

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE ABDERRAHMANE MIRA BEJAIA
FACULTÉ DE TECHNOLOGIE
DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE

MEMOIRE

PRÉSENTÉ POUR L'OBTENTION DU DIPLÔME DE

MASTER

FILIÈRE : GÉNIE MÉCANIQUE

SPÉCIALITÉ : CONCEPTION MÉCANIQUE ET PRODUCTIQUE

PAR :

ATMAOUI MERIEM

MOUHOU MEGDOUDA

Thème

Application d'une étude éco-conception au pot de yaourt, étude du moule et élaboration d'un prototype.

Soutenu le Jeudi 22 Juin 2017 devant le jury composé de:

Mr. YAYA.K

Président

Mr. BELAMRIA

Rapporteur

Mr. BECHEUR.A

Examineur

ANNÉE UNIVERSITAIRE 2016-2017

Remerciement

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

Nous tenons à remercier sincèrement notre promoteur Dr BELAMRI.A d'avoir encadré et dirigé ce thème intéressant.

Nous adressons toute notre gratitude à notre professeur Mr BECHEUR, pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter notre réflexion.

Nous désirons aussi remercier Dr BENSLIMEN. A et nos collègues, MOHAMADI Tarik et AYAD Feriel, BENYAHYA Amar, ainsi que tous les étudiants de département génie mécanique qui par leur compréhension et leur aide nous ont permis d'accomplir notre travail de recherche.

Nos vifs remerciements vont également au président du jury Mr YAYA Kamel pour l'intérêt qu'il a porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail et de l'enrichir par leurs propositions.

A nos familles et amis, de près ou de loin pour nous avoir encouragé et fourni un grand soutien moral. Sans eux, nous n'en serions pas là.

Sans oublier tous les responsables de hall technologie de targua Ouzemour ainsi que tous les ingénieurs de l'entreprise all Plast d'Akbou qui ont collaboré pour la réalisation de ce modeste travail.

Merci

Liste des figures

Figure I.1: Pneumatique positif (moule relief).....	3
Figure I.2 : Pneumatique négatif (moule creux).....	3
Figure I.3 : Thermoformage par emboutissage	3
Figure I.4:Thermoformage mixte	4
Figure I.5: Schémas d'une machine thermoformage.....	4
Figure I.6 : Moule positif et pièce thermoformée.	5
Figure I.7: Moule négatif et pièce thermoformée.	6
Figure I.8 : Coupe d'une pièce thermoformée par un moule positif.	6
Figure I.9: Coupe d'une pièce thermoformée par un moule négatif.	6
Figure I.10 : Représentation schématique d'un polymère linéaire.....	13
Figure I.11:Représentation schématique d'un polymère ramifié.	13
Figure I.12: Représentation schématique d'un polymère réticulé.....	14
Figure I.13 : La structure amorphe.....	14
Figure I.14 : La structure cristalline.	15
Figure I.15 : La structure semi cristallin.	15
Figure II.1:La structure de l'aluminium	19
Figure II.2 : Diagramme d'équilibre Al-Si.....	21
Figure II.3: Fraise cylindrique.	23
Figure I.4: Fraise hémisphérique.....	23
Figure III.1 : Symbole de l'entreprise.	26
Figure III.2 : la bande de PS colorée.....	26
Figure III.3 : Emballage de biscuits.	28
Figure III.4 : Moule a deux cavités d'emballage de biscuit.	28
Figure III.5: Cycle de vie.	30
Figure IV.1: Création de l'esquisse et extrusion à partir de l'angle de dépouille.	36
Figure IV.2 : Création de congé varie	36
Figure IV.3 : Modèle plein.	36

Figure IV.4 : Création des lignes joint	37
Figure IV.5 : Création de plan joint	38
Figure IV.6 : Création du plan pour l'extrusion.....	38
Figure IV.8 Maillage et condition aux limites	39
Figure IV.9 Distribution des contraintes.	40
Figure IV.10 : Distribution des coefficients de sécurité.....	40
Figure IV. 11 : Modèle Soummam type " Fort".....	41
Figure IV.12 : Modèle DANONE type " Danette".....	41
Figure IV.13 : Maillage et condition aux limites.	42
Figure IV.14 : A gauche distribution des contraintes, à droite distribution des déformations, du pot de yaourt Fort.	43
Figure IV.15 Maillage et condition aux limites.	43
Figure IV.16 : A gauche distribution des contraintes, à droite distribution des déformations, du pot de yaourt Danette.	44
Figure IV.17 : Maillage et condition aux limites.	45
Figure IV.18 : A gauche distribution des contraintes, à droite distribution des déformations, du pot de yaourt de notre conception.	45
Figure V.1: Définition du brut et de l'origine programme.....	44
Figure V.2: A simulation de l'usinage des ébauches de pot, B image réel résultats obtenu à l'extérieur de programme	44
Figure V.3: A. Simulation de l'usinage en finition de pot, B image réel résultats obtenu à l'exécution du programme.....	45
Figure V.4 : A. simulation de l'usinage des ébauches de moule, B. image réel résultats obtenu à l'exécution de programme	46
Figure V.5 A simulation de l'usinage en finition de moule, B image réelle résultats obtenu à l'exécution de programme.....	46
Figure IV.6: Prototype du Pot et le moule fini de notre conception	46
FigureV.7: Insertion d'une forme au font du pot de yaourt, après consommation du produit, celui-ci devient moule pour pâte à modeler	47
Figure V.8: Quelque essaye de thermoformage.	48

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Comparaison entre moule positif et négatif.	7
Tableau I.2: Paramètre de retrait des pièces thermoformées.	9
Tableau I.3 : Diamètre de la cavité vide en fonction de l'épaisseur de la feuille.....	10
Tableau I.4 : Propriétés physiques et thermiques de différents polyéthylènes.	17
Tableau I.5 : Propriétés mécaniques des polyéthylènes.	17
Tableau II.2: Les paramètres de coupe de l'alliage d'aluminium.	25
Tableau III.1 : Les ingrédients de la matière première.	27
Tableau III.2 : les caractéristiques de la bande PS.	27
Tableaux III.3 : les caractéristiques de machine.	28
Tableau III.4: Evolution de la masse des produits en polymère.	32
Tableau III.5 : Application de recyclage des polymères.	34

Listedes figures

Liste des tableaux

Sommaire

Introduction générale.....	1
Partie 1 : Généralité sur le thermoformage	2
I.1 Problématique	2
I.2 Définition thermoformage	2
I.2.1 Types de thermoformage.....	2
I.2.2 Principe de fonctionnement.....	4
I.2.3 constituants de la machine de thermoformage	5
I.3 Le moule	5
I.3.1 Types de moule	5
I.3.2 Etude comparative sur les moules	6
I.3.3 Caractéristiques d'un moule.....	8
I.4 Avantage de procédé thermoformage	10
Partie 2 : Matériaux thermoformées.....	11
I.5 Définition de polymère	11
I.5.1 Cycle de vie des polymères	11
I.5.2 Synthèse des polymères	12
I.5.3 Classification des polymères	12
I.6 Polyéthylène PE.....	16
I.6.1 Types de polyéthylène.....	16
I.6.2 Propriétés physiques et thermiques de quelques polyéthylènes.....	17
I.6.3 Propriétés mécaniques de polyéthylène PE.....	17
Partie 1: Matériau de moule	19
II.1 L'aluminium	19
II.2 Alliage d'aluminium.....	19
II.2.1 Désignation de l'alliage d'aluminium.....	20
I.3 Alliage aluminium – silicium (Alpax)	20
II.4 Avantage de l'aluminium dans le domaine de l'industrie	21
Partie 2 : Procédé de fabrication	22
II.5 Machine à commande numérique.....	22
II.6 Usinage de l'aluminium.....	22
II.6.1 Fraisage	22

II.6.1.1 Outils de fraisage et leur utilisation	23
II.6.1.2 Paramètres mis en jeu	24
II.7 Conditions de coupe de l'aluminium	24
III.1 Présentation de l'entreprise	26
III .1.1 Les bandes de PS coloré.	26
III.1.2 Matière première.....	27
III.1.3 Caractéristique de la feuille	27
III.1.4 Produit d'All Plast	27
III.2 Éco-conception.....	30
III.2.1 Méthodologie d'éco-conception.....	30
III.2.2 Outil et démarches d'éco-conception	31
III.2.3 Application de la démarche d'éco-conception sur les matériaux polymères	31
II.2.3.1 Allègement de la pièce	31
II.2.3.2 Réduction de l'épaisseur de la pièce	32
III.2.3.3 Polymères de synthèse	32
III.2.3.3 Bénéfices attendus de l'éco-conception	33
IV.1 Introduction	35
IV.2 Procédure.....	35
IV.2.1 Fabrication du prototype du pot de yaourt.....	35
IV.2.2 Création du moule sur Solid Works.....	37
IV.3 Simulation numérique	39
IV.3.1 Simulation de comportement du moule.....	39
IV.3.2 Etude de résistance de notre modèle de pot	41
IV.3.2.1: Le protocole de l'étude suivie	42
V.1: Partie usinage	43
V.2 : Simulation Rhino-Cam.....	43
V.3: Proposition d'idées d'éco-conception du pot de yaourt.	47
Conclusion générale.	48
Référence bibliographique	
Annexe	

Introduction générale

Introduction générale

Le développement des techniques informatiques a permis une utilisation massive des outils de modélisation pour la conception et la réalisation des produits manufacturés.

Ces outils tendent à limiter, voir à remplacer, les essais de mise au point des procédés de fabrication. Pour les procédés de mise en forme des polymères, l'utilisation d'outils numériques est relativement récente. Nous nous intéressons particulièrement au procédé de thermoformage.

Ce travail s'inscrit dans le cadre de l'étude de fabrication d'une nouvelle forme d'un moule obtenu par usinage à l'aide d'une machine à commande numérique.

Le premier chapitre est divisé en deux parties. Dans la première, on se propose d'étudier d'une manière générale sur le thermoformage et son principe de fonctionnement. Une attention particulière est portée sur l'étude des moules et les différents types existés. Dans la deuxième partie est consacrée à l'étude des polymères et plus particulièrement au polyéthylène.

Le deuxième chapitre est réservé à la présentation des outils et des techniques expérimentales employées dans cette étude telle que le matériau, et les procédés d'usinage ainsi que les logiciels de CAO et FAO utilisée pour la fabrication du moule.

Le chapitre trois, met en exergue les évolutions de l'éco-conception dans le domaine industriel et ses différents démarches et outils.

Suivi du chapitre quatre dont toute la première partie dépeint la procédure de création puis de modélisation de notre moule et de notre pot de yaourt, quant à la seconde partie, elle est consacrée à l'étude de conception et de dimensionnement pour vérifier la faisabilité de notre projet.

En ce qui concerne le dernier chapitre, il est consacré à la mise en pratique de l'étude exposé dans ce travail, ceci se fera par génération d'un programme G-COD sur Rhino-Cam qui pilotera la fraiseuse à commande numérique qui réalisera notre pièce.

