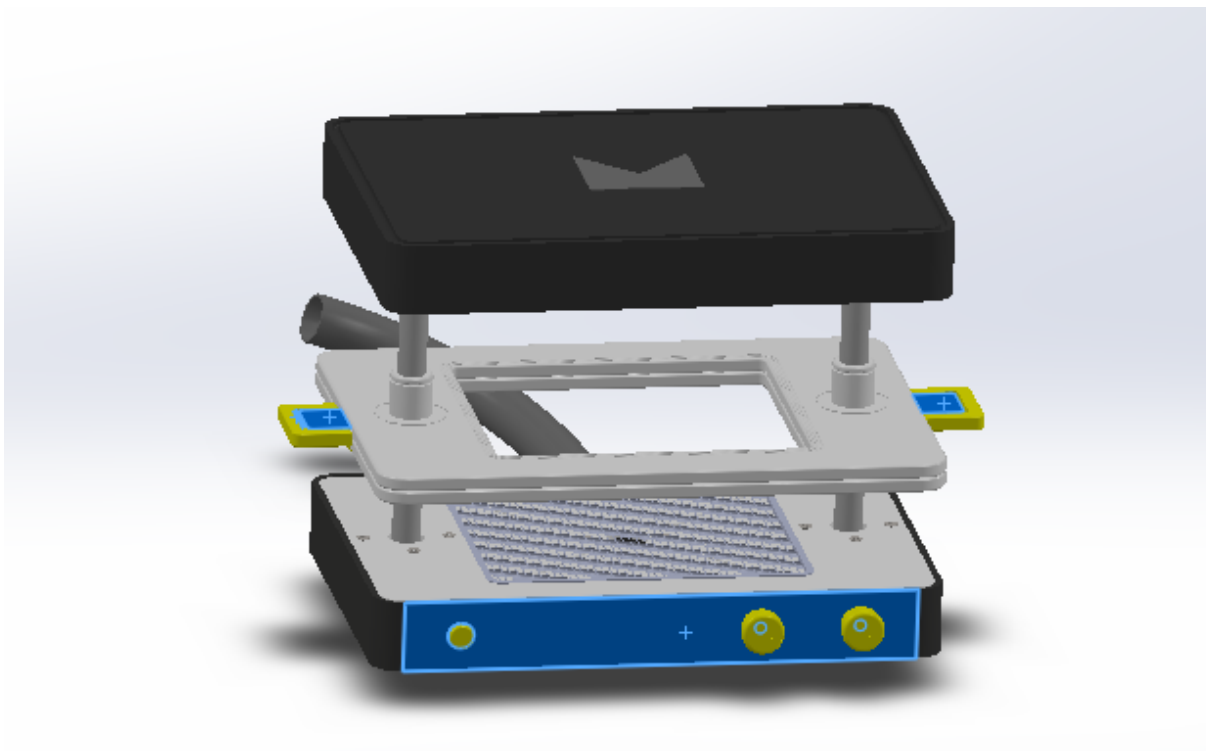


Figure III.9 – capture d'écran du système de contrôle sous-SolidWorks.

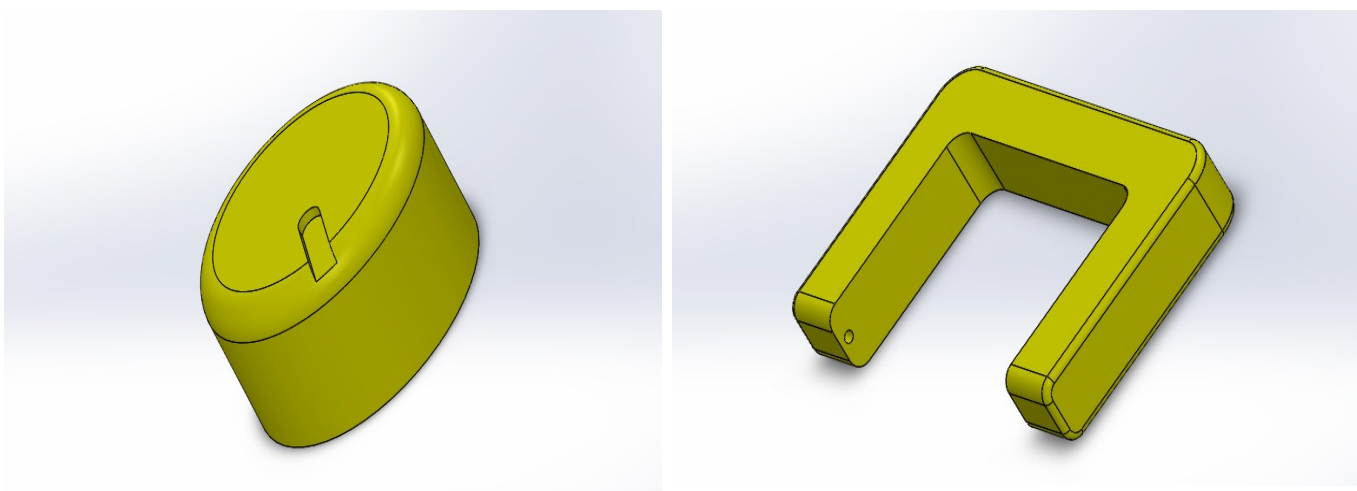


Figure III.10 - capture d'écran du système de contrôle sous-SolidWorks

- Conception du système de mouvement : Cette partie est responsable de déplacer les moules de formage, les pièces formées et les outils de coupe dans et hors de la zone de formage.

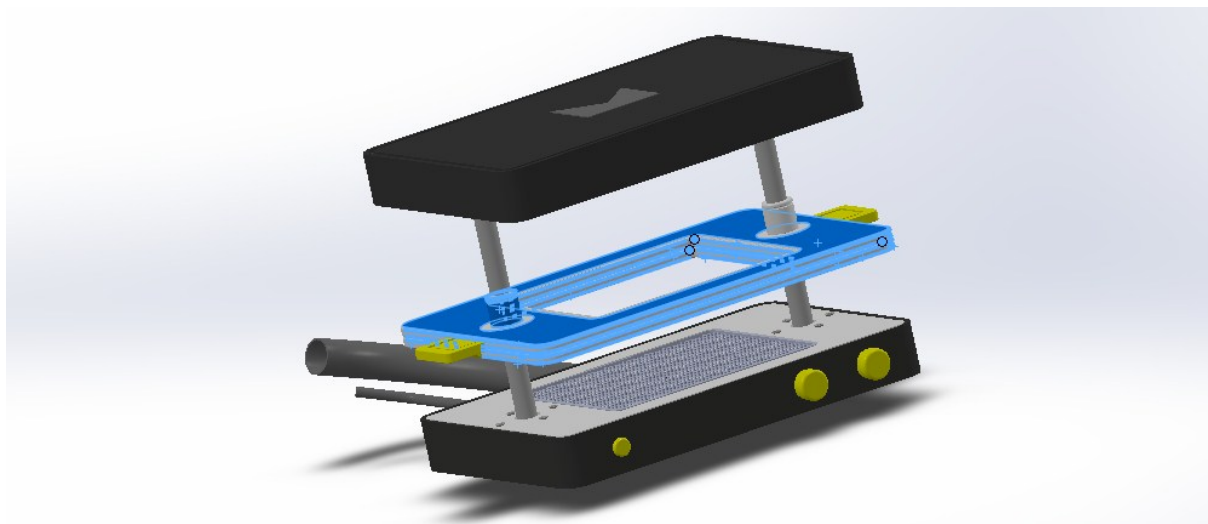


Figure III.11 - capture d'écran du système de mouvement sous-SolidWorks.

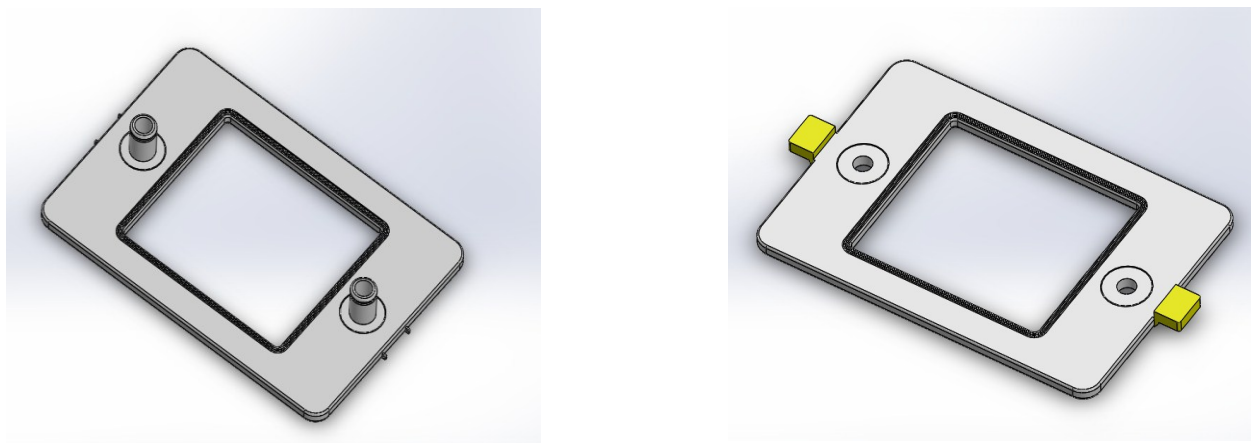


Figure III.12- capture d'écran du système de mouvement sous-SolidWorks.

