REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA



Faculté de **T**echnologie

Département du **G**énie **M**écanique

Mémoire de fin d'études de Master en

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Construction Mécanique

Conception tridimensionnelle complète et validation technique d'un moule d'une bouteille

Présentés par :

Kerbouci Mohamed Rafik

Bouzara Yazid

Proposés et Dirigés par :

Pr. Abdellah Elhadj Abdellah

Promotion 2024-2025

DÉDICACE

بِسۡمِ ٱللَّهِ ٱلرَّحۡمَٰنِ ٱلرَّحِيمِ

والحمد الله رب العالمين، عابدين له وموحدين، والصلاة والسلام على

أشرف المرسلين خاتم الانبياء والمرسلين.

Je dédie ce travail :

Ma famille : en reconnaissance de leur soutien tout au long de mon parcours académique.
Mes amis : Saber, AbdRahime, Amine, Oussama, Yassin, Houssem, Aymen, Redha, Yazid, Islam, Younes, Amel, Rania, Leila, pour leur contribution positive dans l'environnement de travail et d'apprentissage.
Mes camarades de promotion : pour leur rôle actif dans l'échange de connaissances et la coopération académique.

Cette dédicace constitue un témoignage symbolique de reconnaissance à toutes les personnes ayant contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.

Rafik

DÉDICACE

بِسۡمِ ٱللَّهِ ٱلرَّحۡمَٰنِ ٱلرَّحِيمِ

والحمد الله رب العالمين، عابدين له وموحدين، والصلاة والسلام على

أشرف المرسلين خاتم الانبياء والمرسلين.

Je dédie ce travail :

Ma famille : en reconnaissance de leur soutien tout au long de mon parcours académique.
Mes amis : Walid, **Hamza**, **Side Ahmed**, **Ayman**, **Youssef**, **Farouk**, **Rafik**, **Abdoudi**, **Oussama**, **Fares** et **Mohamed**, **Ismail**, pour leur contribution positive dans l'environnement de travail et d'apprentissage.
Mes camarades de promotion : pour leur rôle actif dans l'échange de connaissances et la coopération académique.

Cette dédicace constitue un témoignage symbolique de reconnaissance à toutes les personnes ayant contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.

Yazid

Remerciements

Nous remercions en premier lieu « الله » pour nous avoir donné la chance et la Force à arriver à ce niveau d'études.

Nous voulons remercier notre **parents** qui nous ont toujours encouragés et soutenus dans nos projets. Aussi nos **familles** ainsi que tous nos **amis** et sincères remerciements à **Moussaoui Mohamed** et tous les membres de la plateforme de prototypage rapide.

Nous remercions nos directeurs de mémoire **Pr. Abdellah Elhadj Abdellah** Nous remercions les membres de jury pour avoir accepté de soutenir nos travaux.

الملخص

تتناول هذه المذكرة التصميم ثلاثي الأبعاد الكامل والتحقق التقني لقالب زجاجة بلاستيكية سعة 1.5 لتر. شمل العمل تصميم الزجاجة باستخدام برنامج **Blender**، ثم تصميم القالب على **SolidWorks**تم بعد ذلك دراسة عملية التصنيع ومحاكاتها باستعمال برنامج .**CAMWorks**

لضمان جودة القالب وأدائه، ركزت الدراسة على تحليل نظام التبريد ودراسة مقاومة الضغط، مما سمح بتحديد المادة الأنسب لتصنيع القالب. يبرز هذا العمل أهمية التكامل بين التصميم المتقدم والمحاكاة لإنتاج قوالب دقيقة تضمن جودة وكفاءة عالية في تصنيع الزجاجات.

الكلمات المفتاحية : تصميم ثلاثي الأبعاد , قالب زجاجة, التحقق الفني ,تصميم ثلاثي الأبعاد, صب البلاستيك, ("قالب الزجاجة")

Abstract

This thesis focuses on the complete three-dimensional design and technical validation of a mold for a 1.5-liter plastic bottle. The work covered the bottle's design using Blender software, followed by the mold's design on SolidWorks. The study of the manufacturing process was then conducted and simulated using CAMWorks software.

To ensure the mold's quality and performance, the study focused on analyzing the cooling system and examining pressure resistance, which allowed for the determination of the most suitable material for mold manufacturing. This work highlights the importance of integrating advanced design with simulation to produce precise molds, thereby ensuring high quality and efficiency in bottle manufacturing.

Keywords: 3D Design, Bottle Mold, Technical Validation Three-dimensional, Design Plastic Molding ("bottle mold").

Résumé

Ce mémoire traite de la conception tridimensionnelle complète et de la validation technique d'un moule pour une bouteille plastique de 1.5 litre. Le travail a couvert la conception de la bouteille à l'aide du logiciel Blender, suivie de la conception du moule sur SolidWorks. L'étude du processus de fabrication a ensuite été menée et simulée à l'aide du logiciel CAMWorks.

Pour garantir la qualité et la performance du moule, l'étude a porté sur l'analyse du système de refroidissement et l'étude de la résistance à la pression, ce qui a permis de déterminer le matériau le plus approprié pour la fabrication du moule. Ce travail souligne l'importance de l'intégration entre la conception avancée et la simulation pour produire des moules précis, assurant ainsi une qualité et une efficacité élevées dans la fabrication des bouteilles.

Mots-clés: Conception 3D, Moule Bouteille, Validation technique, Conception tridimensionnelle, Moulage Plastique ("moule d'une bouteille").

Liste des figures

Chapitre I:

Figure I-1 : Granulés plastiques colorés utilisés comme matière première. 5
Figure I-2 : bouteilles en plastique dans une ligne de production automatisée. 7
Figure I-3 : Structure des matières plastiques..... 11
Figure I-4: PET bouteille plastique. 14
Figure I-5 : Capsules plastiques colorées en polyéthylène (PE). 15
Figure I-6 : Des tuyaux en PVC. 16
Figure I.7 : Structure moléculaire du PET. 17
Figure I-8 : Machine de moulage par injection. 18
Figure I-9 : Machine de moulage par soufflage. 19
Figure I-10 : Moule Rotomoulage..... 20
Figure I-11 : Architecture d'un moule d'injection plastique. 23
Figure I-12 : Esquisser d'une moule par injection**.** 24
Figure I-13 : Différentes étapes d'injection. 25
Figure I-14 : Presse horizontale à injection plastique..... 26
Figure I-15 : Presse verticale a injection plastique..... 26

Chapitre II :

Figure II-1 : La machine automatique de soufflage faisant la bouteille de PET. 29
Figure II-2 : Procédé de moulage par injection-soufflage. 32
Figure II-3 : Processus de moulage par extrusion-soufflage. 32
Figure II-4 : Processus de moulage par étirage-soufflage. 33
Figure II-5 : Préforme PET. 33
Figure II-6 : Le procédé d'Injection-Soufflage. 35
Figure II-7: Illustration du principe général de la fabrication d'une bouteille par injection soufflage en cycle froid par une souffleuse rotative. 37
Figure II-8 : Illustration du procédé de soufflage des bouteilles en PET. 38
Figure II-9 : Configurations des circuits de refroidissement dans les moules de soufflage. 39

Chapitre III :

Figure III-1: SOLIDWORKS logo. 42
Figure III-2: Blender logo..... 42
Figure III-3 : Moule supérieur / inférieur modéliser dans SolidWorks.. 45
Figure III-4 : Fourchette modéliser dans SolidWorks..... 45
Figure III-5 : Base de moule modéliser dans SolidWorks. 46
Figure III-6 : Bouteille 1.5 L modéliser dans BLENDER. 47

Figure III-7 : Vérification d'une bouteille sur SolidWorks. 48
Figure III-8 : Création d'un brut de moulage. 49
Figure III-9: Création d'un bloc de moulage. 49
Figure III-10 : Création de la cavité de la bouteille. 50
Figure III-11 : Façonnage de la base de la bouteille. 51
Figure III-12 : Division manuelle du moule en deux moitiés. 52
Figure III-13 : Création des trous de refroidissement avec ajout de tuyaux. 53
Figure III-14 : Assemblage et Vérification Final de moule. 54

Chapitre IV :

Figure IV-1 : SSCNC logo. 56
Figure IV-2 : Représentation des déplacements imposés sur le moule. 57
Figure IV-3 : Représentation des chargements imposés sur le moule. 57
Figure IV-4 : Résultats de l'étude de contrainte de Von mises pour l'aluminium. 58
Figure IV-5 : Résultats de l'étude de déplacements pour l'aluminium. 59
Figure IV-6 : Résultats de l'étude de contrainte de Von mises pour Acier H13. 60
Figure IV-7 : Résultats de l'étude de déplacements pour acier H13. 61
Figure VI-8 : Conception de moule (système refroidissement). 62
Figure VI-9 : Courbe graphique d'un système de refroidissement 'Aluminium'. 63
Figure VI-10 : La température sur la surface de moule pour l'aluminium. 64
Figure VI-11 : La température de fluide pour l'aluminium. 64
Figure VI-12 : La température de solide pour l'aluminium. 65
Figure VI-13 : Courbe graphique d'un système de refroidissement 'Acier H13'. 66
Figure VI-14: La température sur la surface de moule pour acier H13. 66
Figure VI-15 : La température de fluide pour acier H13. 67
Figure VI-16 : La température de solide pour acier H13. 67
Figure IV-17: CAMWorks logo. 69
Figure IV-18 : Moule en cas final d'usinage. 70
Figure IV-19 : Fenêtre de choisie la machine. 70
Figure IV-20 : Définir le point zéro pièce (G54). 71
Figure IV-21 : Fenêtre de La définition des outils. 71
Figure IV-22 : Définie les dimensions du bloc. 72

Liste des tableaux

Chapitre I :

Tableaux I-1 : Les avantages et les Inconvénients de thermoplastique et thermodurcissables. . 11

Tableaux I-2 : Propriétés mécanique des déférents polymères..... 12

Tableaux I-3 : Propriétés thermiques des déférents polymères. 13

Tableaux I-4 : les avantages est les inconvénients pour chaque type de moulage. 20

Chapitre III :

Tableaux III-1 : Comportement mécanique entre ‘Acier H13’ et ‘Alliages d’aluminium’. 44

Tableaux III-2 : Comportement thermique entre ‘Acier H13’ et ‘Alliages d’aluminium’ 44

Sommaire

Dédicace ..... **I**
Remerciement ..... **II**
Résume ..... **III**
Liste des figures ..... **IV**
Liste des tableaux ..... **V**
Sommaire ..... **VI**
Introduction générale **1**
Chapitre I : Généralités. **4**
I.1 Introduction **5**
I.2 Choix des matériaux de moule **6**
I.2.1 Critères de sélection des matériaux **6**
I.3 Comparaison des matériaux **7**
I.3.1 Matériaux métalliques ferreux et non ferreux **8**
I.4 Les matériaux plastiques utilisés en moulage. **10**
I.4.1 Différents types des polymères **10**
I.4.2 Propriétés mécaniques et thermiques des polymères **12**
I.4.3 Le polymères utilise pour la bouteille **14**
I.4.4 Matériau optimal pour la bouteille **17**
I.5 Les principaux procédés de moulage plastique **18**
I.5.1 Les techniques de moulage plastique principales **18**
I.5.2 les avantages est l'inconvénient **20**
I.6 Moulage par injection **21**
I.6.1 Description **21**
I.6.2 Réalisation du processus de moulage par injection **21**
I.6.3 Les différents éléments d'une presse à injection **21**
I.6.4 Les étapes principales pour le moulage par injection **22**
I.6.5 Différents types de presse injection plastique **26**
I.7 Conclusion **27**
Chapitre II : Procédé de soufflage plastique **28**
II.1 Introduction **29**
II.2 Le procédé spécifique du soufflage PET. **30**
II.3 Fonctionnement de moulage par soufflage **30**
II.3.1 Sélection et préparation des matériaux **30**
II.3.2 Formation de la paraison ou préforme **30**
II.3.3 Processus de soufflage **31**
II.3.4 Refroidissement et éjection **31**
II.4 Les type des moulages par soufflage **31**
II.4.1 Moulage par injection-soufflage **31**
II.4.2 Moulage par extrusion-soufflage **32**
II.4.3 Moulage par étirage-soufflage **33**
II.5 Le Préforme PET **33**
II.5.1 Définition **33**
II.5.2 Processus **34**
II.6 Moulage par injection-soufflage **34**

II.6.1 Principe de fonctionnement **35**
II.7 Conception des cavités du moule **38**
II.8 Conclusion **39**
Chapitre III : Conception des moules **41**
III.1 Introduction **42**
III.2 Matériaux choisies pour fabriques le moule **43**
III.2.1 Alliages d'aluminium T6 6063 ..... **43**
III.2.2 Acier à outils H13 ..... **43**
III.3 Comportement des matériaux **43**
III.3.1 Comportement mécanique des matériaux **43**
III.3.2 Comportement Thermique des matériaux **44**
III.4 Composition d'un moule de soufflage **45**
III.4.1 Moule supérieur **45**
III.4.2 Moule inférieur **45**
III.4.3 Support de col de préforme 'Fourchette' **46**
III.4.4 Base de moule **46**
III.5 Conception d'un moule par SolidWorks **47**
III.6 Conclusion **54**
Chapitre IV : Étude technique avancée et usinage des moules **55**
IV.1 Introduction **56**
IV.2 Étude de résistance des matériaux (RDM) d'un moule **57**
IV.2.1 Aluminium T6 6063 ..... **58**
IV.2.2 Acier H13 (X40CrMoV5-1) **60**
IV.3 Étude thermique de moule **62**
IV.3.2 Résultats **63**
IV.4 La comparaison entre 'Aluminium T6 6063' et 'Acier H13' **68**
IV.5 Usinage d'un moule avec machine CNC **69**
IV.5.1 CAMWorks **69**
IV.5.2 les étapes pour extraire le G-Code **69**
IV.5.3 Usinage de moule **70**
IV.6 Conclusion **73**
Conclusion générale **74**
Références bibliographiques **76**
Annexe **81**

Introduction générale

Introduction générale :

Dans l'industrie manufacturière moderne, la production de masse d'articles en plastique, notamment les emballages tels que les bouteilles, repose fondamentalement sur la précision et l'efficacité des moules utilisés. La conception de ces moules est une étape critique qui influence directement la qualité du produit final, les coûts de production et la durabilité du processus. Avec l'avènement des outils de conception assistée par ordinateur (CAO) et de fabrication assistée par ordinateur (FAO), la conception de moules a évolué d'un processus manuel complexe à une approche tridimensionnelle sophistiquée, permettant une visualisation, une analyse et une optimisation sans précédent.

La conception tridimensionnelle d'un moule pour bouteille plastique de 1.5 litre n'est pas simplement une transposition géométrique du produit fini ; c'est une ingénierie complexe qui intègre des considérations sur le matériau plastique (généralement le PET ou le PEHD pour les bouteilles), le processus de fabrication (principalement le moulage par soufflage ou l'injection-soufflage), les propriétés thermiques et mécaniques, ainsi que les exigences esthétiques et fonctionnelles de la bouteille elle-même. Un moule typique de bouteille est composé de plusieurs éléments clés : la cavité qui donne la forme extérieure de la bouteille, le noyau qui définit sa forme intérieure, le système de refroidissement pour un cycle rapide et uniforme, et le système d'alimentation (pour les ébauches si c'est du moulage par soufflage).

L'utilisation de logiciels de CAO 3D (comme SolidWork) permet aux concepteurs de modéliser le moule avec une grande précision, d'analyser les lignes de joint (plans de joint), les systèmes de refroidissement et de ventilation. L'intégration de la FAO (comme CAMWorks) dans ce processus permet ensuite de générer des parcours d'outils optimisés pour les machines CNC, garantissant une fabrication fidèle au modèle numérique. La simulation de l'usinage, avec des analyses de déviation et de finition de surface, devient un outil indispensable pour valider la stratégie d'usinage avant même de toucher à la machine réelle, minimisant ainsi les erreurs, les pertes de matière et les temps d'arrêt.

La conception tridimensionnelle d'un moule de bouteille plastique de 1.5 litre est une discipline d'ingénierie qui fusionne l'art de la modélisation 3D avec les principes de la science des matériaux et les techniques de fabrication avancées. L'objectif ultime est de créer un moule qui non seulement reproduit fidèlement le design de la bouteille, mais le fait de manière répétable, rapide et économique, répondant aux exigences strictes d'une industrie de l'emballage en constante évolution.

Dans le chapitre I, nous avons exploré les bases de l'industrie des plastiques et le moulage par injection comme procédé de production clé. L'importance du choix des matériaux de moule (acier, aluminium) a été soulignée, avec leurs propriétés spécifiques. Nous avons classifié les métaux ferreux et non ferreux, et distingué les thermoplastiques (recyclables) des thermodurcissables. Le PET a été identifié comme le matériau optimal pour les bouteilles. Enfin, nous avons détaillé les étapes du moulage par injection

Dans le chapitre II, nous avons abordé la technique du moulage par soufflage, essentielle pour la fabrication d'articles plastiques creux. Nous en avons détaillé les phases: préparation des matériaux, formation de la paraison ou préforme, soufflage, et enfin refroidissement et éjection. Les principaux types de moulage par soufflage (injection-soufflage, extrusion-soufflage, étirage-soufflage) ont été différenciés. Un accent particulier a été mis sur l'injection-soufflage du PET, expliquant la transformation des préformes en bouteilles avec l'étirage biaxial pour améliorer les propriétés mécaniques. Enfin, l'importance d'une répartition symétrique des cavités du moule pour garantir l'uniformité et la qualité des pièces a été soulignée.

Dans le chapitre III, nous avons exploré la conception de moules, étape cruciale pour la fabrication industrielle. Nous avons souligné le rôle des logiciels de CAO comme SolidWorks pour la précision et Blender pour la modélisation artistique. Le choix des matériaux de moule, tels que l'alliage d'aluminium T6 6063 et l'acier à outils H13, a été détaillé en fonction de leurs propriétés mécaniques et thermiques. Nous avons présenté la composition d'un moule de soufflage (moule supérieur, moule inférieur, support de col de préforme, base de moule). Enfin, nous avons décrit les étapes de conception d'un moule sur SolidWorks, incluant la modélisation de la bouteille sur Blender, son exportation, la création du brut et de la cavité, la division, la répétition par symétrie, l'ajout des trous de fixation, du support de col et des canaux de refroidissement, jusqu'à l'assemblage et la vérification finale.

Dans le chapitre IV, nous avons abordé l'étude technique et l'usinage des moules. Une analyse de résistance des matériaux (RDM) a été menée, simulant les conditions d'utilisation réelles sur des moules en aluminium T6 6063 et en acier H13, confirmant leur robustesse. L'étude thermique a démontré l'efficacité des systèmes de refroidissement. La comparaison a révélé que l'acier H13 est optimal pour la durabilité et les grandes séries, tandis que l'aluminium 6063-T6 convient mieux pour la rapidité et les volumes plus faibles. Enfin, nous avons détaillé l'usinage des moules via les machines CNC, en utilisant CAMWorks pour générer le G-code et SSCNC pour la simulation.

Chapitre I :

Généralités

I.1 Introduction :

L'industrie des plastiques, qui domine la fabrication moderne, doit ses origines à des innovations marquantes. Dès 1907, le chimiste américain Leo Baekeland révolutionne le domaine avec l'invention de la bakélite, une matière synthétique thermodurcissable, résistante et isolante, qui a supplanté des matériaux comme la gomme laque et fut essentielle pour l'isolation des systèmes de câblage. Par la suite, les années 1920 et 1930 voient l'émergence d'autres plastiques fondamentaux tels que le PVC (chlorure de vinyle) en 1926, développé par Waldo Semon comme un matériau imperméable et résistant au feu, ainsi que le polyéthylène et le polystyrène.

Au cœur de cette industrie se trouve le moulage par injection, un procédé de fabrication où un matériau en fusion est injecté sous pression dans un moule pour se solidifier et prendre la forme désirée avant d'être éjecté. Bien que polyvalent pour des fabrications ponctuelles, ce procédé excelle surtout dans la production à grande échelle de pièces identiques. Les matériaux les plus couramment utilisés en moulage par injection sont les plastiques et les élastomères. Sa capacité à produire d'importants volumes et à garantir une qualité uniforme en fait une méthode indispensable pour diverses industries, allant des composants électroniques et pièces automobiles aux éléments de mobilier et biens de consommation courants.**[01]**

Dans ce contexte, le moule lui-même, élément déterminant du processus, est généralement fabriqué à partir de matériaux métalliques tels que l'acier et l'aluminium. Ces métaux doivent posséder des propriétés spécifiques pour supporter les contraintes élevées et assurer la précision requise dans la production de pièces plastiques. La compréhension de ces matériaux de moule est donc fondamentale pour optimiser l'efficacité, la durabilité et la rentabilité du processus de moulage.



Figure I-1 : Granulés plastiques colorés utilisés comme matière première pour le moulage par injection. **[02]**

I.2 Choix des matériaux de moule :

La fabrication des moules nécessite l'utilisation de divers matériaux spécialisés, tels que les aciers pour moules et certains alliages techniques. Le choix de ces matériaux joue un rôle déterminant dans la qualité finale du moule. L'utilisation de matériaux de haute performance permet d'assurer la précision, la stabilité dimensionnelle et la durabilité du moule sur le long terme. Par ailleurs, ces matériaux influencent directement l'efficacité du processus de moulage par injection, contribuant ainsi à la production de pièces plastiques de qualité. **[03]**

I.2.1 Critères de sélection des matériaux :

Afin de choisir le matériau, vous devez respecter les exigences suivantes :

I.2.1.1 Les propriétés mécaniques du matériau :

Le choix d'un matériau pour une application d'injection ne repose pas uniquement sur son coût ou sa facilité d'utilisation. Il est essentiel de prendre en compte ses propriétés mécaniques, telles que la résistance, l'élasticité et la rigidité, car ces caractéristiques déterminent son comportement face aux contraintes mécaniques.

Ainsi, la sélection du matériau idéal pour un moule de soufflage nécessite une compréhension approfondie de ces propriétés spécifiques, qui influencent directement la performance et la durabilité du moule. **[03]**

I.2.1.2 Le coût du matériel :

Le coût constitue un critère essentiel dans le choix de la matière plastique adaptée au procédé de moulage par injection, notamment dans un contexte de traitement des déchets.

Opter pour des matériaux courants et économiques, comme le polystyrène ou le polyéthylène, peut représenter une solution avantageuse. Toutefois, ce choix dépend également de la disponibilité du matériau sur le marché et de la quantité nécessaire. Il est donc primordial de sélectionner une matière qui réponde à la fois aux contraintes budgétaires et aux exigences techniques de l'application envisagée. **[03]**

I.2.1.3 Les propriétés thermiques du matériau :

Si l'analyse des propriétés mécaniques est essentielle dans le choix d'un matériau plastique pour le moulage par injection, les caractéristiques thermiques doivent également être soigneusement prises en compte.

Ces propriétés incluent notamment le point de fusion, la conductivité thermique et le comportement de dilatation sous l'effet de la chaleur. Elles sont déterminantes pour évaluer l'aptitude d'un matériau à une application spécifique.

Par exemple, pour des produits devant résister à des températures élevées, des matériaux comme le polycarbonate ou le nylon sont particulièrement adaptés grâce à leur point de fusion élevé et à leur bonne conductivité thermique. À l'inverse, pour des environnements soumis à des températures basses, des plastiques tels que le polystyrène ou le polyéthylène se révèlent plus appropriés, grâce à leur faible point de fusion et leur capacité à limiter le transfert thermique. **[03]**

I.2.1.4 Disponibilité et l'usinage des matériaux :

Dans le choix des matériaux pour la fabrication des moules de soufflage, la disponibilité et l'usinabilité jouent un rôle essentiel. Un matériau facilement disponible sur le marché permet de réduire les délais de production et d'optimiser les coûts d'approvisionnement. De plus, il est important que ce matériau soit usinable avec précision, afin de faciliter les opérations de fraisage, perçage et polissage tout en assurant une bonne qualité de surface. Par exemple, l'aluminium est largement utilisé pour sa grande usinabilité et sa disponibilité sous diverses formes standards, tandis que des aciers comme le P20 offrent un bon compromis entre robustesse et facilité d'usinage. Le bon équilibre entre ces deux critères permet d'obtenir des moules performants, économiques et adaptés aux exigences de production industrielle.**[03]**



Figure I-2 : bouteilles en plastique dans une ligne de production automatisée. **[04]**

I.3 Comparaison des matériaux :

Le terme « métal » désigne à la fois un élément chimique et un matériau, et il en existe une grande diversité. Avant de traiter le sujet du recyclage des métaux, il est essentiel d'en présenter une classification générale, ainsi que leurs principales propriétés et domaines d'application.

I.3.1 Matériaux métalliques ferreux et non ferreux :

Les matériaux métalliques se divisent en deux grandes catégories : les ferreux et les non ferreux. Les métaux ferreux, riches en fer, sont solides et économiques, mais sensibles à la corrosion. Les métaux non ferreux, comme l'aluminium et le cuivre, sont plus résistants à l'oxydation et souvent plus légers. Ce classement est essentiel pour choisir un matériau adapté à chaque usage industriel. **[05]**

I.3.1.1 Les métaux ferreux :

Les métaux ferreux sont principalement composés de fer, généralement à plus de 90%. Ils incluent notamment l'acier, la fonte et leurs alliages. Très répandus dans les secteurs du bâtiment, de l'automobile et de l'industrie lourde, ces matériaux sont appréciés pour leur solidité, leur résistance mécanique et leur faible coût. Cependant, leur principal inconvénient reste leur sensibilité à l'oxydation, ce qui nécessite souvent un traitement de surface ou une protection contre la corrosion. **[05]**

Ils représentent une part importante des matériaux recyclés en raison de leur forte valeur industrielle et de leur réutilisabilité.

Les aciers : sont des alliages dont la base est le fer, combiné avec une faible quantité de carbone (généralement moins de 1,7 %). Cette combinaison confère au matériau des propriétés mécaniques renforcées. En fonction des éléments d'alliage ajoutés (comme le chrome, le nickel ou le manganèse), l'acier peut présenter des caractéristiques très variées, adaptées à de nombreuses applications industrielles. C'est cette diversité qui fait de l'acier un matériau incontournable dans la construction, la fabrication d'outils, ou encore l'automobile. Ici, on distinguera plusieurs aciers classifiés selon leurs domaines d'utilisation :

- Les aciers d'usage général, qui représentent près de 85 % de la consommation totale, contiennent divers éléments comme le manganèse, le silicium, le soufre ou le phosphore.
- Les aciers de traitement thermique sont conçus pour être modifiés par chauffage afin d'améliorer leurs propriétés. **[05]**
- Les aciers à outils, très résistants, sont utilisés pour fabriquer des moules ou outils de découpe. Par exemple : Acier à outils H13 ; Acier à outils pré-durci P20.
- Enfin, les aciers inoxydables, riches en chrome (12 à 30 %), se distinguent par leur excellente résistance à la corrosion. **[05]**

La fonte : est un alliage composé principalement de fer, de plus de 1,7 % de carbone et de silicium. Moins coûteuse que l'acier, elle se distingue par sa grande densité et sa bonne aptitude au moulage. Grâce à sa fluidité à des températures relativement basses, elle est idéale pour fabriquer des pièces complexes par coulée. Cette propriété permet à la fonte de remplir facilement les cavités détaillées des moules, ce qui en fait un matériau très utilisé pour les pièces moulées industrielles. On distinguera 4 sortes de fontes :

La fonte grise- La fonte ductile -La fonte blanche - La fonte malléable. **[05]**

I.3.1.2 Les métaux non ferreux :

Les métaux non ferreux sont des matériaux métalliques ne contenant pas ou très peu de fer. Parmi les plus courants figurent l'aluminium, le cuivre, le zinc, le plomb, le nickel ou encore l'étain. Ils se distinguent par leur légèreté, leur résistance à la corrosion et leur bonne conductivité électrique ou thermique. Utilisés dans des secteurs variés comme l'électronique, l'aéronautique ou la construction, ils sont également très recherchés pour le recyclage en raison de leur forte valeur économique. **[05]**

L'alliage : Aujourd'hui largement utilisé, **l'alliage** est un métal relativement moderne, devenu le second le plus employé après l'acier. Léger, malléable et résistant. Grâce à sa faible densité et à ses excellentes propriétés mécaniques, il est particulièrement prisé dans l'aéronautique, l'automobile et le BTP. Sa capacité à former des alliages spécifiques lui permet de répondre à des exigences élevées en matière de solidité, de sécurité et de résistance à la déformation. **[05]**

Le cuivre : de teinte rouge doré, est l'un des premiers métaux utilisés par l'homme, notamment dès la fin du Ve millénaire. Bien qu'il puisse se trouver à l'état naturel, il est majoritairement extrait de minerais sulfurés comme la malachite. Ce métal, à la fois malléable, ductile et très conducteur, est utilisé dans des domaines variés : câblage électrique, plomberie, pièces de monnaie ou encore fabrication d'alliages comme le bronze (avec de l'étain) et le laiton (avec du zinc). **[45] [05]**

L'argent est un métal noble très réactif chimiquement, plus malléable que le cuivre mais moins que l'or. Il résiste à l'air pur et à l'eau, mais se ternit au contact de l'oxygène. Son excellente conductivité électrique le rend précieux, bien que son coût limite son usage à des domaines spécialisés comme l'électronique, la photographie argentique ou la joaillerie. Utilisé dans de nombreuses applications industrielles, il est difficilement récupérable, ce qui le distingue de métaux comme l'or, généralement plus recyclables. **[05]**

I.4 Les matériaux plastiques utilisés en moulage :

Les polymères plastiques les plus courants pour le processus de moulage par injection étaient les polymères thermoplastiques. Cependant, un autre type de plastique a fait surface dans l'industrie manufacturière - les plastiques thermodurcissables.