Nous terminerons par une conclusion générale où on expose les principaux résultats de cette étude ainsi que les éventuelles perspectives qui nous sembleraient intéressantes à développer.

Problématique et matériaux de pot

Partie 1 : Généralité sur le thermoformage

I.1 Problématique

Les producteurs de moules pour les pots de yaourt sont ARCIL en France et ILLIG en Espagne, se sont les leaders dans le domaine, notre région (Bejaia) connaît une forte industrie agroalimentaire, en particulier la zone d'activité d'Akbou (taharcht), où on trouve une forte concentration de production de ce produit (yaourt). Notre constat est que les producteurs tel que SOUMMAM, DANONE et RAMDY trouvent des difficultés en ce qui concerne la maintenance de ces moules ou encore ce qui concerne l'adaptation de nouvelles idées que se soit sur la forme du pot ou bien la quantité de production.

Notre travail consiste à apporter une approche et des amplifications du domaine de fabrication de ces pots, où on utilise la technique de thermoformage que nous allons bien expliquer puis nous allons voir les points importants qui rendent la fabrication de moules difficile sachant que la compréhension de ces points contribue à la réussite du moule.

Ce travail va aussi bien apporter un plus dans la conception de pots de yaourt où nous allons donner des idées pour un nouveau pot qui portera notre touche, que nous allons proposer aux industriels d'Akbou afin que notre université apporte un plus au manque que vivent ces industriels.

I.2 Définition thermoformage

Il s'agit d'une technique qui consiste à prendre un matériau sous forme de plaque (verre, polymère..) à le réchauffer et le ramollir pour ensuite le mettre en forme grâce à un moule. [1]

I.2.1 Types de thermoformage

Il existe différentes méthodes pour thermoformer une pièce :

- Les procédés qui utilisent la pression ou l'aspiration d'air sont appelés : technique de thermoformage sous vide ou par gonflage donc de thermoformage par moyens pneumatique.

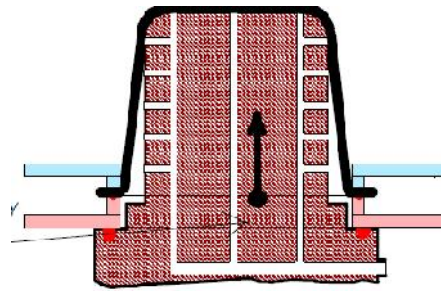


Figure I.1: Pneumatique positif (moule relief). [2]

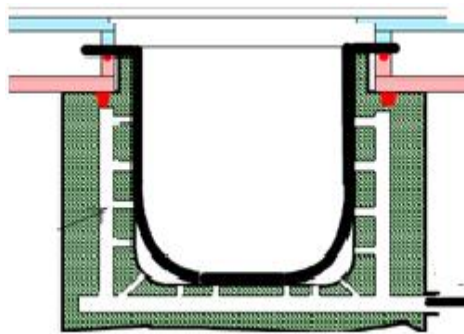


Figure I.2 : Pneumatique négatif (moule creux). [2]

- Les procédés dans lesquels la déformation est obtenue grâce à l'action directe d'un poinçon sont appelés : techniques de thermoformage par emboutissage ou moyens mécaniques.

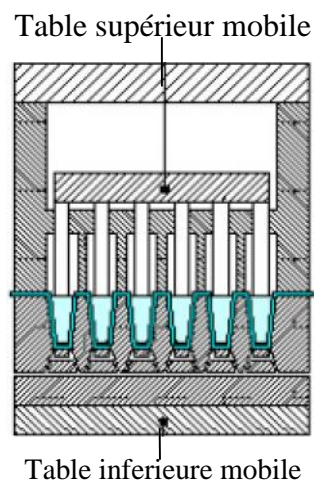


Figure I.3 : Thermoformage par emboutissage [3].

- Les procédés basés sur la combinaison de ces deux systèmes précédents sont appelés : techniques de thermoformage mixte (pneumatique + mécanique).

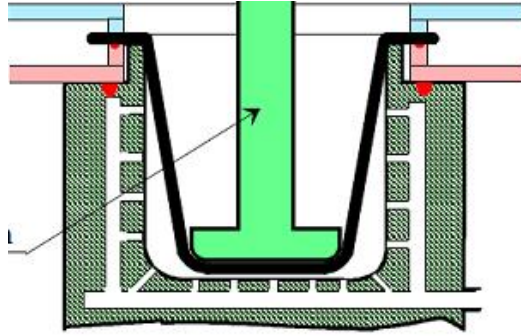


Figure I.4:Thermoformage mixte [2].

I.2.2 Principe de fonctionnement

Le thermoformage permet de réaliser une pièce en volume par déformation de matière plastique à chaud. L'opération consiste à plaquer une feuille de plastique chaude sur un moule ayant la forme souhaitée, par aspiration d'air à travers un plateau perforé. Après refroidissement, on obtient la forme recherchée. Cette procédure est réalisée à l'aide d'une machine de thermoformage montrée dans la (figure I.5) ci-dessous. [3]

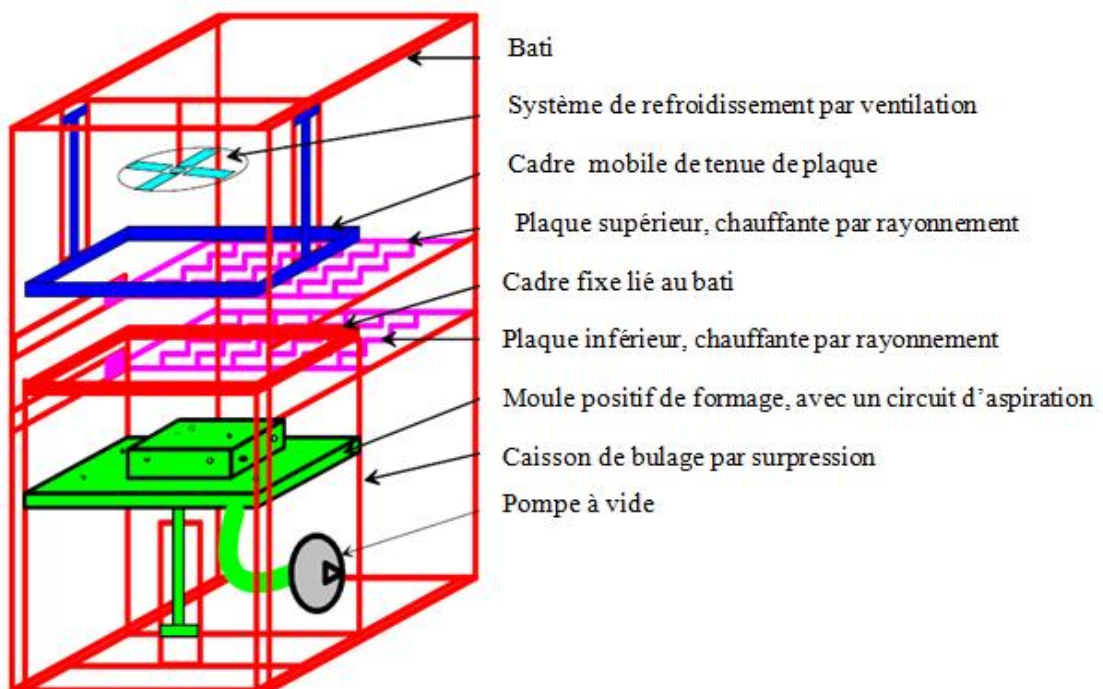


Figure I.5:Schémas d'une machine thermoformage.

I.2.3 constituants de la machine de thermoformage

- **Bâti** : c'est un couvercle qui sert à protéger la machine contre la poussière et les différents risque d'endommagement par l'extérieure.
- **Système de refroidissement par ventilation** : système comportant un ou deux ventilateurs électriques qui mettent l'air en mouvement afin de permettre son évacuation ou son insufflation forcée. Les bouches de ventilation régulent automatiquement l'admission et l'extraction d'air afin d'assurer correctement son renouvellement tout en limitant les déperditions d'énergie. [6]
- **Cadre mobile de tenu de plaque** : il s'agit d'un support qui sert à maintenir et déplacer la plaque thermoplastique vers le système de chauffage et le moule.
- **System de Chauffage par rayonnement** : consiste à créer une interaction entre une source de rayonnement électromagnétique et une surface qui absorbe le rayonnement sous forme de chaleur. Le rayonnement est caractérisé par sa longueur d'onde. Cette technique de chauffage nous permet d'éviter la brulure de matériau et de chauffer la plaque uniformément. [4]
- **Pompe sous vide** : c'est un outil qui aspire l'air par les événements qui existent dans le moule et permet à la plaque de prendre la forme du moule pour ensuite gonfler pour le démoulage de la pièce moulée.

I.3 Le moule

Il existe plusieurs types de moule de thermoformage, les moules négatifs et positifs, leur choix dépendra de plusieurs facteurs essentiels tel que les dimensions de la pièce, le type de machine de thermoformage et la précision demandée ainsi que le matériau à utiliser. [3]

I.3.1 types de moule

A) Moule positif

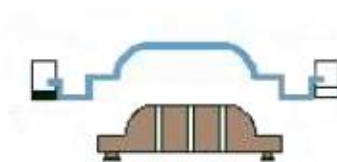


Figure I.6 :Moule positif et pièce thermoformée. [5]

B) Moule négatif

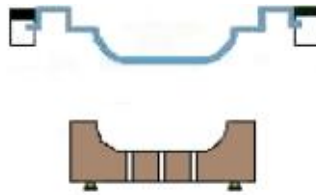


Figure I.7: Moule négatif et pièce thermoformée. [5]

I.3.2 Etude comparative sur les moules

Le choix entre le formage positif et le formage négatif est dicté par le résultat que l'on souhaite obtenir au niveau de la pièce finie, une étude comparative est faite sur ces deux moules comme elle est montrée dans le (tableau (I.1)) et les (figures I.8 et I.9) ci-dessous.

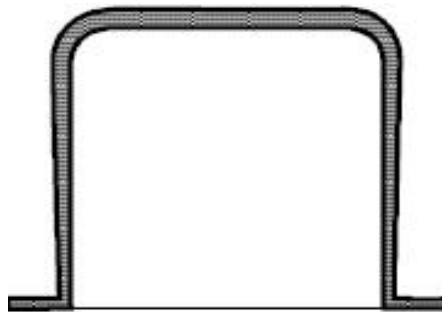


Figure I.8 : Coupe d'une pièce thermoformée par un moule positif. [3]

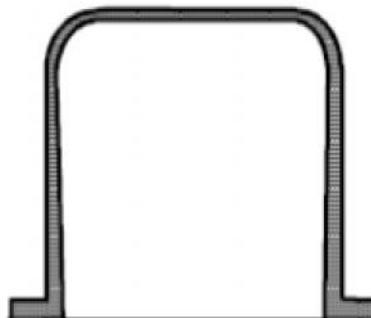


Figure I.9: Coupe d'une pièce thermoformée par un moule négatif. [3]

* Remarque

Nous remarquons qu'il y'a une différence entre ces deux types de moule, l'épaisseur des parois des pièces thermoformées par un moule positif sont plus minces que celle thermoformée par un moule négatif contrairement au fond qui, lui est épais dans le moule positif est mince dans le moule négatif.