- Conception du système de vide : un dispositif est intégré dans la machine de thermoformage qui permet d'appliquer une aspiration sur le moule afin de maintenir la feuille de plastique en place pendant le processus de formage. Selon le modèle de machine de thermoformage, d'autres composants et fonctionnalités peuvent être ajoutés pour répondre aux besoins spécifiques de chaque application. De même, pour le modèle de machine de thermoformage "MiniForm", des parties supplémentaires et des fonctionnalités peuvent être ajoutées en fonction des exigences spécifiques de chaque application

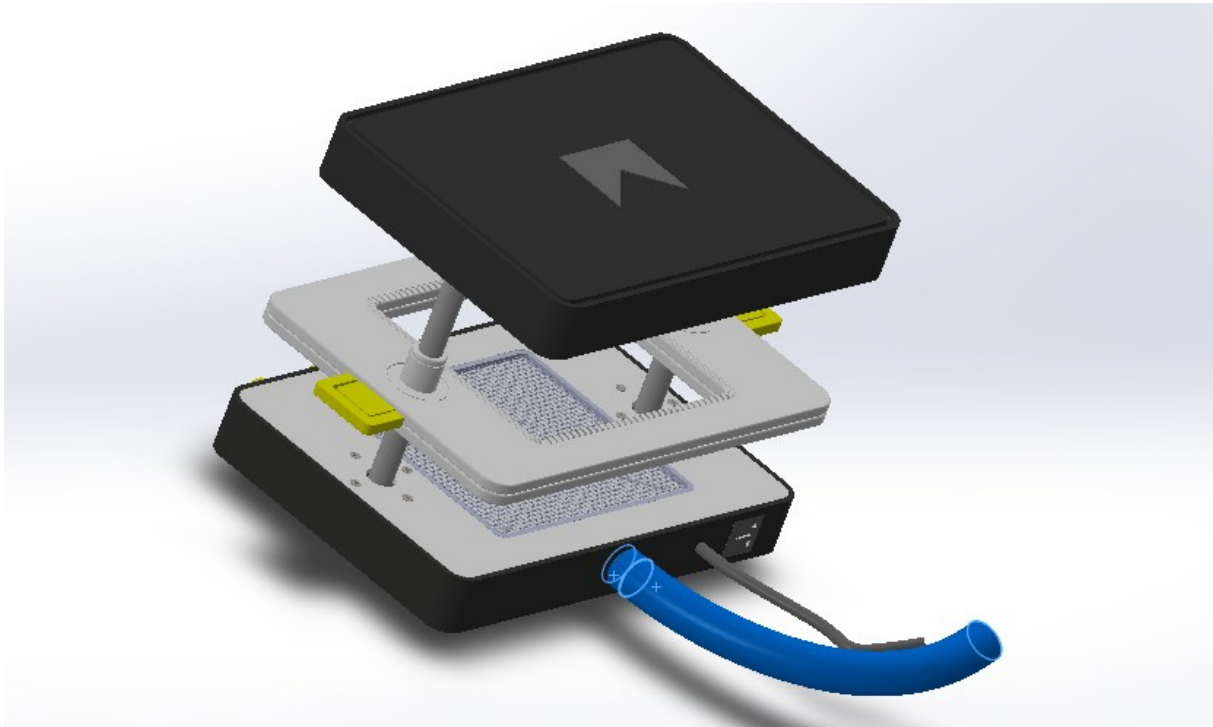


Figure III.13- capture d'écran du système d'aspiration sous-SolidWorks.



Figure III.14- capture d'écran de tuyaux du système d'aspiration sous-SolidWorks.

**Conclusion**

En conclusion, la conception et le dimensionnement d'une machine de thermoformage revêtent une importance capitale pour assurer la qualité et l'efficacité de la production. Il est essentiel de prendre en considération différents paramètres tels que la nature du matériau, la forme de la pièce, la capacité de la machine, la puissance requise, la vitesse de production, etc. afin de concevoir une machine qui réponde aux besoins de l'entreprise et aux exigences du marché.

Il est tout aussi important de souligner que la conception et le dimensionnement ne représentent pas une étape finale, mais plutôt le début d'un processus continu d'amélioration et d'optimisation. Il est donc essentiel de surveiller les performances de la machine lors de son utilisation et d'apporter des ajustements si nécessaires.

Par ailleurs, la sécurité des opérateurs et des travailleurs doit être garantie en respectant les normes et réglementations en matière de sécurité au travail. En résumé, la conception et le dimensionnement d'une machine de thermoformage doivent être réalisés avec une attention particulière portée à la qualité, à l'efficacité, à la sécurité et à la durabilité.



# **Chapitre IV :**

## **Réalisation et Evaluation des performances de la machine de thermoformage**



## **Introduction**

L'évaluation des performances d'une machine de thermoformage revêt une importance capitale pour assurer son efficacité, sa productivité et sa rentabilité dans un environnement industriel. Cette évaluation permet de mesurer divers critères tels que la vitesse de production et la qualité des produits formés, tout en mettant en évidence les domaines où des améliorations peuvent être apportées afin d'optimiser les opérations de thermoformage.

Pour améliorer les performances de la machine de thermoformage, plusieurs améliorations peuvent être envisagées, notamment l'adoption de technologies plus avancées. Par exemple, l'intégration de systèmes automatisés de mouvement de la feuille plastique (plateau de formage) permettrait une régulation plus précise de la forme de la feuille.

Dans le présent chapitre, nous nous concentrerons sur l'évaluation des performances de notre machine de thermoformage, en mettant en évidence ses points forts et ses points faibles. Nous explorerons également les possibilités d'amélioration en examinant les avancées technologiques récentes et en proposant des stratégies potentielles pour optimiser l'efficacité, la qualité et la productivité de la machine. L'objectif principal est de formuler des recommandations concrètes visant à maximiser les performances de la machine et à obtenir des résultats supérieurs dans le processus de thermoformage.

### **1 Automatisation de la machine de thermoformage**

La mise à jour du plateau de formage vers une version automatisée a été une étape cruciale dans l'amélioration de notre processus de thermoformage. Avant la mise à jour, nous avions un plateau manuel qui nécessitait une intervention humaine constante, ce qui entraînait des temps d'arrêt fréquents et une productivité réduite. Avec le nouveau plateau automatisé, le processus est beaucoup plus fluide et efficace.

Le nouveau plateau de formage est contrôlé par un système automatisé qui surveille et ajuste en temps réel la température, la pression et les autres variables critiques nécessaires à la production de pièces thermoformées. Grâce à ce contrôle automatisé, nous pouvons également réduire les déchets de production et améliorer la précision du formage.

En plus de ces améliorations, la mise à jour du plateau de formage peut également réduire les risques sur la santé et la sécurité des travailleurs. Les opérateurs n'ont plus besoin de manipuler manuellement le plateau de formage et les risques de brûlures ou d'autres blessures ont été considérablement réduites.

Dans l'ensemble, la mise à jour du plateau de formage vers une version automatisée a été un choix judicieux pour améliorer notre processus de thermoformage. Elle nous permettra alors d'augmenter la productivité, de réduire les coûts de production et d'améliorer la sécurité d'utilisation de la machine.

### **2 Le choix des composants pour la réalisation d'une machine de thermoformage**

Le choix des matériaux des composants pour la réalisation de la machine a une influence directe sur la performance et la durabilité de la machine. Il dépend de plusieurs facteurs, tels que les exigences du processus de thermoformage, la durabilité requise de la machine, le budget disponible et les considérations environnementales. Voici quelques matériaux utilisés dans la fabrication de notre machine de thermoformage :

## 2.1 Support

Le support d'une machine automatisée de thermoformage peut être fabriqué à partir de différents matériaux en fonction des besoins de performance et de durabilité. Ainsi, nous avons opté pour l'utilisation de l'acier inoxydable en raison de ses propriétés exceptionnelles telle que sa résistance à la corrosion, de sa robustesse et de sa durabilité. Il offre une bonne rigidité et peut résister aux contraintes mécaniques et thermiques associées au thermoformage.

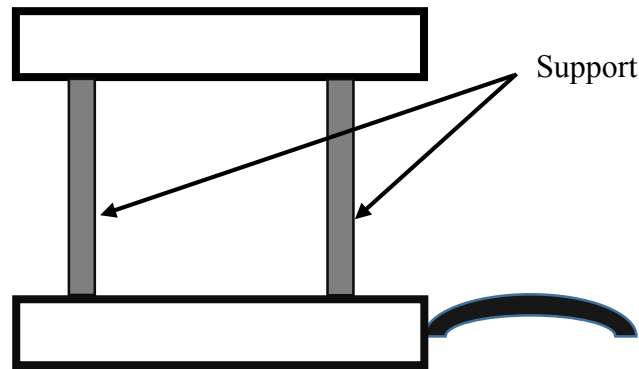


Figure IV.1 : schéma représentant support

## 2.2 Plateau de formage

Différents facteurs influencent le choix du matériau pour le plateau de formage d'une machine de thermoformage, notamment la taille de la machine, le matériau à former et la température de formage nécessaire. Nous avons opté pour l'utilisation de l'imprimante 3D trouvée dans le laboratoire de productique Tlemcen pour fabriquer notre plateau de formage destiné à notre machine de thermoformage.

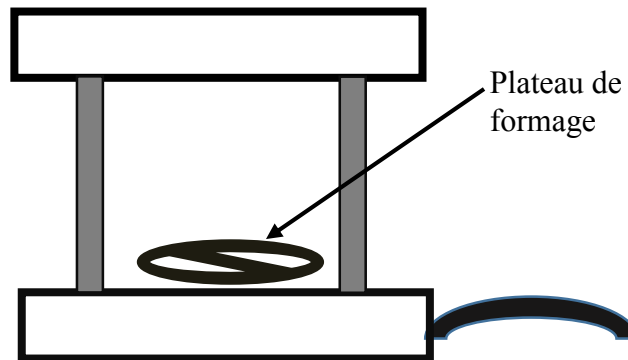


Figure IV.2: schéma représentant plateau de formage

## 2.3 Moule de formage

Le choix du matériau pour le moule de formage dépend de plusieurs facteurs tels que les caractéristiques du matériau à former, la complexité de la pièce à former et les exigences de production. Dans le cas des machines de thermoformage de petite taille, les moules de formage sont généralement fabriqués à partir de matériaux tels que l'aluminium, l'acier inoxydable ou le composite de fibre de verre. Ces matériaux sont privilégiés en raison de leur résistance, de leur durabilité et de leur capacité à résister aux températures élevées du processus de formage.

En plus de leur résistance et de leur durabilité, ces matériaux offrent également une grande précision de formage, ce qui permet d'obtenir des pièces avec des détails complexes et des tolérances serrées. Ils sont capables de maintenir la forme souhaitée pendant le processus de thermoformage, garantissant ainsi la qualité et la précision des pièces formées.

Dans le cadre de notre prototype, notre objectif est de réaliser des formes d'emballage adaptées à différents produits. Pour atteindre cet objectif, nous avons opté pour la fabrication du moule de formage en utilisant des matériaux tels que l'aluminium, l'acier inoxydable ou le composite de fibre de verre. Cela nous permettra d'obtenir des résultats de formage de haute qualité et de produire des emballages qui répondent aux exigences spécifiques de chaque produit.

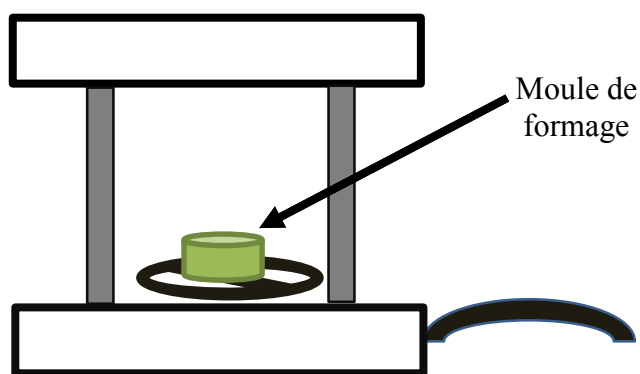


Figure IV.3: schéma représentant moule de formage

#### 2.4 Système de chauffage

Le système de chauffage d'une machine automatisée de thermoformage est généralement fabriqué à partir de matériaux résistants à la chaleur et capables de fournir une répartition uniforme de la chaleur sur la surface de formage. Le type de matériau utilisé pour notre système de chauffage est les résistances électriques : Les résistances électriques, telles que les fils chauffants ou les bandes chauffantes, sont souvent utilisées pour générer la chaleur nécessaire dans le processus de thermoformage. Ces résistances sont généralement fabriquées à partir de matériaux résistifs spéciaux, tels que le nichrome, qui peuvent résister à des températures élevées et produire une chaleur uniforme sur la surface de formage. Ces résistances sont plus répandues en raison de leur efficacité, de leur coût relativement bas et de leur capacité à maintenir une température stable pendant l'impression.