La combinaison de résines et de thermodurcissables sert d'alternative au métal et aux thermoplastiques pour procédés de fabrication plastique. Il existe des situations dans lesquelles les meilleurs matériaux à utiliser sont les thermoplastiques. De même, certaines situations justifient l'utilisation de thermodurcissables. En raison de leurs similitudes, certains fabricants utilisent les deux matériaux pour les mêmes produits. **[06]**

I.4.1 Différents types des polymères :

I.4.1.1 Thermoplastiques :

Les thermoplastiques sont les plus utilisés. La caractéristique principale qui les différencie des plastiques thermodurcissables est qu'ils peuvent subir de nombreux cycles de fusion et de durcissement sans dégradation importante de leurs propriétés. Les thermoplastiques se présentent généralement sous forme de petits granulés ou de feuilles, qui sont chauffés et mis en forme par divers procédés. Le processus est complètement réversible parce qu'il ne fait pas intervenir de liaisons chimiques, ce qui permet le recyclage ou la fusion, et la réutilisation. **[06]**

Types courants de matériaux thermoplastiques :

Acrylique (PMMA) ; Acrylonitrile butadiène styrène (ABS) ; Polyamide (PA) ; Poly (téréphtalate d'éthylène) (PET) **;** Polycarbonate (PC) ; Polyétheréthercétone (PEEK) ; Polyéthylène (PE) ; Polypropylène (PP) ; Polychlorure de vinyle (PVC).

I.4.1.2 Thermodurcissables :

Contrairement aux thermoplastiques, les plastiques thermodurcissables conservent leur état solide après polymérisation. Les liaisons chimiques des polymères des matériaux thermodurcissables s'établissent pendant la polymérisation, qui est déclenchée par la chaleur, la lumière ou une irradiation appropriée. La polymérisation forme des liaisons chimiques irréversibles. Les thermodurcissables se décomposent à la chaleur plutôt qu'ils ne fondent, et ils ne se reforment pas lorsqu'ils sont refroidis. Le recyclage ou le retour aux composants d'origine du matériau thermodurcissable est impossible. **[06]**

Types courants de matériaux thermoplastiques :

Phénoliques ; Silicone ; Mélamine ; Epoxy ; Polyfluorure de vinylidène (PVDF) ; Polytétrafluoroéthylène (PTFE) ; Polyuréthane ; Polyimide.

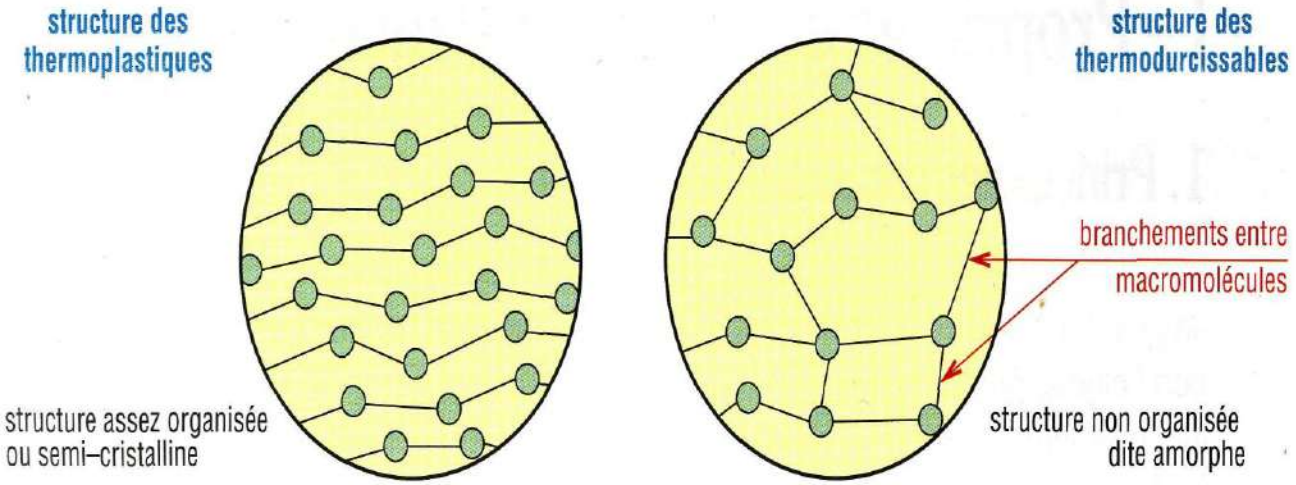


Figure I-3 : Structure des matières plastiques.**[07]**

I.4.1.3 Les avantages et les Inconvénients :

Tableaux I-1 : Les avantages et les Inconvénients de thermoplastique et thermodurcissables. **[08]**

Les types de polymère	Les avantages	les inconvénients
Thermoplastique	Malléabilité : Ils ramollissent sous l'effet de la chaleur et durcissent au refroidissement, permettant de les mouler facilement.	Ramollissement à haute température : Certains thermoplastiques perdent leur rigidité ou se déforment sous l'effet de la chaleur
	Recyclable : Ils peuvent être fondus et remodelés plusieurs fois sans altération majeure de leurs propriétés	Moins rigides et plus fragiles : que les thermodurcissables notamment sous forte contrainte mécanique.
	Poids réduit **:** Idéaux pour des applications nécessitant des matériaux légers (automobile, aéronautique).	Certains thermoplastiques techniques sont coûteux à produire et difficiles à usiner.
Thermodurcissables	Supportent des températures élevées : sans ramollir	Non renouvelables: Une fois durcis, ils ne peuvent pas être refondus ni remodelés.

	Grande rigidité et solidité **:** idéales pour les pièces soumises à des contraintes mécaniques importantes.	Recyclage compliqué : Contrairement aux thermoplastiques, ils ne peuvent pas être réutilisés par fusion, ce qui les rend moins écologiques.
	Excellents isolants électriques : utilisés pour les circuits imprimés, les boîtiers électriques et les composants électroniques	Durée de fabrication plus longue : Leur mise en forme nécessite un durcissement chimique qui prend plus de temps.

I.4.2 Propriétés mécaniques et thermiques des polymères :

I.4.2.1 Propriétés mécaniques :

-Résistance à la traction : Capacité d'un polymère à supporter une force d'étirement sans se rompre.

-Résistance à la compression : Capacité à supporter des charges appliquées en compression.

-Résistance à l'impact (résilience) : Capacité d'un polymère à absorber de l'énergie sans se casser.

-Dureté : Résistance à la déformation permanente sous une charge.

-Élasticité et module de Young : Capacité d'un polymère à reprendre sa forme après une contrainte.

-Module de Young : Indique la rigidité du matériau (faible pour un matériau souple, élevé pour un matériau rigide).

-Résistance à l'usure et au frottement : Capacité à résister à l'abrasion et aux frottements répétés.

-Fluage (Déformation sous charge prolongée) : Déformation progressive sous une charge constante sur une longue durée. **[09]**

I.4.2.1.1 Polymères et leurs propriétés mécaniques :

Tableaux I-2 : Propriétés mécanique des déférents polymères. **[10]**

Polymère	Résistance à la traction	Résistance à la compression	Dureté	Élasticité	Usure/Frottement
Polycarbonate (PC)	Élevée	Élevée	Moyenne	Faible	Moyenne
PMMA (Plexiglas)	Moyenne	Faible	Élevée	Faible	Faible
Polyamide (PA - Nylon)	Élevée	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Élevée
(PET)	Élevé	Non spécifiée	Moyenne	Élevé	Élevé

I.4.2.2 Propriétés thermique :

-Température de transition vitreuse (Tv) : C'est la température à laquelle un polymère passe d'un état rigide et cassant (état vitreux) à un état souple et caoutchouteux.

-Température de fusion (Tf) (uniquement pour les thermoplastiques cristallins) : Température à laquelle le polymère fond et devient liquide.

-Conductivité thermique (λ) : Capacité du polymère à conduire la chaleur.

En général, les polymères sont de mauvais conducteurs thermiques (utilisés comme isolants).

-Résistance à la chaleur : Capacité à maintenir ses propriétés mécaniques sous haute température.

-Coefficient de dilatation thermique : Indique l'expansion du polymère sous l'effet de la chaleur. Les polymères ont généralement un coefficient de dilatation élevé, ce qui peut poser des problèmes d'assemblage avec des métaux.

-Résistance au feu : Certains polymères sont hautement inflammables, d'autres sont auto-extinguibles ou résistants au feu. **[09]**

I.4.2.2.1 Polymères et leurs propriétés thermiques :

Tableaux I-3 : Propriétés thermiques des déférents polymères. **[08]**

Polymère	Tv (Cº)	Tf(Cº)	Résistance thermique	Dilatation thermique	Inflammabilité
PE (Polyéthylène)	-120	110-135	Faible	Forte	Très inflammable
PP (Polypropylène)	-10	160-170	Moyenne	Moyenne	Inflammable
PMMA (Plexiglas)	105	Amorphe	Moyenne	Forte	Inflammable
PC (Polycarbonate)	150	Amorphe	Élevée	Moyenne	Auto-extinguible
PTFE (Téflon)	120	327	Très élevée	Faible	Très résistant
PEEK	143	343	Très élevée	Faible	Très résistant
Kapton (Polyimide)	400+	500+	Extrême	Très faible	Très résistant
(PET)	69	255-260	Elevée	Moyenne à élevée	Inflammable

I.4.3 Le polymères utilise pour la bouteille :

I.4.3.1 Le polyéthylène téréphtalate (PET) :

Le polyéthylène téréphtalate (PET encore appelé PET1) correspond au chiffre ‘1’ sur votre bouteille. Ce plastique léger est utilisé pour les bouteilles d'eau, la plupart des sodas ainsi que pour les contenants de sauces comme les mayonnaises, les préparations à base de tomates entre autres. Ce plastique est le plus souvent utilisé pour tout type d’emballages alimentaires.

Dans le cadre d’un usage unique, les bouteilles en polyéthylène téréphtalate sont considérées sans danger. En revanche, à des températures élevées, il y a un risque de lixiviation (ce qui est une dissolution des composants) d’une substance chimique appelée trioxyde d’antimoine, qui est reconnue comme étant un perturbateur endocrinien.

Néanmoins, correctement stockées à des températures ambiantes, les risques de lixiviation restent faibles et les emballages plastiques 01-PET restent sans danger, dès lors que l’usage reste unique, et que les bouteilles soient conservées à l’abri du soleil pour minimiser tout danger lié à la dissolution chimique et de contamination de l’eau que vous consommez. **[11]**



Figure I-4 : PET bouteille plastique. **[12]**

I.4.3.2 Le polyéthylène (PE) :

Le polyéthylène (PE), utilisé dans la fabrication de nombreux articles plastiques, notamment les bouteilles d'eau, est généralement considéré comme l'un des plastiques les plus sûrs. Toutefois, certaines préoccupations demeurent quant à sa sécurité. Les dangers liés au polyéthylène sont principalement associés à sa production et à sa dégradation. Lorsqu'il est exposé à des températures élevées ou à une lumière intense, le polyéthylène peut libérer des composés organiques volatils (COV) qui peuvent être nocifs s'ils sont inhalés sur le long terme. **[11]**

De plus, des recherches ont suggéré que des micro-plastiques provenant de polyéthylène peuvent migrer dans les aliments et les boissons, posant des risques pour la santé humaine en raison de leur potentiel à contenir des polluants chimiques. Bien que ces risques soient encore en cours d'évaluation, il est conseillé de privilégier des alternatives plus sûres lorsque cela est possible, et donc de ne pas réutiliser pour vos boissons de bouteilles en polyéthylène. **[11]**



Figure I-5 : Capsules plastiques colorées en polyéthylène (PE). **[13]**

I.4.3.3 Le polyéthylène haute densité (PEHD) :

Le polyéthylène haute densité (PEHD) correspond au chiffre ‘2’ sur vos contenants ménagers en plastique. Le PE-HD est un plastique plus solide et plus durable. Il s'agit donc d'un bon matériau pour les bouteilles de détergent, les contenants de savon liquides et autre gels douches. Le polyéthylène haut densité est également utilisé pour les bouteilles de jus de fruits et les bouteilles de lait avec bouchon vissé.

Dans le cadre d’une réutilisation, les contenants plastiques marqués ‘2’ ne sont pas considérés par les instances de santé comme inquiétants pour la santé. Bien entendu, vous devez vous assurer de toujours utiliser un contenant propre, et jamais endommagé. Le risque de ‘fuite’ de produits chimiques pour du polyéthylène haute densité reste faible, bien qu’avec le temps et avec des réutilisations répétées, l’usure du plastique, donc le risque, augmente. **[11]**

I.4.3.4 Les polychlorures de vinyle (PVC) :

Les polychlorures de vinyle encore appelés Polyvinyles (PVC), correspondent au chiffre ‘3’ des emballages plastiques. Potentiellement dangereux pour l’organisme, lorsqu’il est chauffé ou en contact de corps gras, le PVC est peu utilisé dans l’industrie alimentaire. On le retrouve toutefois dans la composition de nombreux jouets pour enfants. Les propriétés isolantes du PVC (isolations électrique, phonique et thermique), ainsi que son étanchéité (liquides autant que gaz) en font un plastique très utilisé dans l’industrie. **[11]**

Le PVC est surtout utilisé dans l'habitation et la construction, revêtements, ameublements, cadres de fenêtres, cloisons et autres canalisations sont autant d'applications qu'on lui reconnait. Il peut contenir des phtalates et du bisphénol A (BPA) ce qui le rend potentiellement dangereux pour l'organisme. Vous ne devez jamais réutiliser de plastique marqué '3' pour un usage alimentaire. **[11]**



Figure I-6 : Des tuyaux en PVC. **[14]**

I.4.3.5 Le polyéthylène basse densité (PEBD) :

Le polyéthylène basse densité (PEBD), encore appelé PELD (Low Density) est l'élément chimique rencontré dans les plastiques marqués du sigle '4'. On retrouve ce type de plastique dans les emballages plastiques tels que les sacs de congélation, sacs poubelles, les barquettes, les films alimentaires. Les plastiques de type '4' sont considérés sans danger pour la santé, et ne présentent à ce jour aucune toxicité particulière. Le procédé de fabrication du PEBD, obtenu par polymérisation de l'éthylène sous très haute pression aux alentours de 200 °C en fait un plastique très compact, et qui ne crée pas de 'lessivage' ou 'lixiviation' des produits chimiques en contact avec vos boissons ou vos aliments. Vous pouvez donc réutiliser vos sacs plastiques de type '4-PEBD' sans danger pour votre santé. **[11]**

I.4.3.6 Le Polypropylène (PP) :

Le Polypropylène est la substance chimique que l'on retrouve dans la composition des plastiques notés du sigle '5'. Les instances de santé considèrent le polypropylène comme sans danger pour l'organisme. On retrouve le PP dans les tasses pour enfants, certaines gourdes réutilisables pour les sportifs et dans certains récipients plastiques alimentaires réutilisables. Si vous deviez réutiliser un récipient plastique, choisissez celui marqué du sigle '5'. Autres particularités du polypropylène, il est sans odeur, il résiste à la graisse, ne se décompose pas et est recyclable. **[11]**

I.4.4 matériau optimal pour la bouteille :

Le polyéthylène téréphtalate (PET) est le matériau de référence pour fabriquer les bouteilles plastiques (surtout pour les boissons) pour plusieurs raisons techniques, économiques et écologiques.

I.4.4.1 La structure moléculaire :

Le PET est un polyester thermoplastique linéaire obtenu par la réaction de l'éthylène glycol avec de l'acide téréphtalique. Le motif constitutif est formé d'un phényle, associé de chaque côté à un radical carboxyle (-COO-), dont l'un est relié à un radical éthyle.

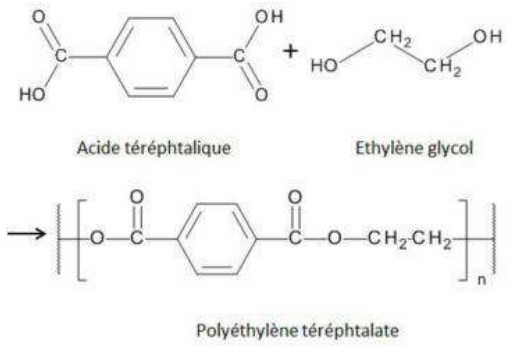


Figure I.6: Structure moléculaire du PET. **[15]**

I.4.4.2 Propriétés du PET :

I.4.4.2.1 Résistance et durabilité :

Le PET possède une excellente résistance à la traction, ce qui en fait l'un des thermoplastiques les plus résistants. Cela signifie qu'il peut résister à des contraintes mécaniques importantes sans se déformer ni se casser. Qu'il soit utilisé dans des bouteilles de boissons ou des composants automobiles, la résistance du PET garantit la longévité des produits. **[16]**

I.4.4.2.2 Transparence et clarté :

L'un des attributs visuels les plus frappants du PET est sa transparence. Le PET est exceptionnellement transparent, permettant aux consommateurs de voir le contenu d'une bouteille ou les couleurs vives d'un emballage à base de PET. Cette propriété est essentielle pour des produits comme les bouteilles d'eau et de boissons gazeuses, où l'attrait visuel du contenu est crucial. **[16]**

I.4.4.2.3 Nature légère :

Le PET est un matériau léger, particulièrement avantageux dans l'industrie de l'emballage. Sa faible densité réduit non seulement les coûts d'expédition, mais contribue également à une empreinte carbone plus faible. La légèreté du PET joue un rôle central dans la réduction de la consommation d'énergie pendant le transport. **[16]**

I.4.4.2.4 Propriétés de la barrière :

Dans les applications d'emballage, les propriétés barrières du PET brillent. Il empêche efficacement la pénétration de l'oxygène, du dioxyde de carbone et de l'humidité, préservant ainsi la fraîcheur et la durée de conservation des aliments et des boissons. **[16]**

I.4.4.2.5 Recyclabilité :

L'une des caractéristiques les plus célèbres du PET est peut-être sa recyclabilité. Le PET est hautement recyclable et le PET recyclé (rPET) est utilisé pour créer de nouveaux produits, réduisant ainsi l'impact environnemental et promouvant une économie circulaire. **[16]**

I.5 Les principaux procédés de moulage plastique :

Le plastique se situe en bonne place parmi les matériaux les plus diffusés pour la fabrication d'objets du quotidien, composants techniques et à géométrie complexe. La méthode de fabrication la plus répandue est le moulage du plastique, qui permet la réalisation d'objets ou composants en matière polymérique.

Grâce à leurs caractéristiques chimiques et mécaniques, les matières **plastiques** sont aujourd'hui parmi les matériaux principaux qui sont employés dans la réalisation de différentes typologies d'objets et composants. La modalité principale de fabrication d'objets en plastique est le **moulage** : à travers l'emploi d'un ou plusieurs moules, on réalise des composants en plastique polymérique, sur la base des exigences de production et de conception. **[17]**

I.5.1 Les techniques de moulage plastique principales :

I.5.1.1 Moulage par injection :

Cette technique de moulage prévoit le réchauffement et la fonte de la matière plastique, qui est ainsi insérée dans un moule clos. Suite à la solidification du matériau, le moule peut être ouvert et le nouveau composant obtenu peut être extrait.

Dans le moulage par injection, qui se déroule avec une presse à injecter, la température et la pression du plastique sont si élevées qu'elles garantissent un meilleur glissement dans le moule. **[17]**



Figure I-8 : Machine de moulage par injection. **[18]**

I.5.1.2 Moulage par compression :

Le moulage par compression est réalisé avec une presse spécifique où l'on fixe un moule en aluminium ou en acier sur la surface d'opération. Essentiellement, le moulage plastique s'effectue à travers la vulcanisation du caoutchouc : il s'agit d'une technique très souple puisqu'elle permet d'incorporer diverses typologies d'inserts dans le produit. Dans ce cas également, pression et température sont très élevées et varient beaucoup pendant tout le moulage. **[17]**

I.5.1.3 Thermoformage :

Le thermoformage est une technique de moulage du plastique réalisée à partir de films ou plaques mises sous pression et sous vide grâce à une machine de thermoformage, si sous pression, la plaque s'appuie au moule avec une pression d'air qui accélère le refroidissement, si sous vide, la plaque ou le film se moulent au moule par aspiration, en reprenant sa forme.

Cette technique de moulage est fréquemment utilisée pour la fabrication de blisters, plateaux, plaques utilisés dans l'industrie automobile, barquettes à usage alimentaire. **[17]**

I.5.1.4 Moulage par soufflage :

C'est une technique de moulage employée notamment pour la fabrication d'objets à la forme en creux. La matière polymérique sous forme de granulés est surchauffée et transformée en un composé pâteux. Ensuite, elle est injectée ou extrudée de façon qu'elle acquière une forme tubulaire et puis close dans un moule spécifique, où elle peut prendre sa forme finale, c'est à cette étape finale que l'air est soufflé, ce qui permet au plastique de se gonfler jusqu'à adhérer aux bords du moule. **[17]**



Figure I-9 : Machine de moulage par soufflage. **[19]**

I.5.1.5 Rotomoulage :

C'est la technique de moulage du plastique utilisée essentiellement pour la création de produits creux de grande taille, tels que des vases, jouets, meubles, conteneurs poubelle, le plastique sous forme de poudre est inséré dans un moule où il est chauffé et tourné sur deux axes, afin que le plastique puisse adhérer aux bords. Ensuite, le produit sera refroidi et, pour finir, extrait. **[17]**



Figure I-10 : Moule Rotomoulage. **[20]**

I.5.2 les avantages est l'inconvénient :

Tableaux I-3 : les avantages est les inconvénients pour chaque type de moulage.

	Les avantages	Les inconvénients
Moulage par injection [21]	• Haute précision et qualité de finition. • Production en masse rapide. • Peu de déchets	• Coût élevé des moules. • Rentable surtout en grande série.
Moulage par compression [22]	• Adapté aux matériaux thermodurcissables • Bonne résistance mécanique des pièces • Capacité à produire de grandes pièces	• Temps de cycle plus long • Moins de précision sur les détails fins • Risque de bulles ou de défauts si le dosage est mal fait
Thermoformage [23]	• Faible coût de moules. • Bon pour petites/moyennes séries	• Moins précis et robuste que l'injection. • Déchets plus importants.
Moulage par soufflage [24]	• Parfait pour les objets creux. • Coût de production modéré	• Moins précis que l'injection. • Limité à certaines formes.
Rotomoulage [25]	• Production de pièces creuses complexes en une seule étape • Épaisseur de paroi homogène	• Temps de cycle long • Moins de précision dimensionnelle

I.6. Moulage par injection :

I.6.1 Description :

Les machines employées en injection plastique sont des presses à injecter. Elles sont utilisées pour des productions de grandes et très grandes séries allant jusqu'à plusieurs milliers de pièces. Les matériaux principalement employés sont les plastiques et les élastomères. La presse à injecter est une machine destinée à assurer l'exploitation industriel d'outillage conçue pour mouler ces matières, dont les composant principales sont : buse, plateau mobile, plateau fixe, collier chauffant, trémie d'alimentation, vis sans fin (ou vis de plastification), système d'évacuation, mécanisme de fermeture et console. En outre, il est possible de catégoriser les éléments d'une presse à injecter en deux ensembles principaux.

Premièrement, il y a un groupe d'injection plastification. Il permet plusieurs applications comme l'alimentation en granulés et la fusion de la matière, par la suite dosée et injectée sous pression.

Deuxièmement, il y a un groupe de fermeture. Ce dernier permet de verrouiller, ouvrir, fermer le moule et d'éjecter les pièces. Ainsi, il est possible de fusionner la matière et de la transférer dans le moule. **[26]**

I.6.2 Réalisation du processus de moulage par injection :

Le moulage par injection est un procédé de fabrication dans lequel un matériau en fusion est injecté dans un moule préparé à l'avance, puis laissé refroidir. Au cours de son refroidissement, le matériau se solidifie et prend la forme du moule, avant d'être éjecté. Bien que ce procédé puisse être employé pour de la fabrication unique, il est généralement utilisé quand il faut produire des pièces identiques sur une grande échelle. Les matériaux les plus souvent utilisés en moulage par injection sont les plastiques et les élastomères.

I.6.3 Les différents éléments d'une presse à injection :

I.6.3.1 Unité d'injection :

L'unité d'injection est responsable de la fusion et de l'injection du matériau plastique. Elle se compose d'un réservoir de plastique, d'une vis d'injection, d'un cylindre de plastification et d'une buse. Le plastique est chauffé et fondu dans le cylindre de plastification par la vis d'injection, puis injecté dans le moule par la buse pour former la pièce. **[27]**

I.6.1.3.2 Moule :

Le moule est l'élément qui détermine la forme et les caractéristiques de la pièce en plastique. Il est constitué de deux parties, l'empreinte et le noyau, qui s'assemblent pour former une cavité dans laquelle le plastique fondu est injecté. Le moule est généralement fabriqué en acier ou en alliage et est conçu en fonction des spécifications précises de la pièce à produire. **[27]**

I.6.3.3 Système de serrage :

Le système de serrage est responsable de maintenir le moule fermement en place pendant le processus d'injection. Il est composé d'une presse hydraulique ou électrique qui exerce une force de serrage sur le moule pour garantir sa stabilité pendant l'injection du plastique. Le système de serrage permet également d'ouvrir et de fermer le moule pour l'éjection de la pièce finie. **[27]**

I.6.3.4 Système de refroidissement :

Le système de refroidissement est essentiel pour contrôler la température du moule et solidifier le plastique fondu. Il se compose de canaux de refroidissement à travers lesquels circule de l'eau ou un autre fluide de refroidissement. Le système de refroidissement assure un refroidissement uniforme du moule et de la pièce pour éviter les déformations et les défauts.**[27]**

I.6.3.5 Système de commande : Le système de commande est le cerveau de la machine d'injection plastique. Il comprend un **écran tactile** ou un panneau de contrôle qui permet de programmer et de régler les paramètres de l'injection, tels que la température, la pression, la vitesse d'injection, le temps de refroidissement, etc. Le système de commande surveille également le fonctionnement de la machine et peut détecter les erreurs ou les anomalies. **[27]**

I.6.4 Les étapes principales pour le moulage par injection :

I.6.4.1 Fabrication du moule

La première phase est de réaliser le moule qui permettra de façonner la pièce à produire. Ce moule est élaboré à l'aide d'un logiciel de CAO, et d'après les spécifications relatives au modèle 3D de la pièce, en suivant un certain nombre de directives pour le moulage. Il est ensuite fabriqué en deux parties, couramment par usinage CNC, dans un matériau métallique (surtout de l'acier ou de l'aluminium). **[19]**

La plupart des moules sont conçus selon le schéma ci-dessous. Dans un moule nous trouvons donc : Une partie fixe- Une partie mobile- Batterie d'éjecteurs.

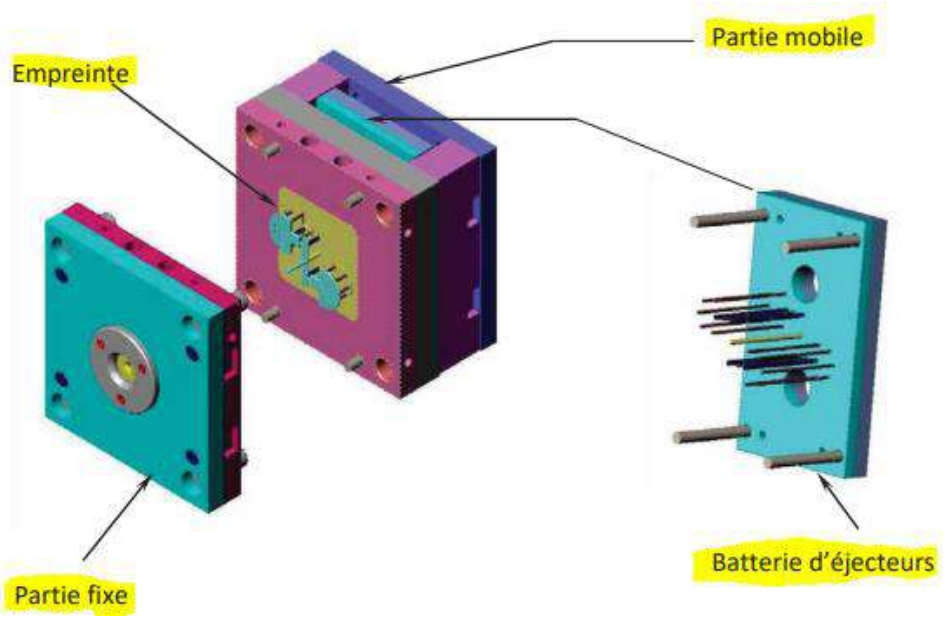


Figure I-11 : Architecture d'un moule d'injection plastique. **[28]**

Le moule thermoplastique est généralement défini par :

-Le nombre d'empreintes (1, 2, 4, 8, 16, 32 ...)

-Son architecture : nombre de plaques, tiroirs…

-Le système d'alimentation : carotte perdue, canaux chauffants.

-Le type d'alimentation des empreintes : pin point, en masse, en parapluie, sous-marine,

-L'éjection des pièces ▪ Système de refroidissement.

Moule d'injection plastique (composants).