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

Tableau I.1 : Comparaison entre moule positif et négatif. [2]

I.3.3 Caractéristiques d'un moule

La construction du moule doit tenir compte du coefficient de retrait du thermoplastique et de la direction d'extrusion des plaques.

A) Le retrait

C'est un processus qui conduit à une réduction des dimensions de la pièce. Il se manifeste sous trois formes :

➤ Retrait en moule

Lorsque le thermoplastique est chauffé et formé sur moule, un retrait du matériau se manifeste durant le cycle de refroidissement. Après obtention d'une température en surface se prêtant au démoulage de la pièce formée, les dimensions de celle-ci auront légèrement diminuées par rapport à ses dimensions de formage. En ce qui concerne le dragage male, le retrait est moins critique par rapport aux dimensions finales de la pièce. [9]

➤ Retrait post formage

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

➤ Post-retrait

Ce phénomène est associé à la contraction (ou l'expansion) normale d'un objet due à des modifications de température ou d'humidité. Le coefficient de retrait est tributaire de la température de formage du matériau, de sa température de transition vitreuse ainsi que de la température du moule. Il est également en fonction du degré de cristallinité : les matériaux à haute teneur cristallines se rétractent généralement plus que les polymères amorphes [9]. Les paramètres de retrait standards des pièces en polymères thermoformées sont exprimés dans le tableau I.2 ci-dessous :

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

Tableau I.2: Paramètre de retrait des pièces thermoformées. [9]

➤ **Facteurs influents sur le retrait de la pièce**

D'une manière générale, les facteurs d'influence du retrait de moulage sont les suivants :

- Le type de plastique (avec les éventuels écarts de charge) ;
- La vitesse de refroidissement : le retrait est moindre si le refroidissement est rapide ;
- Le retrait augmente avec la température de démoulage ;
- Le retrait est plus faible en formage positif qu'en formage négatif.

B) Cavités à vide

Les cavités à vide doivent être incorporées au moule à l'extrême contact entre moule et feuille, afin de minimiser les risques de bulles d'air résiduelles qui empêchent d'achever le formage de la pièce. En ce qui concerne les feuilles minces, les cavités doivent avoir un diamètre compris entre 0,25 et 0,40 mm. Pour ce qui est des feuilles épaisses, le diamètre doit être compris entre 1,0 et 1,5 mm ou plus, pourvu que les cavités ne laissent pas de marques ou de défauts sur la pièce formée.[9]

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

Tableau I.3 : Diamètre de la cavité vide en fonction de l'épaisseur de la feuille. [9]

C) Angle de dépouille

C'est un angle important qui sert à éviter le frottement entre le moule et la pièce à usiner. Les moules femelles sont plus faciles à démouler que les moules males. Au démoulage, certains moules femelles ne nécessitent aucun angle de dépouille sur la surface externe de la pièce, car la pièce peut se retirer d'elle-même.[9]

I.4 Avantage de procédé thermoformage

Cette technique présente de grands avantages dans tous les domaines qu'ils soient économique ou industriel... etc.

L'accessibilité du thermoformage est sans contredit un de ces grands avantages. L'investissement de départ est économique et la production de courte série ou de pièces complexes peut être très abordable, car le coût de l'outillage est faible et sa durabilité est remarquable.

Des modifications ou retouches peuvent aisément être apportées à l'équipement pour offrir un maximum de possibilités. Les délais de production sont courts car l'élaboration des prototypes et la fabrication des moules sont aisées. L'apport technologique dans l'offre des matières plastiques, la technicité des équipements et des moules ainsi que l'intégration de traitements complémentaires engendrent des pièces de précision et d'une excellente définition.

L'avantage du procédé sous vide est de permettre d'obtenir des pièces à parois minces et de grande surface à l'aide d'outillages simples. Ce procédé permet également de fabriquer en grandes séries et de rentabiliser aussi les petites séries.

Partie 2 : Matériaux thermoformés

Les matériaux polymères sont généralement utilisés pour leurs propriétés mécaniques particulières et leur aptitude à être mis en œuvre. Ces qualités sont étroitement liées à leur structure. Cette partie a pour objet une présentation générale sur les polymères et en particulier le polyéthylène, polypropylène (PP) et le polystyrène (PS). Il est aussi courant d'utiliser des associations de plusieurs polymères (ABS-PC-PMMA-PVC) dont la plupart sont recyclables.

I.5 Définition de polymère

Les polymères sont parmi les matières ayant le plus d'applications industrielles. Ce sont des macromolécules obtenues par la combinaison d'un grand nombre de molécules plus petites. Les polymères ont une masse molaire très importante. [10]

I.5.1 Cycle de vie des polymères

- **Elaboration :** les polymères sont synthétisés en reliant par des liaisons des petites molécules, appelées molécules de monomère. [10]
- **Formulation :** après leur synthèse, les polymères ne sont jamais utilisés tels quels. On leur ajoute diverses substances qui modifient leur comportement. [10]
- **Mise en œuvre :** elle peut se faire à partir de poudres (revêtements), de solutions ou d'émulsions (peintures, colles), de l'état fondu (cas le plus fréquent), de l'état caoutchouteux (soufflage de bouteilles) ou de l'état solide (étirage de fibres et de films, usinage des pièces mécaniques). [10]
- **Utilisation:** faible cout, faible masse volumique, propriétés mécaniques (résistance au choc), optiques (transparence), thermique et électriques (caractère isolant), physico-chimiques (effet barrière, résistance à la corrosion). [10]
- **Devenir après l'usage :** élimination (mise en décharge), réutilisation ou valorisation (recyclage). [10]

I.5.2 Synthèse des polymères

Il existe deux méthodes pour synthétiser des polymères :

A) Polymérisation en chaîne : Est une réaction conduisant à la formation de polymère par additions successives de monomères sur une extrémité active de la chaîne macromoléculaire. Pour produire les polymères synthétiques par exemple le polyéthylène, le polystyrène. [11]

B) Polycondensation

Est une réaction chimique entre molécules de base (monomère). Au cours de la polycondensation, les monomères s'associent avec élimination simultanée d'atomes ou de groupes d'atomes. Cette réaction mène à l'élaboration des macromolécules nommés polycondensats Les polyamides, les polyesters. [11]

I.5.3 Classification des polymères

Plusieurs classifications de polymères peuvent être proposées, selon l'origine on distingue (naturel, artificielle, polymère synthétique), le type d'architecture (linéaire, réticulé, ramifié, dendritique), selon le domaine d'application (grande fusion, technique, polymères spéciaux), synthèse des polymères (polymérisation, polycondensation), selon leurs propriétés (thermoplastique, thermodurcissable, élastomère). [11]

On s'intéresse dans notre recherche aux types d'architectures et aux propriétés thermiques et mécaniques comme base de la classification.

A) Classement des polymères selon les propriétés thermiques et mécaniques

Les polymères peuvent prendre différents aspects : durs, souples, cassants, transparents, il existe deux grandes familles de polymères, les thermoplastiques et les thermodurcissables. Mais on retrouve aussi des élastomères.

➤ **Les thermoplastiques :** sont des plastiques qui ont été moulés à chaud (au-dessus du point de fusion) et ils sont utilisés à froid. La transformation est réversible et renouvelable un grand nombre de fois, les thermoplastiques sont ainsi facilement recyclables, les matières les plus utilisées sont notamment PE, PP, PVC, PET, ...etc. [11]

➤ **Les thermodurcissables :** sont des plastiques qui ont été moulés à chaud et ont été réticulés à cette température et prennent une forme définitive au premier refroidissement : ils

deviennent durs et ne se ramollissent plus une fois moulés comme polyuréthanes, phénoplastes. [11]

- **Les élastomères:** sont des polymères ayant des propriétés élastiques réversibles (allongement réversible important) comme le caoutchouc naturel, le polybutadiène, le polysoprène...etc. [11]

B) Classification des polymères selon le type d'architecture des macromolécules

- **Les polymères linéaires :** sont obtenus par des techniques de polymérisation en chaîne, les motifs s'enchaînent de manière unidimensionnelle comme montre la figure I.10 ci-dessous.[12]



Figure I.10 :Représentation schématique d'un polymère linéaire.[12]

- **Les polymères ramifiés :** appelés aussi polymère bidimensionnelle, il existe des ramifications courtes sur les chaînes. [13]

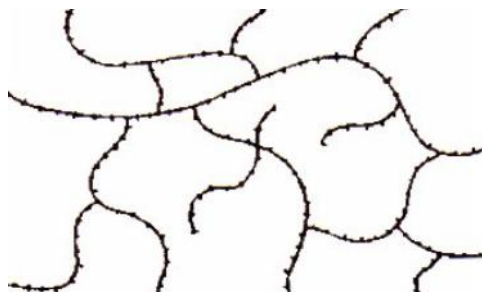


Figure I.11:Représentation schématique d'un polymère ramifié. [12]

- **Les polymères réticulés :** aboutit par l'introduction des liaisons covalentes entre chaîne de polymère linaire ou ramifié.[12]

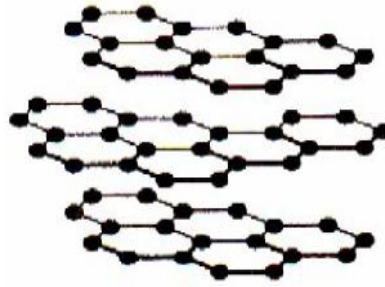


Figure I.12:Représentation schématique d'un polymère réticulé. [12]

C) Classification selon la structure des chaînes macromoléculaires

- **Les polymères amorphes :** L'état amorphe des matériaux polymères est caractérisé par l'absence d'ordre à grande distance. Il n'y a pas de distance constante entre les macromolécules et aucune régularité dans l'arrangement et l'orientation comme montre la figure I.13 ci-dessous.