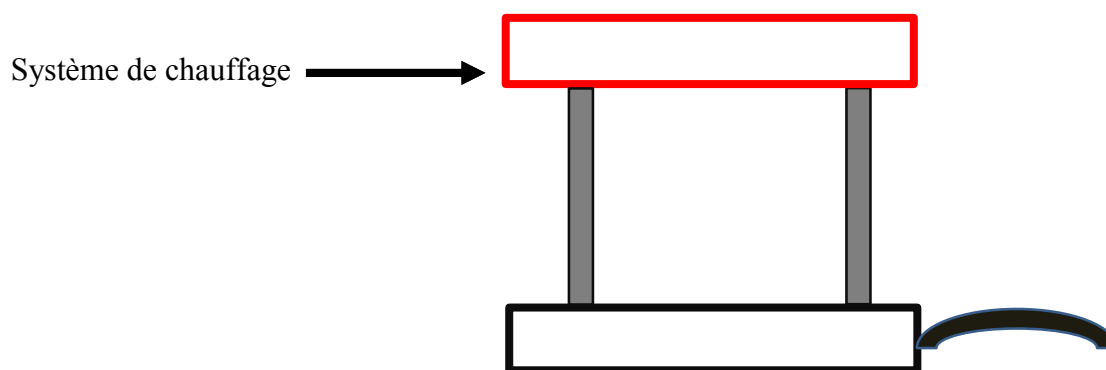


Figure IV.4: schéma représentant système de chauffage

## 2.5 Système de vide

Le système de vide dans une machine de thermoformage automatisée petite est généralement fabriqué à partir de matériaux tels que le plastique, l'acier inoxydable et le caoutchouc, nous avons utilisé un système d'aspiration fait maison pour extraire l'air de la zone de thermoformage.

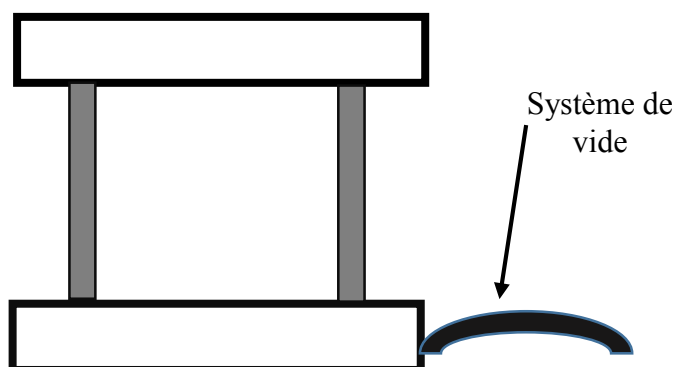


Figure IV.5: schéma représentant système de vide

## 2.6 Contrôles et automatisation

Les machines de thermoformage sont généralement équipées de commandes électroniques pour réguler les paramètres tels que la température, le temps de formage, le vide, etc. Ces commandes permettent d'automatiser le processus et d'assurer une production précise et cohérente. Ces derniers peuvent être réalisés à l'aide de différents composants et matériaux. Voici un aperçu des éléments et des matériaux utilisés :

- Panneau de commande : Le panneau de commande, qui abrite les boutons, les écrans et les interfaces utilisateur, est généralement fabriqué à partir de plastique résistant et durable. Les matériaux tels que le polycarbonate ou l'ABS sont couramment utilisés pour les panneaux de commande.
- Composants électroniques : Les composants électroniques, tels que les cartes de circuit imprimé (PCB), les capteurs (capteur LM35), les actionneurs (moteur pas à pas), sont fabriqués à partir de matériaux tels que le plastique, le métal et la céramique. Les PCB sont généralement fabriquées en fibres de verre recouvertes de cuivre.

- Système de contrôle : Le système de contrôle, comprenant des unités de traitement, des logiciels et des dispositifs de communication, peut être intégré dans un boîtier en plastique ou en métal. Les matériaux utilisés dépendent de la taille, de la complexité et des exigences de protection du système de contrôle.
- Interfaces de communication : Les interfaces de communication, telles que les câbles, les connecteurs, peuvent être composées de matériaux isolants et conducteurs tels que le cuivre, l'aluminium et divers polymères

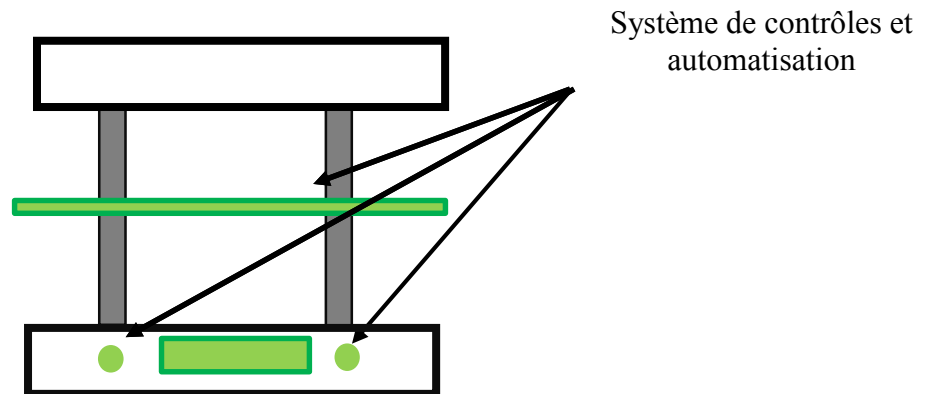


Figure IV.6: Partie contrôle de la machine « MiniForm »

### 3 Présentation des composants clés dans la fabrication de la machine "MiniForm"

Une machine de thermoformage comprend différents composants essentiels qui travaillent en harmonie pour réaliser le processus de thermoformage. Nous vous présentons les différents composants qui ont été utilisés lors de la fabrication de notre machine de thermoformage :

#### 3.1 Carte Arduino

La carte Arduino est un circuit imprimé (PCB) doté d'un microcontrôleur, de ports d'entrées/sorties, de connecteurs et d'autres composants électroniques. Il s'agit d'une plateforme open-source et programmable conçue pour faciliter la création de prototypes et de projets électroniques interactifs. L'Arduino peut être utilisé pour contrôler différents types de périphériques, tels que des moteurs, des LED, des capteurs, des écrans, etc. Sa grande

flexibilité et sa facilité d'utilisation ont contribué à sa popularité auprès des concepteurs, des ingénieurs, des artistes et des amateurs de bricolage électronique.

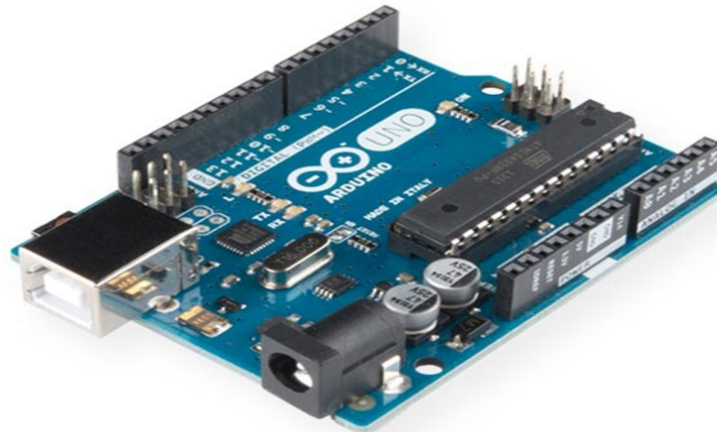


Figure IV.7: Carte Arduino (23)

### 3.2 Logiciel Arduino

Le logiciel Arduino, également connu sous le nom d'IDE Arduino (Integrated Development Environment), est un environnement de programmation spécialement conçu pour développer des applications sur les cartes Arduino. Il fournit un ensemble d'outils et de fonctionnalités pour écrire, compiler et téléverser du code sur une carte Arduino.

Le logiciel Arduino est basé sur le langage de programmation C/C++ et offre une interface conviviale pour les utilisateurs, même ceux qui n'ont pas de connaissances approfondies en programmation. Il comprend un éditeur de code avec des fonctionnalités telles que la coloration syntaxique, l'indentation automatique et l'autocomplétion, ce qui facilite l'écriture du code Arduino.

En utilisant le logiciel Arduino, les utilisateurs peuvent programmer des actions et des interactions entre les composants électroniques connectés à la carte Arduino, tels que des capteurs, des actionneurs, des LED, des moteurs, etc. Le logiciel permet également de gérer les bibliothèques de code, d'effectuer le téléversement (chargement) du code sur la carte Arduino et de surveiller les résultats et les messages de débogage.

En résumé, le logiciel Arduino est un environnement de développement convivial et accessible, spécialement conçu pour la programmation des cartes Arduino, permettant aux utilisateurs de créer facilement des projets interactifs et de contrôler des composants électroniques à l'aide du langage de programmation Arduino.



Figure IV.8: logiciel Arduino (24)

### 3.3 Un moteur pas à pas

Un moteur pas à pas est un type particulier de moteur électrique qui transforme des signaux électriques en mouvement mécanique de manière discrète. Contrairement aux moteurs conventionnels, il effectue des mouvements par incréments précis plutôt que de manière continue. Chaque incrémentation correspond à un angle spécifique de rotation.

Le moteur pas à pas se compose de deux principales parties : le rotor et le stator. Le rotor est la partie mobile qui exécute les mouvements, tandis que le stator est la partie fixe contenant des bobines électromagnétiques.

Le fonctionnement du moteur pas à pas repose sur les principes de l'électromagnétisme. En appliquant des courants séquentiels aux bobines du stator, des champs magnétiques sont générés, attirant le rotor. En modifiant l'ordre d'activation des bobines, on peut faire tourner le rotor dans une direction spécifique. Cela permet un contrôle précis du positionnement et du mouvement du moteur pas à pas.

Les moteurs pas à pas sont largement utilisés dans des applications qui nécessitent un positionnement précis, telles que les imprimantes 3D, les machines à commande numérique, les robots, les équipements de fabrication et les systèmes de positionnement automatisés. Ils offrent un contrôle de mouvement précis, une résolution élevée en termes de positionnement et une grande fiabilité. C'est pourquoi nous avons choisi d'utiliser un moteur pas à pas pour réaliser notre machine de thermoformage automatisée.