1. Bague de centrage.
2. Colonne de guidage.
3. Rappel d'éjection.
4. Plaque d'éjection.
5. Empreinte.
6. Tasseaux.
7. Queue d'éjection.
8. Arrache carotte.
9. Plot de soutien.
10. Contre buse.
11. Bague de guidage.
12. Ressort de rappel.
13. Plaque de fixation A.V.
14. Plaque porte empreinte Inf.
15. Plaque intermédiaire.
16. Plaque de fixation A.R.
17. Ejecteur.
18. Plaque porte empreinte Sup

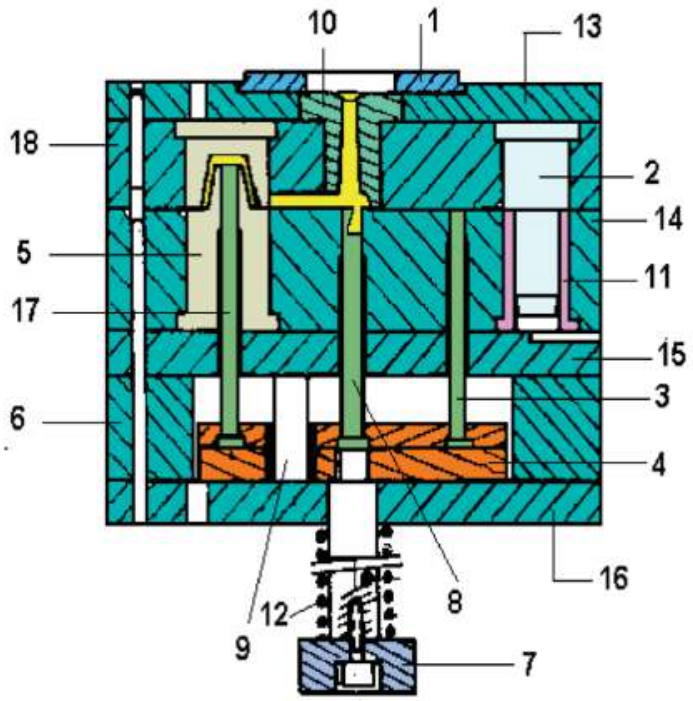


Figure I-12 : Esquisser d'un moule par injection**. [28]**

I.6.4.2 Injection

Le procédé d'injection se déroule en cinq étapes :

-La phase de dosage (Figure I-12 a) : Les granulés de polymère tombent depuis une trémie dans un ensemble vis-fourreau. Ils sont ensuite fondus progressivement par actions conjuguées des colliers chauffant le fourreau, du cisaillement de la matière, provoqué par la rotation de la vis et la friction des granulés (entre eux et contre les parois du fourreau et de la vis). La matière fondue est alors convoyée en avant de la vis (via un clapet anti-retour), dans l'espace créé par le recul progressif de cette dernière lors de sa rotation. **[28]**

-La phase d'injection (Figure I-12-b) : Grâce à un mouvement de translation de la vis, le polymère fondu est transféré du réservoir à un moule via des canaux. Ce mouvement de translation est généré par un vérin, à travers le clapet anti-retour qui, dans cette phase, empêche la matière de rebrousser chemin. **[26]**

-La phase de compactage (Figure I-12-c) : Le moule est composé de deux parties, un fixe et un mobile. Durant le compactage, le moule est maintenu sous pression pour rester Fermé, pendant que la matière est compactée par la vis. Pendant cette phase, le polymère fondu continue à être injecté pour compenser le rétrécissement, ou retrait, de la matière qui refroidit. **[26]**

-La phase de refroidissement (Figure I-12-d) : Lorsque le polymère est entièrement figé au niveau du ou des seuils d'injection, il n'est plus nécessaire d'appliquer une pression de maintien, et la pièce continue de se refroidir jusqu'à ce qu'elle soit complètement solidifiée. La vis reprend son cycle de rotation à l'étape 1. **[26]**

-La phase d'éjection (Figure I-12-d) : Le moule s'ouvre, et la pièce formée est éjectée du moule. **[23]**

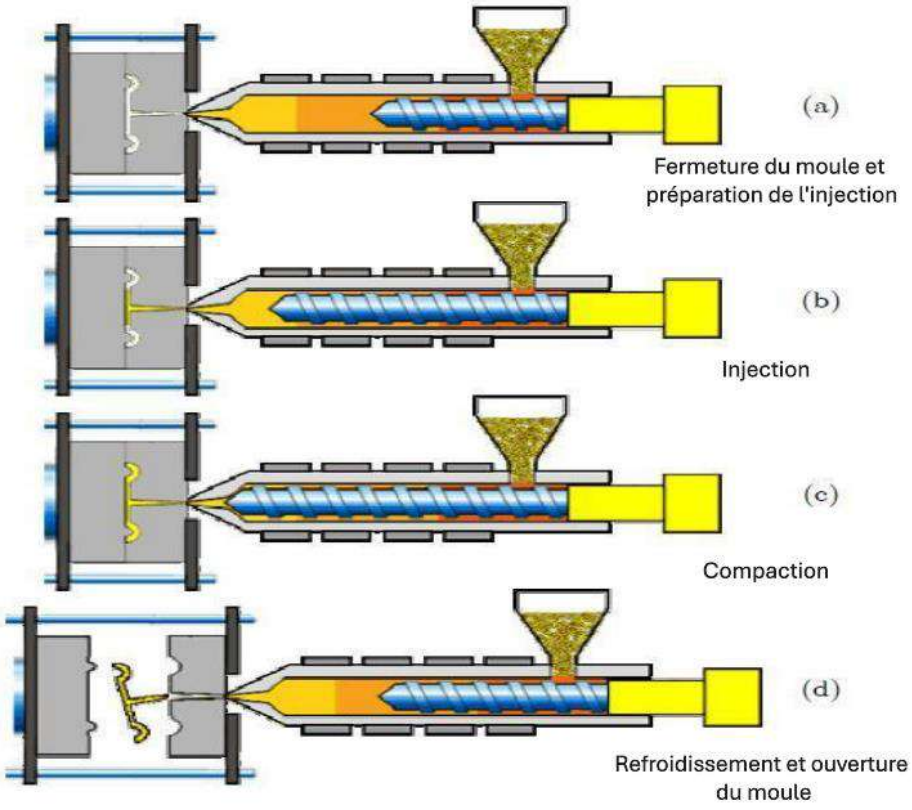


Figure I.13 : Différentes étapes d'injection. **[29]**

I.6.1.4.3 Éjection et finition :

Une fois le matériau totalement refroidi et solidifié, le dispositif de serrage de la machine d'injection sépare les deux moitiés du moule et expulse la pièce contenue dans celui-ci. La pièce obtenue passe alors par certaines opérations de post-usinage visant à enlever le matériau en surplus et les structures de maintien éventuelles. Ces opérations peuvent aussi englober un traitement de surface ou, au besoin, de la peinture, un traitement thermique, un placage électro-métallique, etc…

Le moule, également appelé « outillage », est un élément déterminant dans le processus de fabrication d'une pièce injectée. C'est lui qui va donner la forme définitive à la pièce. Généralement fabriqué en acier, le moule va peser de quelques dizaines de kilos à plusieurs tonnes. **[19]**

I.6.5 Différents types de presse injection plastique :

Il existe plusieurs types de presses d'injection plastiques chacun selon son domaine d'utilisation.

-Presse horizontale à injection. -Presse verticale à injection. -Presse d'angle et bi-matière.

I.6.1.1 Presse horizontale à injection plastique :

La machine de moulage par injection horizontale est la plus utilisée et la plus performante. la plus large gamme d'applications. Cette machine est conçue avec un corps relativement bas, moulage rapide et la convivialité du fonctionnement et de l'entretien. **[30]**



Figure I-14 : Presse horizontale à injection plastique**. [31]**

I.6.1.2 Presse verticale a injection plastique :

Une machine de moulage par injection verticale est, comme son nom l'indique, une machine qui moule le plastique dans une chambre de moulage. Orientation verticale. Dans la plupart des cas, il permet de produire des moules relativement petits. Elle permet d'injecter une plus grande variété d'articles tout en réduisant l'espace nécessaire. Le potentiel de la machine d'injection verticale à accroître l'efficacité de la production peut être considérablement renforcée par l'ajout d'une table rotative ou d'une bande transporteuse. **[30]**



Figure I-15 : Presse verticale a injection plastique. **[32]**

I.7 Conclusion :

Ce chapitre a permis d'explorer les fondements des matériaux plastiques et leur rôle primordial dans la fabrication moderne. Nous avons distingué les thermoplastiques, caractérisés par leur recyclabilité et leur malléabilité, des thermodurcissables, reconnus pour leur résistance à la chaleur et leur rigidité, bien que non recyclables. L'étude de leurs propriétés mécaniques (résistance à la traction, à la compression, dureté, élasticité) et thermiques (température de transition vitreuse, fusion, dilatation) a souligné l'importance d'un choix éclairé pour des applications spécifiques. Le Polyéthylène Téréphtalate (PET) a été identifié comme le matériau optimal pour les bouteilles, grâce à sa résistance, sa transparence, sa légèreté, ses propriétés barrières et sa recyclabilité.

Parallèlement, nous avons détaillé le moulage par injection, un procédé essentiel pour la production de masse de pièces identiques de haute qualité. La description de la presse à injecter et de ses composants clés (unité d'injection, unité de fermeture, moule, systèmes de refroidissement et de commande) a éclairé les étapes de ce processus, de la fabrication du moule à l'éjection de la pièce finie. Cette compréhension des techniques de moulage, notamment le moulage par injection, par compression, le thermoformage, le moulage par soufflage et le rotomoulage, ainsi que de leurs avantages et inconvénients, est fondamentale pour optimiser la conception du moule et garantir une production efficace et conforme aux exigences.

Chapitre II:

Procédé de soufflage plastique

II.1 Introduction :

Le moulage par soufflage est un moyen essentiel de fabriquer des articles en plastique. Il est connu pour fabriquer une grande variété de produits, des bouteilles ordinaires aux pièces spéciales pour des industries spécifiques. À mesure que les technologies progressent et que la pression en faveur de la durabilité grandit, ce processus de fabrication est sur le point de devenir un précurseur. Sa pertinence, son adaptabilité et les promesses qu'il contient mettent en évidence son rôle intégral à la fois aujourd'hui et dans les temps à venir.

Le procédé de moulage par soufflage est particulièrement privilégié pour la production de grands volumes d'articles en plastique à paroi mince, qu'il s'agisse de bouteilles ordinaires ou de boîtiers de protection pour biens de consommation.

Le moulage par soufflage se distingue comme une méthode prédominante dans le vaste domaine de la fabrication de plastiques. La fonction première de cette technique ? Fabriquez des articles en plastique creux.

La procédure est simple : un tube en plastique extrudé se gonfle, prenant la forme précise d'un moule prédéfini. Bien que divers thermoplastiques et polymères thermodurcissables conviennent à cette méthode, le PEHD, ou polyéthylène haute densité, apparaît souvent comme le choix privilégié des praticiens sur le terrain.

Il existe deux principaux types de moulage par soufflage : l'injection et l'extrusion. Les deux ont leurs utilisations uniques mais partagent de grands avantages, comme la mise en forme de pièces avec des designs complexes, couplées à des vitesses de production rapides et des dépenses d'outillage peu coûteuses. **[16]**

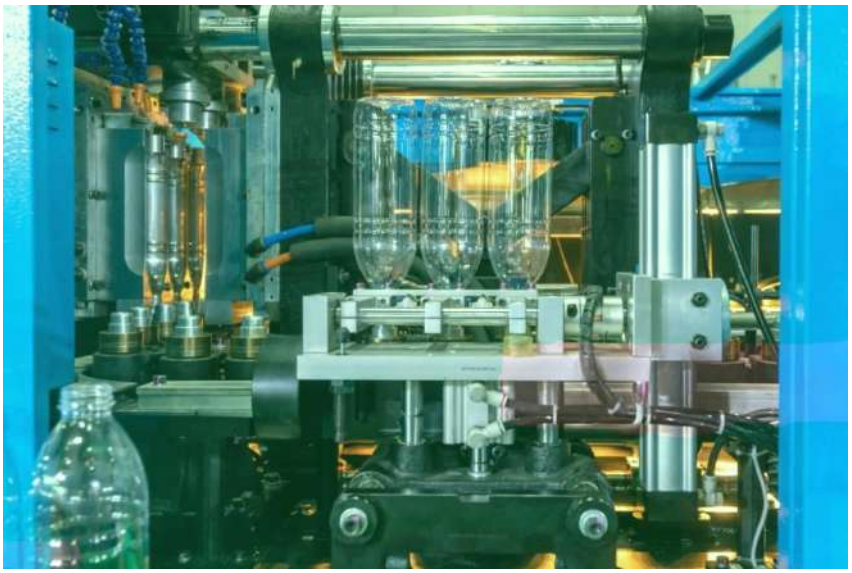


Figure II-1 : La machine automatique de soufflage faisant la bouteille de PET.**[33]**

II.2 Le procédé spécifique du soufflage PET :

Pour fabriquer une bouteille en plastique, surtout en PET (polyéthylène téréphtalate), comme celles utilisées pour l'eau ou les sodas, on utilise généralement un procédé en deux étapes appelé **injection-soufflage**.

Le moulage par injection-soufflage combine les principes du moulage par injection traditionnel et du moulage par soufflage. Le processus commence par l'injection de plastique fondu sur une tige métallique à l'intérieur d'un moule, formant la préforme préliminaire.

Après cela, la préforme, accompagnée de la tige, se dirige vers un autre moule qui reflète la forme du produit final. L'injection d'air comprimé transforme la préforme pour qu'elle épouse la forme du moule.

Bénéficiant d'une plus grande précision, en particulier autour du col du produit, cette méthode utilise principalement des matériaux tels que le PEHD, le PET, le PP et le nylon. Elle est renommée pour la fabrication d'articles allant des contenants de boissons aux réservoirs de stockage complexes.

II.3 Fonctionnement de moulage par soufflage :

Le moulage par soufflage, une méthode essentielle dans la fabrication de plastique, transforme sans effort les tubes polymères (Préforme) en objets creux. Cette procédure complexe mais efficace peut être divisée en quatre étapes principales. Examinons chaque étape pour comprendre les complexités de la machine de moulage par soufflage et de ses opérations :

II.3.1 Sélection et préparation des matériaux :

Avant d'initier le procédé de moulage par soufflage, l'étape initiale est de choisir le polymère adapté. Ce polymère forme la base du produit fini. Il est essentiel de garantir sa qualité et sa compatibilité avec la finalité du produit souhaité. Une fois sélectionné, ce matériau est soumis à une préparation attentive, le préparant pour les étapes ultérieures. **[19]**

II.3.2 Formation de la paraison ou préforme :

Après la préparation du plastique, le polymère est chauffé jusqu'à ce qu'il parvienne à un état souple. Ce polymère réchauffé est ensuite moulé pour créer un tube à bout fermé, fréquemment nommée paraison ou préforme.

Ce tube épais établit la forme initiale, offrant une structure de base que la machine de moulage par soufflage modifiera par la suite pour obtenir le design final. **[19]**

II.3.3 Processus de soufflage :

Avec le préforme fermement maintenue entre deux moitiés de moule, la véritable magie se produit. De l'air sous pression est promptement injecté dans cette préforme. Cette opération provoque le gonflement du tube, le contraignant à s'adapter aux contours du moule. La forme désirée est minutieusement façonnée pour épouser les moindres détails de la conception du moule.**[19]**

II.3.4 Refroidissement et éjection :

Une fois que le polymère gonflé est bien ajusté au moule, le processus de refroidissement débute. À cette étape, une tige centrale est introduite pour soutenir le maintien de la forme désirée. La tige centrale contribue à moduler la température, assurant que la forme nouvellement fabriquée se solidifie sans aucune déformation.

Lorsque l'état de refroidissement optimal est atteint, le produit est doucement éjecté de la machine de moulage par soufflage. La dernière touche consiste à enlever le surplus de plastique, surtout autour de la zone où l'injection d'air a eu lieu. Cette phase finale assure un produit final poli et travaillé. **[19]**

II.4 Les type des moulages par soufflage :

II.4.1 Moulage par injection-soufflage :

Le moulage par injection-soufflage fusionne les techniques traditionnelles du moulage par injection et du soufflage. Le processus débute par l'injection de plastique en fusion sur une tige métallique dans un moule, créant ainsi la préforme initiale.

Par la suite, la préforme, avec l'aide de la tige, est dirigée vers un autre moule qui imite la forme du produit fini. L'introduction d'air sous pression modifie la préforme pour qu'elle prenne la forme du moule.

Cette technique, qui offre une meilleure précision notamment autour du col du produit, se concentre principalement sur l'utilisation de matériaux tels que le PEHD, le PET, le PP et le nylon. Elle est réputée pour produire des articles allant des récipients à boissons aux réservoirs de stockage sophistiqués. **[19]**

*

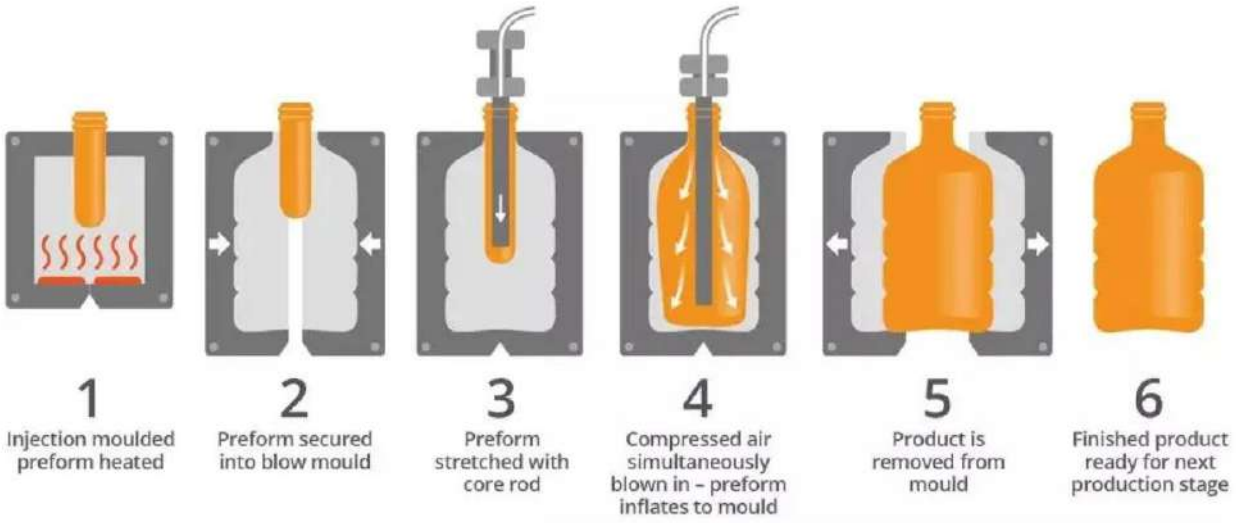


Figure II-2 : Procédé de moulage par injection-soufflage**. [19]**

II.4.2 Moulage par extrusion-soufflage :

Cette méthode, qui diffère de son équivalent par injection, se base sur l'extrusion de la préforme vide. Une fois qu'une extrémité a été scellée, l'air comprimé injecte de la vitalité dans la préforme, la remodelant pour correspondre aux contours du moule.

Après le moulage, le produit est refroidi puis éjecté. La méthode est segmentée en extrusion-soufflage continue et intermittente, chacune présentant des spécificités propres.

On fabrique souvent des articles tels que des bouteilles d'eau, des pièces automobiles et des outils de jardin. On note ici la présence de matériaux tels que le PEHD, le PP et le nylon.**[19]**

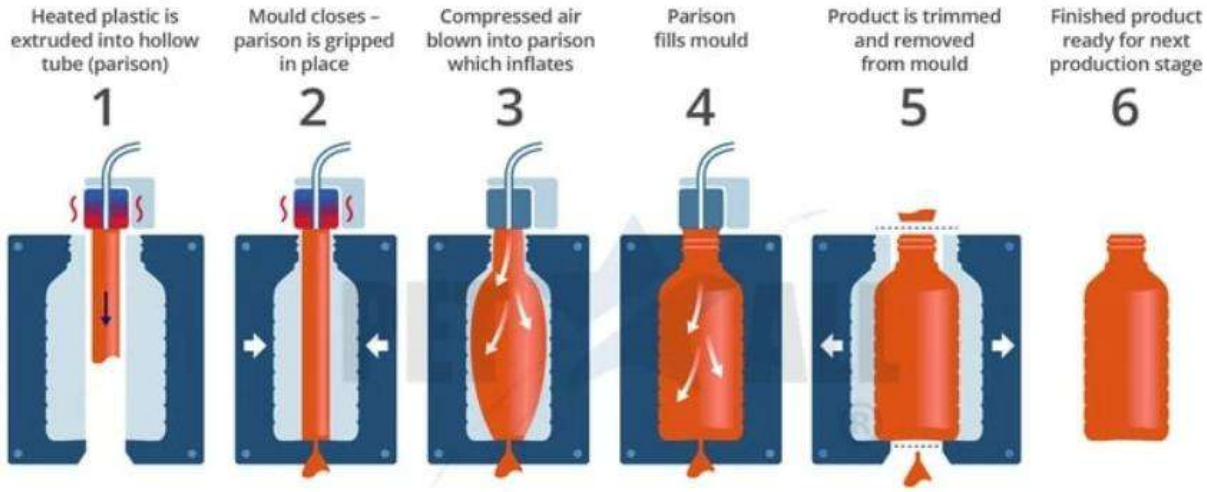


Figure II-3 : Processus de moulage par extrusion-soufflage. **[19]**

II.4.3 Moulage par étirage-soufflage :

Parfois perçu comme une variante du moulage par soufflage à l'aide d'injection, cette méthod e intègre une phase additionnelle : l'étirement.Suite à la fabrication de la préforme, une tige étend le matériau jusqu'à atteindre les dimensions souhaitées, puis le produit final est obtenu par gonflage.Cet te extension améliore la solidité mécanique du produit.Que le processus soit à une ou deux étapes, on retrouve fréquemment des matériaux comme le PEHD, le PP, l'ABS et le nylon dans la méthode de moulage par étirage-soufflage. **[19]**

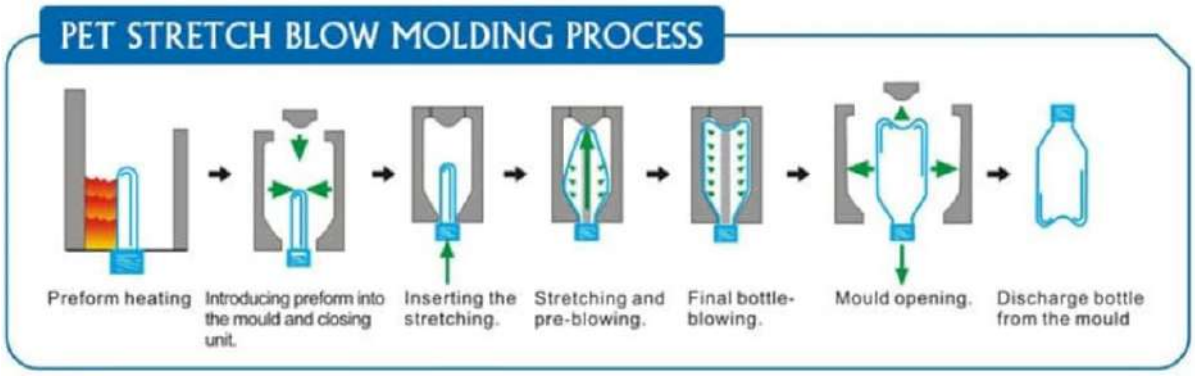


Figure II-4 : Processus de moulage par étirage-soufflage. **[33]**

II.5 Le Préforme PET :

II.5.1 Définition :

Les préformes PET, plus connues sous le nom de « préformes », sont un produit intermédiaire grâce auquel la fabrication des bouteilles est réalisée. Le surnom du PET est dû au matériau à partir duquel ils sont fabriqués, le polyéthylène téréphtalate. **[35]**



Figure II-5 : Préforme PET. **[36]**

II.5.2 Processus :

Ce produit est créé grâce à un processus de moulage par d'injection de précision. La préforme PET est injectée dans un moule pour devenir une préforme qui, grâce à une étape supplémentaire de soufflage, prendra la forme souhaitée (principalement des récipients pour boissons, détergents ou tout liquide).

L'un des avantages des préformes PET est leur grande flexibilité en termes de conception, puisque des produits très différents peuvent être créés par ce même procédé. Selon les besoins du client, nous pouvons faire varier le poids, le volume, la couleur, la forme ou le col de la bouteille.

Les préformes PET peuvent être utilisées pour le conditionnement d'eaux minérales, de jus, de liqueurs, de boissons gazeuses, de boissons gazeuses, d'huiles propres à la consommation, de médicaments, de marinades, de confitures, de produits de consommation, etc. **[35]**

II.6 Moulage par injection-soufflage :

Le procédé d'injection-soufflage en cycle froid constitue une technologie de référence pour la production de récipients creux, notamment les bouteilles et flacons destinés au conditionnement de liquides alimentaires tels que l'eau (plate ou gazeuse), les jus de fruits ou les boissons gazeuses. Grâce à son haut niveau d'automatisation, ce procédé permet aujourd'hui d'atteindre des cadences industrielles impressionnantes pouvant dépasser 60 000 unités par heure, répondant ainsi aux exigences de rentabilité dans le secteur très concurrentiel des boissons.

Principalement réservé aux polymères thermoplastiques, le procédé d'injection-soufflage est compatible avec divers matériaux comme le polypropylène (PP) ou le polylactide (PLA), ce dernier étant un biopolymère compostable issu de ressources renouvelables. Toutefois, le polyéthylène téréphtalate (PET) reste le matériau privilégié pour la fabrication de bouteilles, en raison de ses excellentes propriétés mécaniques et de sa transparence.

Une des spécificités majeures de cette technologie réside dans l'étirage bi-axial de la matière, qui confère au produit final une amélioration significative de ses performances mécaniques, notamment en termes de résistance à la pression interne et à la déformation. Cette orientation moléculaire s'effectue en deux temps : un étirage longitudinal initial, réalisé par l'action combinée d'un piston et d'un soufflage modéré, suivi d'un étirage radial obtenu par insufflation d'air comprimé. Ce double étirage permet une distribution homogène de la matière et une meilleure exploitation des caractéristiques du polymère **[25].**

II.6.1 Principe de fonctionnement :

Le procédé d'Injection-Soufflage permet de réaliser des corps creux qui présentent de bonnes propriétés mécaniques.

Il se décompose en 2 phases distinctes :

- Une première phase d'injection : Cette phase consiste à injecter une préforme (éprouvette) dans un moule d'injection.
- Une deuxième phase de soufflage : Cette phase consiste à souffler la préforme dans un moule.

Cette technique est essentiellement réservée aux thermoplastiques. Le cycle de fabrication se compose de 5 étapes :

Les différentes étapes :

- Injection de la préforme. Celui-ci est définitivement réalisé à ce stade de fabrication de l'objet.
- La préforme encore chaude (120°C-200°C) est transférée dans un moule de soufflage.
- Soufflage. L'air comprimé est introduit au travers du noyau portant la préforme.
- La pièce est démoulée, puis transférée à l'aide du noyau sur le poste d'éjection.
- Ejection. **[37].**

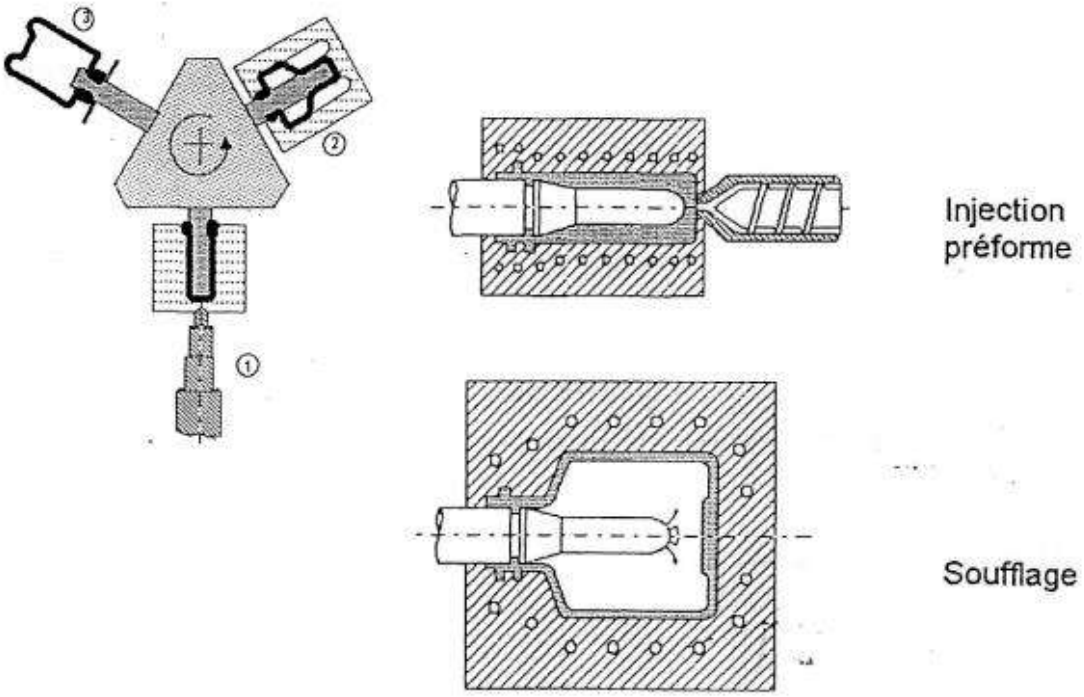


Figure II-6 : Le procédé d'Injection-Soufflage.**[38]**

II.6.1.1 injecter une préforme :

Les préformes en PET sont des tubes qui donneront naissance à des contenants constitués de ce matériau. Il s'agit d'un produit intermédiaire dans la chaîne de production, ils peuvent être soufflés pour façonner le récipient final et peuvent varier en poids, couleur et forme. Pour fabriquer la préforme PET, il faut d'abord chauffer la résine granulée jusqu'à obtenir un mélange lisse qui est injecté dans un moule et passé dans un système de refroidissement pour les durcir, les parois sont épaisses car cette forme est encore incomplète, il faut passer par soufflage, qui donnera naissance à une bouteille. Préformes PET de haute qualité pour boissons gazeuses et non gazeuses, produits alimentaires et ménagers. Les préformes 'Petainer' sont disponibles dans une variété de finitions de col, de poids, de couleurs et de formes. Bien que la plupart de nos préformes soient fabriquées à partir de résine PET 100 % vierge, nous pouvons fournir des préformes contenant jusqu'à 100 % de PET recyclé post-consommation (rPET) sur demande.

Les préformes, compactes et peu encombrantes, sont faciles à stocker et à gérer. Contrairement aux bouteilles en plastique fragiles, les préformes peuvent être organisées dans des racks ou des systèmes de stockage, garantissant ainsi la sécurité et l'intégrité de leur contenu avant d'être soufflées dans divers moules. L'utilisation de préformes PET peut contribuer à réduire les coûts dans tous les domaines, du stockage à l'expédition et à la logistique, et à économiser sur un espace d'entrepôt précieux.

Alors que le monde s'oriente vers des pratiques durables, les préformes PET jouent un rôle central. Leur conception légère contribue à réduire l'impact environnemental, bénéficiant aux entreprises grâce à une réduction des coûts. Les préformes PET étant créées selon un poids spécifique, il est plus facile pour les fournisseurs et les marques d'alléger leurs emballages afin de progresser vers des objectifs de durabilité spécifiques.

D'une manière générale, les conteneurs PET, par rapport à leurs homologues, offrent une rentabilité exceptionnelle sans compromettre la qualité. Les clients sont attirés par ces conteneurs en raison de leur capacité à refléter les qualités d'autres matériaux tout en étant plus économiques.