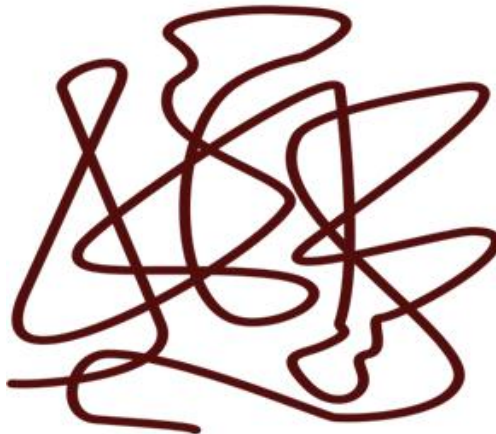


Figure I.13 : La structure amorphe. [10]

- **Les polymères cristallins** : c'est une structure où les chaînes macromoléculaires sont rangées plus régulièrement, plus les polymères sont ramifiés plus le taux de cristallinité est faible. [10]

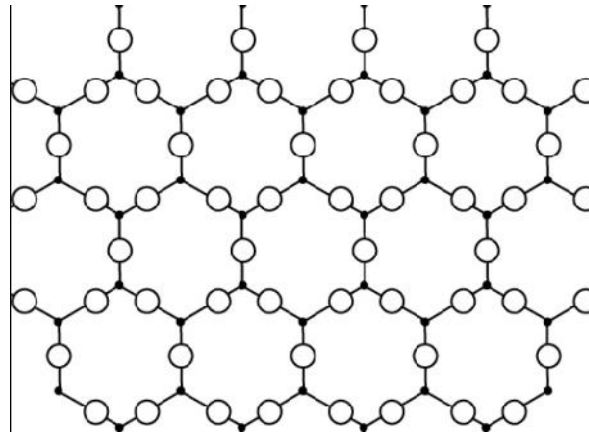


Figure I.14 : La structure cristalline. [10]

- **Les polymères semi cristallins** : présentent une alternance de plaquettes de phase amorphe et de phase cristalline. [10]

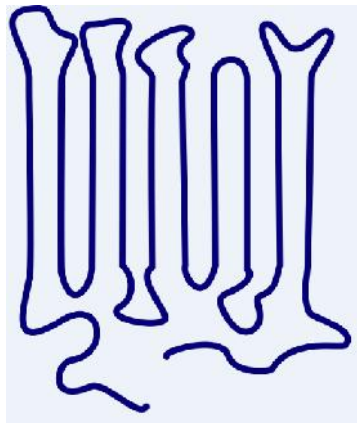


Figure I.15 : La structure semi cristallin. [10]

I.6 Polyéthylène PE

Le polyéthylène est un des polymères les plus simples, c'est un matériau semi cristallin obtenu par la polymérisation de l'éthylène, et un thermoplastique résistant au choc à l'impact même à de basses températures ($T < 0^{\circ}\text{C}$). [13]

I.6.1 types de polyéthylène

Il existe différents types de polyéthylène, ils sont classés en fonction de leur densité :

➤ Le polyéthylène haute densité (PEHD)

La rigidité et la dureté du PEHD augmentent avec la densité, et donc avec la cristallinité. La rigidité est mesurée au moyen du module d'élasticité. [13]

➤ Le polyéthylène basse densité (PEBD)

Le PEBD est plus souple que le PEHD, mais il possède résistance mécanique plus moindre que le PEHD.

➤ Le polyéthylène à basse densité linéaire PEBDL

A été inventé pour remplacer le polyéthylène à basse densité PEBD [13]

- polyéthylène à masse molaire élevée PE- UHPM
- polyéthylène réticulé PE-R
- polyéthylène réticulé à haute densité PE- RHD
- polyéthylène à moyenne densité PE-MD
- polyéthylène à très basse densité PE- TBD.

I.6.2 Propriétés physiques et thermiques de quelques polyéthylènes

Quelques propriétés physiques et thermiques sont présentées dans le tableau suivant :

Propriétés	PEhd	PEbd
Masse volumique (g/cm ³)	0.955 – 0.970	0.915 – 0.935
Température de ramollissement (°C)	110	110
Température de fusion à l'équilibre thermodynamique (°C)	128 - 135	120 - 125

Tableau I.4 : Propriétés physiques et thermiques de différents polyéthylènes. [14]

A) Température de fusion : c'est une propriété caractéristique de la matière, elle représente la température à une pression donnée à travers laquelle la matière passe d'un état solide à un état liquide. [15]

I.6.3 Propriétés mécaniques de polyéthylène PE

Propriétés	PEhd	PEbd		PEbdl	
Contrainte au seuil d'écoulement – Traction (MPa)	25-30	film	plaque	film	plaque
		8-15/7-10		9-20/10-20	
Résistance rupture (MPa)	30-35	9-23/8-10		20-30/10-13	
Allongement repture %	500-1100	150-1100/300-800		600-1200/500-700	
Module d'élasticité en traction (MPa)	800-1100	200-500/190-280		200-600/210-550	
Dureté shore D	66	40-47/40-47		46-63/46-63	

Tableau I.5 : Propriétés mécaniques des polyéthylènes. [14]

Chapitre II : Matériaux de moule et fabrication

Partie 1: Matériau de moule

Comme nous avons déjà cité au premier chapitre que les matériaux utilisés pour la fabrication des moules est l'aluminium.

II.1 L'aluminium

L'aluminium est un élément du troisième groupe de classification de Mendeleïev, dont le nombre atomique est 13, la masse atomique 26.28 et la température de fusion 660°C . Il se cristallise dans le système cubique à faces centrées, avec un paramètre de maille 0.404 nm. Sa masse volumique est 2.7 kg/dm^3 , son coefficient de dilatation thermique linéaire est de l'ordre de 23.10^{-6} , son module de Young de 6.9 MPa. [17]

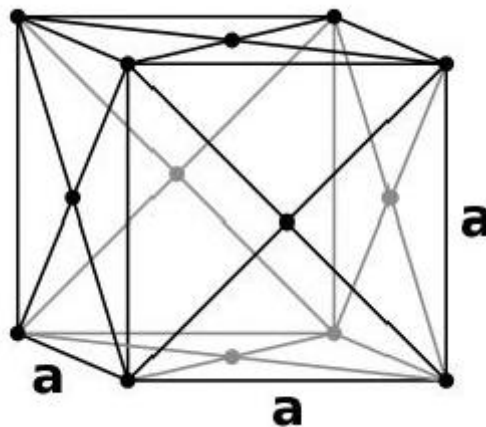


Figure II.1: La structure de l'aluminium. [18]

II.2 Alliage d'aluminium

Un alliage d'aluminium est une composition chimique dans laquelle d'autres éléments sont ajoutés à l'aluminium pur en vue d'améliorer ses propriétés tel que, la densité, la maniabilité, la conductivité électrique et la résistance à la corrosion. Ces propriétés sont affectées par l'ajout des éléments qui comprennent le fer, le silicium, le cuivre, le magnésium, le manganèse et le zinc à des niveaux combinés qui peuvent représenter jusqu'à 15% de l'alliage en poids. Les alliages aluminium sont divisés en deux grandes catégories qui sont alliage de fonderie destiné à être transformé par des techniques de fonderie (méthode au moule permanent et non permanent), alliage de corroyage destiné à être transformé par des techniques de forge (laminage, filage, matriçage, forge). [19]

II.2.1 Désignation de l'alliage d'aluminium

Pour différencier entre un alliage aluminium et un autre, il est nécessaire d'avoir un système normalisé, il en existe deux : un système européen et un système américain.

A) Selon le système européen

Le système européen pour la classification des alliages d'aluminium est comparable au système américain, la désignation de l'aluminium et des alliages d'aluminium se fait sur base des symboles chimiques souvent suivis des chiffres donnant la pureté de l'aluminium ou la teneur nominale de l'élément en question, on distingue :

➤ Désignation d'alliage corroyé

La norme NF EN 573 définit les règles de désignation des produits destinés à être transformés par corroyage. La désignation des alliages d'aluminium comprend un nombre de 4 chiffres. Elle est précédée des lettres AW : A pour l'aluminium et W pour alliage corroyé (wrought). [20]

➤ Désignation d'alliage de fonderie :

La norme NF EN 1780 impose une désignation numérique des alliages d'aluminium de fonderie qui peut être éventuellement suivie d'une désignation par symboles chimiques. Elle est précédée des lettres AB : A pour l'aluminium et B pour alliage de fonderie. [20]

I.3 Alliage aluminium – silicium (Alpax)

Les alliages aluminium-silicium sont employés dans la fonderie des métaux légers sous le nom d'alpax en France et aux Etats-Unis et sous le nom de silumin dans les autres pays [21]. Les éléments secondaires d'addition sont en général le magnésium (Mg) pour améliorer la résistance à la corrosion. Le titane (Ti) pour améliorer les caractéristiques mécaniques, très efficace mais diminue l'usinabilité. Le cuivre (Cu) pour améliorer les caractéristiques mécaniques et l'usinabilité. Le diagramme d'équilibre Al-Si montre l'existence de deux solutions solides et . La première contient jusqu'à 1,65 % de Si, un eutectique existe à 12,7 % de Si comme montre la (figure II.2) ci-dessous. [21]

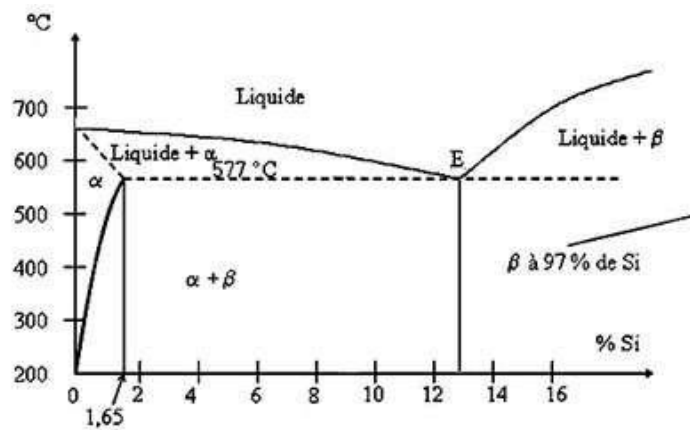


Figure II.2 :Diagramme d'équilibre Al-Si. [21]

II.4 Avantage de l'aluminium dans le domaine de l'industrie

L'aluminium, sous sa forme pure ou dans des alliages est l'un des métaux les plus utiles sur la planète de part sa polyvalence, il est léger, ductile et il résiste à la corrosion. Il présente aussi une très bonne conductivité thermique et électrique. L'aluminium et ses alliages s'usinent avec facilité à condition de prendre quelques précautions aux grandes vitesses de coupe et d'utiliser des outils adaptés. Les alliages à hautes caractéristiques mécaniques c'est à dire ayant des capacités de déformation à froid faibles, s'usinent bien. (Fraisage, perçage, cisaillement). [18]

L'aluminium industriel contient généralement 0.5% d'impuretés (principalement Fe+Si), mais il peut être obtenu presque pur par raffinage électrolytique ($Al > 99.99\%$) [17]. Ces impuretés ont différents effets sur les propriétés électriques et mécaniques, l'aluminium forme très vite une couche d'oxyde Al_2O_3 (alumine), épaisse et adhérente qui protège le métal. Par contre, ce film d'alumine n'a qu'une résistance chimique limitée. Elle résiste cependant bien dans les solutions d'acide chlorhydrique, sulfurique et nitrique. Par contre, les bases attaquent violemment le métal. Cette protection peut être améliorée par anodisation [17].

D'une manière générale, les Al-Si sont les alliages d'aluminium qui présentent les meilleures propriétés de fonderie on peut les appliquer dans plusieurs domaines tel que l'automobile, l'aviation, la mécanique, pour les appareillages électriques ou encore en chimie. [21]

L'aluminium est un des métaux dont le recyclage est le plus attractif tant sur le plan énergétique que sur le plan économique. La refusions de l'aluminium ne représente que 5% de l'énergie nécessaire à l'élaboration du métal à partir du minerai. [21]

Partie 2 : Procédé de fabrication

Dans cette partie nous allons définir les différents procédés et outils de fabrication de notre moule disponible au niveau du hall de technologie.