Figure IV.9 : moteur pas à pas (25)

### 3.4 Un afficheur LCD

Un afficheur LCD (Liquid Crystal Display) est un type d'écran utilisé pour afficher du contenu textuel ou graphique. Il est largement utilisé dans de nombreux appareils électroniques tels que les téléviseurs, les smartphones, les montres, les calculatrices, les panneaux de contrôle, etc.

L'afficheur LCD se compose de plusieurs couches, dont deux polariseurs et un matériau à cristaux liquides situé entre eux. Les cristaux liquides réagissent à des signaux électriques pour contrôler la transmission de la lumière à travers l'écran.

Lorsqu'une tension est appliquée aux pixels individuels de l'afficheur LCD, les cristaux liquides se réalignent pour bloquer ou laisser passer la lumière en fonction des

informations à afficher. Cela crée des caractères, des images ou des graphiques visibles à l'écran.

Les afficheurs LCD offrent de nombreux avantages, tels qu'une faible consommation d'énergie, une bonne lisibilité même en plein soleil, une durabilité et une grande flexibilité pour afficher différents types de contenu. Ils sont souvent utilisés pour afficher des informations statiques ou en temps réel dans de nombreux appareils électroniques du quotidien.



Figure IV.10 : afficheur LCD (26)

### 3.5 Un capteur de température

Le capteur de température LM35 est un capteur électronique de précision utilisé pour mesurer la température ambiante. Il se distingue par sa facilité d'utilisation et sa précision élevée.

Le capteur LM35 fournit une tension de sortie linéaire et directement proportionnelle à la température mesurée, ce qui facilite son intégration avec d'autres composants électroniques. Il est capable de mesurer des températures dans une plage allant de  $-55^{\circ}\text{C}$  à  $+150^{\circ}\text{C}$ , ce qui en fait un choix polyvalent pour de nombreuses applications nécessitant une surveillance et un contrôle précis de la température, tels que les systèmes de climatisation, les dispositifs de refroidissement, les thermostats, les enregistreurs de données de température et notre machine de thermoformage, etc.

Le capteur LM35 est largement utilisé dans le domaine de l'électronique et de l'automatisation pour garantir des mesures fiables et précises de la température.



Figure IV.11 : Capteur de température LM35 (27)



#### 4 Construction de la machine automatisée : Processus et défis

La construction de notre machine de thermoformage automatisé "MiniForm" impliquait plusieurs étapes et présentait certains défis. Voici un processus général ainsi que certains des défis couramment rencontrés :

- Conception préliminaire : Nous avons déterminé les exigences spécifiques de notre machine de thermoformage automatisé, telles que la taille des pièces à thermoformer, les matériaux utilisés, etc. En fonction de ces critères, Nous avons réalisé des croquis et des plans préliminaires pour la structure et les composants de base.

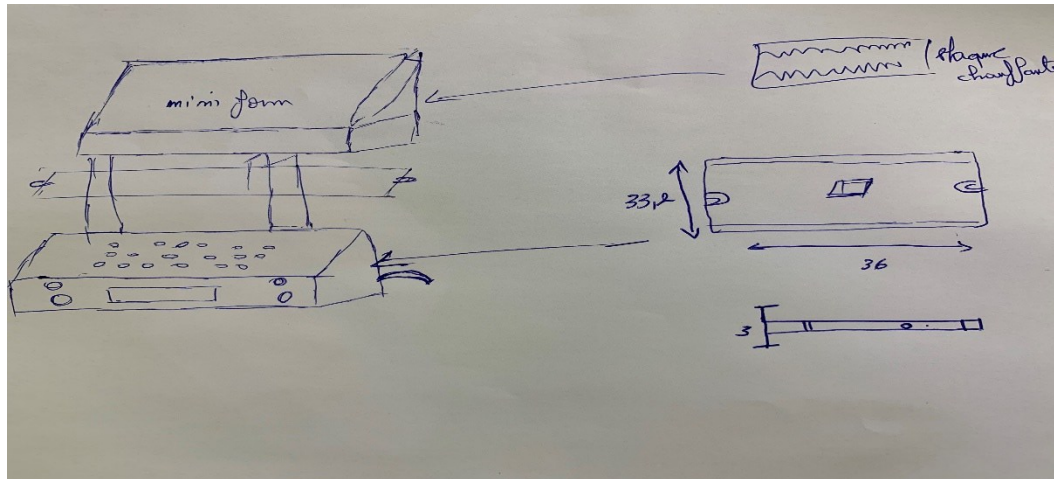


Figure IV .12 : croquis machine de thermoformage

- Conception détaillée : À partir des plans préliminaires, nous avons effectué une conception détaillée de chaque composant de la machine, tels que la structure mécanique, les systèmes de chauffage, les systèmes de refroidissement, les mécanismes de mouvement, les capteurs, etc.

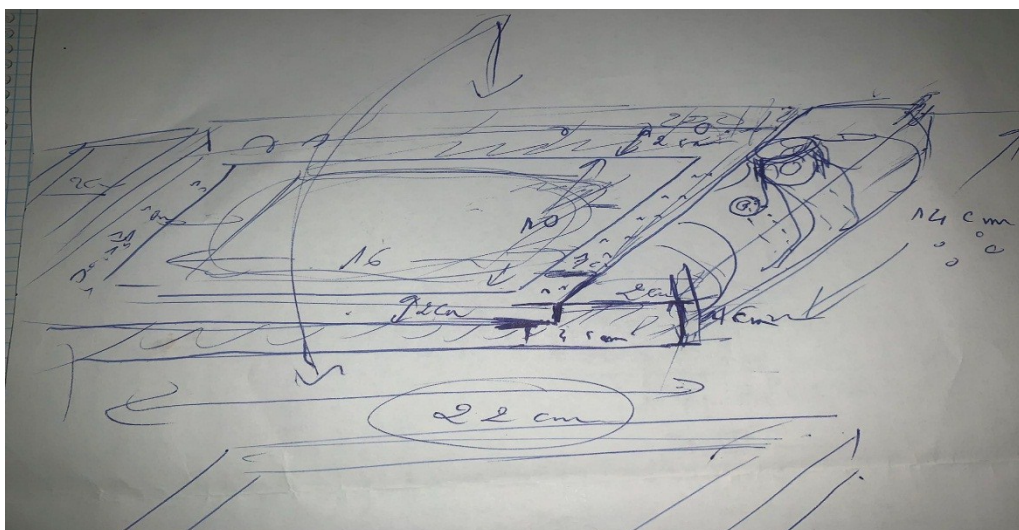


Figure IV .13 : croquis machine de plateau e fromage

- Conception sur SolidWorks : À partir des plans détaillés, nous avons effectué une conception des composants de la machine, tels que le plateau de formage automatisée, le cadre et la porte.

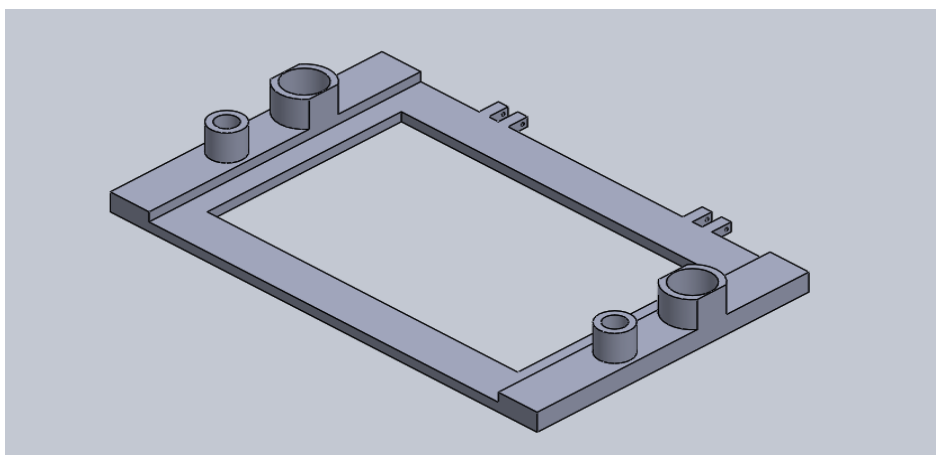


Figure IV.14 : Conception sous SolidWorks de plateau de formage automatisée (le cadre)

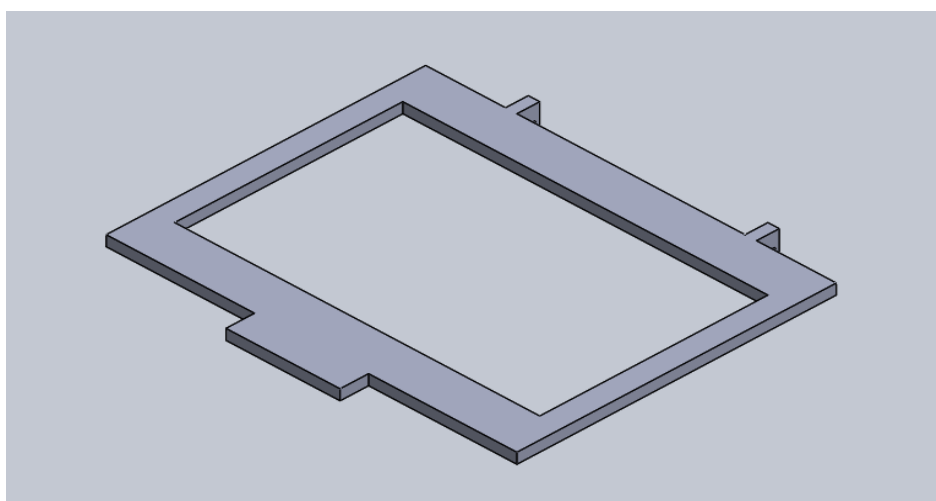


Figure IV.15 : Conception sous SolidWorks de plateau de formage automatisée (la porte)

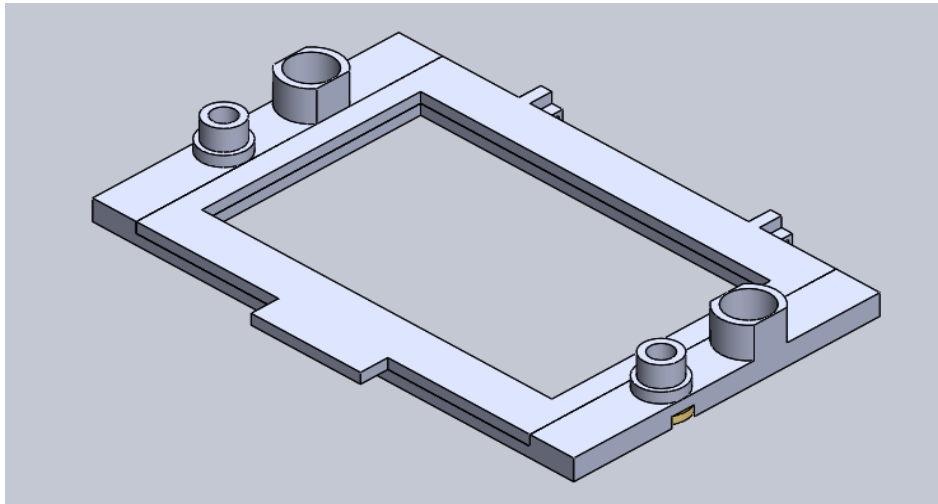


Figure IV.16 : Conception sous SolidWorks de l'assemblage du plateau de formage automatisée

- L'impression 3D du plateau de formage : Nous avons utilisé l'impression 3D pour créer des plateaux de formage sur mesure pour nos machines de thermoformage. Cette technologie nous a permis d'obtenir des géométries complexes et des détails précis tout en garantissant durabilité et résistance. Cette approche innovante a réduit les coûts et ouvert de nouvelles perspectives dans le domaine du thermoformage.