Il existe une possibilité presque infinie de bouteilles pouvant être fabriquées à l'aide de préformes PET. Une fois le diamètre et le poids du col des préformes sélectionnés, les moules peuvent ensuite être personnalisés pour toutes les formes et tailles différentes pouvant être utilisées dans diverses catégories de consommables/non consommables. **[39]**

II.6.1.2 Processus d'obtention des bouteilles en PET :

La fabrication des bouteilles en PET s'articule autour de trois grandes étapes fondamentales : l'injection des granulés pour former la préforme, le réchauffement de celle-ci, puis le soufflage final pour obtenir la bouteille. Dans un premier temps, les granulés de PET, après séchage, sont chauffés à des températures supérieures à 280 °C, puis injectés dans un moule pour former une préforme, généralement à structure amorphe. Cette préforme est ensuite réchauffée de manière homogène à l'aide de lampes infrarouges, avant d'être introduite dans un moule ayant la forme exacte de la bouteille finale, dont les parois sont maintenues à une température d'environ 11 °C afin d'assurer un refroidissement rapide. **[40]**

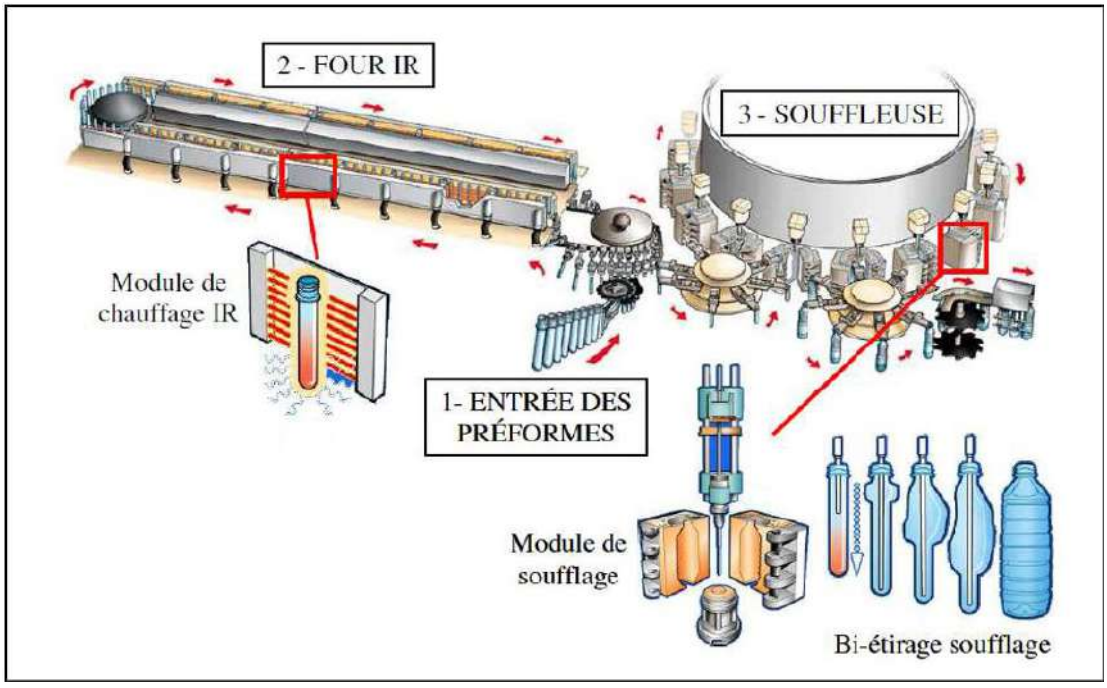


Figure II-7 : Illustration du principe général de la fabrication d'une bouteille par injection soufflage en cycle froid par une souffleuse rotative. **[41]**

La transformation de la préforme en bouteille se déroule alors en trois étapes successives : une tige métallique vient d'abord étirer axialement le fond de la préforme à une vitesse d'environ 1 m/s ; simultanément, une première insufflation d'air comprimé à une pression modérée, comprise entre 5 et 9 bars (0,5 à 0,9 MPa), permet à la matière de commencer à épouser la forme du moule. Enfin, une pression plus élevée, comprise entre 15 et 40 bars (1.5 MPa à 4 MPa), est appliquée pour plaquer complètement le matériau contre les parois du moule froid. Cette dernière phase, d'une durée d'environ 4 secondes, assure la solidification rapide du PET. Par ce procédé combinant étirage mécanique et soufflage à haute pression, la préforme amorphe et épaisse est progressivement transformée en une bouteille à paroi mince, semi-cristalline, d'une épaisseur finale variant généralement entre 300 et 500 microns. **[40]**

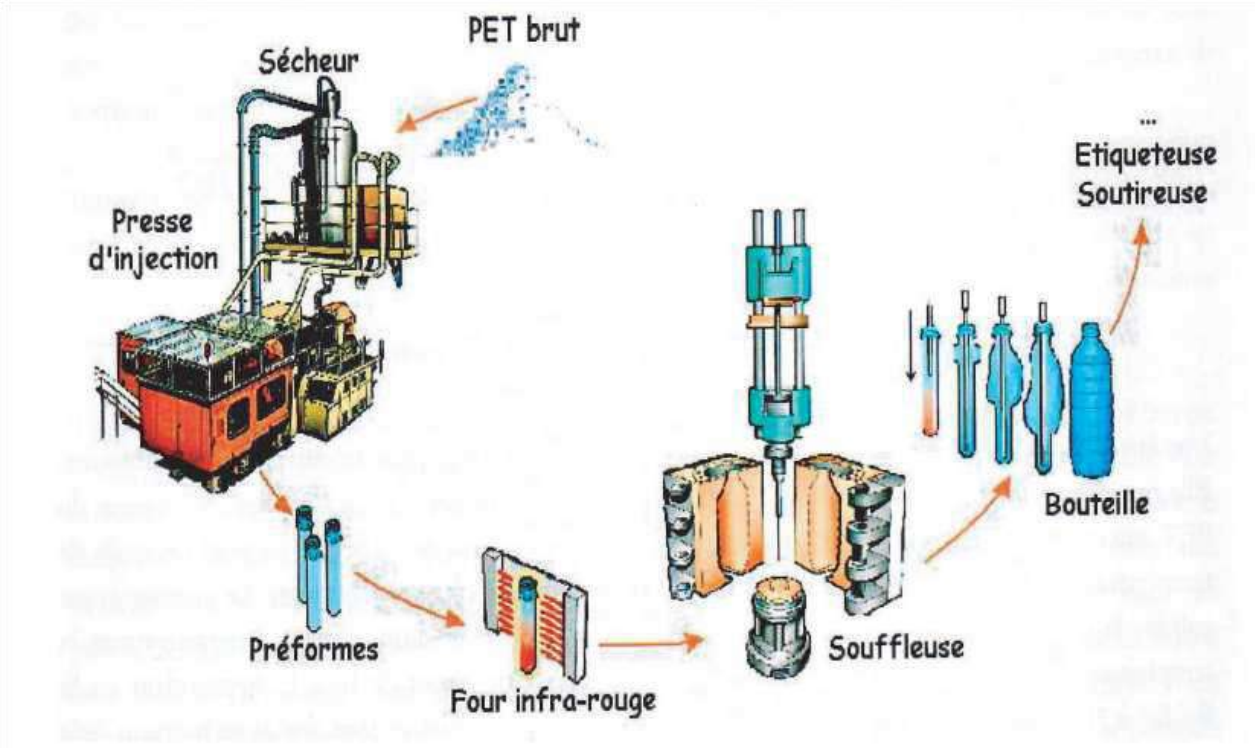


Figure II-8 : Illustration du procédé de soufflage des bouteilles en PET. **[47]**

II.7 Conception des cavités du moule :

La première chose est de calculer le nombre de cavités nécessaires, car cela définira leur répartition. La règle d'or des moules à injection à plusieurs cavités est qu'il soit le plus symétrique possible, afin que le plastique atteigne toutes les pièces et les remplisse en même temps et de la même manière. Si les cavités sont mal réparties, certaines pièces se rempliraient avant d'autres, donc soit le temps de cycle s'allonge, soit une des pièces sortira sans refroidissement suffisant et avec des défauts. Ce procédé d'injection plastique n'est pas simple, car plus il faut de cavités, plus sa distribution est compliquée. Non seulement cela, mais à mesure que les canaux s'agrandissent, le plastique perd de la pression et de la température en s'éloignant de l'auge principale.

Il existe plusieurs façons de répartir les cavités selon les besoins du moule d'injection, en recherchant toujours un flux équilibré et en réduisant la consommation de matière. De nombreux systèmes d'alimentation utilisent un mélange de conceptions radiales et ramifiées. La conception radiale a un volume de système d'alimentation inférieur et fournit un débit plus équilibré. Cependant, des canaux primaires plus longs et plus de débris sont nécessaires à mesure que la taille des cavités augmente.

Le nombre d'options pour placer les cavités est extrêmement élevé et pour choisir l'optimum, différents types de distributions sont généralement testés et des analyses de remplissage sont effectuées pour vérifier leur comportement.

Bien qu'il existe plusieurs façons de placer les cavités dans un moule d'injection plastique, toutes ne sont pas acceptables ou peuvent être améliorées, car les cavités des moules d'injection sont planes, bien qu'a priori elles puissent sembler symétriques et validé, lorsque vous y réfléchissez bien, le placement fera en sorte que les pièces ne soient pas identiques les unes aux autres. Dans les exemples suivants, le placement de gauche est le mauvais et celui de droite l'améliore. **[42]**

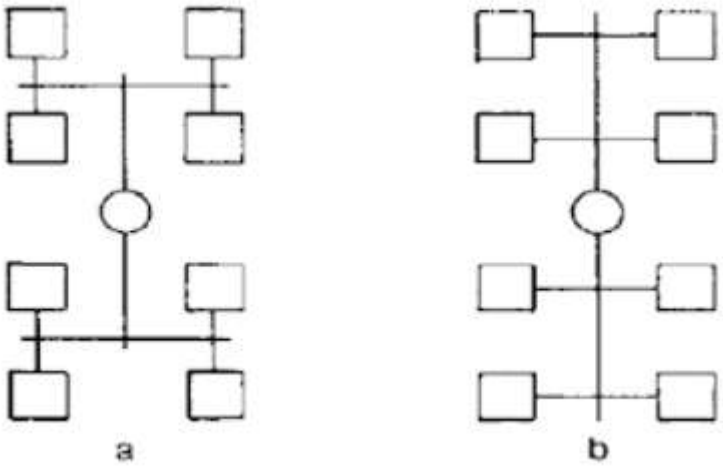


Figure II-9 : Configurations des circuits de refroidissement dans les moules de soufflage. **[42]**

Dans ce premier cas, il est bien clair que sur l'image de gauche le flux n'atteindrait pas toutes les cavités en même temps. Il atteindrait d'abord les 4 cavités les plus proches de la carotte de moulage par injection et, plus tard, les 4 autres les plus éloignées, créant ainsi des pièces inégales. Cela peut être corrigé en modifiant la mise en page, comme le montre l'image de droite. Avec ce changement, toutes les cavités sont identiques. **[42]**

II.8 Conclusion :

Ce chapitre a fourni une exploration technologique exhaustive du procédé de moulage par soufflage, soulignant son rôle essentiel dans la fabrication d'articles plastiques creux, notamment les bouteilles. Nous avons détaillé les principes de fonctionnement des principaux types, tels que le moulage par injection-soufflage et par extrusion-soufflage, mettant en lumière leurs spécificités, avantages et applications. L'attention particulière a été portée sur le procédé d'injection-soufflage pour le PET, décrivant ses étapes clés, de la préparation des matériaux à la formation de la préforme, son soufflage par bi-orientation, jusqu'au refroidissement et à l'éjection du produit fini.

L'importance stratégique des préformes PET comme produit intermédiaire a été mise en évidence, de par leur flexibilité de conception et leur contribution à l'efficacité économique et environnementale. Enfin, la section dédiée à la conception des cavités du moule a souligné la nécessité impérative d'une répartition symétrique et d'un flux équilibré pour garantir l'uniformité et la qualité des pièces produites en grande série.

la maîtrise des technologies de soufflage, et en particulier de l'injection-soufflage pour le PET, est fondamentale pour la production de contenants creux performants. Cette compréhension approfondie est essentielle pour concevoir des moules optimaux et répondre aux exigences de qualité et de rentabilité de l'industrie.

Chapitre III:

Conception des moules

III.1 Introduction :

La conception de moules est une étape essentielle dans le processus de fabrication industrielle, notamment pour les pièces en plastique ou en métal, fabriquées par injection, soufflage ou compression. Cette phase critique requiert une modélisation précise, une prise en compte rigoureuse des contraintes mécaniques et thermiques, ainsi qu'une anticipation des problèmes potentiels liés à la fabrication.

Avec l'évolution des outils numériques, des logiciels de conception assistée par ordinateur (CAO) comme SolidWorks et Blender permettent de concevoir des moules de manière plus efficace et optimisée. SolidWorks, logiciel professionnel largement utilisé dans l'industrie, offre un environnement paramétrique puissant pour modéliser en 3D, assembler les composants du moule, réaliser des analyses de flux et simuler les contraintes mécaniques ou thermiques. Il est particulièrement adapté à la précision et à l'industrialisation des conceptions.

Figure III-1: SOLIDWORKS logo. **[43]**

Blender, quant à lui, bien qu'orienté à l'origine vers le design artistique et l'animation, trouve aujourd'hui sa place dans la conception technique grâce à ses capacités de modélisation organique, sa flexibilité et sa compatibilité avec divers formats d'échange. Il peut être utilisé dans les phases préliminaires de design, pour créer des formes complexes, esthétiques ou ergonomiques, qui seront ensuite intégrées dans SolidWorks pour la partie technique et l'usinage.

La combinaison de ces deux outils permet ainsi une approche complémentaire : Blender pour la modélisation artistique et créative, et SolidWorks pour l'ingénierie, les simulations et la préparation à la fabrication. Cette synergie favorise une meilleure maîtrise du processus de conception de moules, tout en réduisant les erreurs, les coûts et les délais.

Figure III-2: Blender logo. **[44]**

III.2 Matériaux choisies pour fabriques le moule:

Pour fabriquer le moule d'une bouteille, les matériaux choisis doivent répondre à des exigences spécifiques liées à la durabilité, la résistance à l'usure, la précision et la conductivité thermique.

III.2.1 Alliages d'aluminium T6 6063 :

L'alliage 6063-T6 est un aluminium de la série 6000, contenant du magnésium et du silicium. Le traitement T6 signifie que l'alliage a subi une solution thermique suivie d'un vieillissement artificiel, ce qui lui confère une excellente résistance mécanique et une bonne résistance à la corrosion, tout en étant facile à extruder.

Les exigences spécifiques pour les alliages d'aluminium utilisés dans les moules de soufflage sont principalement liées à la stabilité dimensionnelle à la température, la résistance à la corrosion, la dissipation thermique, ainsi que la résistance mécanique adaptée au processus de moulage.

III.2.2 Acier à outils H13 (X40CrMoV5-1) :

L'acier à outils H13 est un acier allié au chrome-molybdène-vanadium, largement utilisé dans la fabrication de moules soumis à des températures élevées. Il est conçu pour résister à l'usure, à la fatigue thermique et aux chocs thermiques, ce qui en fait un choix idéal pour le moulage sous pression, l'injection plastique à haute température, et le forgeage à chaud.

Grâce à sa ténacité élevée, sa résistance à l'abrasion et sa dureté exceptionnelle, le H13 est également utilisé dans de nombreuses applications d'outillage pour travail à chaud. Plus dur et plus résistant que l'acier P-20, il est adapté aux moules à cavité profonde et aux productions en gros volumes, bien qu'il soit plus coûteux.

Ce matériau polyvalent offre également d'excellentes propriétés de traction, de texturation de surface et de stabilité dimensionnelle après traitement thermique.

III.3 Comportement des matériaux :

Le comportement des matériaux décrit leur réaction face à diverses sollicitations mécaniques, thermiques ou environnementales. Il englobe des caractéristiques comme la résistance, la dureté, la déformation ou la conductivité. Ces propriétés sont fondamentales en ingénierie pour garantir la performance, la sécurité et la durabilité d'un produit. Comprendre ces réactions permet de sélectionner le matériau le plus adapté à chaque application technique ou industrielle.

III.3.1 Comportement mécanique des matériaux :

Il concerne la manière dont un matériau réagit à des forces physiques (traction, compression, torsion, flexion). Les propriétés clés incluent :

- **Élasticité :** La capacité d'un matériau à revenir à sa forme originelle après avoir été déformé.
- **Plasticité :** La capacité d'un matériau à subir une déformation permanente sans rupture.
- **Résistance :** Capacité d'un matériau à supporter des charges sans défaillance. **[49]**

Tableaux III-1 : Comportement mécanique entre 'Acier H13' et 'Alliages d'aluminium'. **[47]**

Matière	Acier à outils H13	Alliages d'aluminium
Élasticité 'GPa' (Module d'élasticité)	215	69
Plasticité (capacité à se déformer sans rupture)	Moyenne à bonne, surtout à chaud	Bonne, surtout en formage à froid
Résistance mécanique 'MPa'	1200-1590	190–220

III.3.2 Comportement Thermique des matériaux :

Les propriétés thermiques clés incluent la conductivité thermique, la résistance à la chaleur, la diffusivité, l'effusivité, la capacité calorifique et la dilatation thermique. Ces caractéristiques déterminent la manière dont un matériau réagit aux variations de température et influencent fortement son choix selon l'application industrielle. **[23]**

Tableaux III-2 : Comportement thermique entre 'Acier H13' et 'Alliages d'aluminium' **[48]**

Matière	Acier à outils H13	Alliages d'aluminium
La conductivité thermique $(W.m^{-1}.K^{-1})$	24–28	201–209
La résistance à la chaleur $(C°)$	600–650	150–200
La diffusivité (mm^2/s)	6.5	84
L'effusivité	Moyenne à élevée	Élevée
la capacité calorifique $(J.Kg^{-1}.K^{-1})$	460	900
la dilatation thermique $(10^{-6}/C°)$	11.5	23.5

L'acier H13 est connu pour sa bonne résistance à la chaleur, ce qui en fait un excellent choix pour les moules de soufflage ou à haute température.

L'aluminium 6063-T6 a une très bonne conductivité thermique, ce qui le rend idéal pour les applications nécessitant une dissipation rapide de chaleur, mais il est moins performant à haute température. **[23]**

III.4 Composition d'un moule de soufflage :

Un moule do soufflage se compose de :

III.4.1 Moule supérieur / inférieur:

Le moule se compose de deux parties principales :

La **partie supérieure**, également appelée **partie mobile** ou **partie mâle**, est généralement fixée à la partie mobile de la presse ou de la soufflante. Elle peut intégrer des éléments de guidage ainsi que le noyau central, selon la configuration du moule.

La **partie inférieure**, appelée aussi **partie fixe** ou **partie femelle**, est fixée de manière permanente à la platine fixe de la presse. Elle contient généralement la cavité principale dans laquelle le matériau fondu est injecté.

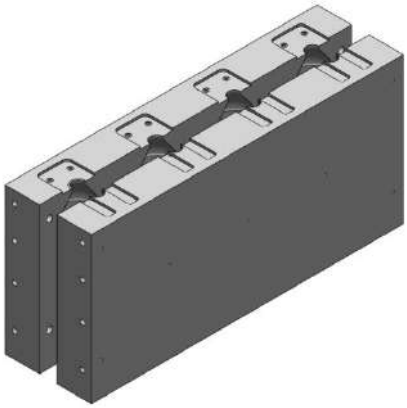


Figure III.3 : Moule supérieur / inférieur modéliser dans SolidWorks.

III.4.3 Support de col de préforme 'Fourchette' :

Sert à maintenir ou centrer les deux demi-moules (supérieur et inférieur) lors de la fermeture.

Peut aussi faire partie du système de guidage pour assurer un alignement précis pendant le cycle de moulage.

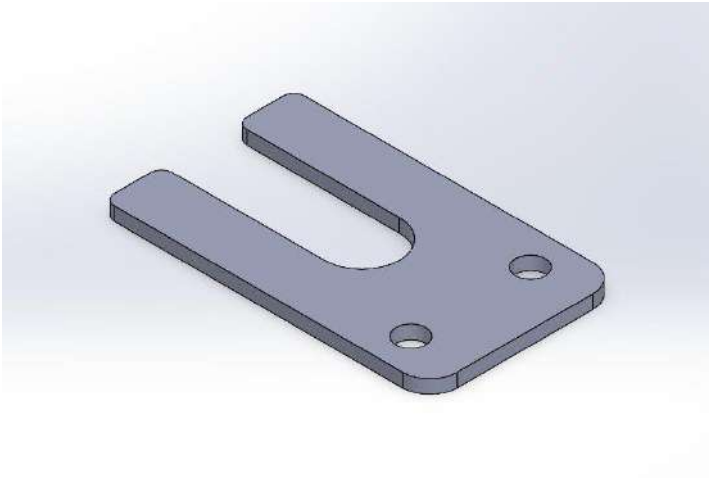


Figure III-4 : Fourchette modéliser dans SolidWorks.

III.4.4 Base de moule :

Plaque inférieure avec cavités pour le fond de la bouteille ou aussi appelé : « plaque de base de moule »

Son métier :

- Fixer la moitié inférieure du moule (fond de la bouteille).
- Déterminer la forme de la base de la bouteille (la partie qui touche le sol).
- Ces cavités sont souvent interchangeables selon la conception de la bouteille.



Figure III-5 : Base de moule modéliser dans SolidWorks.

III.5 Conception d'un moule par SolidWorks :

La conception d’un moule de bouteille en PET repose sur une approche rigoureuse alliant précision géométrique, contraintes thermiques et exigences de production. Elle débute par la modélisation en 3D de la bouteille finale, qui servira de référence pour générer la cavité du moule. Le moule est ensuite divisé en deux demi-coquilles, généralement fixées sur des plaques mobiles de la machine de soufflage. Des éléments fonctionnels tels que les goupilles de centrage, les canaux de refroidissement, les conduits de soufflage et les évents sont intégrés pour garantir le bon fonctionnement du procédé. Le choix des matériaux, les tolérances dimensionnelles et la facilité de maintenance sont également pris en compte afin d'assurer une production stable, répétable et conforme aux exigences de qualité du secteur de l’emballage.

Etape 01 : Conception d'une bouteille sur logiciel 'Blender' :

La conception d'une bouteille sur le logiciel Blender repose sur des techniques de modélisation 3D précises et intuitives. À partir d'un croquis ou de dimensions spécifiques, l'utilisateur peut créer le profil de la bouteille en utilisant des courbes ou des formes de base, puis appliquer l'outil de révolution (spin) pour générer le volume complet. Blender permet également d'ajuster finement les détails comme le filetage du col, le relief de l'étiquette, ou encore les formes ergonomiques du corps de la bouteille. Grâce à ses fonctionnalités de subdivision de surface et de sculpture, il est possible de créer des designs réalistes et optimisés pour le rendu. Enfin, les matériaux et éclairages peuvent être configurés pour produire des visualisations photo réalistes, utiles dans la phase de validation esthétique avant fabrication.

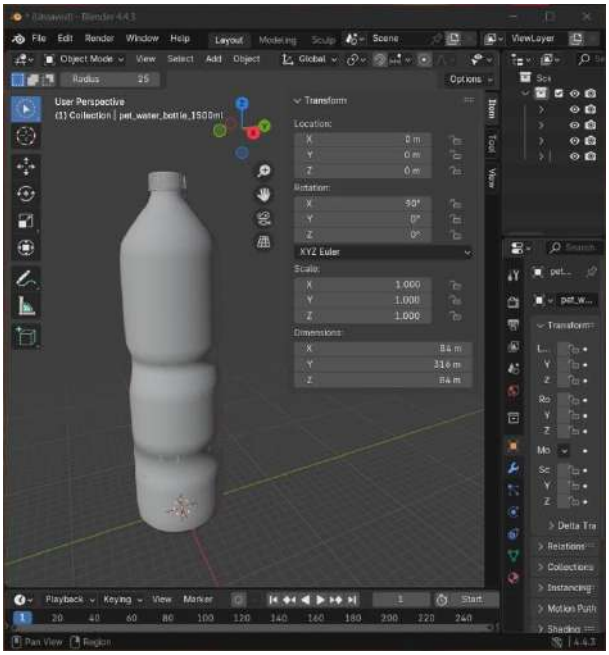


Figure III-6 : Bouteille 1.5 L modéliser dans BLENDER.

Etape 02 : Exportation et vitrification d'une bouteille sur SolidWorks :

Une fois la conception de la bouteille finalisée dans Blender, nous procédons à son exportation dans un format compatible avec les logiciels de CAO pour l'étape de fabrication. Généralement, le modèle est exporté au format STL (Standard Tessellation Language), qui convient parfaitement aux formes organiques, ou au format STEP (Standard for the Exchange of Product Data) si une meilleure précision géométrique et une compatibilité avec les assemblages paramétriques sont requises. Avant l'exportation, nous nous assurons que le modèle est correctement échelonné, qu'il est étanche (manifold) et exempt d'erreurs de maillage, afin d'éviter des problèmes lors de l'importation dans SolidWorks. Ensuite, nous lançons SolidWorks et importons le fichier STL ou STEP dans un nouveau projet.

Si le fichier est au format STL, SolidWorks le convertit en un corps volumique (via la fonction « Importer comme corps graphique / surface / solide »), ce qui nous permet ensuite d'utiliser le modèle comme base pour la conception du moule. Cette transition entre Blender et SolidWorks assure une continuité entre la phase de design artistique et la phase technique de conception industrielle.

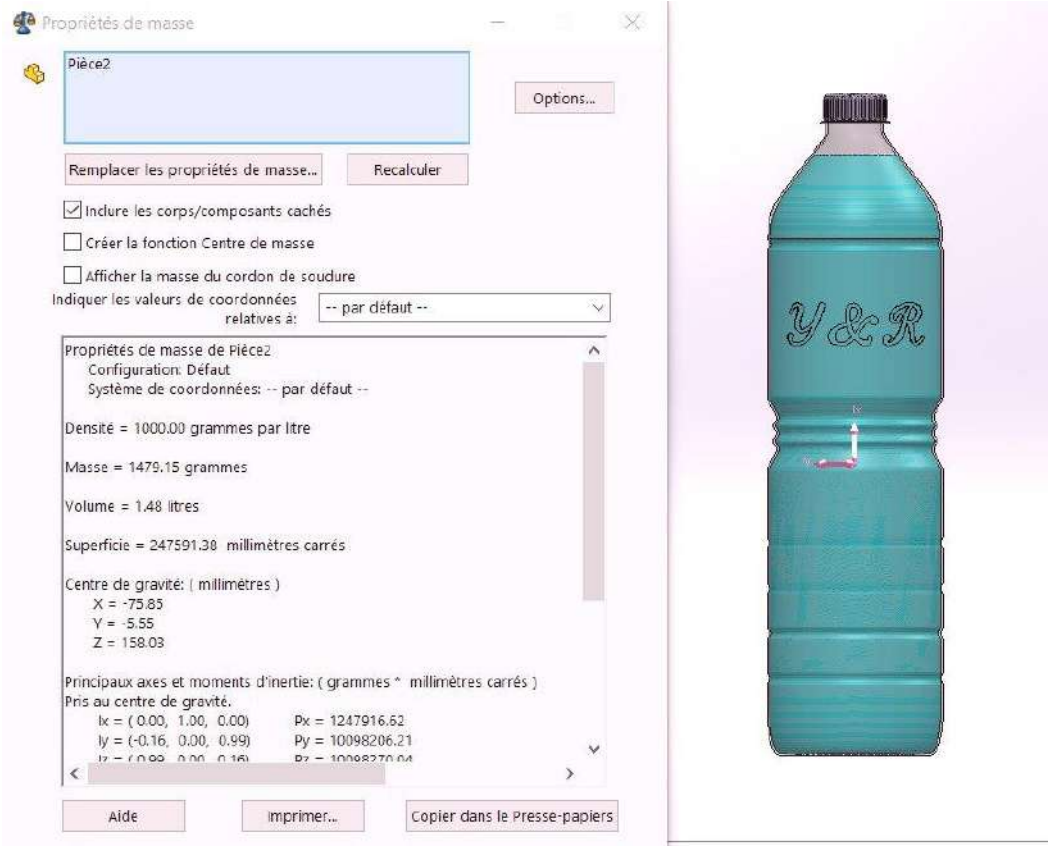


Figure III-7 : Vérification d'une bouteille sur SolidWorks.

Nous testons le volume de la bouteille via le programme Solid Works, en utilisant l'option Propriétés de masse, pour confirmer que le volume de la bouteille est de 1,5 litre, comme indiqué sur **Figure III-8**

Etape 03 : Conception du moule sur SolidWorks :

Création d'un brut de moulage :

Dans le fichier pièce contenant le modèle de bouteille importé (ou dans un nouveau fichier pièce où vous insérez la bouteille comme solide), créez une grande esquisse rectangulaire à un niveau approprié (par exemple, le plan frontal). Ce rectangle doit être bien plus grand que la bouteille et couvrir toute la surface du moule.

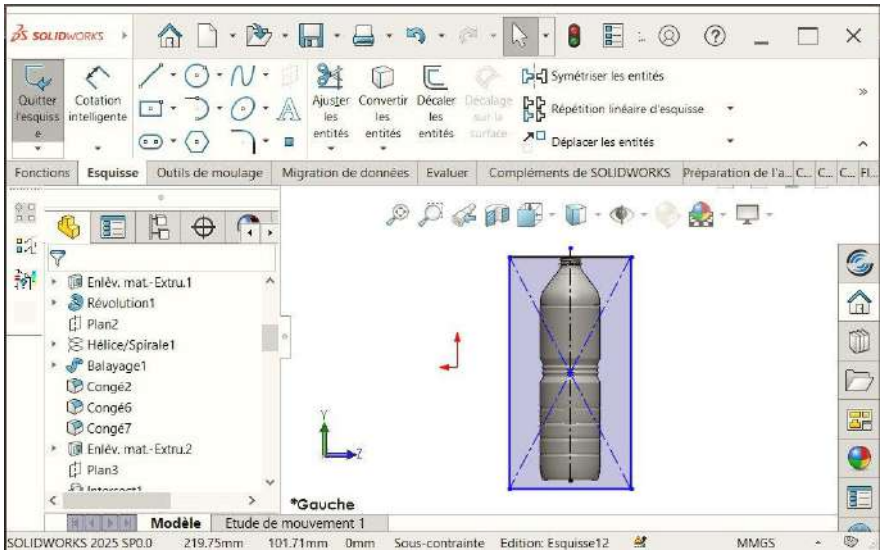


Figure III-8 : Création d'un brut de moulage.