II.5 Machine à commande numérique

Il s'agit de machines pilotées par un programme informatique, réalisé par les différents logiciels de CAO et FAO, ces machines fabriquent des pièces par usinage c'est-à-dire par enlèvement de matière (tournage, fraisage, perçage...). Elles nous permettent aussi de réaliser des pièces qui présentent des surfaces complexes avec une grande précision.

II.6 Usinage de l'aluminium

L'usinage est un procédé de génération de surfaces. Il consiste à créer une nouvelle surface par enlèvement de matière en utilisant un outil coupant. Les caractéristiques de cette surface dépendent du couple outil-matière, c'est-à-dire des paramètres mis en jeu pendant la coupe (vitesse de coupe, vitesse d'avance, profondeur de passe ...). En usinage, il existe plusieurs configurations utilisables selon le procédé de coupe (le fraisage, le rabotage, le tournage ...). Durant notre étude, nous nous intéresserons plus précisément à la technique d'enlèvement de matière par fraisage.

II.6.1 Fraisage

Dans son principe, c'est un procédé de fabrication mécanique par coupe (enlèvement de matière) faisant intervenir, en coordination, le mouvement de rotation d'un outil à plusieurs arêtes (mouvement de coupe) et l'avance rectiligne d'une pièce (dit mouvement d'avance).[22]

II.6.1.1 Outils de fraisage et leur utilisation

A) Fraise cylindrique

La fraise cylindrique comme le montre la figure (II.3) possède un embout plat avec des lèvres de coupe permettant d'usiner dans les trois axes XYZ. Elles sont réalisées en différentes matières. Il existe tout un choix de fraises cylindriques possédant diverses caractéristiques (angle de coupe de 25°, 30°, 40°, 45°, de filets, nombre de dents, etc..) permettant des usinages dans différentes matières.



Figure II.3: Fraise cylindrique.[22]

- **Fraise hémisphère:** La fraise hémisphérique ou fraise boule est une fraise utilisée pour la phase de finition en usinage 3D.



Figure I.4: Fraise hémisphérique. [22]

II.6.1.2 paramètres mis en jeu

Les différents paramètres de coupe ont évidemment une influence sur l'usinabilité des pièces à cru et ces derniers doivent être optimisés afin d'obtenir des pièces de qualité.

- A) Vitesse de coupe :** est notée V_c et exprimée en m/min c'est la vitesse relative de la pièce par rapport à la pointe d'une dent, elle dépend de l'outil utilisé et la pièce à usiner ainsi que la puissance d'une machine. Trouvée par la relation suivante [23] :

$$N = \frac{1000 * V_c}{\pi * \varnothing} \quad (\text{II.1})$$

$$V_c = \frac{\pi * \varnothing * N}{1000} \quad (\text{II.2})$$

N : fréquence de rotation tr/min.

\varnothing : diamètre de l'outil mm.

B) Vitesse d'avance : notée V_f correspond à la vitesse de déplacement de la pièce par rapport à l'outil pour le déplacement des axes, exprimé en mm/min par la relation suivante [23]:

$$V_f = F_z * Z * N \quad (\text{III.3})$$

Z : nombre de dent de la fraise

F_z : vitesse d'avance par dent en mm/ (tr. dent)

C) Profondeur de la passe : est l'engagement de l'outil dans la pièce. Elle est notée a_p exprimée en mm, elle dépend de la taille de l'outil (hauteur) et la matière de la pièce ainsi que les ébauches et la finition de la pièce. [23]

II.7 Conditions de coupe de l'aluminium

Chaque matériau à usiner possède ses propres paramètres de coupe, dans notre cas nous nous intéressons à celle de l'aluminium et ses alliages qui sont montrés dans le tableau II.3 ci-dessous [22].

Matériaux à usiner	Vitesse de coupe V_c en mm/min			
	Acier rapide		Carbure	
Vitesse d'avance F mm/(tr. Dent)	0.03 à 0.1	0.1 à 0.2	0.05 à 0.2	0.2 à 0.3
Alliage d'aluminium de faible dur été sans silicium	250	200	500	400
Alliage d'aluminium dur sans silicium ou %Si moyen	120	80	300	200
Alliage d'aluminium à haute teneur en silicium >12%	80	40	120	80

Tableau II.2: Les paramètres de coupe de l'alliage d'aluminium. [23]

***Chapitre III présentation de l'entreprise et étude
éco-conception au produit fini***

III.1 Présentation de l'entreprise

L'entreprise ALL PLAST : est créée en 1998 implanté au cœur de la zone d'activité de Taharacht à Akbou s'engage dans une démarche de qualité grâce a une équipe de jeune et performante qui s'investie toujours plus et se tient au fait des derniers technologies.

ALL PLAST est spécialisé dans la fabrication de la feuille polystyrène et de la feuille polypropylène destiné pour l'industrie agroalimentaire (laiterie, margarine, conditionnement alimentaire), parmi ses clients les quels leur fabrique des plaque de polystyrène pour le thermoformage des pots de yaourt on trouve SOMMAME, DANONE, ou les braquettes de margarine comme BELLAT, LA BELLE.



Figure III.1 : Symbole de l'entreprise.

III .1.1 Les bandes de PS coloré.

La feuille PS thermoformable d'All Plast est de grade alimentaire, destinée pour le conditionnement des produits laitiers et dérivés (yaourts, fromage, beurre,...) et bien d'autres produits alimentaires.



Figure III.2 : la bande de PS colorée.

III.1.2 Matière première

Colorant 1 (selon le choix de client)	2+ 0.5%
Colorant 2 (blanc)	48+-0.5%
Nature de matières première	Grade alimentaire
Polystyrène choc	48+-5%
Polystyrène cristal	48+-5%

Tableau III.1 : Les ingrédients de la matière première.**III.1.3 Caractéristique de la feuille**

Couleur	Transparente
Densité (théorique)	1.05+-0.01g/cm ³
Effet de sabre	<10mm sur 6 m
Epaisseur totale	De 0.35jusqu'a 2mm
Laize	Jusqu'à 940 mm
Ondulation	<40 mm sur 2m
Produit	Bande de Polystyrène Alimentaire
Retrait longitudinale	<10%
Retrait transversale	<2%

Tableau III.2 : les caractéristiques de la bande PS.**III.1.4 Produit d'All Plast**

En dehors des plaques de thermoformage on trouve les braguettes de margarine et les emballage de biscuit comme montre la figure ci-dessous on distingue deux modèles à deux cavités ou a trois cavité en utilisant une bande de polystyrène qui se ramollissent a une température de l'ordre 210 C°

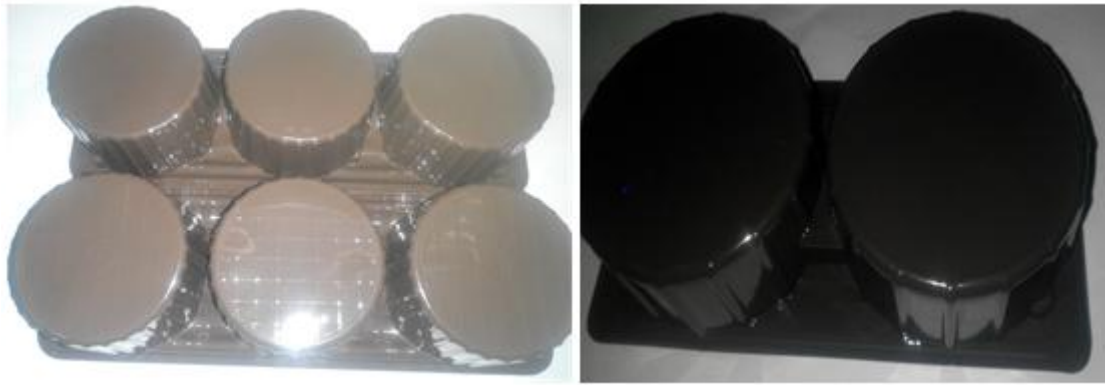


Figure III.3 : Emballage de biscuits.

Ces derniers prennent la forme d'un moule en aluminium qui se chauffe a 20 C° et se refroidit a 7 ou à 6 C°.



Figure III.4 : Moule a deux cavités d'emballage de biscuit.

La machine utilisée pour ce procédé est de type GN Thermoforming équipement chester N.S fabriqué au Canada (GN3021DX) en 2013 ses caractéristiques sont montré dans le tableau suivant.

La pression minimum	8.1 Bar
La pression maximum	9.6 Bar
La fréquence	50 à 60 Hz
Demande électricité	380 V

Tableaux III.3 : les caractéristiques de machine.

Conclusion

Après avoir effectué un stage pratique au sein de l'entreprise All Plast. Nous avons eu l'occasion de confronter le monde de l'industrie et voir le processus de production ainsi que le fonctionnement des machines et leurs caractéristiques.

Ce qui nous a permis d'acquérir beaucoup d'informations grâce aux membres du service maintenance, service de qualité qui nous ont ouvert les portes d'apprentissage.

D'autre part, on a constaté que l'entreprise a consacré tous les moyens (personnel, matériel...) afin d'offrir le bien pour sa clientèle.

Les principaux impacts de ces activités concernent la production de déchets solides, d'effluents liquides ou les rejets atmosphériques, d'autres déchets émis hors des murs de l'entreprise, sont également imputables au produit : il s'agit de ceux générés par les fournisseurs de matériaux et composants entrant dans la composition des produits. Il faut également en tenir compte dans une démarche d'éco-conception.