Figure IV.17 : impression 3D de plateau de formage automatisée

- Sélection des composants : Nous avons identifié les différents composants nécessaires pour la machine, tels que les systèmes de chauffage, systèmes d'aspiration, les supports, les mécanismes de mouvement (comme les moteurs et les actionneurs), les capteurs et les contrôleurs, etc.

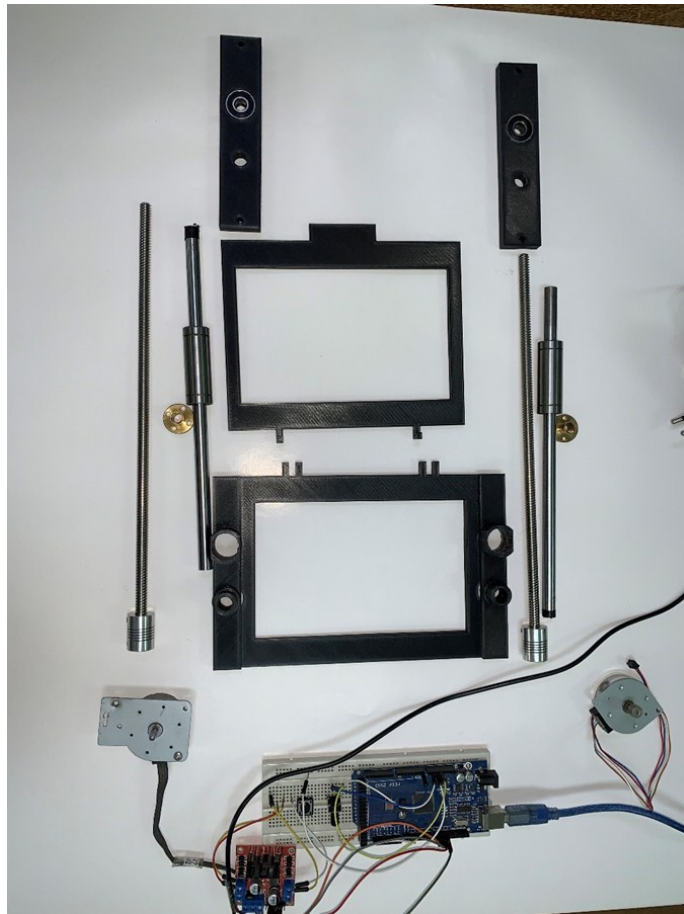


Figure IV .18 : composants utilisée pour la construction machine

- Assemblage mécanique : Nous avons monté les différentes parties de la machine en suivant les plans de conception. Nous nous sommes assuré que les composants étaient solidement fixés et que les mouvements nécessaires étaient fluides et précis.



Figure IV .19 : Assemblage des pièces

- Intégration des systèmes de chauffage et de refroidissement : Nous avons installé les systèmes de chauffage pour ramollir les feuilles de plastique et les moules de formage pour donner la forme désirée. Nous avons également prévu des mécanismes de refroidissement pour solidifier les pièces formées.

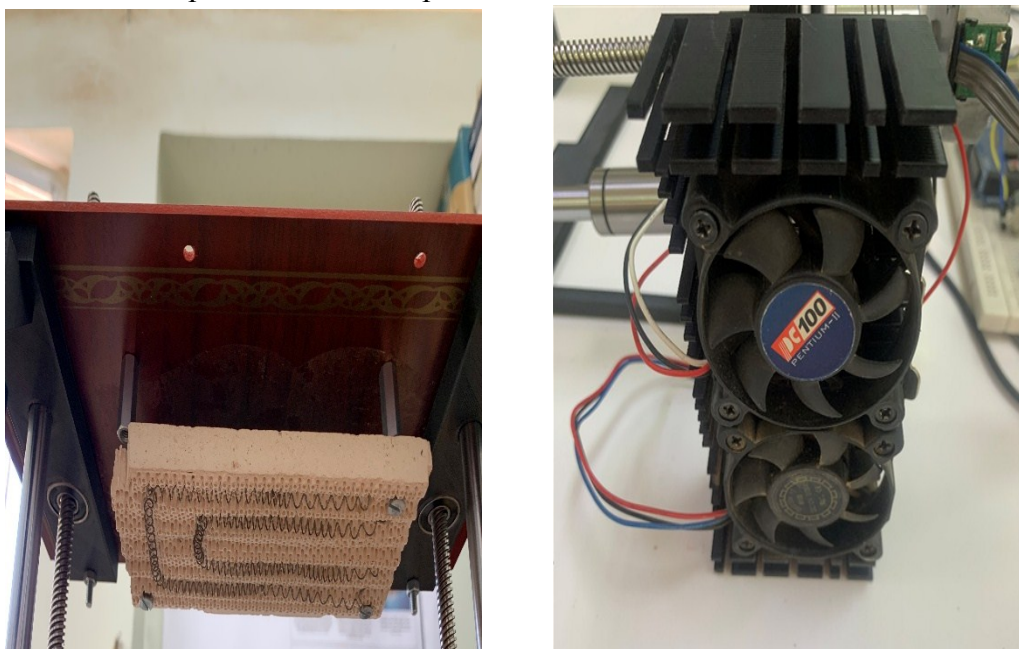


Figure IV .20 : Intégration des systèmes de chauffage et de refroidissement

- Systèmes de mouvement automatisés : Nous avons intégré les moteurs, les actionneurs et les systèmes de contrôle nécessaires pour automatiser les mouvements de la machine, tels que le positionnement des feuilles de plastique, le formage des pièces, etc.



Figure IV .21 : Systèmes de mouvement automatisés

- Installation du capteur : Nous avons placé un capteur pour surveiller et contrôler la température afin d'assurer un processus de thermoformage précis et stable.

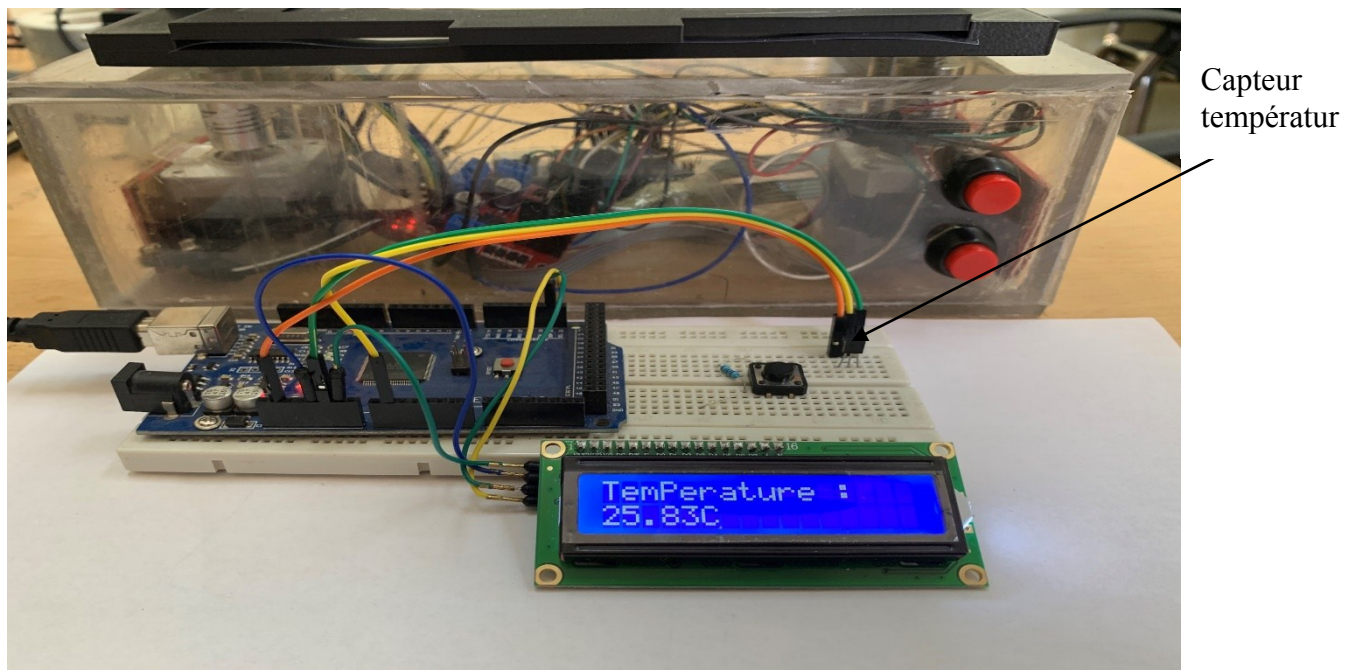


Figure IV .22 : Installation du capteur

## **5 Assemblage et intégration des composants de la machine automatisée**

L'assemblage et l'intégration des composants de la machine de thermoformage automatisé nécessitent une attention méticuleuse pour garantir un fonctionnement fluide et fiable. Voici les étapes générales pour l'assemblage et l'intégration des composants :

- Préparation de l'espace de travail : Nous avons assuré la préparation d'un espace de travail propre et organisé, avec tous les outils et équipements nécessaires à portée de main. Nous avons également veillé à avoir les plans de conception détaillés et les schémas électriques à disposition.
- Montage de la structure mécanique : Nous avons procédé à l'assemblage de la structure mécanique de base de la machine en utilisant des techniques d'assemblage appropriées. Nous avons suivi les plans de conception pour garantir que chaque composant est correctement positionné.
- Installation des moteurs et des actionneurs : Nous avons installé les moteurs nécessaires pour les mouvements automatisés de la machine. Nous nous sommes assuré qu'ils sont solidement fixés à la structure et correctement alignés pour permettre les mouvements souhaités.
- Connexion des câbles électriques : Nous avons effectué le câblage électrique en connectant les moteurs, les actionneurs, les capteurs et les autres composants électriques aux contrôleurs et aux panneaux de commande. Nous avons respecté les schémas électriques, utilisé des câbles appropriés et assuré une isolation correcte des connexions.
- Installation des systèmes de chauffage et de refroidissement : Nous avons installé les systèmes de chauffage pour ramollir les feuilles de plastique et les moules de formage afin de leur donner la forme désirée. Nous avons également intégré les systèmes de refroidissement pour solidifier les pièces formées. Nous nous sommes assuré que les systèmes sont correctement positionnés et bien connectés aux sources de chaleur et de refroidissement.
- Intégration des capteurs et des contrôleurs : Nous avons positionné les capteurs nécessaires pour surveiller et contrôler les différentes variables du processus de thermoformage, telles que la température, etc. Nous les avons connectés aux contrôleurs appropriés et avons configuré les paramètres de contrôle en conséquence.
- Vérification des connexions et des réglages : Une fois que tous les composants ont été installés, nous avons minutieusement vérifié toutes les connexions électriques et mécaniques pour nous assurer de leur solidité et de leur bon fonctionnement. Nous avons effectué les réglages nécessaires pour aligner les mouvements et les paramètres selon les spécifications.
- Tests : Nous avons mis la machine sous tension et effectué des tests pour vérifier chaque fonctionnalité et chaque mouvement. Nous avons identifié et résolu les problèmes éventuels tels que les dysfonctionnements, les erreurs de configuration ou les défauts de composants.