Extrudez ce rectangle pour former un bloc solide. Ce bloc représente la matière première à partir de laquelle le moule sera fabriqué.

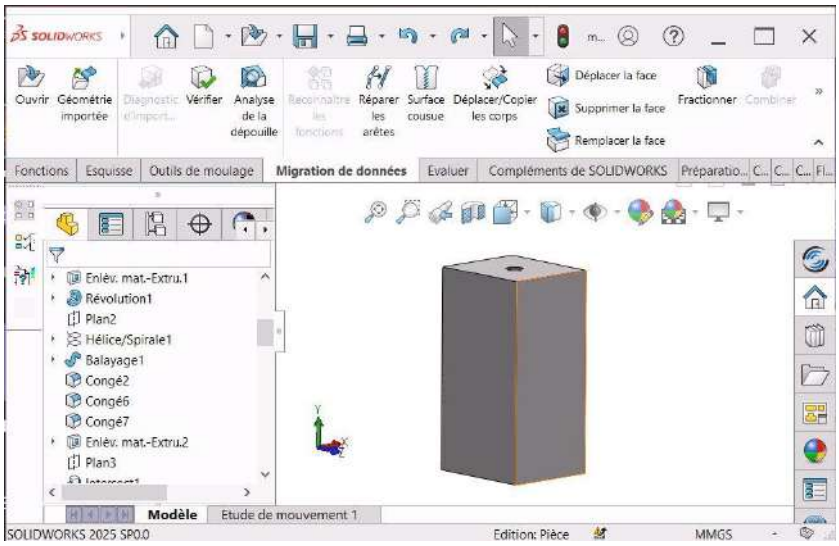


Figure III-9: Création d'un bloc de moulage.

Création de la cavité de la bouteille :

Pour créer la cavité de la bouteille à l'intérieur du corps volumique brut qui représente le moule, il faut d'abord s'assurer que le modèle 3D de la bouteille est présent en tant que "Corps volumique" dans le même fichier de pièce SolidWorks que le grand bloc brut précédemment créé. Ensuite, on utilise la commande "Combiner", accessible via le menu "Insertion", puis "Fonctions", et enfin en sélectionnant "Combiner". Dans la fenêtre " Property Manager Combiner" qui apparaît,

l'opération "Soustraire" est sélectionnée. Pour cette opération, le grand bloc brut est choisi comme "Corps principal" (corps à partir duquel la soustraction sera effectuée), et le "Corps volumique" de la bouteille est sélectionné comme "Corps à soustraire". En cliquant sur "OK", SolidWorks retire le volume de la bouteille du bloc brut, ce qui a pour résultat la création d'une cavité interne parfaitement conforme à la forme de la bouteille à l'intérieur du moule.

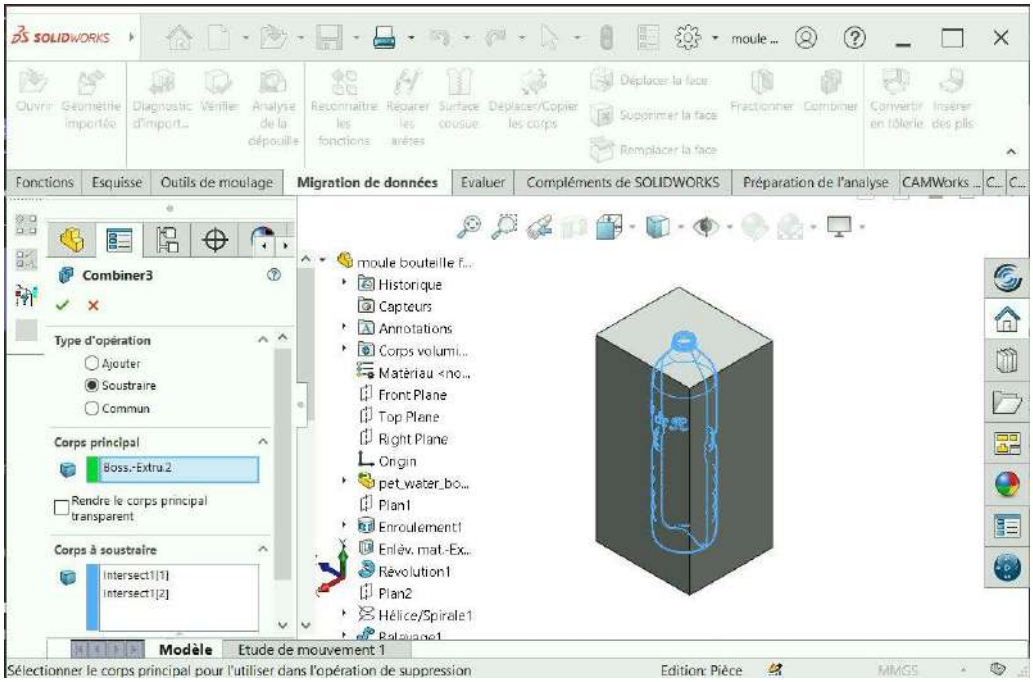


Figure III-10 : Création de la cavité de la bouteille.

Façonnage de la base de la bouteille :

Sur la face inférieure du moule (le corps qui contient maintenant la cavité), dessinez une "Esquisse" représentant les détails de la base de la bouteille. Utilisez la commande "Enlèvement de matière extrudé" pour créer ces détails dans la base de la cavité.

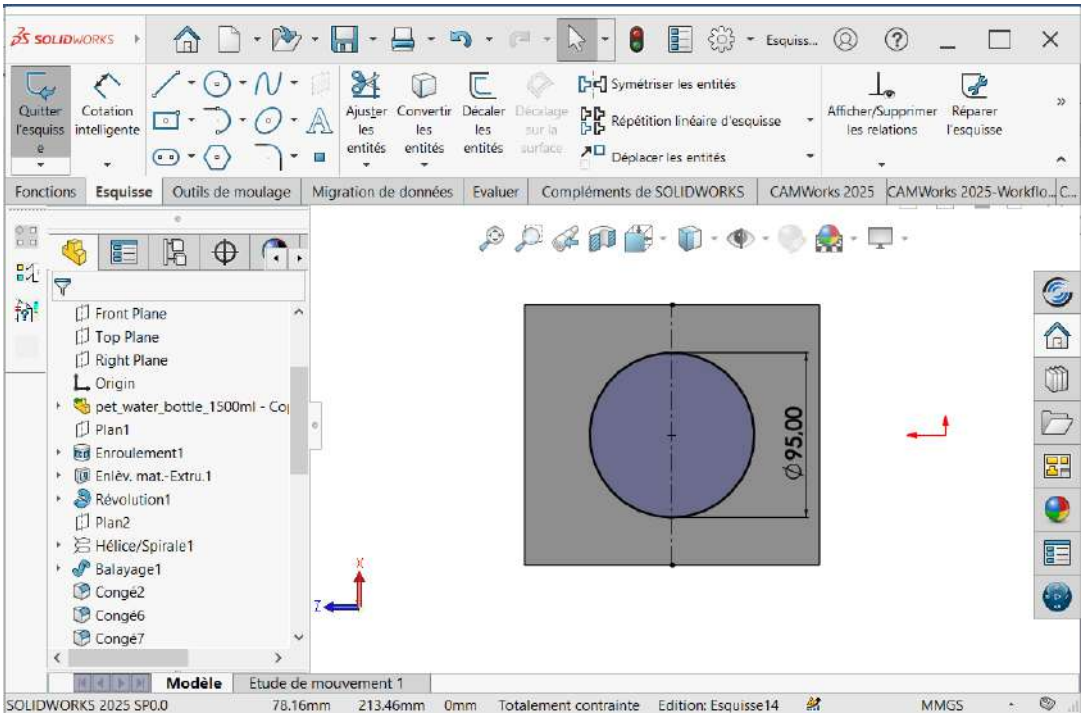


Figure III-11 : Façonnage de la base de la bouteille.

Division manuelle du moule en deux moitiés :

À cette étape, que j'ai appelée fractionnement du moule avec le « fractionner », commence le processus de séparation du bloc solide contenant la cavité du moufle en deux moitiés distinctes. Pour ce faire, le concepteur crée d'abord une nouvelle esquisse ou un nouveau plan représentant la ligne de séparation précise entre les deux moitiés du moule. Cette ligne imaginaire est tracée sur le plan passant généralement par le milieu du moufle, ou sur tout autre plan spécifiquement prévu à cet effet, marquant clairement la limite de la division. Une fois l'outil de découpage terminé, accédez au menu « Insertion », puis à « Fonctions », et choisissez la commande « Scission ». Dans la fenêtre « Scission » qui apparaît, sélectionnez l'esquisse ou le plan créé comme « Outils de découpage ». Ensuite, dans la section « Corps résultants », sélectionnez l'option permettant de créer des corps solides distincts suite au processus de découpage. Lorsque vous appuyez sur OK, SolidWorks divise le bloc solide d'origine (qui contient la cavité du flacon) en deux corps solides distincts, chacun représentant une moitié du moule : la première moitié (souvent le noyau) et la seconde moitié (souvent la cavité), chacune contenant la moitié de la cavité du flacon.

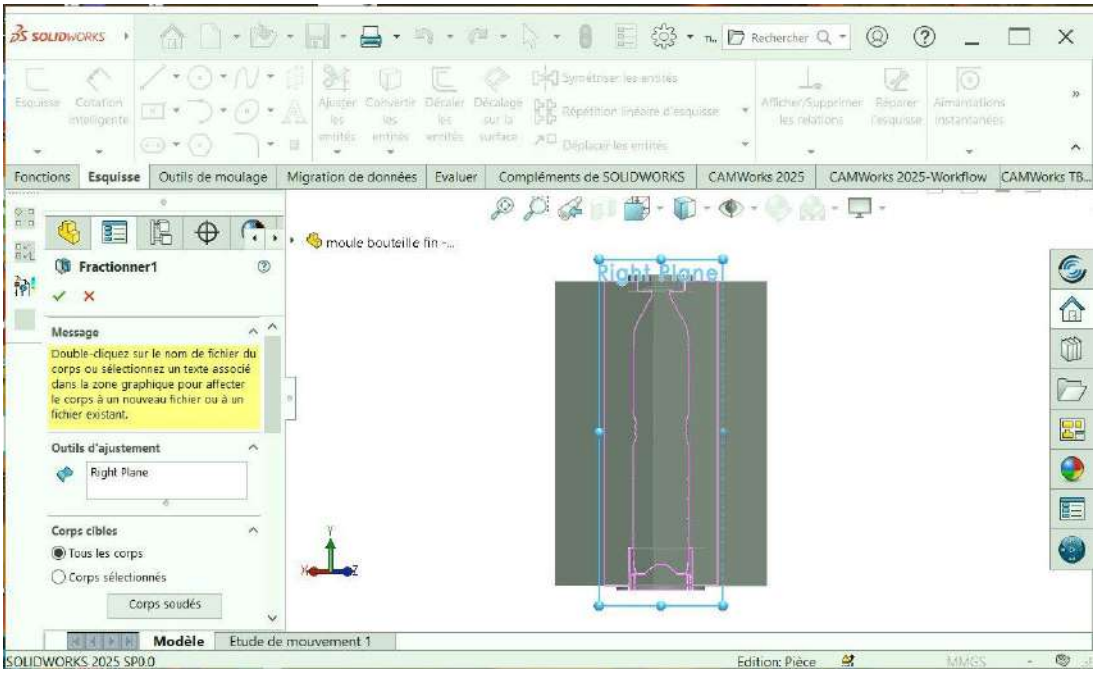


Figure III-12 : Division manuelle du moule en deux moitiés.

Répétition du moule par Symétrie :

Pour obtenir les quatre cavités du moule, une fois que les deux moitiés du moule pour une seule bouteille (maintenant des corps solides distincts) sont conçues, on utilise la fonction "Symétrie" de SolidWorks. Cela implique de sélectionner les deux moitiés du moule dans l'Arbre de création Feature Manager, puis d'aller dans « Insertion"> "Répétition/Mise en miroir" > "Symétrie". Ensuite, un plan ou une face de symétrie (Face/Plan de symétrie) est sélectionné comme référence pour la mise en miroir. Une fois la commande appliquée, SolidWorks crée des copies symétriques des moitiés de moule originales, résultant en 4 ensembles complets de moitiés de moule (un total de 8 corps solides) disposés symétriquement dans la conception finale. Cette méthode permet une duplication rapide et précise des corps solides.

Ajout des trous de fixation et du support de col de la préforme/bouteille :

Les trous de fixation sont essentiels pour monter et maintenir solidement le moule sur la machine de moulage. Ils sont créés sur les surfaces externes du moule à l'aide de commandes telles que "Enlèvement de matière extrudé" ou l'"Assistant pour le perçage". En outre, la conception nécessite l'intégration d'un support pour le col de la préforme ou de la bouteille, parfois appelé "Fourchette". Cette pièce est vitale car elle contribue à maintenir ou à centrer les deux demi-moules (supérieur et inférieur) lors de la fermeture. Ce support peut également faire partie du système de guidage pour assurer un alignement précis pendant le cycle de moulage.

Création des trous de refroidissement avec ajout de tuyaux :

Les canaux de refroidissement sont forés dans le moule en dessinant des cercles sur les surfaces appropriées, puis en utilisant la commande "Enlèvement de matière extrudé" pour créer ces trous de manière à assurer leur connexion et former un passage de flux fermé. Pour représenter les "tuyaux" à l'intérieur de ces trous, la commande "Extrusion" ou "Balayage" peut être utilisée pour créer des corps volumiques remplissant ces passages ou suivant leurs trajectoires courbes, représentant ainsi les canaux efficaces pour le fluide de refroidissement. Ces canaux sont cruciaux pour le contrôle de la température du moule.

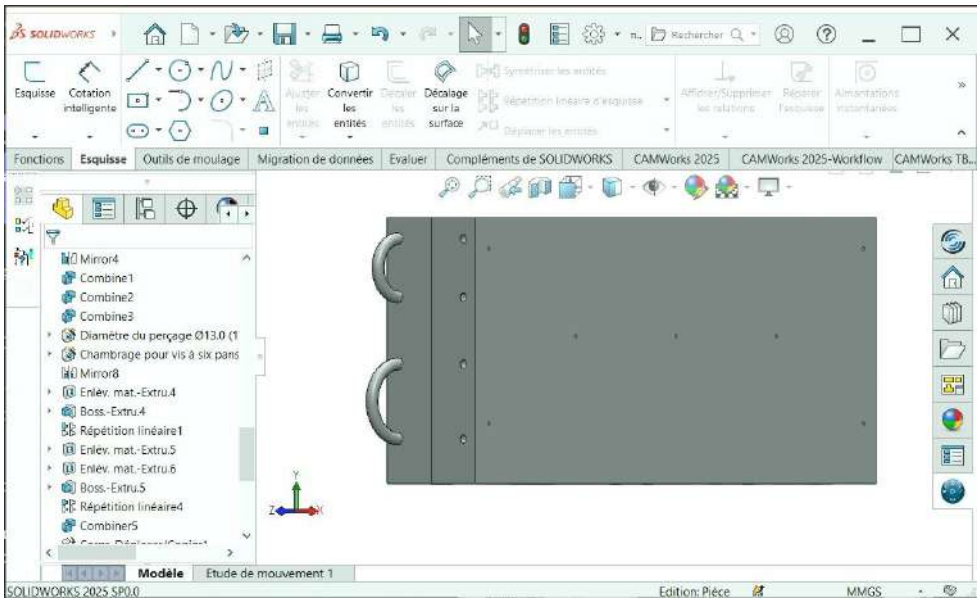


Figure III-13 : Création des trous de refroidissement avec ajout de tuyaux.

Assemblage et Vérification Finale :

Pour finaliser la conception du moule, un nouveau fichier d'assemblage est créé dans SolidWorks. Tous les corps volumiques représentant les moitiés de moule y sont insérés, puis les Contraintes sont utilisées pour assembler précisément chaque moitié avec son homologue. Pour visualiser comment les composants du moule se séparent et s'assemblent, la fonction "Vue éclatée" est utilisée. Afin de valider l'intégrité de la conception, la "Détection des interférences" est appliquée dans l'assemblage pour s'assurer qu'il n'y a aucune collision lors de la fermeture du moule, en complément d'une inspection visuelle complète.

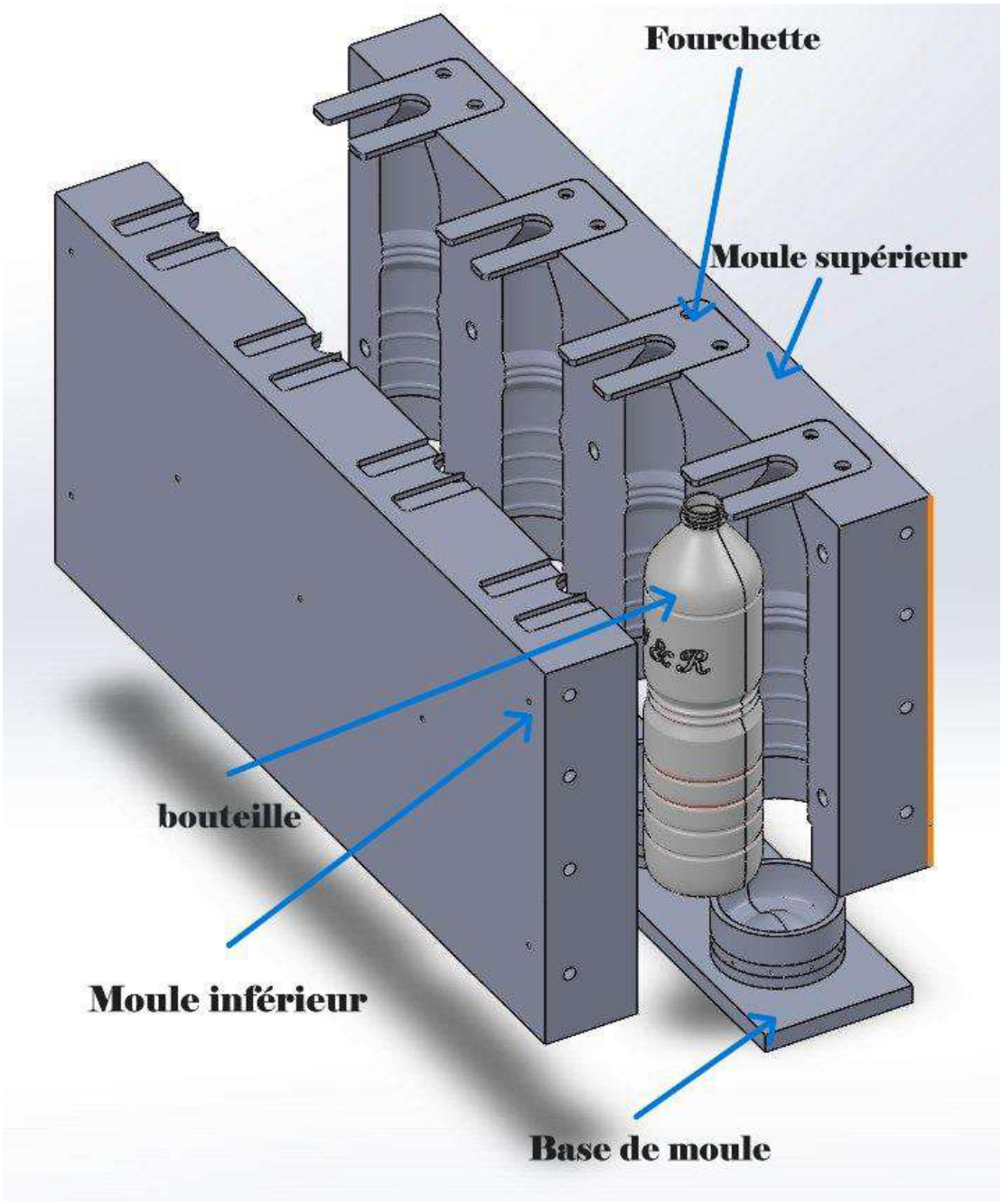


Figure III-14 : Assemblage et Vérification Final de moule.

III.6 Conclusion :

Ce chapitre a mis en lumière les trois piliers fondamentaux de la fabrication des moules : les techniques de fabrication traditionnelles, le choix des matériaux, et la conception des moules. Nous avons exploré l'importance de chaque aspect, depuis les méthodes d'usinage et les critères de sélection des aciers, jusqu'aux étapes clés de la conception de la cavité et des systèmes auxiliaires. En définitive, la synergie entre une conception précise, l'utilisation de matériaux appropriés et des techniques de fabrication maîtrisées est cruciale pour garantir la performance, la durabilité et l'efficacité économique des moules, éléments essentiels à toute production industrielle réussie.

Chapitre IV:

Étude technique avancée et usinage des moules

IV.1 Introduction :

L'étude technique et l'usinage des moules constituent une étape fondamentale dans la chaîne de production industrielle, notamment dans les procédés de moulage par injection, par soufflage ou par compression. Un moule bien conçu et précisément usiné garantit la qualité, la répétabilité et la performance des pièces produites. Cette étude approfondie s'attarde sur les aspects techniques liés par les contraintes mécaniques et thermiques, ainsi que les technologies d'usinage de pointe telles que les machines à commande numérique (CNC). L'objectif est de maîtriser l'ensemble du processus afin d'optimiser la durabilité, la précision et la rentabilité des moules utilisés dans l'industrie

L'usinage des moules par SSCNC (Logiciel de Simulation CNC de Swansoft) représente une avancée technologique majeure dans le domaine de la fabrication de haute précision. Cette étude technique avancée se penche sur les procédés modernes d'usinage assisté par ordinateur, intégrant la simulation numérique et la supervision en temps réel. Grâce aux machines-outils à commande numérique (CNC), il est possible d'atteindre des tolérances très fines et une excellente répétabilité. L'intégration du SSCNC permet d'optimiser les trajectoires d'outils, de réduire les erreurs et d'anticiper les défauts potentiels avant l'usinage réel. Cette approche améliore l'efficacité du processus, la qualité des moules produits et la durée de vie des outils. L'étude comprend l'analyse des matériaux, la programmation CN, la simulation de l'usinage et le contrôle de la qualité. Elle met aussi en lumière l'importance de la maintenance prédictive et de la collecte de données dans un environnement numérique. L'objectif est d'atteindre une production intelligente, fiable et performante dans l'usinage des moules.



Figure IV-1 : SSCNC logo. **[50]**

IV.2 Étude de résistance des matériaux (RDM) d'un moule :

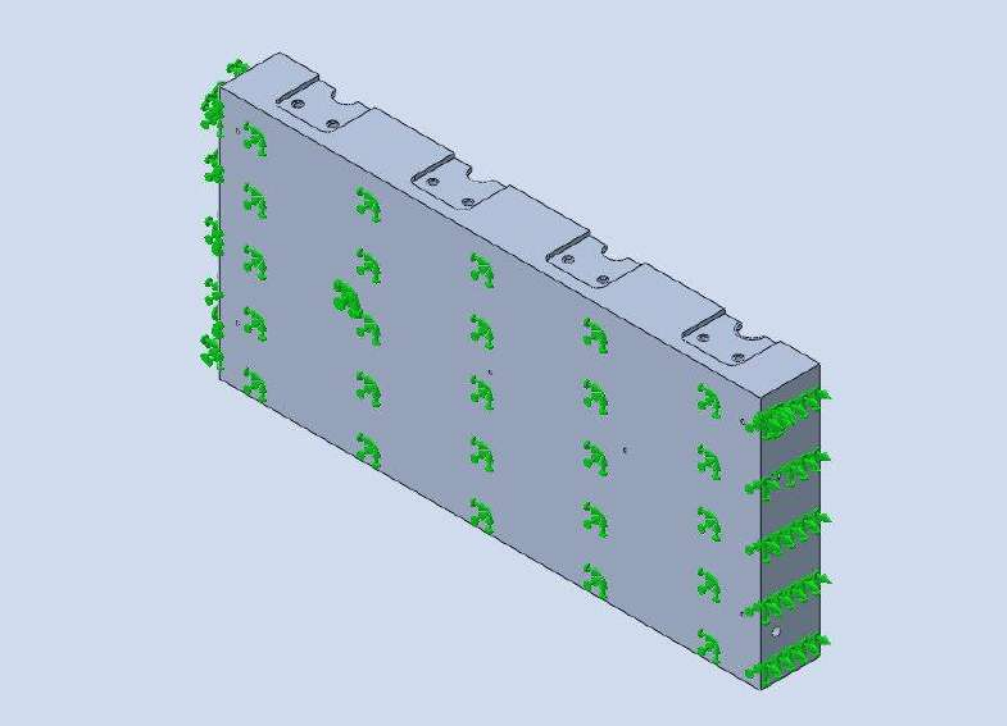


Figure IV-2 : Représentation des déplacements imposés sur le moule.

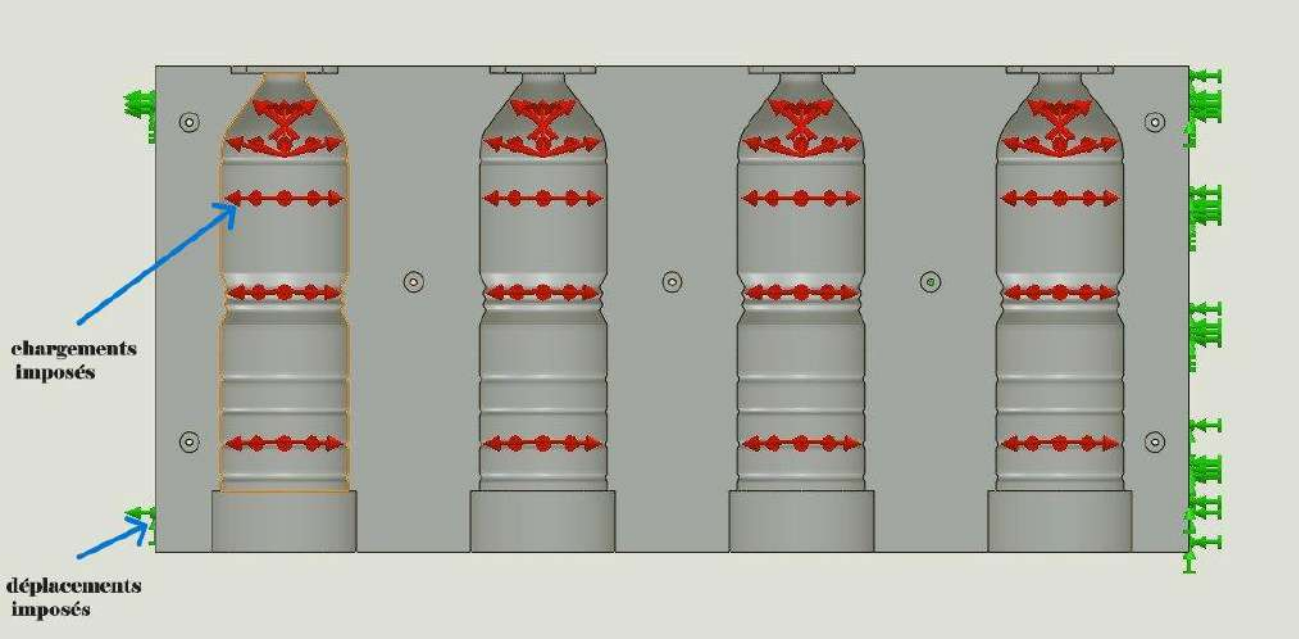


Figure IV-3 : Représentation des chargements imposés sur le moule.

Pour garantir la solidité d'un moule, il est essentiel de réaliser plusieurs analyses, notamment une étude des contraintes mécaniques, qui se décompose en trois étapes principales :

- Application des déplacements imposés : Le moule est fixé sur trois de ses faces (gauche, droite et arrière) afin d'assurer sa stabilité et d'éviter tout mouvement pendant le processus de moulage.

- .Application des charges : Une force de compression totale de 1,5 MPa est appliquée aux empreintes des bouteilles afin de simuler des conditions de fonctionnement réalistes lors du soufflage des préformes. **[46]**
- Sélection des matériaux : Deux matériaux ont été sélectionnés à des fins de comparaison : l'acier à outils H13 et l'aluminium T6 6063. Ces matériaux présentent de bonnes propriétés mécaniques et une résistance suffisante aux contraintes subies pendant la coulée.

Cette approche méthodique permet de concevoir un moule capable de résister aux sollicitations mécaniques tout en assurant une production efficace et de qualité.

IV.2.1 Aluminium T6 6063 :

IV.2.1.1 Résultats de l'étude de contrainte de Von mises (Aluminium):

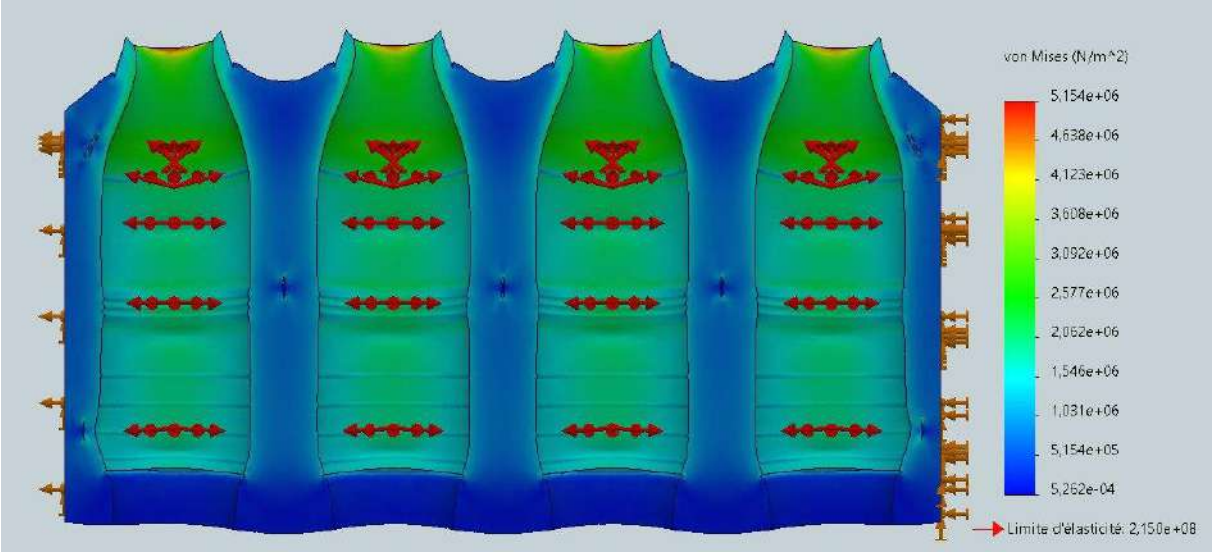


Figure IV-4 : Résultats de l'étude de contrainte de Von mises pour l'aluminium.