III.2 Éco-conception

L'éco-conception est une démarche préventive qui se caractérise par la prise en compte de l'environnement lors de la phase de conception ou d'amélioration d'un produit. L'objectif de cette démarche est d'améliorer la qualité écologique du produit, c'est à dire réduire ses impacts négatifs sur l'environnement tout au long de son cycle de vie, tout en conservant sa qualité d'usage. [24]

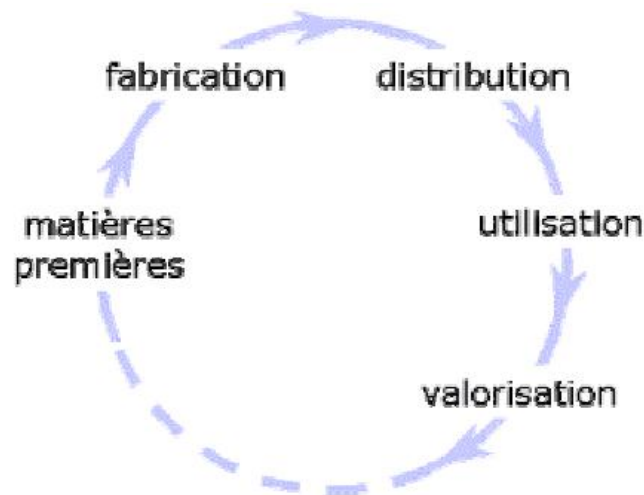


Figure III.5: Cycle de vie. [25]

III.2.1 Méthodologie d'éco-conception

Dans un projet d'éco-conception Il faut garder à l'esprit le but principal : un produit doit répondre à un cahier des charges et surtout à un ensemble de niveaux de performances et de fonctions d'usage. La prise en compte de l'environnement dans la conception du produit doit être évaluée comme une fonction secondaire face à la fonction principale. D'ajouter de la valeur par l'innovation environnementale et de proposer des solutions plus responsables. [26]

III.2.2 Outil et démarches d'éco-conception

Il existe deux types de démarche selon l'outil d'éco-conception :

- A) Démarches exhaustives** : qui consistent à réaliser une évaluation globale des impacts environnementaux à toutes les étapes du cycle de vie d'un produit ou service. La méthode la plus connue est l'Analyse du Cycle de Vie (ACV). [27]
- **Analyse du cycle de vie (ACV)** : est une méthode scientifiquement reconnue et normée (Norme ISO 14040) pour évaluer les impacts environnementaux d'un produit, d'un service ou d'un procédé, Depuis l'extraction des matériaux qui le constituent jusqu'à son traitement en fin de vie (valorisation ou mise en décharge), en passant par sa fabrication, sa distribution et son utilisation, un produit traverse de nombreuses étapes qui constituent son cycle de vie. Ce cycle de vie doit être considéré dans un ensemble car chaque étape peut être source d'impact sur l'environnement. [27]
- B) Démarches sélectives** : qui consistent à rechercher des options de conception visant à réduire le poids d'un ou plusieurs impacts environnementaux préalablement identifiés et que les choix ainsi fait ne risquent pas d'aggraver d'autres impacts. La méthode la plus connue est l'Evaluation Simplifiée et Qualitative du Cycle de Vie ESQCV). [27]
- **Evaluation Simplifiée et Qualitative du Cycle de Vie (ESQCV)** : est une évaluation qui consiste à réduire l'étude à certaines phases du cycle de vie du produit. Cette méthode repose sur un questionnaire qui balaye l'ensemble des critères du produit, rempli par l'entreprise elle-même. Trois choix sont possibles pour chaque critère : bon, moyen ou faible. On appelle cette méthode, méthode matricielle. Cette démarche a l'avantage d'être facile et n'est pas chaire.[27]

III.2.3 Application de la démarche d'éco-conception sur les matériaux polymères

II.2.3.1 Allègement de la pièce

L'allègement des pièces en matériaux polymères est une partie importante de la démarche d'éco-conception, elle permet la réduction de la quantité de matière première et de quantifier la matière à retraiter en fin de vie. Il existe sous plusieurs formes telles que utilisation de matériaux moins denses, réduction des épaisseurs, conception des formes des pièces (évider, optimiser) et remplacement de certains matériaux (métal, verre, ...) par des polymères.

Cette recherche de réduction de masse est visible sur le tableau ci-dessous. [25]

	Poids y'a 20 ans	Poids aujourd'hui	Réduction de la source	contenant	Contenu
Sac de caisse	24g	5.5g	-77%	5.5g	10kg
Bouteille d'eau de source 1.5L	40g	25g	-38%	25g	1.5L
Barquette plat cuisines	40g	23g	-40%	23g	300g
Caisse poisson PSE	100g	87g	-13%	87g	3kg

Tableau III.4: Evolution de la masse des produits en polymère. [25]

II.2.3.2 Réduction de l'épaisseur de la pièce

De nombreuses conférences sont organisées pour informer les industriels sur la possibilité de réduire les épaisseurs des pièces afin d'obtenir des parois minces (moins de 2 mm). Cette possibilité concerne tous les domaines : l'emballage, le médical, les pièces techniques, ...etc.

La réalisation de pièces en parois minces demande une adaptation particulière de la conception et de la fabrication. D'un point de vue de la conception le dimensionnement des pièces doit être calculé plus précisément pour permettre au produit final de correspondre aux exigences demandées (tenue mécanique, résistance chimique, ...). [25]

III.2.3.3 Polymères de synthèse

Les polymères de synthèse (PE, PP, PEP) sont issus du pétrole, une ressource non renouvelable. La diminution de ces ressources et la pollution engendrée par la transformation du pétrole ne font pas à priori des polymères de synthèse de bons candidats pour l'éco-conception. Mais l'utilisation des polymères de synthèse à la place de certains autres matériaux (métal, verre) peut avoir des avantages comme le gain de masse, la diminution du volume, la diminution de la consommation d'énergie et la diminution des coûts.

En comparaison avec les bio-polymères, ils rejettent plus de CO₂ mais aujourd'hui il n'est pas possible de les remplacer dans de nombreuses applications. Il est donc important d'utiliser toutes les méthodes possibles pour réduire leurs impacts sur l'environnement.

Comme déjà précisé, la période du cycle vie la plus importante en termes d'éco-conception pour les polymères de synthèse est la fin de vie. Le grand nombre de polymères

différents est un problème au moment du recyclage. Il est difficile de trier correctement tous les déchets et les polymères n'étant pas tous compatibles entre eux, les matériaux obtenus après le recyclage peuvent avoir de très mauvaises caractéristiques. Il existe plusieurs possibilités pour ces polymères comme le recyclage mécanique ou le recyclage chimique, ces deux possibilités permettent de transformer les produits en fin de vie en matière première pour de nouvelles applications. Le tableau ci-dessous présente des exemples de recyclage.[25]

Matériaux	Origines	Quelque application du recyclage
PEHD Polyéthylène haute densité PEBD Polyéthylène basse densité	Bouteille de lait Cubiteins de vin (5L) Flacon de lessives, d'adoucissants, de détergent film de sac	Nouveaux flacons- Bidon tubes de passage câble mandrins pièces devers injectées, sac poubelle
PS	Emballage en PS Boite, boitier, barquette, bouchage	Produits variés en PS Boitier d'appareils photo jetable Dos de Coffrets en cd
PSE	Emballage en PSE Barquette, caisse, calage	Emballage en PSE Plaque d'isolation en PSE Tout produit moulé en PSE hors alimentaire Calage de protection
PET	Bouteille Eau minérale et de source, BRS, bière, vin, cidre vinaigre	Fibre de rembourrage Fibre non tissé Fibre tissé ou tricoté Emballage rigide Feuillard Composant de mousse en PU Pièces devers d'injectées

Tableau III.5 : Application de recyclage des polymères. [25]

III.2.4 Bénéfices attendus de l'éco-conception

Il convient de rappeler que l'objectif principal de la démarche est de diminuer quantitativement et/ou qualitativement les impacts d'un produit ou d'un service, tout en conservant ses qualités et ses performances. Elle permet aux entreprises et aux territoires d'anticiper et respecter la réglementation et mieux maîtriser les risques et les coûts liés au cycle de vie de produits et activités. [25]

L'intégration des aspects environnementaux dans la conception et le développement de produit peut être un facteur de compétitivité et de performance.

En plus de permettre la réduction à la source des impacts environnementaux des produits (avant même qu'ils ne soient produits), une démarche d'éco-conception peut générer de nombreux bénéfices tel que. [28]

Modélisation et étude de comportement

IV.1 Introduction

Dans le chapitre suivant nous entamerons la partie fabrication, mais avant cela nous devons mettre nos idées sous forme concrète et désigner un moule creux 3D qui servira de base de travail pour mener une étude de résistance à la compression sur Solidworks. Une fois la faisabilité du projet confirmée l'étape suivante consistera à usiner notre moule sur fraiseuse numérique en s'aidant du logiciel Rhino Cam pour générer un G-code qui pilotera la machine.

IV.2 Procédure

IV.2.1 fabrication du prototype du pot de yaourt

La première étape consiste à réaliser un prototype de pot de yaourt qui servira plus tard à la mise en forme de l'empreinte de moulage, à l'aide de la fonction "Moule". L'idée de base étant esquissée tout d'abord sur papier puis mise en relief, en suivant une série d'étapes sur le logiciel de design cité auparavant.

Tout d'abord nous devons créer le brut que nous allons modéliser pour obtenir la forme du produit fini, pour cela nous avons créé une esquisse 2D qui représente le contour extérieur de ce dernier, puis nous l'avons extrudé avec un angle de dépouille de 15 degrés et une hauteur d'extrusion de 52 mm.

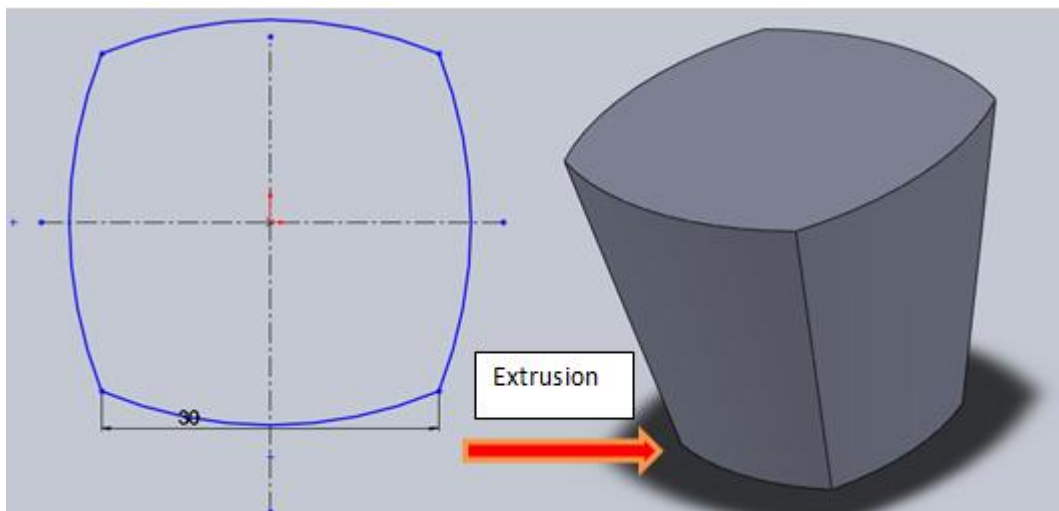


Figure IV.1: Création de l'esquisse et extrusion à partir de l'angle de dépouille.

Une fois cette procédure terminée, nous devons ajouter des congés sur les coins et la base, pour l'esthétique mais surtout pour adoucir l'angle et éviter une possible déchirure de la plaque pendant l'opération de thermoformage.