- Optimisation et ajustements finaux : Une fois les tests initiaux réussis, nous avons essayé d'optimiser les performances de la machine en ajustant les paramètres de contrôle, les mouvements et les températures. Nous nous sommes assuré que la machine fonctionne de manière fiable et efficace.
- Validation et mise en service : Après avoir effectué tous les ajustements nécessaires, nous avons validé le bon fonctionnement de la machine de thermoformage automatisée. Nous l'avons mise en service dans son environnement opérationnel réel et avons procédé aux ajustements finaux pour assurer un fonctionnement optimal.

## 6 Programmation et configuration de la machine automatisée

La programmation et la configuration de la machine de thermoformage automatisé impliquent la mise en place du logiciel et des paramètres nécessaires pour contrôler et superviser le fonctionnement de la machine. Voici les étapes générales pour programmer et configurer une telle machine :

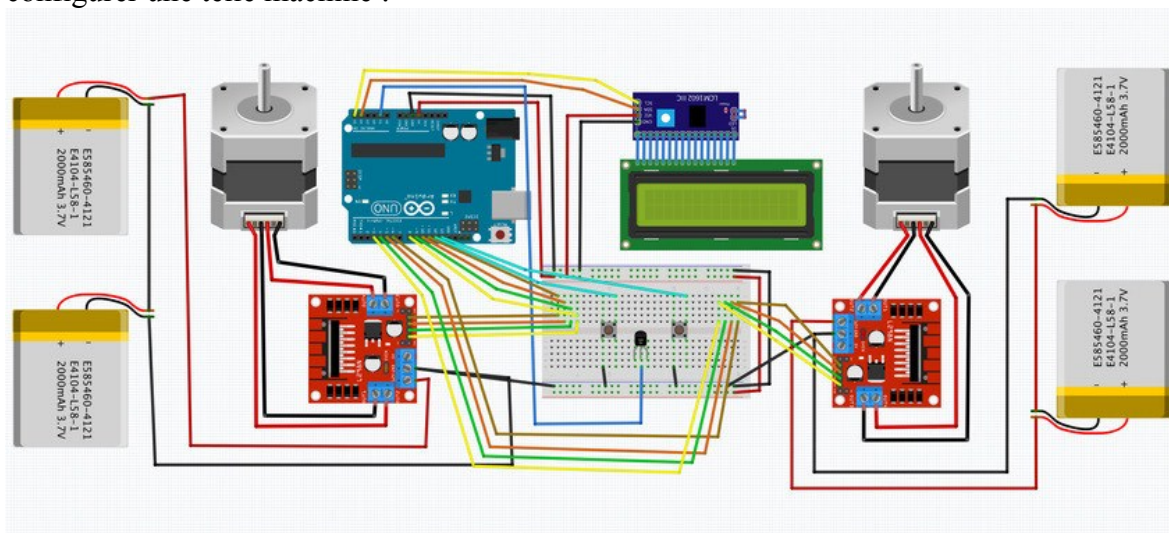


Figure IV .23 : schéma électrique sur ffitzing

## 7 Tests et optimisation de la machine automatisée

Les tests et l'optimisation de la machine de thermoformage automatisé sont essentiels pour s'assurer de son bon fonctionnement et pour améliorer ses performances. Voici quelques étapes à suivre pour effectuer ces tests et optimisations :

- Test des fonctionnalités de base : Nous avons procédé à la vérification de chaque fonctionnalité de base de la machine fonctionne correctement, comme le positionnement des feuilles de plastique, le formage des pièces, etc. avons effectué ces tests en conditions réelles pour valider les mouvements et les opérations de base.





Figure VI.24 : exemple de teste de positionnement des feuilles de plastique

- Vérification des paramètres de contrôle : Nous vérifions les paramètres de contrôle tels que la température, la pression, les temps de chauffage et de refroidissement, les vitesses de mouvement, etc. Nous nous assurons que les paramètres sont correctement configurés pour obtenir les résultats souhaités. Si nécessaire, nous ajustons ces paramètres pour optimiser les performances.
- Vérification des systèmes de chauffage et de refroidissement : Nous vérifions que les systèmes de chauffage atteignent les températures requises pour ramollir les feuilles de plastique de manière uniforme et contrôlée. Nous vérifions également que les systèmes de refroidissement refroidissent efficacement les pièces formées. Nous optimisons les paramètres de chauffage et de refroidissement si nécessaire.
- Test de vitesse et de productivité : Nous évaluons la vitesse de production de la machine en fonction de nos objectifs. Nous mesurons le temps nécessaire pour le formage et l'éjection des pièces et le comparons aux spécifications requises.

- Optimisation des réglages et des paramètres : Nous nous basons sur les résultats des tests pour apporter les ajustements nécessaires aux réglages et aux paramètres de la machine. Nous modifions les algorithmes de contrôle, les vitesses de mouvement, les temps de chauffage et de refroidissement, etc., afin d'optimiser les performances globales de la machine.
- Mise en service et ajustement final : Une fois que la machine a été testée avec succès, nous avons procédé à sa mise en service et à des ajustements finaux. Nous avons veillé à ce que tous les composants et les systèmes fonctionnent de manière optimale et répondent aux exigences spécifiques.

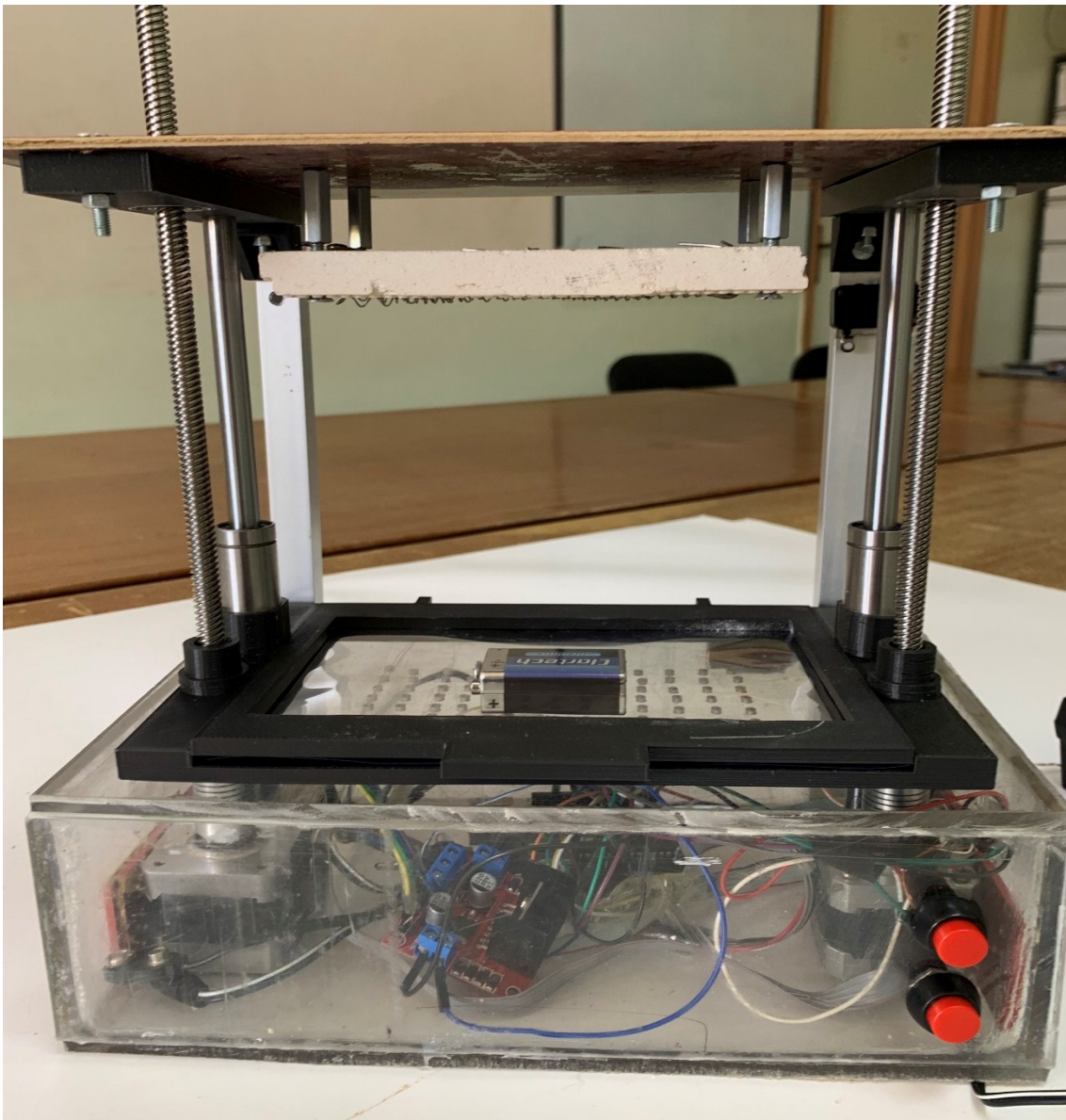


Figure IV .25 : Mise en service et ajustement final

## **8 Défis coudefisrants lors de la construction de la machine de thermoformage automatisé**

La construction d'une machine de thermoformage automatisé est un processus complexe qui présente plusieurs défis à relever. Parmi ces défis, on peut citer :

- Complexité mécanique : La construction d'une machine de thermoformage automatisé nécessite des compétences en ingénierie mécanique avancées pour concevoir et assembler les différents composants de manière efficace et fiable.
- Contrôle précis de la température : Le contrôle précis de la température est essentiel pour obtenir des résultats de thermoformage cohérents. La sélection et l'intégration de systèmes de chauffage et de refroidissement appropriés peuvent être un défi technique.
- Mouvements synchronisés : L'automatisation des mouvements nécessite une synchronisation précise des différents systèmes de mouvement pour garantir un formage précis et sans défauts.
- Sécurité : Les machines de thermoformage automatisé peuvent impliquer des éléments chauffants, des mouvements rapides et d'autres processus potentiellement dangereux. Il est essentiel de prendre en compte les mesures de sécurité appropriées lors de la conception et de la construction de la machine.
- Coûts : La construction d'une machine de thermoformage automatisé peut être coûteuse en raison des composants spécialisés, de la technologie avancée et des matériaux de qualité nécessaires. Il est important de gérer les coûts de manière efficace en recherchant des alternatives abordables, en optimisant l'utilisation des ressources et en évaluant les options de financement disponibles.