Distribution de la Contrainte :

Le diagramme montre que les valeurs de contrainte les plus élevées (zones rouges et oranges) sont principalement concentrées dans les coins internes supérieurs des cavités. Ces zones sont connues pour être des points de concentration de contrainte en raison des changements géométriques brusques. Les autres régions du moule (bleu et vert) présentent des niveaux de contrainte faibles.

Valeur Maximale de la Contrainte :

La contrainte de Von Mises maximale enregistrée est de $\mathbf{5.154 \times 10^6 N/mm^2}$, ce qui équivaut à $\mathbf{5.154\ MPa}$

Comparaison avec la Limite d'Élasticité :

La limite d'élasticité du matériau a été définie dans la simulation à $\mathbf{2.150 \times 10^8}$ (soit $\mathbf{215\ MPa}$). En comparant la contrainte maximale ($\mathbf{5.145\ MPa}$) à la limite d'élasticité ($\mathbf{215\ MPa}$), nous constatons que la contrainte maximale ne représente qu'environ $\mathbf{2.4\%}$ de la limite d'élasticité.

IV.2.1.2 Résultats de l'étude de déplacements (Aluminium) :

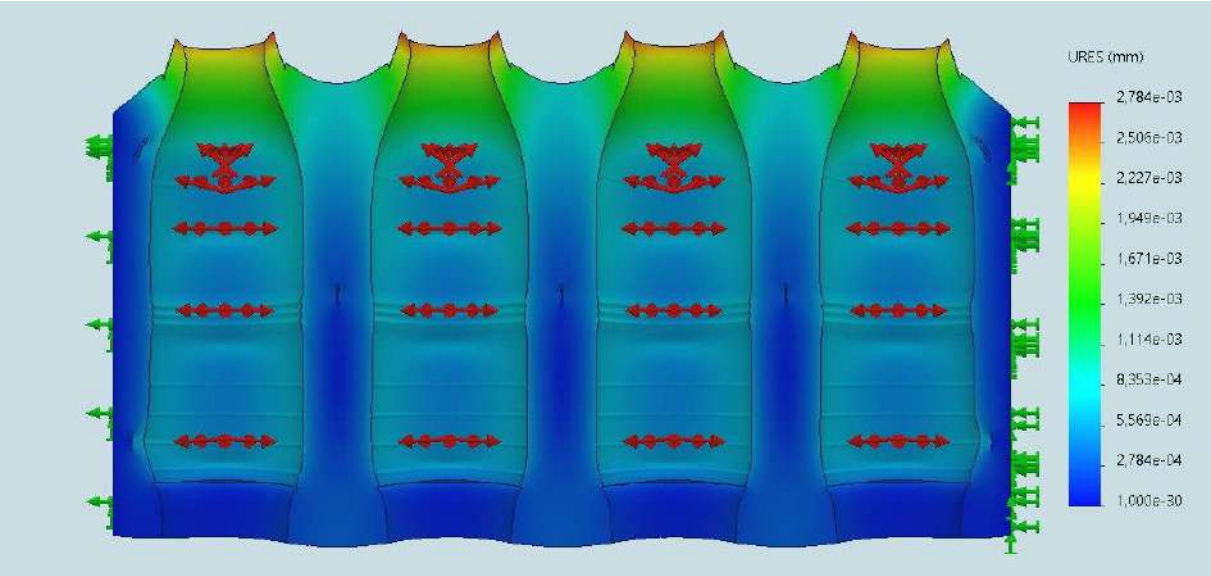


Figure IV-5 : Résultats de l'étude de déplacements pour l'aluminium.

Analyse du Déplacement Résultant :

Les valeurs de déplacement les plus élevées (zones rouges et oranges) apparaissent également dans les parties supérieures des cavités, en concordance avec les zones de contrainte élevée, où la pression tend à pousser les parois du moule vers l'extérieur. Les zones fixées présentent des déplacements très faibles (en bleu foncé). Valeur Maximale du Déplacement : Le déplacement total maximal enregistré est de $2.784 \times 10^{-3} mm$, soit environ $0.0028\ mm$.

IV.2.1.3 Conclusion :

Les résultats de l'analyse par éléments finis indiquent de manière catégorique la performance remarquable du moule de soufflage fabriqué en alliage d'aluminium 6063-T6 dans les conditions de fonctionnement spécifiées (pression de $\mathbf{1.5\ MPa}$) :

Haute Intégrité Structurelle :

Contraintes : La contrainte maximale ($\mathbf{5.154\ MPa}$) est très éloignée de la limite d'élasticité du matériau ($\mathbf{215\ MPa}$). Cela signifie que le moule fonctionne entièrement dans le domaine élastique, et qu'il n'y a aucun risque de déformation permanente (fluage) ou de rupture sous cette pression de fonctionnement. Cela reflète un facteur de sécurité très élevé contre la défaillance matérielle.

Déplacements : La valeur du déplacement maximal de $\mathbf{0.002784}\ \boldsymbol{mm}$ est extrêmement faible. Cela garantit que le moule conservera sa forme avec une très grande précision pendant le processus de soufflage, ce qui est crucial pour maintenir la précision dimensionnelle et la qualité de surface des produits plastiques finis.

IV.2.2 Acier H13 (X40CrMoV5-1) :

IV.2.2.1 Résultats de l'étude de contrainte de Von mises (Acier H13) :

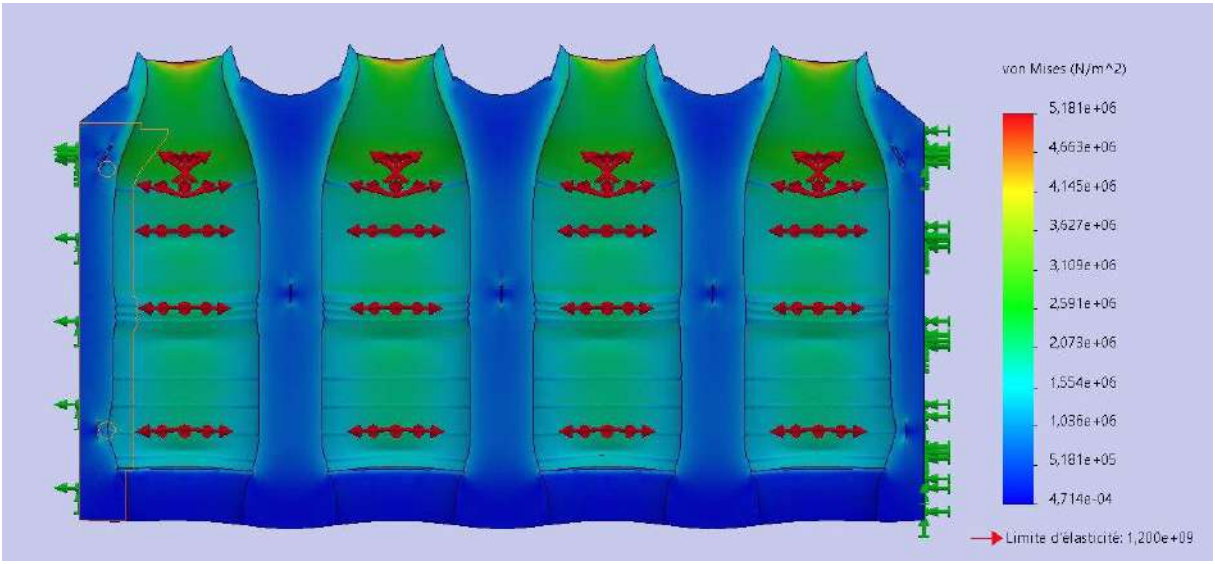


Figure IV-6 : Résultats de l'étude de contrainte de Von mises pour Acier H13.

Distribution de la Contrainte : Le diagramme montre que les valeurs de contrainte les plus élevées (zones rouges et oranges) sont principalement concentrées dans les coins internes supérieurs des cavités. Ces zones sont connues pour être des points de concentration de contrainte en raison des changements géométriques brusques. Les autres régions du moule (bleu et vert) présentent des niveaux de contrainte faibles.

Valeur Maximale de la Contrainte : La contrainte de Von Mises maximale enregistrée est de $.\mathbf{181} \times \mathbf{10^6}\boldsymbol{N/mm^2}$, ce qui équivaut à $\mathbf{5.181}\ \boldsymbol{MPa}$

Comparaison avec la Limite d'Élasticité : La limite d'élasticité du matériau a été définie dans la simulation à $\mathbf{1.200} \times \mathbf{10^9}\boldsymbol{N/mm^2}$ (soit$\mathbf{1200}\ \boldsymbol{MPa}$). En comparant la contrainte maximale ($\mathbf{5.181}\ \boldsymbol{MPa}$) à la limite d'élasticité ($\mathbf{1200MPa}$), nous constatons que la contrainte maximale ne représente qu'environ $\mathbf{0.43}\%$ de la limite d'élasticité.

IV.2.2.2 Résultats de l'étude de déplacements (Acier H13) .

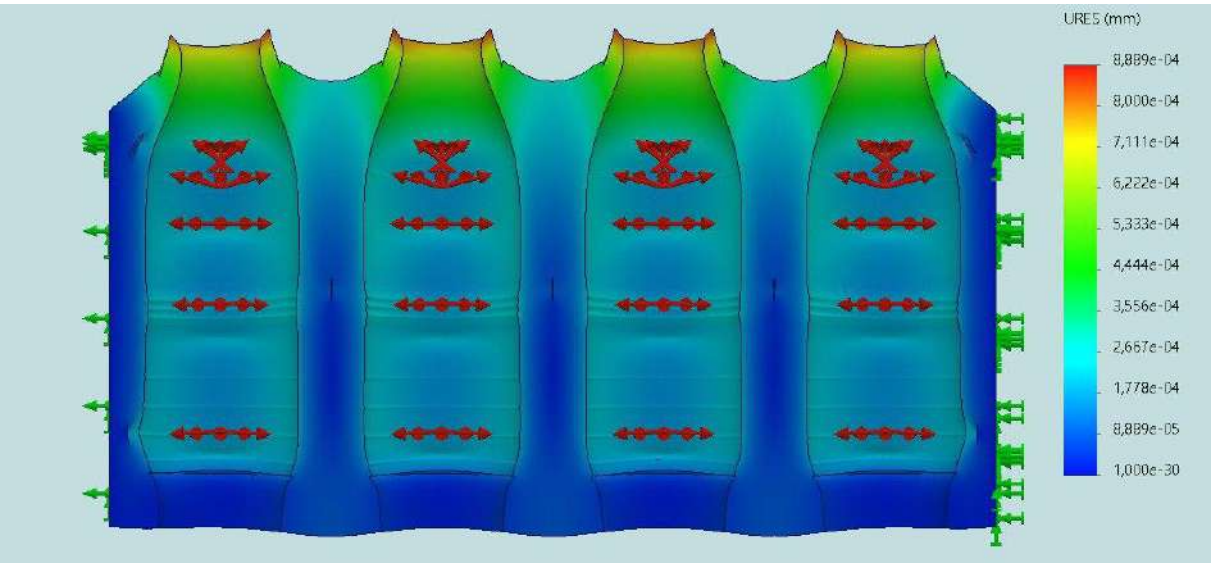


Figure IV-7 : Résultats de l'étude de déplacements pour acier H13.

Distribution du Déplacement : Les valeurs de déplacement les plus élevées (zones rouges et oranges) apparaissent également dans les parties supérieures des cavités, en concordance avec les zones de contrainte élevée, où la pression tend à pousser les parois du moule vers l'extérieur. Les zones fixées présentent des déplacements très faibles (en bleu foncé).

Valeur Maximale du Déplacement : Le déplacement total maximal enregistré est de . $\mathbf{781} \times \mathbf{10^{-3}}\boldsymbol{mm}$, soit environ $\mathbf{0.002781}\ \boldsymbol{mm}$.

IV.2.2.3 Conclusion : Les résultats de l'analyse par éléments finis indiquent de manière catégorique la performance remarquable du moule de soufflage fabriqué en acier H13 dans les conditions de fonctionnement spécifiées (pression de $\mathbf{1.5}\ \boldsymbol{MPa}$) :

Sécurité Structurelle Supérieure :

- **Contraintes :** La contrainte maximale ($\mathbf{5.181}\ \boldsymbol{MPa}$) est très éloignée de la limite d'élasticité du matériau ($\mathbf{1200}\ \boldsymbol{MPa}$). Cela signifie que le moule fonctionne entièrement dans le domaine élastique, et qu'il n'y a aucun risque de déformation permanente (fluage) ou de rupture sous cette pression de fonctionnement. Cela reflète un facteur de sécurité très élevé contre la défaillance matérielle, nettement supérieur à celui observé avec l'aluminium dans des conditions similaires.
- **Déplacements :** La valeur du déplacement maximal de $\mathbf{0.000889}\ \boldsymbol{mm}$ est extrêmement faible. Ceci confirme que le moule conservera sa forme avec une précision extrême pendant le processus de soufflage, ce qui est crucial pour maintenir la précision dimensionnelle et la qualité de surface des produits plastiques finis.

IV.3 Étude thermique de moule :

Lorsque le plastique fondu (PET) ou l dans le moule, il est à très haute température. Pour qu'il prenne la forme finale du moule, il doit refroidir et se solidifier rapidement. Le système de refroidissement permet donc de figer la matière dans le moule de façon efficace.

Un refroidissement bien maîtrisé garantit une bonne finition de surface, sans défauts visibles comme des bulles ou des marques de retrait. Il assure aussi une précision dimensionnelle.

Le refroidissement rapide des moules permet d'augmenter la productivité en réduisant le temps de fabrication, d'éviter les déformations des bouteilles après démoulage, et de préserver la durée de vie du moule en limitant son usure.

Le refroidissement est généralement assuré par des canaux à l'intérieur du moule, où circule de l'eau froide ou un fluide caloporteur. Dans certains cas, des systèmes plus avancés comme le refroidissement par air ou par régulation thermique sont utilisés pour mieux contrôler certaines zones du moule.

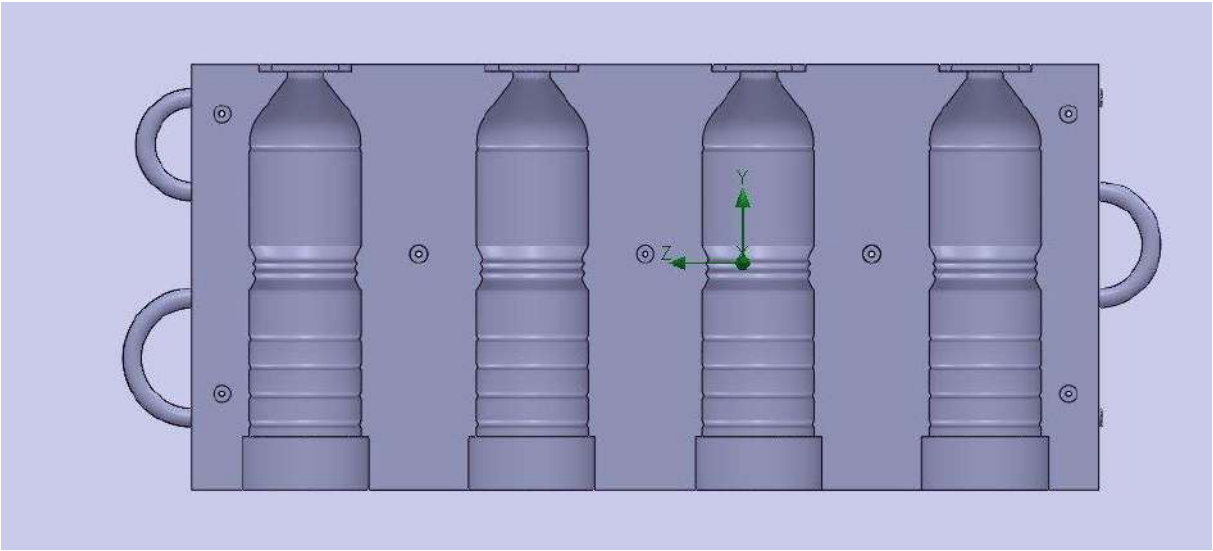


Figure VI-8 : Conception de moule (système refroidissement).

VI.3.1 Méthodologie de système de refroidissement sur SolidWorks :

L'analyse a été réalisée à l'aide du module Simulation d'écoulement/Analyse thermique de SolidWorks Simulation.

Modèle géométrique : Un modèle 3D d'un moule de soufflage multi-empreintes avec canaux de refroidissement intégrés a été utilisé.

Matériau : Le matériau du moule était l'alliage 6063-T6, avec ses propriétés thermiques et mécaniques standard.

Charge thermique : Une charge thermique a été appliquée pour refléter la température de fonctionnement initiale ou maximale atteinte par le moule, comme indiqué sur la courbe de refroidissement, où l'alliage 6063-T6 démarre à environ 360 K et refroidit.

Système de refroidissement : Les canaux de refroidissement internes ont été modélisés selon une conception en serpentin. Le liquide de refroidissement (l'eau) a été défini à une température d'entrée appropriée.

IV.3.2 Résultats

IV.3.2.1 Aluminium T6 6063 :

Un bon contrôle thermique est crucial dans le moulage par soufflage, car la température du moule affecte la qualité et la productivité. L'étude évalue l'efficacité d'un système de refroidissement dans un moule en alliage 6063-T6, reconnu pour sa bonne conductivité thermique et sa légèreté.

Cette étude vise à analyser et évaluer les performances de refroidissement d'un moule de soufflage multi-empreintes en alliage 6063-T6 dans des conditions thermiques spécifiques (température initiale/de fonctionnement). Grâce à l'analyse CFD dans SolidWorks Simulation, la distribution de température sur les surfaces internes et externes du moule, ainsi que la courbe de refroidissement du matériau, ont été examinées.

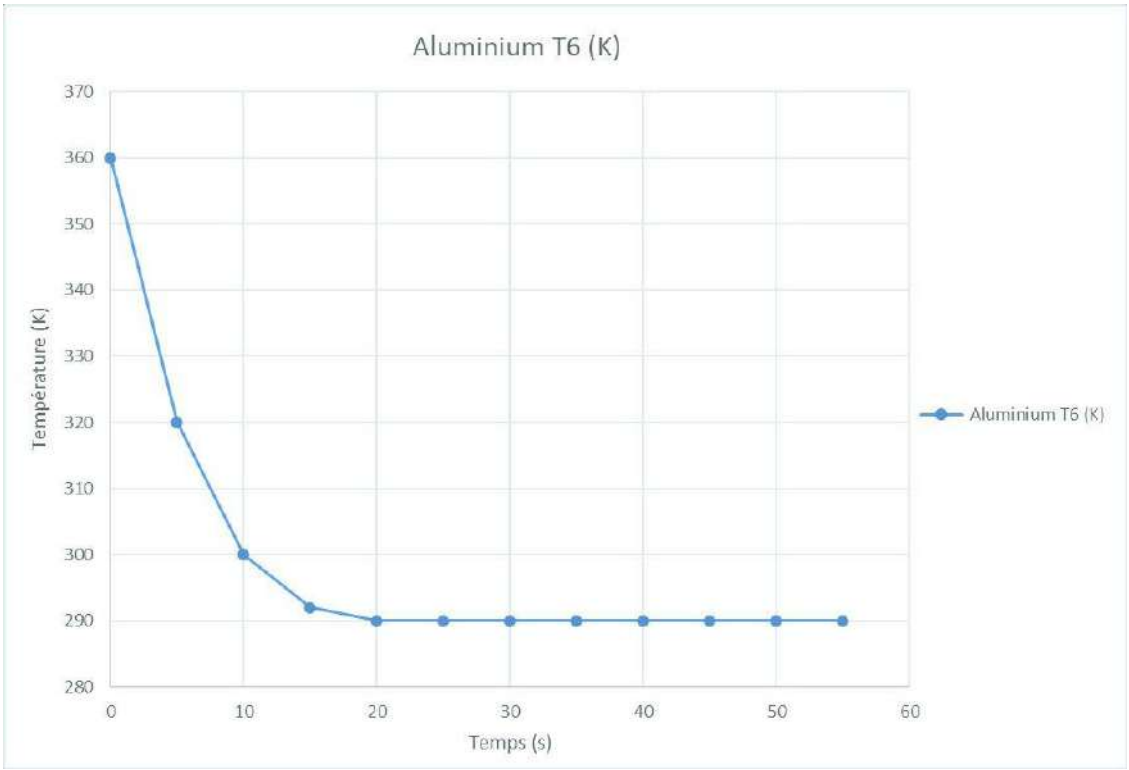


Figure VI-9 : Courbe graphique d'un système de refroidissement 'Aluminium'.

Le graphique montre un processus de refroidissement de l'alliage 6063-T6 d'une température initiale d'environ $360\ k$ (environ $86.85\ C°$) jusqu'à une température stable d'environ $290\ k$ (environ$16.85\ C°$) sur une très courte période de 15 à 20 secondes. La baisse rapide de la température reflète l'excellente conductivité thermique de cet alliage, indiquant sa grande capacité à dissiper la chaleur très rapidement et à réduire considérablement le temps de cycle de production. **[24]**

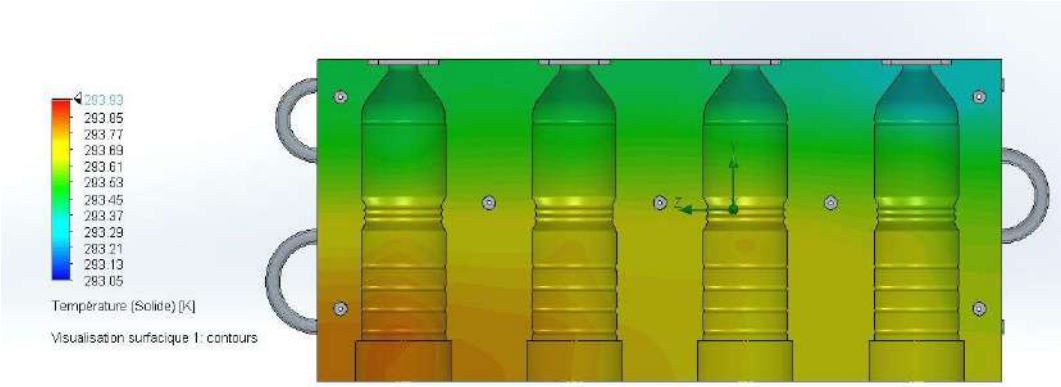


Figure VI-10 : La température sur la surface de moule pour l'aluminium.

Ce graphique montre la distribution de la température sur les surfaces externes des cavités du moule (où la bouteille est formée).La plage de température affichée varie entre $293.05\ K$ et $293.93\ K$, ce qui indique une distribution de température largement uniforme sur la surface de formage, avec une légère variation de $0.88\ K$.

Cette distribution homogène indique un contrôle efficace de la température de surface, ce qui est crucial pour garantir la qualité du produit final.

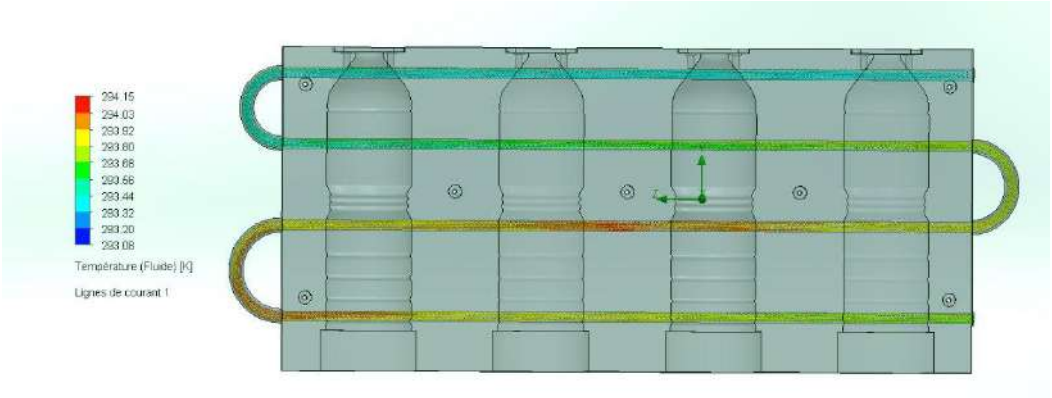


Figure VI-11 : La température de fluide pour l'aluminium.

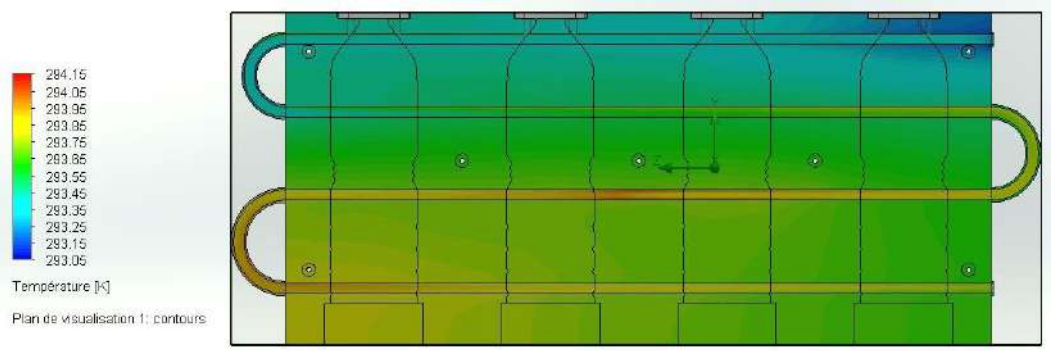


Figure VI-12 : La température de solide pour l'aluminium.

Interprétation et Conclusion :

Les résultats de l'analyse du flux thermique indiquent catégoriquement l'excellente performance du système de refroidissement du moule de soufflage fabriqué en alliage 6063-T6 dans les conditions thermiques spécifiées.

Efficacité de Refroidissement Exceptionnelle : La grande vitesse de refroidissement du moule, comme en témoigne l'atteinte d'une température stable en environ 15-20 secondes, confirme l'efficacité supérieure du système de refroidissement et l'excellente conductivité thermique de l'alliage 6063-T6. Cette rapidité se traduit directement par une réduction significative du temps de cycle de production et, par conséquent, une augmentation de la productivité.

Distribution Thermique Uniforme : La distribution uniforme de la température à la surface du moule, avec une légère variation, assure un refroidissement cohérent du produit plastique. Cela réduit la probabilité d'apparition de défauts tels que la déformation, les contraintes résiduelles, ou une mauvaise finition de surface, contribuant à la production de produits de haute qualité.

Adéquation de l'Alliage 6063-T6 : Cette étude confirme que l'alliage 6063-T6 est un choix extrêmement efficace pour les moules de soufflage qui nécessitent un refroidissement rapide et des cycles de production courts. Ses propriétés intrinsèques telles que la conductivité thermique supérieure, la facilité d'usinage et son faible poids, en font un matériau économique et pratique pour ces applications.

Impact sur la Productivité et la Qualité du Produit : Le refroidissement efficace et le contrôle thermique précis contribuent directement à l'amélioration de la qualité du produit final en assurant une solidification homogène de la matière plastique, et réduisent la consommation d'énergie associée aux longs processus de refroidissement.

IV.3.2.1 Acier H13 (X40CrMoV5-1) :

Avec les mêmes paramètres et conditions que précédemment pour étudier le système de refroidissement du moule, nous avons changé le type de matériau en Acier H13 (X40CrMoV5-1).

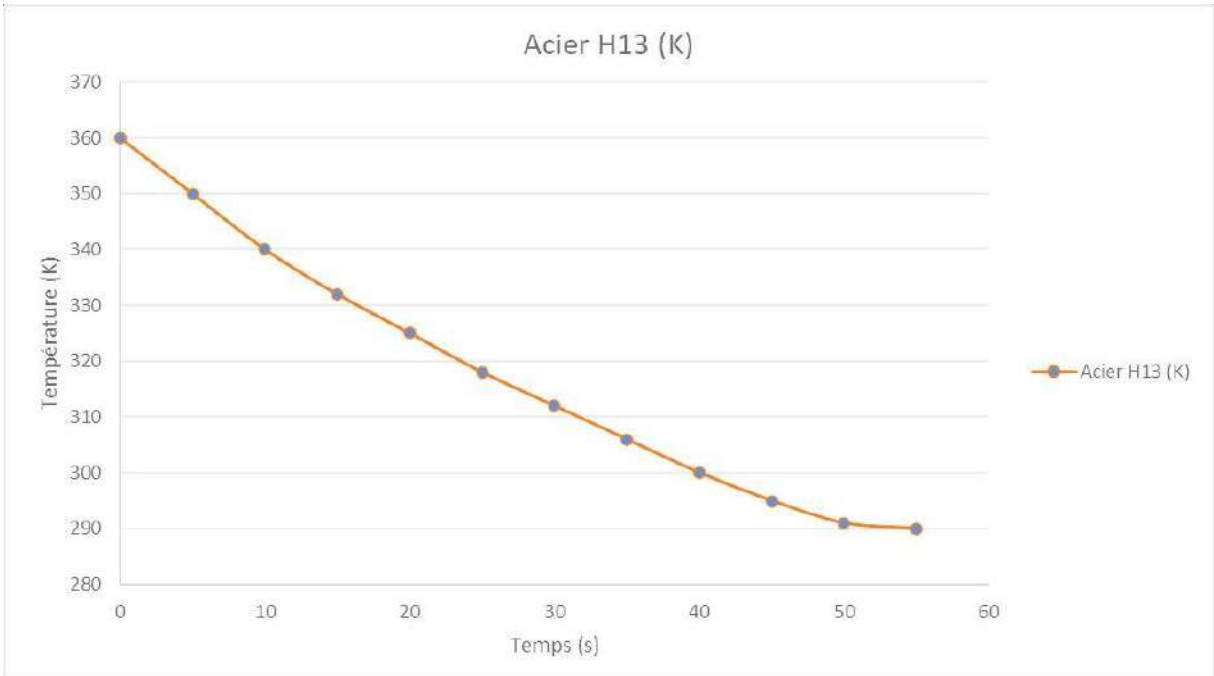


Figure VI-13 : Courbe graphique d'un système de refroidissement 'Acier H13'

Le graphique montre un processus de refroidissement de l'acier H13 d'une température initiale d'environ $360\ K$ (environ $86.85\ C°$) jusqu'à environ $290\ K$ (environ$16.85\ C°$) sur une période d'environ 55 secondes. La courbe se caractérise par une diminution exponentielle de la température, un modèle typique des processus de refroidissement. Cela indique la capacité du moule à dissiper efficacement la chaleur dans un délai raisonnable pour le cycle de production.