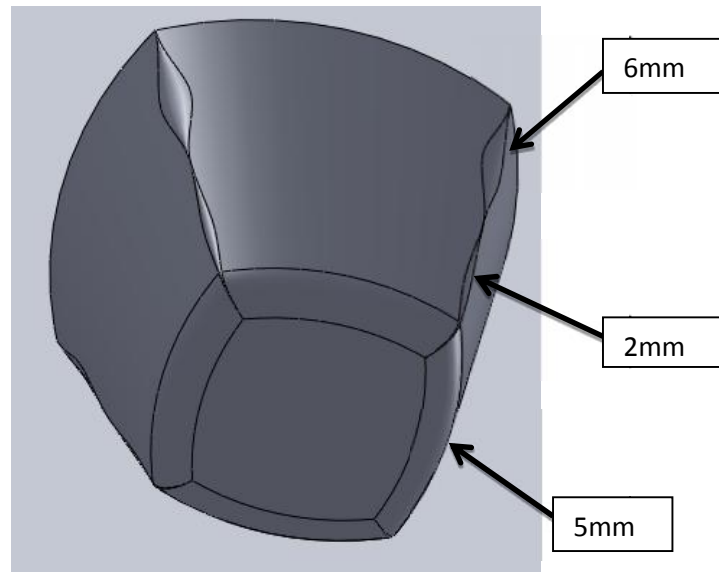


Figure IV.2 : Création de congé varie

La forme générale du produit étant finie il nous reste à entamer le coté purement esthétique, qui a pour but d'aider le consommateur à différencier les différents types de goûts disponibles. Pour se faire une forme caractéristique représentant l'arôme du produit en question a été extrudé sur le côté du prototype, et l'autre sur la base de celui-ci à l'aide d'un enlèvement de matière.

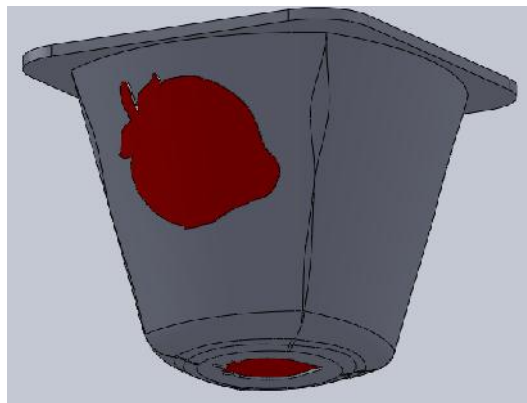


Figure IV.3 : Modèle plein.

IV.2.2 création du moule sur Solid Works

Maintenant il nous faut créer le moule, ce dernier est composé d'un noyau et d'une empreinte, le noyau reproduit la matrice interne du modèle, et l'empreinte sa matrice extérieure. Un plan de joint sépare le noyau de l'empreinte.

Une fois cette étape terminée il faut créer une ligne de joint, qui sépare la dépouille et cela en sélectionnant les arêtes comprises entre les deux dépouilles. En faisant cela nous délimitant la jonction entre l'empreinte et le moule, cette étape se fait en cliquant sur "ligne de joint" dans la barre d'outils sous l'onglet outils de moulage, il faut spécifier la direction d'ouverture et régler l'angle de dépouille à 1° avant de lancer l'analyse de dépouille, pour vérifier la validité de la ligne de joint choisie (chevauchement ou carrément l'absence de dépouille).

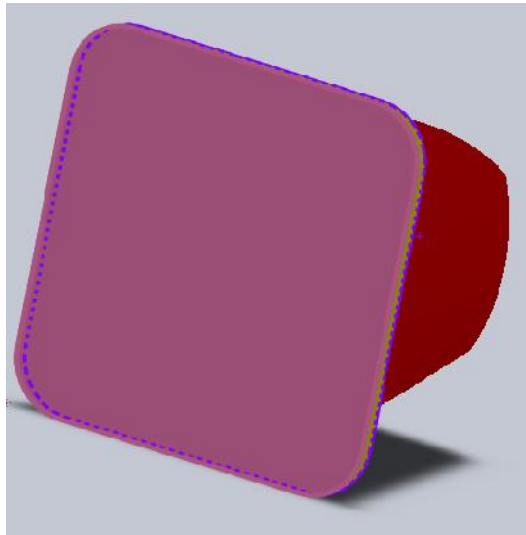
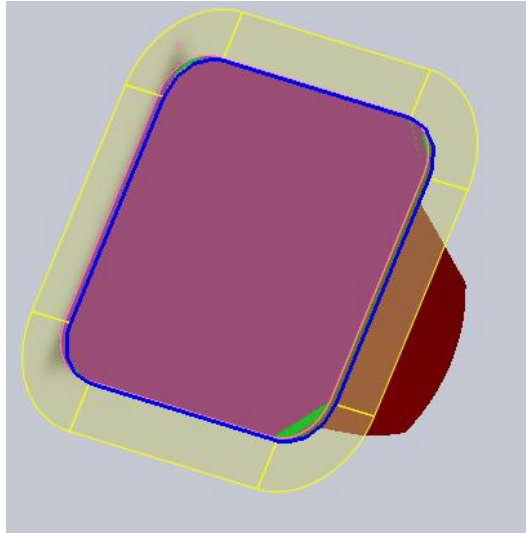
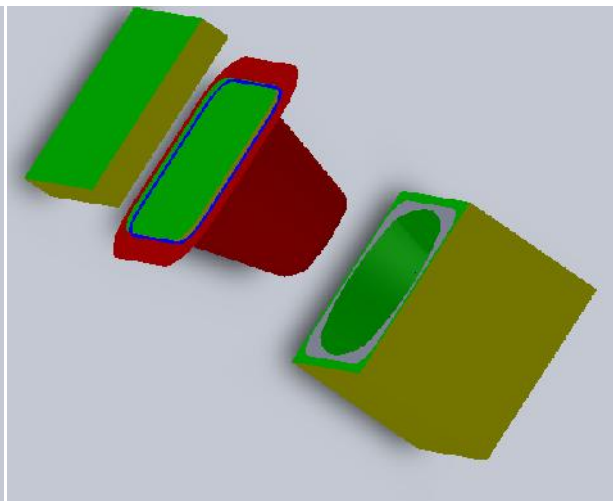
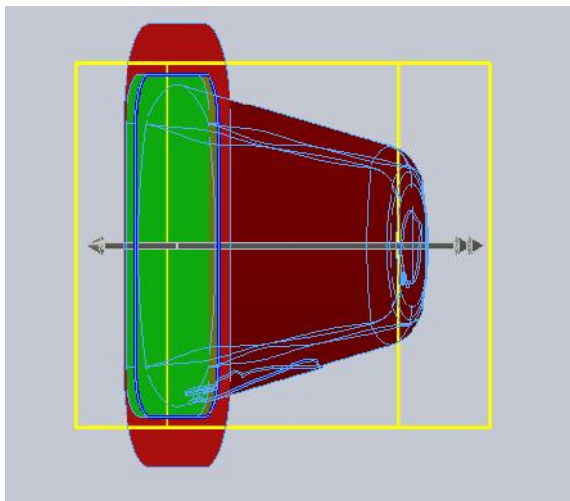


Figure IV.4 : création des lignes joint

L'étape suivante consiste à créer un plans de joint en extrudant la ligne de joint créée précédemment pour séparer l'empreinte du moule de son noyau, grâce à l'outil "plans de joint", ce plan doit être placé à une distance de 10 mm perpendiculairement de la surface d'ouverture.

**Figure IV.5 :** création de plan joint

Maintenant que toutes ces étapes sont terminées, il nous faut créer la matrice qui contient l’empreinte de notre modèle de pot de yaourt avec l’outil “Volumes noyau/empreinte”, celle-ci est modelée à partir de la forme extérieure du pot, pour faire cela il faut tout d’abord sélectionner le plan parallèle à la surface qui nous intéresse (empreinte positif) et puis créer une esquisse rectangulaire, ayant les dimensions extérieures du moule, une fois quitter la fonction l’esquisse.

**Figure IV.6 :** Création du plan pour l'extrusion**Figure IV.7 :** Modélisation du moule

IV.3 Simulation numérique

IV.3.1 Simulation de comportement du moule

La figure IV.8 suivante illustre le maillage et les conditions aux limites, tel que le maillage utilisée est un maillage standard de 6 mm de longueur d'arrête, nous avons fixé le moule à sa base, et nous avons appliqué une pression d'aspiration 0.6 MPa, car le moule travail sous ces conditions, une pompe sous vide aspire l'aire contenu dans le moule et engendre cette dépression.

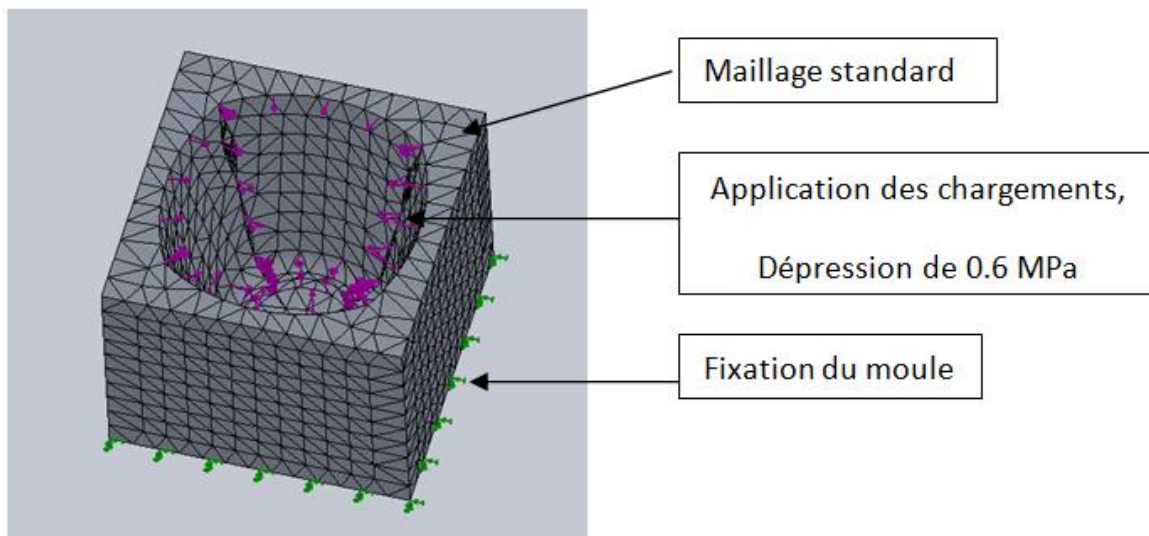


Figure IV.8 Maillage et condition aux limites

La figure IV.9 illustre la distribution des contraintes dans le volume du moule, après analyse nous avons trouvé que la zone la plus sollicitée se trouve au fond du moule ou nous avons fait un zoom afin de bien voir cette zone.