## **9 Analyse des résultats de la réalisation de la machine automatisé**

L'analyse des résultats de la réalisation de notre machine de thermoformage automatisé est une étape cruciale pour évaluer son fonctionnement, identifier nos points forts et nos points faibles, et prendre des décisions pour améliorer ses performances. Voici les étapes générales que nous suivons pour effectuer cette analyse des résultats :

1. Collecte des données : Nous rassemblons toutes les données pertinentes liées à la performance de notre machine de thermoformage automatisé. Cela comprend des mesures des temps de production, des mesures de précision, des erreurs de formage, etc. Nous veillons à collecter des données fiables et représentatives.
2. Analyse des performances : Nous examinons les données collectées pour évaluer les performances globales de la machine. Nous identifions les aspects qui répondent aux spécifications et ceux qui nécessitent des améliorations. Nous analysons les tendances, les variations et les écarts par rapport à nos objectifs.
3. Identification des points forts et des points faibles : Nous identifions les points forts de notre machine, c'est-à-dire les aspects où elle excelle et qui sont conformes aux exigences. Nous identifions également les points faibles, les domaines nécessitant des améliorations ou les problèmes récurrents susceptibles d'affecter les performances.

4. Évaluation des performances par rapport aux objectifs : Nous comparons les résultats obtenus avec les objectifs que nous avons initialement fixés pour notre machine de thermoformage automatisé. Nous déterminons dans quelle mesure les objectifs ont été atteints et identifions les écarts éventuels. Cela nous aide à évaluer l'efficacité de la machine et à déterminer si des ajustements sont nécessaires.
5. Proposition de solutions : Sur la base de l'analyse des résultats et de l'identification des causes profondes, nous proposons des solutions pour résoudre les problèmes identifiés et améliorer les performances de la machine. Cela peut impliquer des ajustements de réglages, des modifications de conception, des améliorations de processus, des formations supplémentaires, etc.
6. Plan d'action et mise en œuvre : Nous élaborons un plan d'action détaillé pour mettre en œuvre les solutions proposées. Nous identifions les responsables, les échéanciers et les ressources nécessaires pour effectuer les modifications ou les ajustements requis. Nous nous assurons de documenter le plan d'action pour référence future.
7. Suivi et évaluation : Nous mettons en œuvre les solutions identifiées et surveillons attentivement les résultats. Nous suivons les indicateurs clés de performance (KPI) pertinents pour évaluer l'impact des modifications apportées. Nous effectuons un suivi régulier et ajustons nos actions si nécessaires pour améliorer continuellement les performances de notre machine.

## **10 Considérations techniques lors de la -réalisation de la machine automatisée**

Lors de la réalisation de la machine de thermoformage automatisé, il est essentiel de prendre en compte plusieurs considérations techniques pour assurer son bon fonctionnement et sa performance. Voici quelques aspects techniques à prendre en compte :

- Conception mécanique : La conception mécanique de la machine doit être soigneusement réalisée en prenant en compte les mouvements nécessaires pour le positionnement des feuilles de plastique, le formage des pièces, l'éjection des pièces formées, etc. Il faut s'assurer que les composants mécaniques, tels que les actionneurs, les guides, les systèmes de mouvement, sont robustes, précis et adaptés aux charges et aux contraintes prévues.
- Systèmes de contrôle : Les systèmes de contrôle de la machine doivent être efficaces et fiables. Ils doivent permettre de réguler la température, la pression, les temps de chauffage et de refroidissement, les vitesses de mouvement, etc. Des capteurs appropriés doivent être utilisés pour mesurer les paramètres clés du processus de thermoformage et permettre un contrôle précis.
- Automatisation et intégration des composants : L'automatisation de la machine de thermoformage doit être soigneusement planifiée et mise en œuvre. Les composants utilisés dans l'automatisation, tels que les actionneurs, les moteurs, les capteurs, doivent être intégrés de manière à assurer une coordination précise des mouvements et des opérations. Une attention particulière doit être portée à l'interfaçage entre les

différents composants pour assurer une communication et une synchronisation efficaces.

- Systèmes de chauffage et de refroidissement : Les systèmes de chauffage doivent être capables d'atteindre les températures requises pour ramollir les feuilles de plastique de manière uniforme et contrôlée. Des éléments chauffants appropriés, tels que des résistances, des lampes infrarouges, doivent être utilisés en fonction des exigences du processus de thermoformage. De même, les systèmes de refroidissement doivent être dimensionnés pour refroidir les pièces formées efficacement et rapidement.
- Sécurité : La sécurité est une préoccupation majeure lors de la réalisation de toute machine automatisée. Les dispositifs de sécurité, tels que les capteurs de présence, les barrières de sécurité, les arrêts d'urgence, doivent être installés pour prévenir les accidents et protéger les opérateurs. Une analyse des risques doit être effectuée pour identifier et atténuer les dangers potentiels.
- Maintenance et entretien : Prévoir des accès et des dispositifs de maintenance pour faciliter l'entretien et la réparation de la machine. Les composants sujets à l'usure doivent être facilement accessibles et remplaçables.

## **Conclusion**

L'évaluation des performances d'une machine de thermoformage est essentielle pour mesurer son efficacité et identifier les domaines nécessitant des améliorations. En prenant en compte des facteurs tels que la qualité du formage, la vitesse de production, les temps d'arrêt, la consommation d'énergie et la maintenance, on peut améliorer la productivité et réduire les coûts. Pour optimiser les performances, il est recommandé d'ajuster les réglages, d'automatiser les processus, de former le personnel, de planifier une maintenance préventive, d'analyser les données et de suivre les avancées technologiques.

En continuant à évaluer et à améliorer la machine, on peut obtenir une meilleure qualité de formage, une augmentation de la productivité et une meilleure compétitivité sur le marché.

# Conclusion générale

En conclusion, la conception et la réalisation d'une machine automatisée de thermoformage représentent une avancée significative dans le domaine de l'industrie manufacturière. Ce mémoire a exploré les différentes étapes impliquées dans le processus de conception, en mettant l'accent sur la conception mécanique, la sélection des composants, la programmation et la mise en œuvre des systèmes de contrôle.

L'étude a démontré que l'automatisation du thermoformage présente de nombreux avantages, tels que l'amélioration de la productivité, la réduction des coûts de main-d'œuvre, l'augmentation de la qualité des produits et la diminution des erreurs humaines. La machine automatisée permet également d'optimiser les temps de cycle, d'augmenter la flexibilité de production et de répondre aux exigences croissantes du marché.

Cependant, il est important de souligner que la conception et la réalisation d'une telle machine ne sont pas sans défis. Des contraintes techniques, économiques et réglementaires doivent être prises en compte. La coordination entre les différents domaines d'expertise, tels que la mécanique, l'électronique et l'informatique, est également essentielle pour assurer le bon fonctionnement de la machine.

D'autre part, il reste des perspectives d'amélioration pour cette machine, notamment l'optimisation de certains paramètres de fonctionnement tels que la température et la pression, ainsi que l'intégration de nouvelles fonctionnalités pour répondre aux besoins spécifiques des clients.

Dans l'ensemble, ce mémoire a permis d'approfondir nos connaissances sur le thermoformage automatisé et d'explorer les différentes considérations liées à la conception et à la réalisation d'une machine automatisée. Il constitue une base solide pour de futures recherches et développements dans ce domaine. L'automatisation du thermoformage ouvre la voie à des améliorations continues dans l'industrie manufacturière, en favorisant l'efficacité, la qualité et la compétitivité des entreprises.

# Références

1. Production. *Production marchande et non marchande*. s.l. : "Toupiictionnaire".
2. SAOUDI, B., & REMITA. *Résolution du problème d'ordonnement conjoint de la production et de la maintenance de type Flow Shop*. Tlemcen : s.n.
3. Système. *wikipedia*. [En ligne] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Syst%C3%A8me>.
4. Processus productif. *economy-pedia*. [En ligne] <https://economy-pedia.com/11038698-productive-process>.
5. OULMAS, Y , YAHI,F. *L'analyse du processus de production au sein d'une entreprise Cas : Entreprise Algérienne de Textile Industrielle et*. TIZI-OUZOU : s.n., 2016-2017. Vol. 142, 11.
6. Classification des systèmes de production. *Thpanorama*. [En ligne] 2019. <https://www.thpanorama.com/blog/cultura-general/clasificacin-de-los-sistemas-de-produccion-caractersticms-destacadas.html>.
7. Guide des procédés de fabrication avec les plastiques. *formlabs*. [En ligne] <https://formlabs.com/fr/blog/guide-procedes-fabrication-plastiques/>.
8. Injection Molding. 2018.
9. *simulation numérique d'injection soufflage*. Bellet, Michel. 01 juillet 2002, Technique de l'ingénieur .
10. Injection soufflage. *prpcreation*. [En ligne] 2022. <https://www.prpcreation.com/realiser-vos-produits/extrusion-soufflage/> .
11. L'extrusion, qu'est-ce que c'est ? *polyvia formation*. [En ligne] <https://www.polyvia-formation.fr/la-plasturgie-cest-quoi/lextrusion-quest-ce-que-cest>.
12. extrusion-soufflage. *prpcreation*. [En ligne] <https://www.prpcreation.com/realiser-vos-produits/extrusion-soufflage/>.
13. Roquebert, B. Ro Extrusion-gonflage de films de polyéthylène en mousse pour application à une géomembrane : détermination des paramètres optimaux du procédé. *semantic scholar*. [En ligne] 2014. <https://www.semanticscholar.org/paper/Extrusion-gonflage-de-films-de-poly%C3%A9thyl%C3%A8ne-en-pour-Roquebert/83975be996b95c93ab76a867bf7278574f145a46>.
14. Les 3 principales technologies en plasturgie. *revoluplast*. [En ligne] 15 janvier 2018. <https://www.revoluplast.com/fr/3-principales-technologies-plasturgie/>.
15. Agency, Charlie. *Le procédé de fabrication par rotomoulage*. 10/03/2013 .
16. Le thermoformage, c'est quoi ? *polyvia-formation*. [En ligne] <https://www.polyvia-formation.fr/la-plasturgie-cest-quoi/le-thermoformage-cest-quoi>.