Figure VI-14: La température sur la surface de moule pour acier H13.

Ce graphique montre la distribution de la température sur les surfaces externes des cavités du moule (où la bouteille est formée). La plage de température affichée varie entre $293.20\ K$ et $293.26\ K$, ce qui indique une distribution de température extrêmement uniforme sur la surface de formage. Un contrôle précis de la température de surface est crucial pour la qualité du produit, et ces résultats indiquent l'absence de points chauds ou froids indésirables.

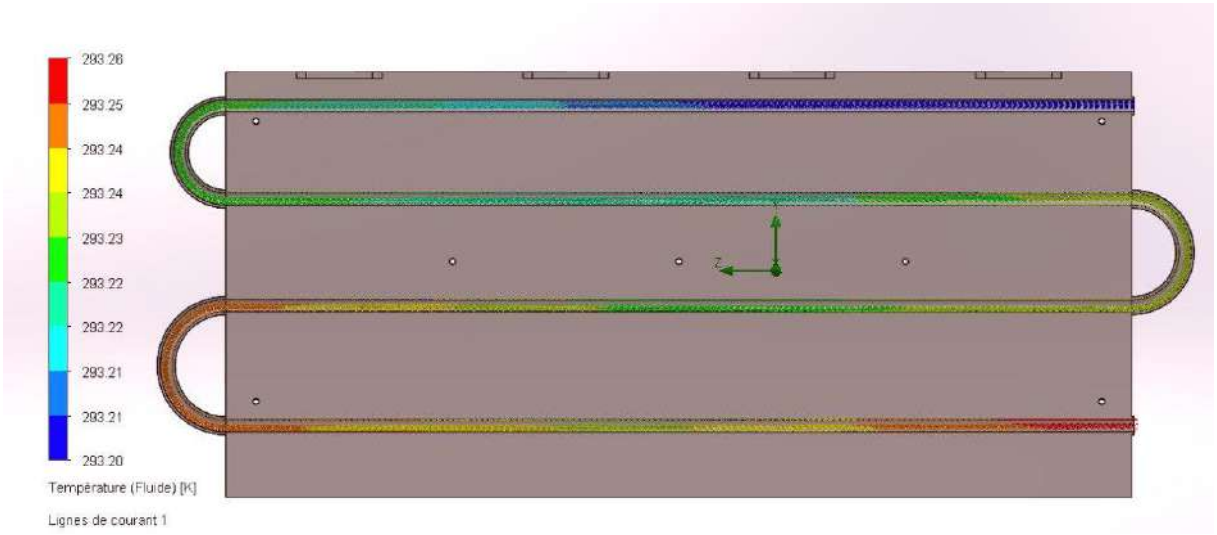


Figure VI-15 : La température de fluide pour acier H13.

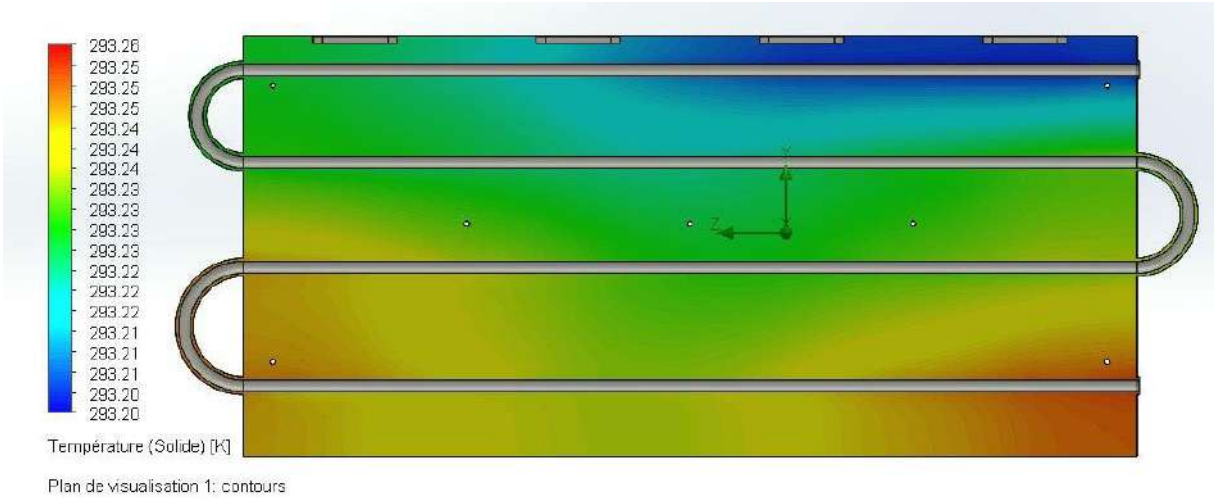


Figure VI-16 : La température de solide pour acier H13.

Interprétation et Conclusion :

Les résultats de l'analyse du flux thermique indiquent catégoriquement l'excellente performance du système de refroidissement du moule de soufflage fabriqué en acier H13 dans les conditions thermiques spécifiées.

Haute Efficacité de Refroidissement : La courbe de refroidissement confirme que le moule peut passer d'environ 360 K à une température proche de celle du liquide de refroidissement en moins d'une minute, ce qui est très positif pour le temps de cycle de production. (En référence aux résultats complets de l'étude, le liquide de refroidissement ne montre qu'une très légère augmentation de sa température, ce qui indique son efficacité élevée à absorber la chaleur).

Distribution Thermique Uniforme : La plage de températures extrêmement étroite à la surface du moule (et dans les zones internes du moule, basée sur l'étude complète) indique une distribution thermique homogène et excellente. Cela garantit que le produit plastique sera refroidi uniformément, ce qui réduit la probabilité de déformation, de défauts ou de contraintes résiduelles dans le produit final, et améliore la qualité de surface.

Importance de la Conception des Canaux pour l'Acier H13 : Cette étude démontre qu'une conception efficace et précise des canaux de refroidissement est absolument nécessaire pour obtenir un contrôle thermique exceptionnel dans les moules en acier H13. Cela renforce l'utilisation des propriétés inhérentes au matériau, telles que sa résistance aux hautes températures et sa stabilité dimensionnelle.

Impact sur la Productivité et la Qualité du Produit : Un refroidissement rapide et un contrôle thermique uniforme se traduisent par une réduction du temps de cycle de production, augmentant ainsi la productivité. Cela contribue également à améliorer la qualité du produit final en assurant une solidification homogène du matériau plastique.

IV.4 La comparaison entre ‘Aluminium T6 6063’ et ‘Acier H13’:

Il ressort de l'ensemble des études menées, incluant l'analyse de la Résistance Des Matériaux (RDM) et l'évaluation des systèmes de refroidissement, que l'acier H13 représente la solution optimale pour une durabilité absolue et une longue durée de vie dans des environnements exigeants ; il se distingue clairement par sa robustesse et sa rigidité sous contrainte, ce qui en fait le choix privilégié pour les applications nécessitant les plus hauts degrés de résistance à la déformation et aux sollicitations, telles que la production à très grande échelle dans des conditions d'utilisation sévères et exigeant une longue durée de vie du moule.

En revanche, l'alliage d'aluminium 6063-T6 offre rapidité et efficacité pour des productions en plus petites quantités et à un coût plus modéré, excellant considérablement en vitesse de refroidissement grâce à sa conductivité thermique supérieure, ce qui influe directement sur la réduction du temps de cycle de production et le rend parfaitement adapté aux prototypes ou aux productions de volume moyen où la vitesse du cycle thermique est un facteur crucial. Bien que l'acier H13 permette d'atteindre une excellente homogénéité thermique grâce à une conception efficace des canaux de refroidissement, son processus global de refroidissement est plus lent. Par conséquent, le choix entre l'acier H13 et l'alliage d'aluminium 6063-T6 repose sur un équilibre précis entre les exigences du projet en termes de durabilité, de vitesse, de coût et de conditions d'utilisation.

IV.5 Usinage d’un moule avec machine CNC :

IV.5.1 CAMWorks :

CAMWorks est un logiciel de programmation de FAO (Fabrication Assistée par Ordinateur) qui s'intègre directement à SolidWorks. C'est une solution avancée de programmation CNC conçue pour optimiser et accélérer le processus de fabrication. Une de ses fonctions clés est la capacité à générer le G-code, le langage de programmation numérique utilisé par les machines CNC pour exécuter les opérations d’usinage. CAMWorks permet ainsi de traduire les conceptions 3D en instructions machines précises, facilitant le passage de la conception à la production effective de pièces.

Figure IV-17: CAMWorks logo. **[51]**

IV.5.2 les étapes pour extraire le G-Code :

Pour extraire le G-code de CAMWorks, le processus démarre généralement après la conception du moule dans SolidWorks. Cela implique de définir la machine et l'ébauche (matière première) dans CAMWorks. Ensuite, le point zéro de la pièce est établi. Le logiciel procède alors automatiquement à l'extraction des entités usinables à partir du modèle. À partir de ces entités, un plan d'opération et les trajectoires d'outils sont générés.

Une étape cruciale consiste à simuler ces trajectoires pour s'assurer de l'absence d'erreurs ou de collisions. Finalement, la fonction de "Post-traitement" (Post Process) est utilisée : CAMWorks convertit les trajectoires d'outils en G-code, qui est le fichier exploité par la machine CNC pour fabriquer le moule.

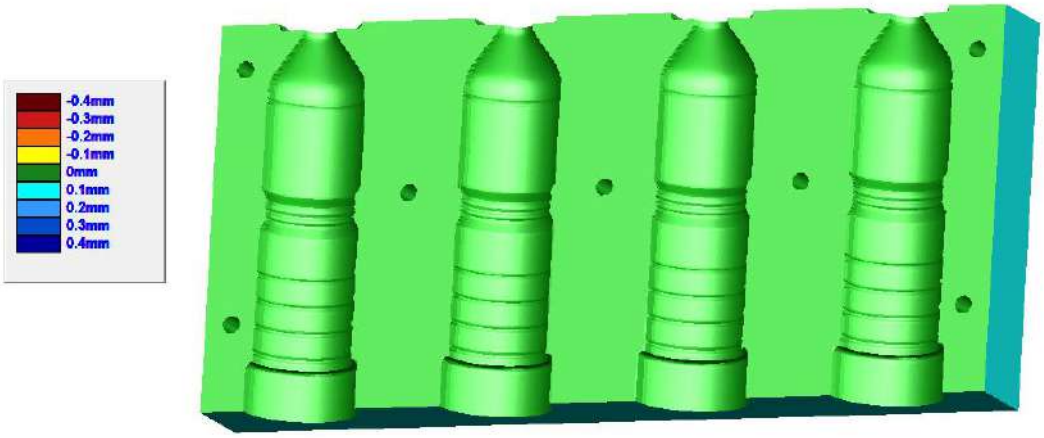


Figure IV.18 : Moule en cas final d'usinage.

IV.5.3 Usinage de moule :

Après avoir extrait le code G du moule comportant quatre cavités sur un côté, la phase de conception du moule et de génération du parcours d'outil est terminée.

Ouvrez et exécutez le simulateur SSCNC :

Pour débuter l'application du G-code sur le simulateur SSCNC, il est nécessaire de lancer le programme SSCNC sur votre ordinateur. Dès l'ouverture, assurez-vous de sélectionner le système de contrôle approprié qui émule votre machine, à savoir Siemens SINUMERIK 810/840D M pour les opérations de fraisage.

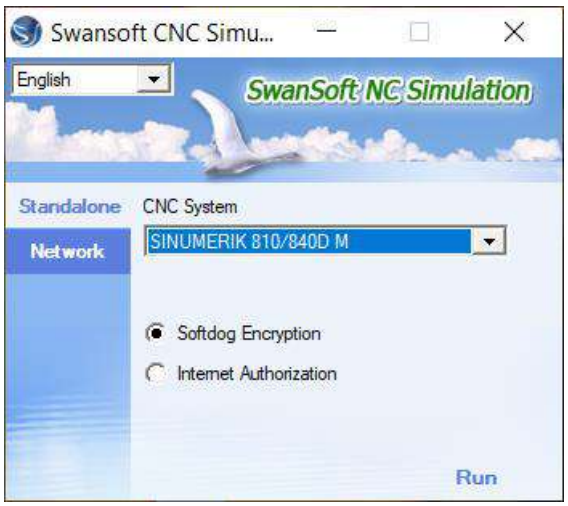


Figure IV-18 : Fenêtre de choisie la machine.

Définir le point zéro et sélectionner les outils :

Allumez la machine. Ensuite, vous devrez définir le point zéro pièce (G54) dans le simulateur, généralement un coin du brut ou le centre de sa surface supérieure, afin qu'il corresponde exactement à ce que vous avez configuré dans CAMWorks ; cette correspondance est vitale pour la précision des trajectoires d'outils. Enfin, la définition des outils (Tool Definition) est primordiale : saisissez les spécifications des outils utilisés dans CAMWorks (diamètre, longueur, numéro dans le magasin d'outils - Tool Magazine) dans la table d'outils du simulateur, en veillant à ce qu'elles soient identiques à celles du G-code, et assurez-vous que l'outil par défaut approprié (par exemple, une fraise en bout - End Mill) est bien en place dans la broche ‘spindle’.

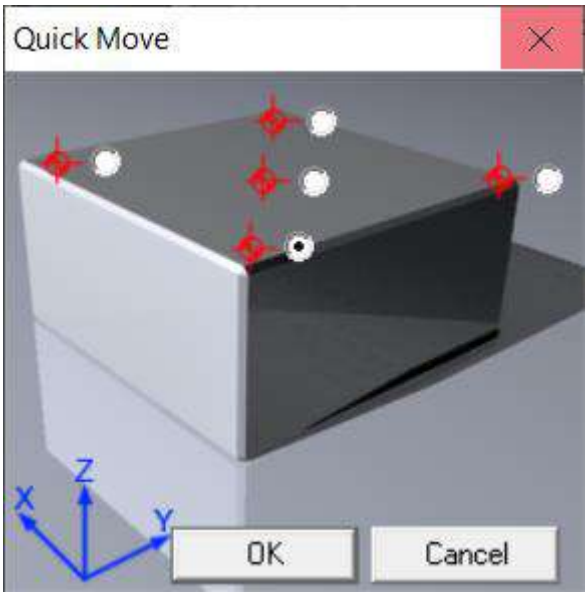


Figure IV-19 : Définir le point zéro pièce (G54).

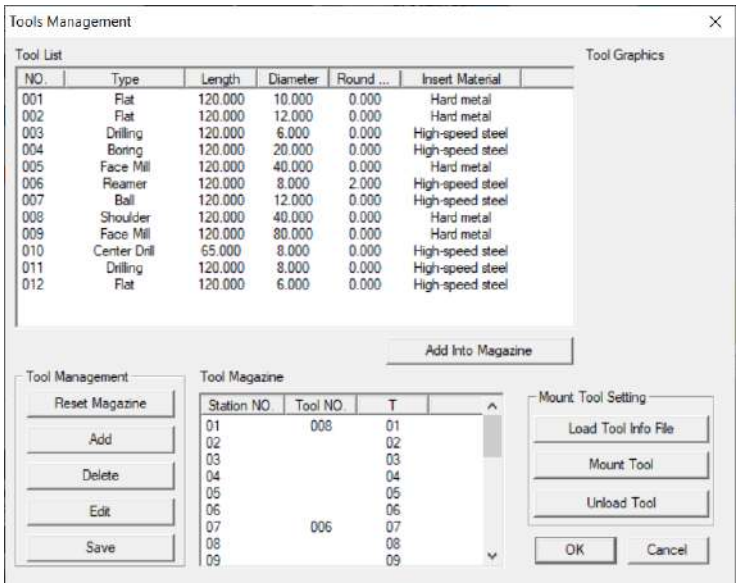


Figure IV-18 : Fenêtre de La définition des outils.

Définition de la pièce brute

Il est nécessaire de charger le brut dans SSCNC en définissant précisément les dimensions du bloc rectangulaire à partir duquel le moule sera usiné. Ces dimensions doivent correspondre exactement à celles du brut que vous avez spécifié dans CAMWorks (qui était plus grand que le moule fini). Assurez-vous également que la position de ce brut est correctement définie par rapport au point zéro de la machine.

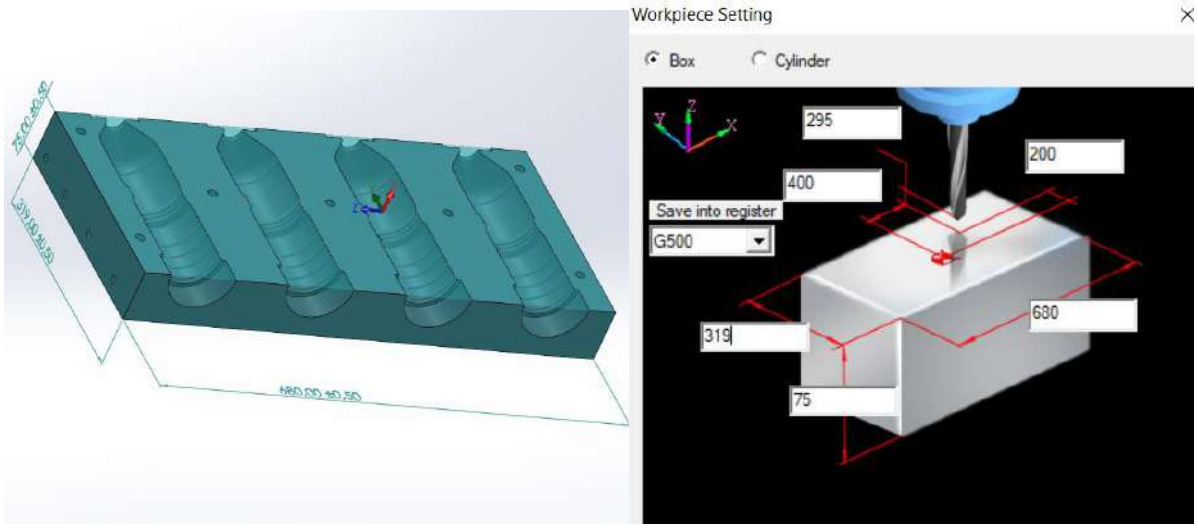


Figure IV-19 : Définie les dimensions du bloc.

Charger le programme G-code :

Pour charger le programme G-code, accédez à l'interface de commande de la machine dans SSCNC, généralement via le mode "Edit" ou "Program". Recherchez ensuite l'option "Open" ou "Load Program", puis parcourez votre ordinateur pour sélectionner le fichier G-code que vous avez généré avec CAMWorks. Une fois choisi, le G-code sera automatiquement chargé dans la mémoire de la commande virtuelle.

Simulation et exécution :

Pour la simulation et l'exécution du programme, il est recommandé, avant de lancer l'opération, de vérifier rapidement le programme G-code, notamment son début (en-têtes d'outils, vitesses d'avance, points zéro). Ensuite, accédez au mode simulation dans SSCNC, ce qui vous permettra de visualiser la trajectoire de l'outil et le mouvement de coupe sans que la machine ne fonctionne à pleine vitesse. Pour démarrer la simulation, appuyez sur le bouton de démarrage Il est crucial de surveiller attentivement le mouvement de l'outil pour s'assurer qu'il suit les trajectoires correctes, qu'il n'y a pas de collisions et qu'il usine le moule comme prévu.

IV.6 Conclusion :

Ce chapitre a mis en lumière l'importance capitale d'une étude technique approfondie et d'un usinage précis des moules pour garantir la qualité et l'efficacité de la production industrielle. L'analyse par éléments finis (RDM) a démontré la robustesse structurelle des moules, qu'ils soient en aluminium 6063-T6 ou en acier H13, confirmant leur capacité à opérer sans déformation permanente sous des pressions réalistes (1.5 MPa). Parallèlement, l'étude thermique a souligné le rôle crucial des systèmes de refroidissement pour la rapidité du cycle et l'homogénéité de la température de surface, l'aluminium excellant en vitesse de refroidissement et l'acier H13 en uniformité thermique via une conception optimisée des canaux.

Il a été clairement établi que le choix du matériau dépend des exigences spécifiques du projet en termes de durabilité, de coût et de vitesse de production. Enfin, l'intégration des logiciels de FAO tels que CAMWorks et la simulation numérique (SSCNC) a été présentée comme indispensable pour traduire avec précision les conceptions 3D en instructions CN, permettant une validation rigoureuse des parcours d'outils et une anticipation des défauts, assurant ainsi une fabrication optimisée, fiable et performante des moules.

Conclusion générale

Conclusion générale :

La conception tridimensionnelle des moules, tel celui d'une bouteille plastique de 1.5 litre, est devenue un pilier fondamental de l'industrie moderne pour une production de masse efficace et de haute qualité. Ce processus ne se limite pas à une simple transposition de la géométrie du produit ; c'est une ingénierie complexe qui intègre les propriétés des matériaux plastiques et les processus de fabrication (tel que le soufflage).

Les outils de Conception et Fabrication Assistées par Ordinateur (CAO/FAO) ont révolutionné ce domaine, permettant la création de modèles de moules et de leurs composants essentiels (comme la cavité et le système de refroidissement) avec une précision inégalée. Ces outils offrent une capacité inestimable de simulation et d'analyse, ce qui permet d'identifier et de corriger les erreurs virtuellement avant même le début de la fabrication physique.

Grâce à cette précision et à ce contrôle, les technologies de conception 3D garantissent la production de moules de haute qualité, ce qui conduit à son tour à la fabrication de bouteilles en plastique caractérisées par leur qualité, leur durabilité et leur répétabilité, tout en réduisant considérablement les coûts et le gaspillage de matériaux. C'est une pierre angulaire qui assure la compétitivité de l'industrie et sa capacité à répondre efficacement aux exigences croissantes du marché.

Références bibliographique

[01] Naeco. *Histoire du plastique : origine et évolution.* 2023
https://naeco.com/fr/actualite/histoire-du-plastique-origine-et-evolution/

[02] *Thermoplastics vs. Thermosets*. Moldie.net. Retrieved from(n.d.)
https://moldie.net/thermoplastics-vs-thermosets/

[03] Zetarmold. Moulage par injection de matériaux.2022
https://zetarmold.com/fr/moulage-par-injection-de-materiaux-2/

[04] *What is Blow Moulding? An In-depth Exploration*. Goodfishgroup.com. (n.d.). Retrieved from
https://www.goodfishgroup.com/what-is-blow-moulding-an-in-depth-exploration

[05] Paprec. La classification des différents types de métal. ND
https://www.paprec.com/fr/comprendre-le-recyclage-2/tout-savoir-sur-les-matieres-recyclables/ferrailles-et-metaux/la-classification-des-differents-types-de-metal/

[06] Formlabs. *Guide des procédés de fabrication plastiques.*2023
https://formlabs.com/fr/blog/guide-procedes-fabrication-plastiques

[07] *Matieres Plastiques*. Zpag.net. Retrieved from
(n.d.).https://www.zpag.net/Tecnologies_Indistrielles/Matieres_Plastiques.htm

[08] Bennett, L. (2022, 19 juin). *Thermoset vs thermoplastic: Definition, and differences*. RapidDirect. Repéré à l'adresse https://www.rapiddirect.com/fr/blog/thermoset-vs-thermoplastic-differences/

[09] Université Mohamed Boudiaf de M'Sila. *Propriétés mécaniques des polymères* 2023
https://elearning.univ-msila.dz/moodle/pluginfile.php/116756/mod_resource/content/2/CHap2_Polym%C3%A8re.pdf

[10] CAMPUS plastics. (n.d.). *CAMPUS® – a material information system for the plastics industry*. Repéré à l'adresse https://www.campusplastics.com/

[11] Les bouteilles en plastique - dangers et risques de réutilisation. 2021.
https://www.yokodesign.fr/fr/journal/les-bouteilles-en-plastique-dangers-et-risque.html

[12] *The Complete Guide to Understanding the Different Types of Plastic Bottles*. SourcingYuan. (2024, October 23). Retrieved from https://www.sourcingyuan.com/the-complete-guide-to-understanding-the-different-types-of-plastic-bottles/

[13] . *Polyéthylène*. Dimaplast.fr. (n.d.).Retrieved from
http://www.dimaplast.fr/portfolio/polyethylene/

[14] *Polychlorure de vinyle*. Aquaportail.com. (n.d.). Retrieved from
https://www.aquaportail.com/dictionnaire/definition/6364/polychlorure-de-vinyle

[15] INRS. *Polymère*. INRS. (n.d.). Retrieved from https://www.inrs.fr/publications/bdd/plastiques/polymere.html?refINRS=PLASTIQUES_polymere_15

[16] Plastic Molding Solutions. *Polyéthylène téréphtalate (PET)*.2023 https://plasticmoldingsolutions.com/fr/polyethylene-terephthalate-pet/

[17] Idea Stampi. *Les techniques principales de moulage du plastique*. 2023. https://www.ideastampi.fr/les-techniques-principales-de-moulage-du-plastique

[18] Léo, G. *Common brand of injection molding machine*. MadeAria. (2022, March 30). Retrieved from https://www.madearia.com/fr/blog/common-injection-molding-machine-brand/

[19] *Moulage par soufflage technologie*. Xometry.pro. (n.d.). Retrieved from https://xometry.pro/fr/articles/moulage-par-soufflage-technologie/

[20] *3 Reasons Why We Chose Rotational Moulding for our Modular Wastewater Treatment Plant The Biorotor*. Biorotor.com. (n.d.). Retrieved from https://www.biorotor.com/package-wastewater-treatment-plant-production/3-reasons-why-we-chose-rotational-moulding-for-our-modular-wastewater-treatment-plant-the-biorotor/

[21] *Quels sont les avantages du moulage par injection?*. Protolabs.com. (n.d.). Retrieved from https://www.protolabs.com/fr-fr/ressources/blog/quels-sont-les-avantages-du-moulage-par-injection/

[22] Sánchez, S. (2023, February 2). *Avantages et inconvénients du moulage sous pression*. Gestión De Compras. Retrieved from https://www.gestiondecompras.com/fr/blog/avantages-et-inconvenients-du-moulage-sous-pression/

[23] *Thermoformage : avantages et inconvénients*. Voilelec.com. (n.d.). Retrieved from https://www.voilelec.com/thermoformage-avantages-inconvenients/

[24] *Extrusion Blow Molding vs. Injection Blow Molding*. (n.d.). Retrieved from https://fr.meper-blowmolding.com/extrusion-blow-molding-vs-injection-blow-molding/

[25] *Avantages et inconvénients du rotomoulage*. rotolia.com. (n.d.).Retrieved from https://rotolia.com/fr/blog/avantages-et-inconvenients-du-rotomoulage/

[26] Achour, M., & Ait Ali, I. *Conception d'un moule de bouteille de 2L* (Mémoire de Master, Université Abderrahmane Mira Bejaia, Faculté de Technologie, Département de Génie Mécanique). Thèses d'Algérie. 2018. https://bucket.theses-algerie.com/files/repositories-dz/2461539780396064.pdf

[27] X3D Group. *Presses à injection plastique*. ND. https://x3d-group.com/presses-injection-plastique

[28] Mansouri, N. *Chapitre 2 - Procédés de mise en forme des matières plastiques*. staff.univ-batna2.dz. (n.d.).Retrieved from https://staff.univ-batna2.dz/sites/default/files/mansouri_naima/files/chapitre-2-procedes-mise-en-forme-matieres-plastiques.pdf

[29] Tayalati, F., Azmani, M., & Azmani, A. *Artificial Intelligence Based Plastic Injection Process for Initial Parameters Setting and Process Monitoring-Review*. ResearchGate. (2023, January).Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/366745386_Artificial_Intelligence_Based_Plastic_Injection_Process_for_Initial_Parameters_Setting_and_Process_Monitoring-Review

[30] Prototool. *Machine de moulage par injection*. ND. https://prototool.com/fr/machine-de-moulage-par-injection/

[31] Aragui, M. *Modélisation du comportement du PET dans les conditions de vitesse et de température du procédé de soufflage* [Doctoral thesis]. biblio.univ-annaba.dz. (2019, September) Retrieved from https://biblio.univ-annaba.dz/ingeniorat/wp-content/uploads/2019/09/ARAGUI-MAROUENE.pdf

[32] *Presses à injection verticales*. Stagnoligears.com. (n.d.). Retrieved from https://www.stagnoligears.com/fr/engrenages-moteurs/presses-a-injection-verticales/

[33] *Eau bouteille particules plastique litre étude université Columbia*. ICI.Radio-Canada.ca. (n.d.). Retrieved from https://ici.radio-canada.ca/nouvelle/2040012/eau-bouteille-particules-plastique-litre-etude-universite-columbia

[34] *Bottle Blow Molding Machine*. ZJGModern.com. (n.d.).Retrieved from https://www.zjgmodern.com/fr/bottle-blow-molding-machine/

[35] *Pièces en plastique / Préformes PET*. Gestiondecompras.com. (n.d.).Retrieved from https://www.gestiondecompras.com/fr/produits/pieces-en-plastique/preformes-pet/

[36] Mavink.com. (n.d.). Retrieved from https://mavink.com/post/F7B01EF7944E66F38EE843F917572F17D1AMD59350/AFE8CFF7C94F8AF38EE843F917572F17D1AMFD5557

[37] SchwendiPlasturgie.Injectionsoufflage. (n.d.) .http://schwendiplasturgie.free.fr/lycee/cours/Injection%20Soufflage.pdf

[38] *Machines d'injection plastique*. pdfcoffee.com. (N.d.). Retrieved from https://pdfcoffee.com/machines-dinjection-plastique-2-pdf-free.html

[39] Perabar. (2023). *Préformes en PET*. (N.d.). https://fr.perabar.com/pet-preform/

[40] MEKID, Salima. *Caractérisation des défauts obtenus sur les préformes en PET lors du processus d'injection*. Mémoire de Master II en Génie Mécanique, option Comportement et Mise en Forme des Matériaux (CMFM), Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2014.