17. Guide du thermoformage. *formlabs*. [En ligne] 10 janvier 2022. <https://formlabs.com/fr/blog/thermoformage/>.
18. Chapitre III : Autres Procédés de Mise en Forme . *III- Thermoformage*. oran , Génie mécanique, Algérie : s.n., 23 avril 2020.
19. Wikipédia en Français. *fr-academic*. [En ligne] 2010. <https://fr-academic.com/dic.nsf/frwiki/1626844>
20. MAINE, Willy. *thermoformage d'une tasse à café*. 2011.
21. Arrouk, Khaled. *Techniques de conception assistée par ordinateur (CAO) pour la caractérisation de*. Clermont Ferrand, France : Université Blaise Pascal - Clermont Ferrand II, 2012. Vol. 275, 29.
22. Ferroudji, Fateh. *CONCEPTION ET OPTIMISATION EN DYNAMIQUE FORCÉE D'UN NOUVEAU PROTOTYPE DE SYSTÈME DE SUIVEUR SOLAIRE À DEUX AXES*. 2015.
23. Qu'est-ce que Arduino ? *Positron-libre* . [En ligne] <https://www.positron-libre.com/electronique/arduino/arduino.php>.
24. logo Arduino. *wikipedia*. [En ligne] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Arduino>.
25. Moteur pas pas. *wikipedia*. [En ligne] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Moteur\\_pas\\_%C3%A0\\_pas](https://fr.wikipedia.org/wiki/Moteur_pas_%C3%A0_pas).
26. Afficheur LCD 16 x 2 + Adaptateur I2C. *powertech-dz*. [En ligne] 2023. <https://powertech-dz.net/products/single/afficheur-lcd-16-x-2-adaptateur-i2c-vente-composants-electronique-blida-algerie-664>.
27. LM35 capteur de température TO-92. *tikno.edutech.dz*. [En ligne] 2023. <https://tikno.edutech.dz/products/LM35-capteur-de-temperature-TO-92-p491663899>.
28. Charlie Agency. Le procédé de fabrication par rotomoulage. *Le coin des techniciens et des bricoleurs*. [En ligne] 10 03 2013. <https://www.padlstore.com/blog/le-coin-du-bricoleur/le-procede-de-fabrication-par-rotomoulage.html>.
29. Joëlle Bonenfant, Jean Lacroix. La production. [En ligne] 05 2016. <https://www.lefrancaisdesaffaires.fr/wp-content/uploads/2016/05/production.pdf>.
30. Clermont, Thibaut. Business Model Canvas : les ressources clés. *Le Coin des Entrepreneurs*. [En ligne] 18 mai 2021. <https://www.lecoindesentrepreneurs.fr/business-model-canvas-les-ressources-cles/>.
31. définition - Systeme. *sensagent*. [En ligne] <https://dictionnaire.sensagent.com/Systeme/fr-fr/#anchorLittre>.
32. Appwapp, Musana. Procédés de transformation. *plasti competences*. [En ligne] 8 mars 2023. <https://www.plasticompetences.ca/?s=procedes+de+transformation>.



33. Qu'est-ce que l'injection plastique ? *keyence*. [En ligne] <https://www.keyence.fr/ss/products/measure-sys/machining/injection-molding/about.jsp#:~:text=Proc%C3%A9d%C3%A9%20d'injection%20plastique,-Au%20d%C3%A9but%20du&text=Le%20mat%C3%A9riau%20est%20inject%C3%A9%20via,la%20pi%C3%A8ce%20moul%C3%A9e%20est%20%C3%A9j.>
34. slim, chouchene. Chapitre V Soufflage des thermoplastiques 1. NJECTION soufflage 2. EXTRUSION soufflage. *choucheneslim files wordpress*. [En ligne] 12 mai 2020. [https://choucheneslim.files.wordpress.com/2020/05/chapitre-ii-soufflage-des-thermoplastiques\\_2020\\_s2-etudiants.pdf](https://choucheneslim.files.wordpress.com/2020/05/chapitre-ii-soufflage-des-thermoplastiques_2020_s2-etudiants.pdf).
35. Colin, Hervé. Quelles sont les 5 étapes de l'extrusion soufflage ? *anvi plasturgie*. [En ligne] 9 juil 2020 . <https://blog.anviplasturgie.fr/5-etapes-de-extrusion-soufflage>.
36. Brydson, J. A. *Plastics Materials (7th edition)*. s.l. : Butterworth-Heinemann., 1999.
37. Schwarzl, F. R. *Handbook of Plastics Technologies: The Complete Guide to Properties and Performance (2nd edition)*. s.l. : Hanser Publications., 2013.
38. Brydson, J. A. *Plastic Materials (8th edition)*. s.l. : Butterworth-Heinemann, 2017.
39. Petrie, E. M. *Handbook of Thermoplastic Piping System Design (2nd edition)*. s.l. : William Andrew., 2012 .
40. Liu, J et Wong, C. *Thermoforming of Single and Multilayer Laminates: Plastic Films Technologies, Testing, and Applications*. 2010.
41. Rosato, D. V., Rosato, M. G., & Rosato, D. V. *Injection Molding Handbook*. 2001.
42. *Thermoforming Quarterly Journal* .
43. *Thermoforming Industry Association (TIA)* . [En ligne] <https://www.thinkthermoforming.com/>.
44. *Modern Plastics Worldwide* . [En ligne] <https://www.modernplasticsworldwide.com/>.
45. *Society of Plastics Engineers Europe (SPE Europe)* . [En ligne] <https://www.spe-europe.org/>.
46. *Thermoforming Division of SPE* . [En ligne] <https://thermoformingdivision.com/>.
47. *Plastics News*. [En ligne] <https://www.plasticsnews.com/>.
48. *Plastics Today* . [En ligne] <https://www.plasticstoday.com/>.
49. *Plastics Technology* . [En ligne] <https://www.ptonline.com/>.
50. *Society of Plastics Engineers (SPE)* . [En ligne] <https://www.4spe.org/>.

51. Schwarzl, F. R. Handbook of Plastics Technologies. *The Complete Guide to Properties and Performance (2nd edition)*. 2013.
52. Iuliano, L. Advanced Manufacturing and Sustainable Logistics. *8th International Heinz Nixdorf Symposium*. 2014.
53. Petrie, E. M. *Handbook of Thermoplastic Piping System Design (2nd edition)*. 2012.
54. Landtwin, Silke. *Save 50% Electricity when Thermoforming – is that Possible?* s.l. : [https://www.leister.com/en/Stories/2023-02-13-Thermoforming-Expertise?keyword=thermoforming&device=c&network=g&matchtype=b&campaignid=19733436653&devicemodel=&placement=&creative=649174777438&adposition=&adtype=&gclid=CjwKCAjw36GjBhAkEiwAKwIWyed0mBb8L\\_CgS](https://www.leister.com/en/Stories/2023-02-13-Thermoforming-Expertise?keyword=thermoforming&device=c&network=g&matchtype=b&campaignid=19733436653&devicemodel=&placement=&creative=649174777438&adposition=&adtype=&gclid=CjwKCAjw36GjBhAkEiwAKwIWyed0mBb8L_CgS), 13 fevrier 2023.
55. [En ligne] <https://docplayer.es/4870462-Leccion-12-plasticos-otras-tecnicas-de-conformado-1-tecnicas-basadas-en-la-extrusion-1-1-introduccion.html>
56. MAINE, Willy. *Le Thermoformage d'un tase à café*. 2011.
57. injection molding . *introductuin to machining* . [En ligne] <https://www.keyence.com/ss/products/measure-sys/machining/injection-molding/>.
58. Chapitre III : Autres Procédés de Mise en Forme. *elearning.univ-usto*. [En ligne] [https://elearning.univ-usto.dz/pluginfile.php/84153/mod\\_resource/content/1/Chapitre%203.pdf](https://elearning.univ-usto.dz/pluginfile.php/84153/mod_resource/content/1/Chapitre%203.pdf).

# Annexe

```
ProjetMaster.ino
1  #include <Stepper.h>
2  #include <Wire.h>
3  #include <LiquidCrystal_I2C.h>
4
5  LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2);
6
7  int temp;
8  float celcius;
9
10 // Définir le nombre de pas par tour
11 int NbrPas = 200;
12
13 Stepper MonMoteur1(NbrPas, 3, 4, 5, 6);
14 int moteurState1 = 0;
15
16
17 Stepper MonMoteur2(NbrPas, 8, 9, 10, 11);
18 int moteurState2 = 0;
19
20 // Buttons
21 int buttonPin1 = 12;
22 int buttonState1 = 0;
23
24 int buttonPin2 = 13;
25 int buttonState2 = 0;
26
27 void setup() {
28
29     // Vitesse à 60 tours/min
30     MonMoteur1.setSpeed(60);
31     MonMoteur2.setSpeed(60);
32
33     pinMode(A1, INPUT);
34
35     // LCD setup
36     lcd.begin(16,2);
37     lcd.backlight();
38     Serial.begin(9600);
39     lcd.setCursor(0, 0);
40     lcd.print("Temperature:");
41
42     // buttons Setup
43     pinMode(buttonPin1, INPUT);
44     pinMode(buttonPin2, INPUT);
45 }
```

Code arduino partie 1

```
ProjetMasfar.ino
37   lcd.backlight();
38   Serial.begin(9600);
39   lcd.setCursor(0, 0);
40   lcd.print("Temperature:");
41
42   // buttons Setup
43   pinMode(buttonPin1, INPUT);
44   pinMode(buttonPin2, INPUT);
45
46
47
48   void loop() {
49
50       buttonState1 = digitalRead(buttonPin1);
51       buttonState2 = digitalRead(buttonPin2);
52
53       // capteur de temperature
54       temp = analogRead(A1);
55       float voltage = temp * (5.0 / 1023.0);
56       celcius = (voltage - 0.5) * 100;
57       Serial.println(celcius);
58
59       lcd.setCursor(0, 1);
60       lcd.print(celcius);
61
62       if(buttonState1 == HIGH){ // button UP
63           if(moteurState1 == 0 && moteurState2 == 0){
64               MonMoteur1.step(NbrPas);
65               MonMoteur2.step(NbrPas);
66               moteurState1 = 1;
67               moteurState2 = 1;
68           }
69
70       if(buttonState2 == HIGH){ // button DOWN
71           if(moteurState1 == 1 && moteurState2 == 1){
72               MonMoteur1.step(-NbrPas);
73               MonMoteur2.step(-NbrPas);
74               moteurState1 = 0;
75               moteurState2 = 0;
76           }
77
78
79       delay(1000);
80
81   }
```

## Code arduino partie 2