[41] : Luo, Y. M. *Modélisation thermo-visco-hyperélastique du comportement du PET dans les conditions de vitesse et de température du procédé de soufflage* [Doctoral thesis, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon]. (2012).HAL Archives Ouvertes.
https://theses.hal.science/tel-00807799

[42] Moldblade. *Conception du nombre et de la répartition des cavités dans un moule d'injection plastique*.2022.
https://moldblade.com/fr/conception-du-nombre-et-de-la-repartition-des-cavites-dans-un-moule-dinjection-plastique/

[43] Dassault Systèmes. *SolidWorks Logo.svg*. Wikipedia. (2013, May 9). Retrieved from https://en.wikipedia.org/wiki/File:SolidWorks_Logo.svg

[44] VulcanSphere. *Logo Blender*.Wikipedia. (2014). Retrieved from https://en.m.wikipedia.org/wiki/File:Logo_Blender.svg

[45] *Soaring Metals Prices Signal Bets on Global Economic Recovery*.] (n.d.). Retrieved from https://www.foxbusiness.com/markets/soaring-metals-prices-signal-bets-on-global-economic-recovery

[46] Cosson, B. *Modélisation et simulation numérique du procédé de soufflage par bi-orientation des bouteilles en PET : évolution de microstructure, évolution de comportement* (Thèse de doctorat). Université Paris-Est.2008
https://theses.fr/2008PEST0235

[47] Rosato, D. V., Rosato, M. G. (2004).
Plastic Product Material and Process Selection Handbook. Elsevier.
Tableau complet des propriétés thermiques, mécaniques et chimiques.

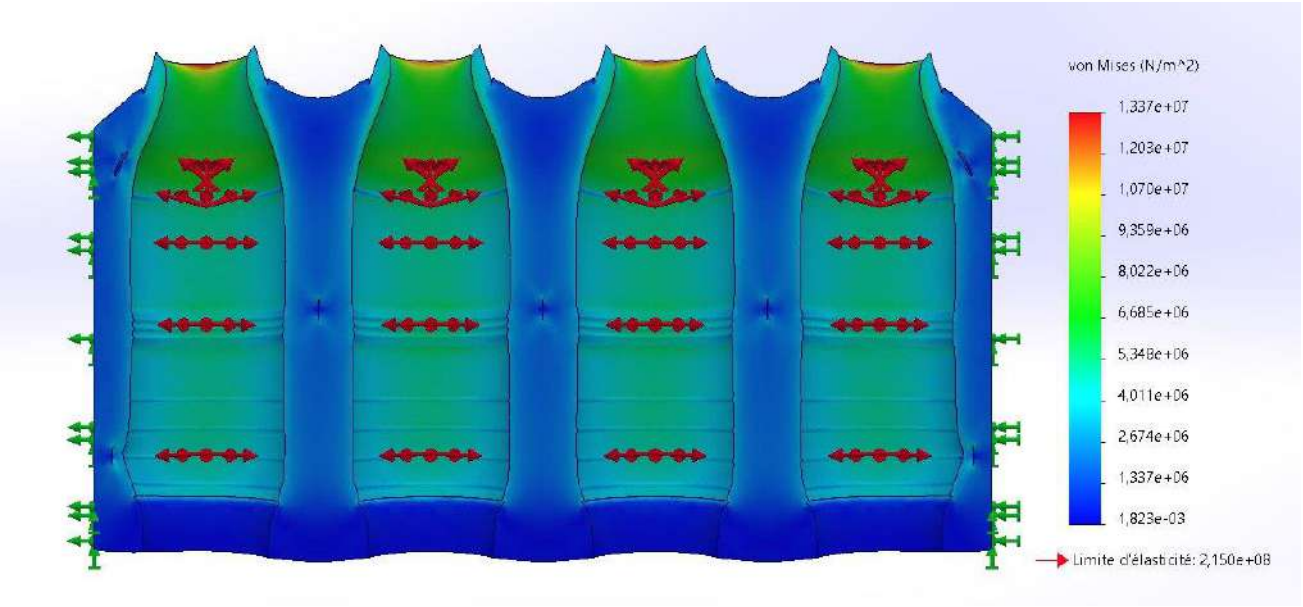
[48] MatWeb. (n.d.). *MatWeb: Your Source for Materials Information*. Repéré à l'adresse https://www.matweb.com/

[49]Titre de la page. (n.d.). *StudySmarter*. Repéré à l'adresse https://app.studysmarter.de/studyset/23455472/summary/72178615

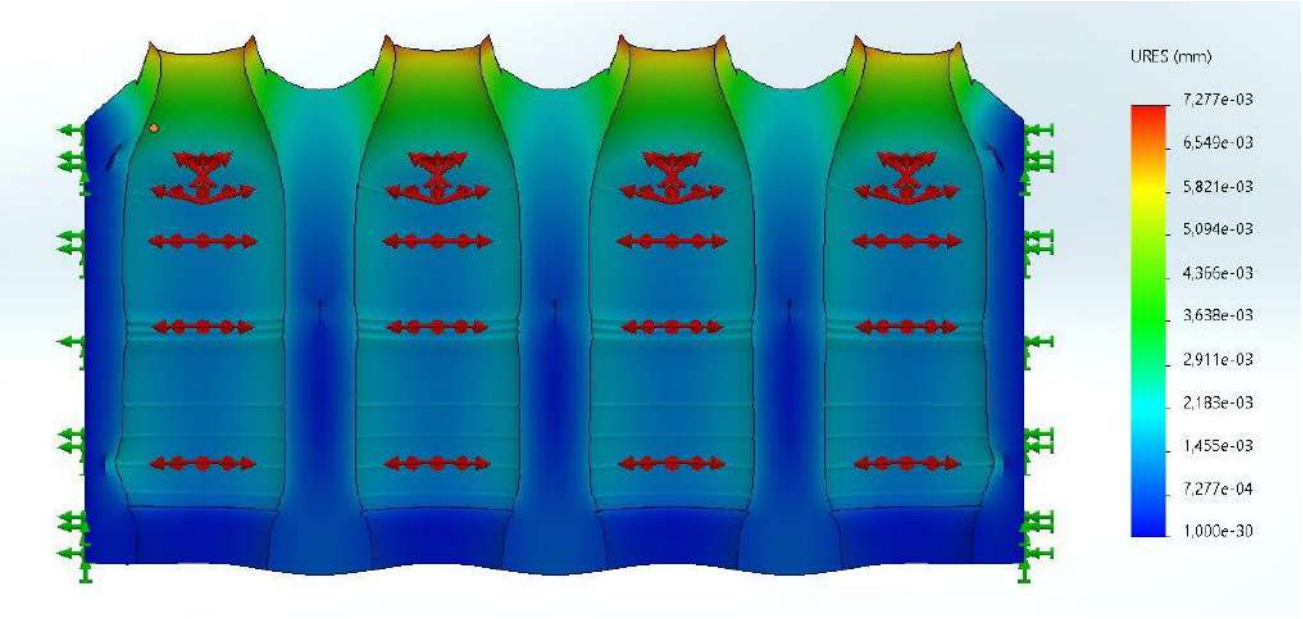
[50] Swans Chemical Co., Ltd. (n.d.). *Home*. Retrieved June 16, 2025, from
http://www.swansc.com/en/

[51] Siemens Digital Industries Software. (n.d.). *CAMWorks – HCL Technologies*. In *Solid Edge partner solutions*, from
https://solidedge.siemens.com/ja/partner/camworks/

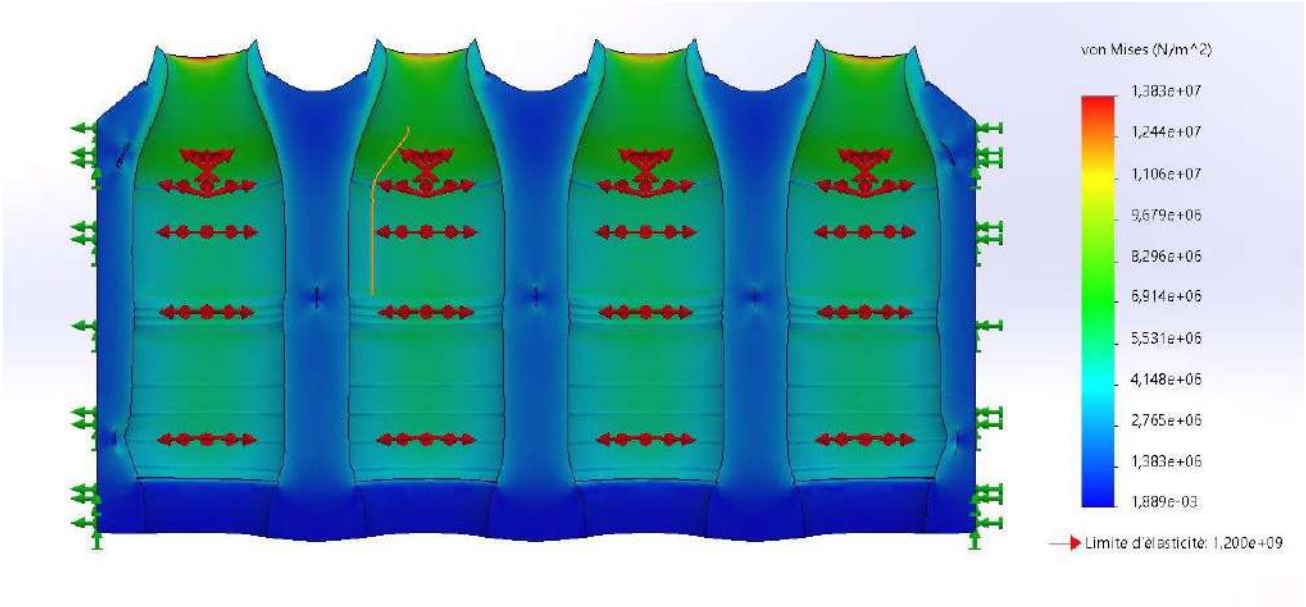
Annexes



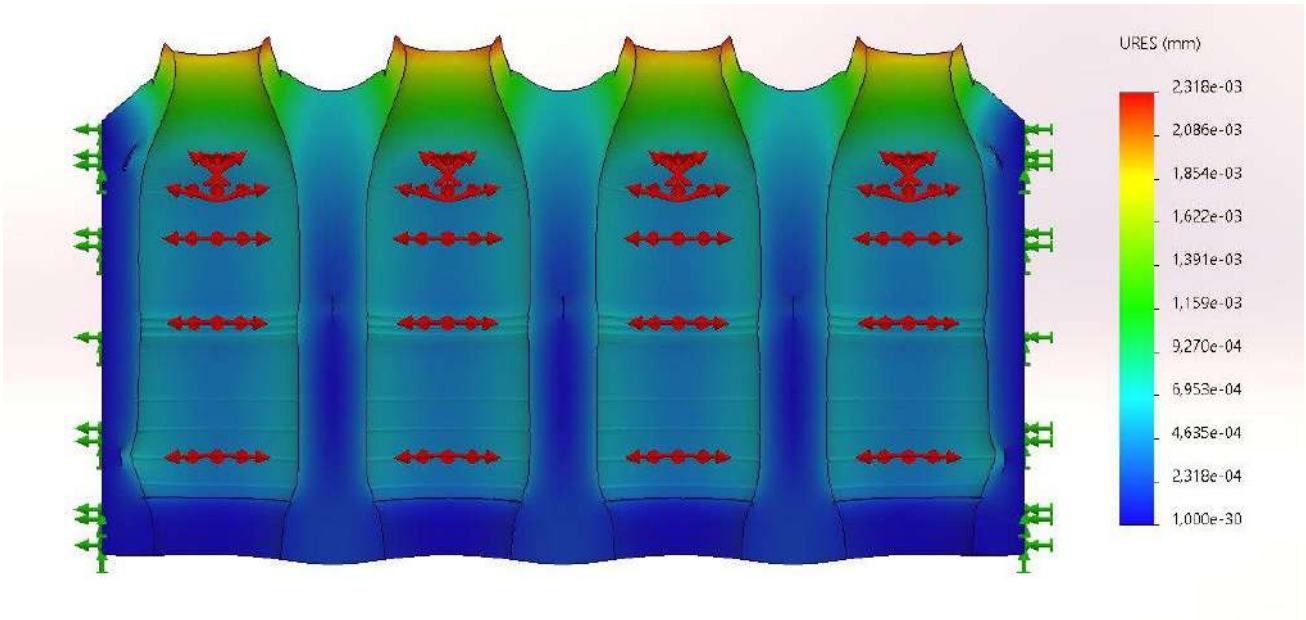
Annexs-Figure 1 : de l'étude de contrainte de Von mises de l'aluminium pour (Pression de $\boldsymbol{4\ MPa}$).



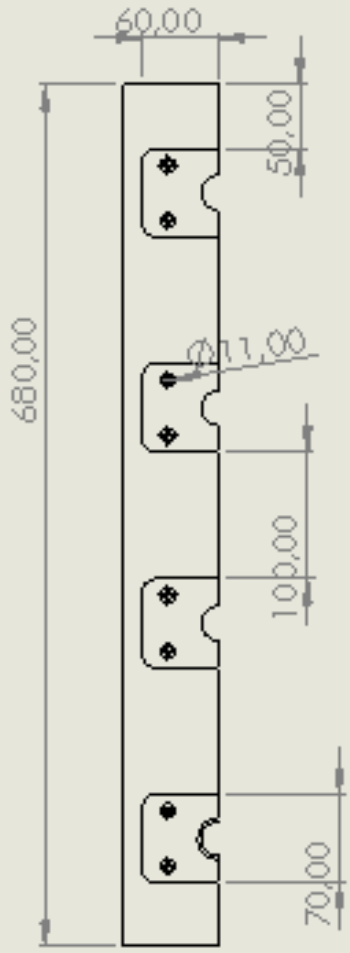
Annexes-Figure 2 : de l'étude de contrainte de déplacement de l'aluminium pour (Pression de $\boldsymbol{4\ MPa}$).

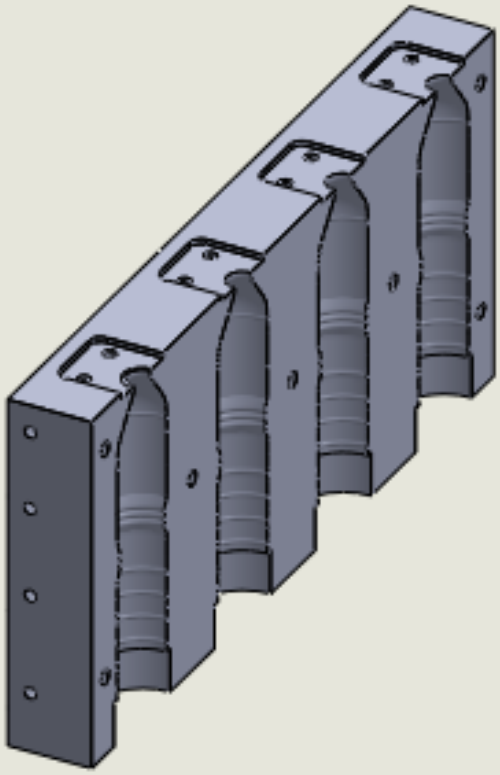


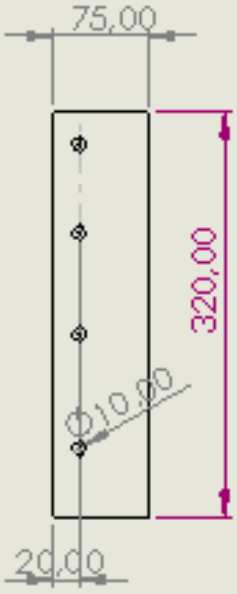
Annexes-Figure 3 : de l'étude de contrainte de Von mises d'acier H13 pour (Pression de $\mathbf{4}\ \boldsymbol{MPa}$).

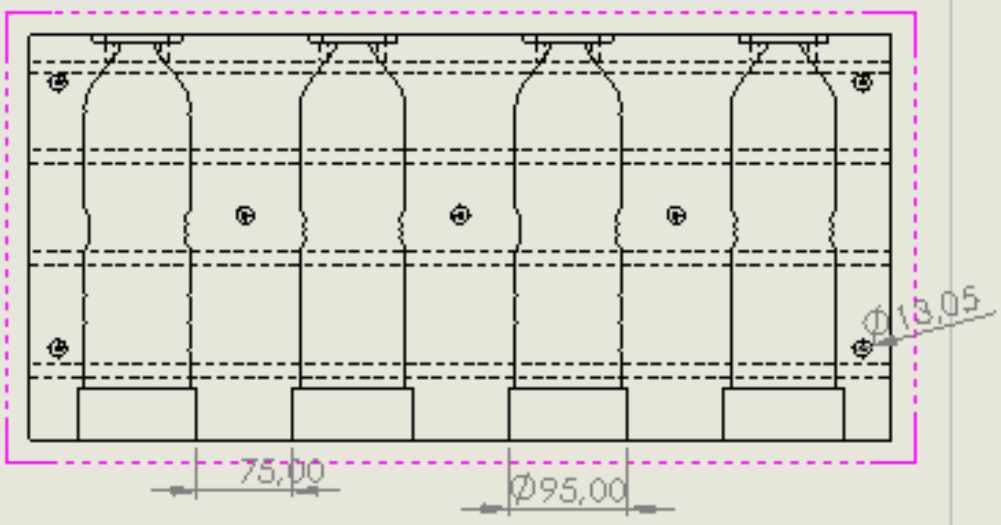


Annexes-Figure 4 : de l'étude de contrainte de déplacement de l'aluminium pour (Pression de $\mathbf{4}\ \boldsymbol{MPa}$).

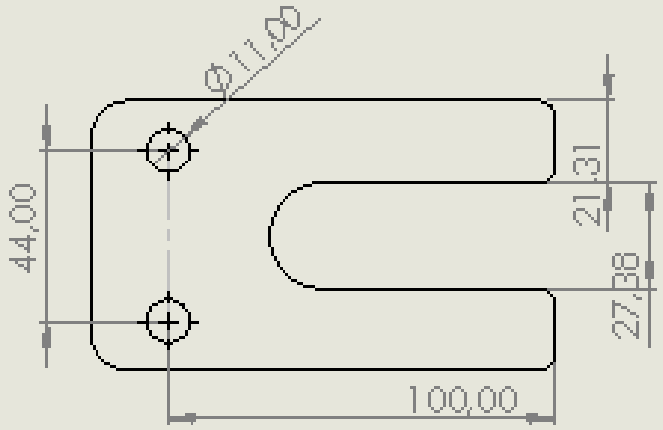


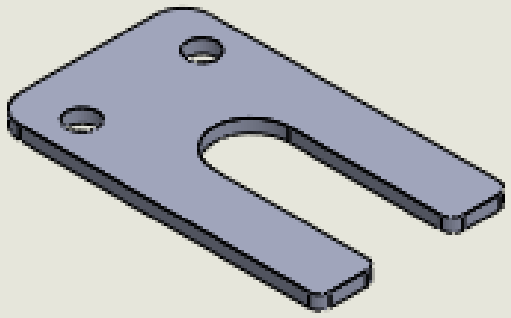


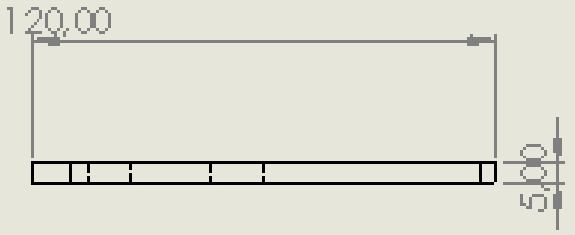


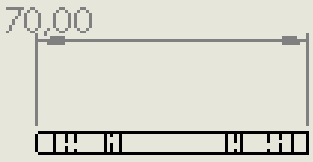


UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA		**LE 15/05/2025**
ECHELL : 1/6	**CONCEPTION DU MOULE DE BOUTEILLE 1.5L**	**Alliages d'aluminium 6063-T6**
	BOUZARA.Y et KERBOUCI.R	**MASTER 2 CM**

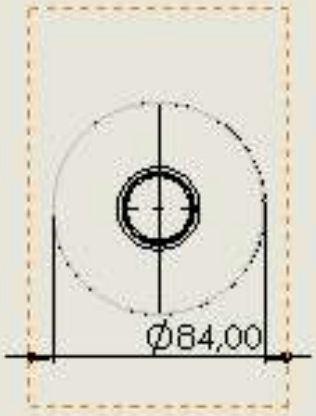




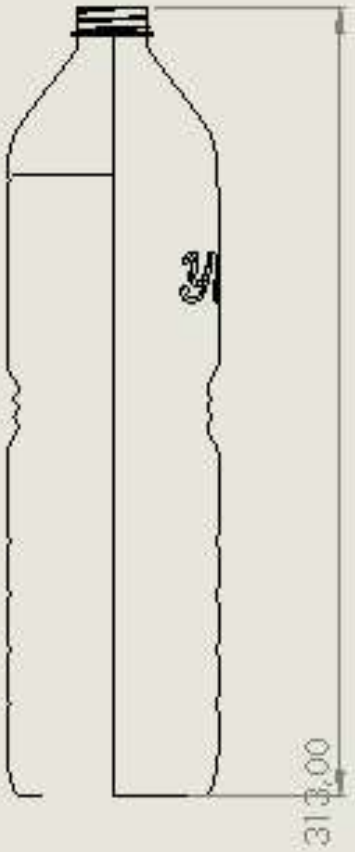


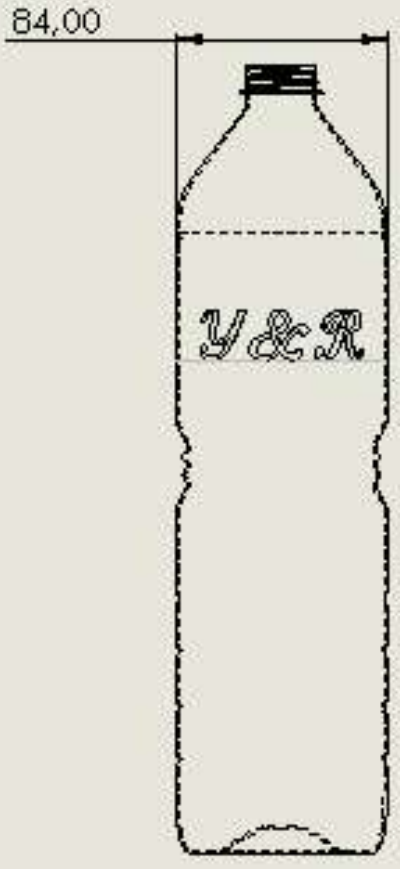


UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA		**LE 15/05/2025**
ECHELL : 1/2	**CONCEPTION D'UN SUPPORT DE COL DE PREFORME**	**Alliages d'aluminium 6063-T6**
	BOUZARA.Y et KERBOUCI.R	**MASTER 2 CM**

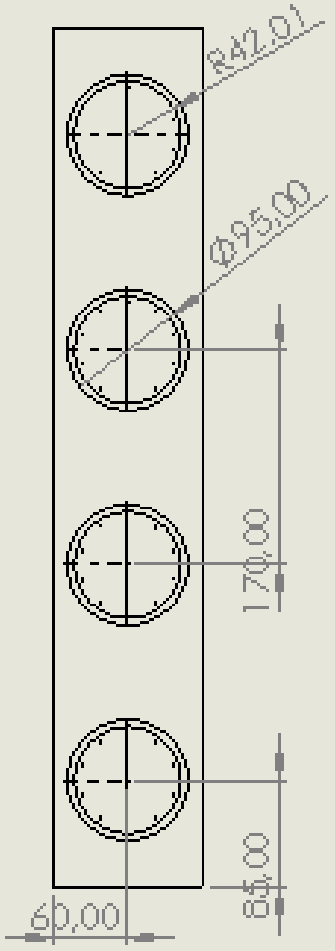


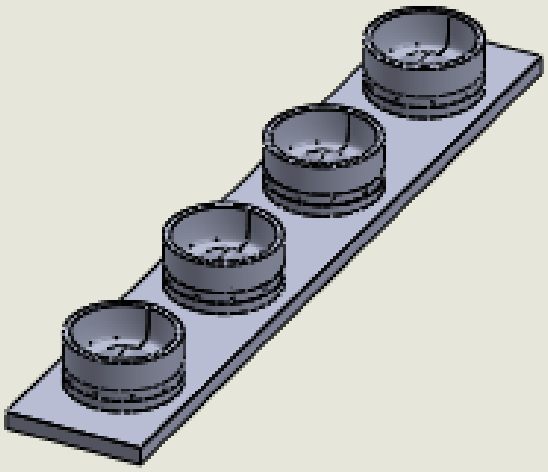


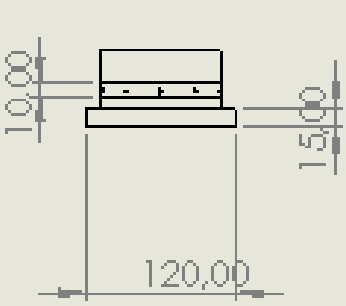


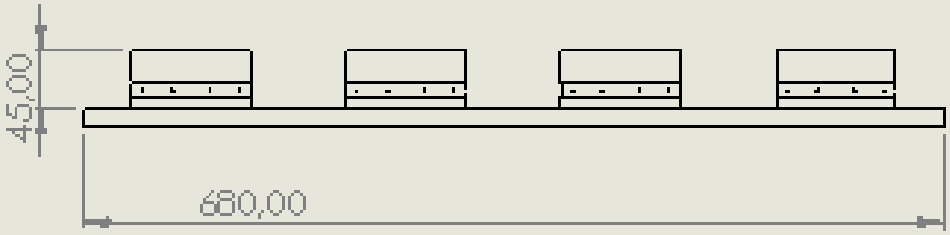


UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA		**LE 15/05/2025**
ECHELL : 1/3	**CONCEPTION D'UNE BOUTEILLE DE 1.5L**	**Polyethylene terephthalate (PET)**
	BOUZARA.Y et KERBOUCI.R	**MASTER 2 CM**

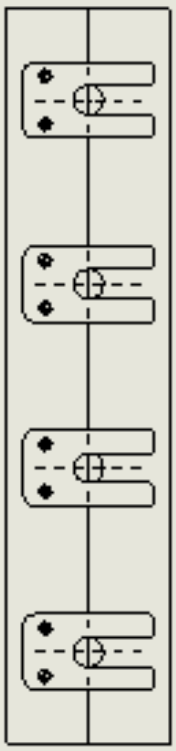


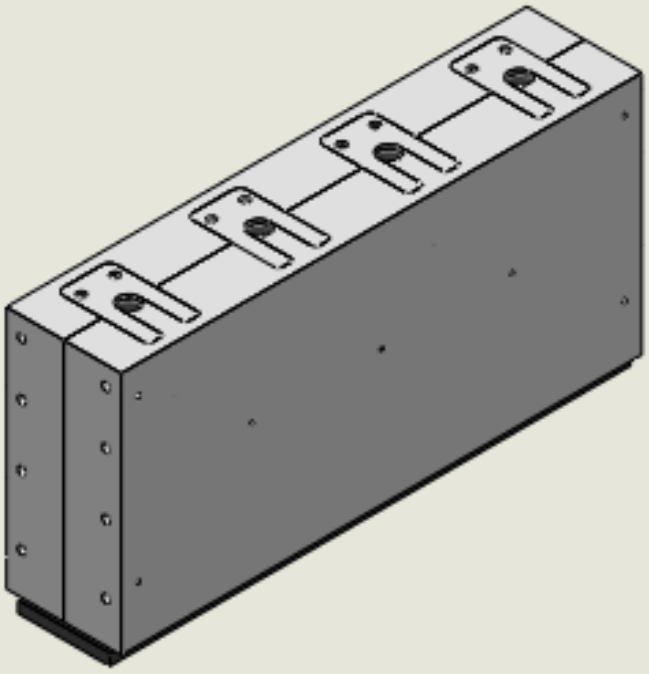


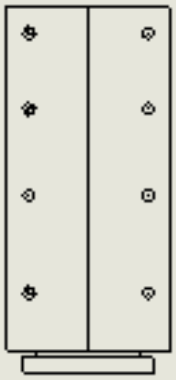


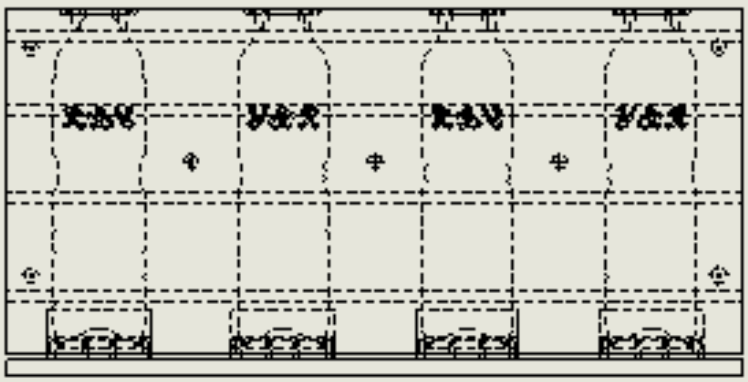


UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA		**LE 15/05/2025**
ECHELL : 1/6	**CONCEPTION D'UNE BASE DE MOULE**	**Alliages d'aluminium 6063-T6**
	BOUZARA.Y et KERBOUCI.R	**MASTER 2 CM**









UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA		LE 15/05/2025
ECHELL : 1/7	CONCEPTION DU MOULE DE BOUTEILLE 1.5L	**Alliages d'aluminium 6063-T6**
	BOUZARA.Y et KERBOUCI.R	MASTER 2 CM