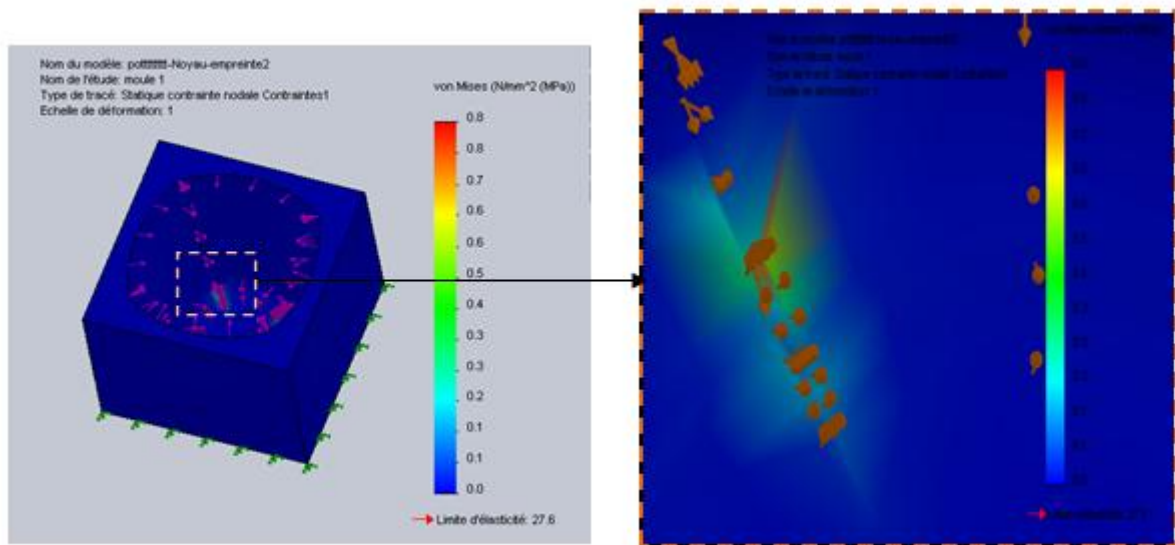


Figure IV.9 Distribution des contraintes.

Pour bien situer le résultat nous avons jugé utile d'ajouter la distribution de coefficient de sécurité

La figure IV.10 illustre que la zone la plus sollicitée présente un coefficient de sécurité de l'ordre 33 ce qui fait que le moule travaille dans une contrainte 33 fois plus petit que sa limite d'élasticité, ce qui nous donne une résistance assez appréciable, on dira que la durée de vie du moule est liée au fait de faire attention aux collision diverses que à la dépression de travail de machine.

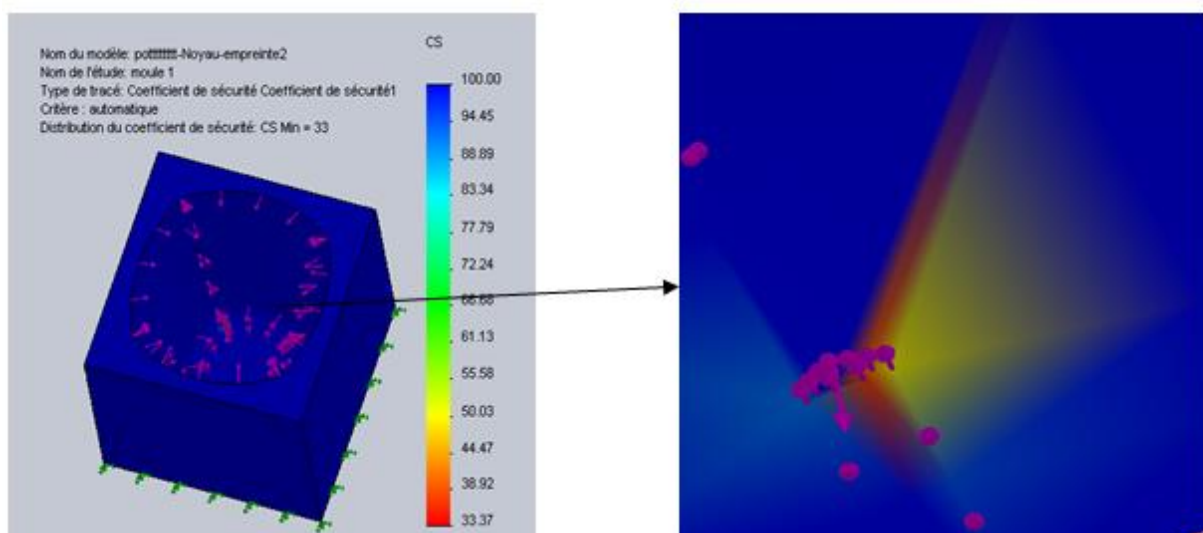


Figure IV.10 :Distribution des coefficients de sécurité.

IV.3.2 Etude de résistance de notre modèle de pot

L'étude de résistance de notre modèle se base sur une comparaison entre le modèle que nous avons conçu et deux exemples que nous avons choisi de produit déjà existant considère pour nous comme des modèle bon car ils sont validés par leur fabricant

Ces modèles auxquels nous allons comparer notre travail sont soigneusement choisis, le pot de la laiterie Soummam du type « Fort » qui présente une forme quasi cylindrique afin de voir le comportement d'un tel forme.



Figure IV. 11 : Modèle Soummam type “ Fort”.

La deuxième modèle pris est celui de laiterie Danone, de type « Danette » qui présente une forme proche de notre forme géométrique complexe de la base vers le haut du pot.



Figure IV.12 : Modèle DANONE type “ Danette”.

Avant de lancer l'étude nous avons fait des tests réel sur les deux pots type (Danette et Fort) nous avons pris les constats suivants

- L'épaisseur de pot Fort est de 0.4mm
- L'épaisseur de pot Danette est de 0.7mm

- La charge maximale supportée par fort est 30 N
- La charge maximale supportée pour Danette est de 45 N

Notre souhait est d'avoir un pot de même épaisseur que celui du modèle « Fort » et même résistance que « Danette ».

IV.3.2.1: Le protocole de l'étude suivie est comme suit :

- La réalisation de model 3D des deux type de pot (Fort, Danette)
- Simulation du comportement du pot "Fort" avec mise en évidence des zone dangereuse.
- Simulation du comportement du pot " Danette" avec mise en évidence des critères de résistance que donne cette forme.
- Conception de notre modèle en 3D et simulation de son comportement, puis interprétation des résultats.

A. Comportement du pot Soummam (Fort)

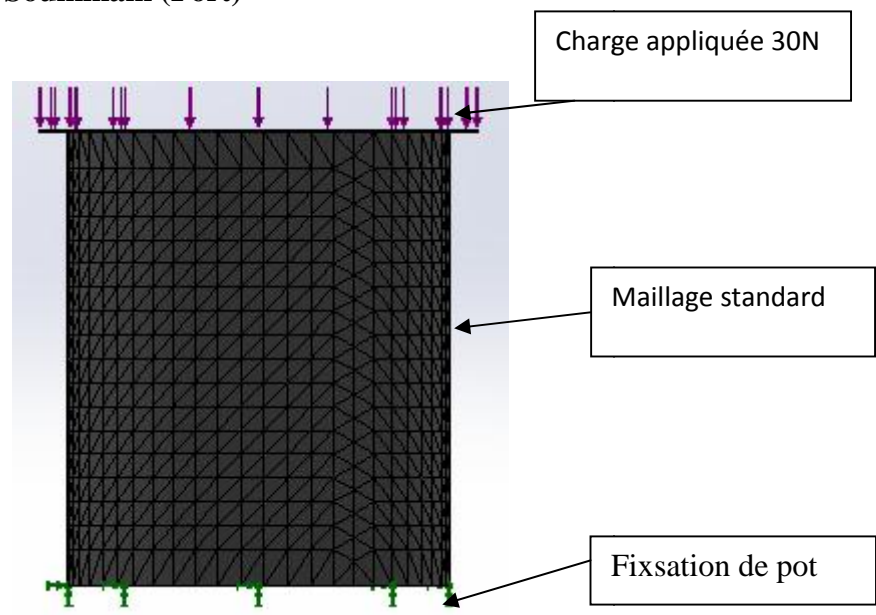


Figure IV.13 : Maillage et condition aux limites.

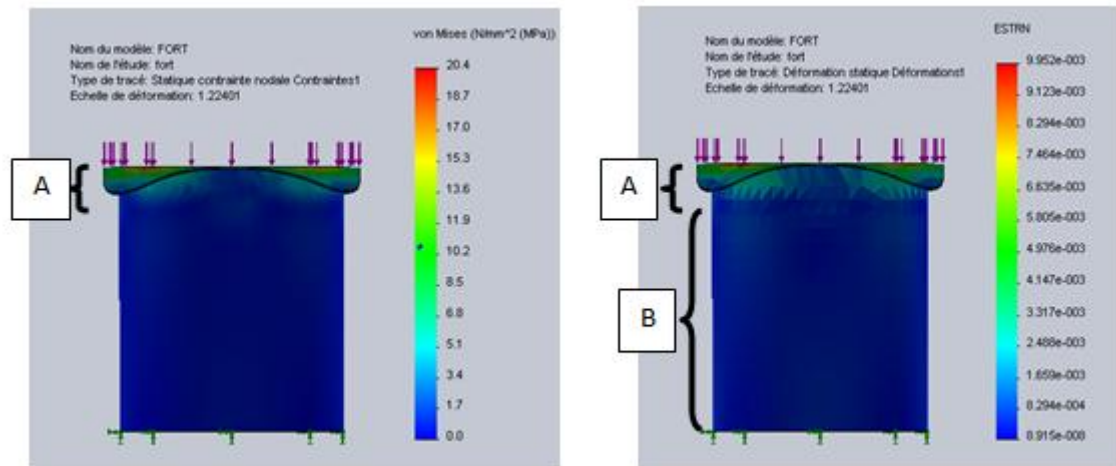
***Résultats**

Figure IV.14 : A gauche distribution des contraintes, à droite distribution des déformations, du pot de yaourt Fort.

Il est remarquable de constater sur la figure IV.14 que le pot de yaourt type Fort subit une contrainte de 13.6 MPa et une contrainte maximale de 20.4 MPa sont localisées principalement en haut de la pièce partie A, à droite nous remarquons que les déformations aussi sont localisées au niveau de la partie A de l'ordre 9.95×10^{-3} alors que la partie B reste faiblement sollicitée ce qui donne la faible charge supportée par cette forme géométrique du pot (30 N).

B. Comportement de pot du « Danette »

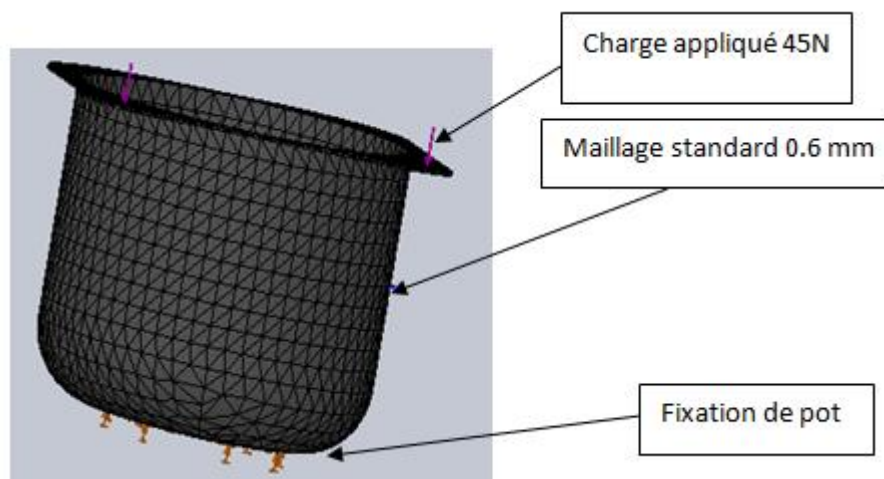


Figure IV.15 Maillage et condition aux limites.

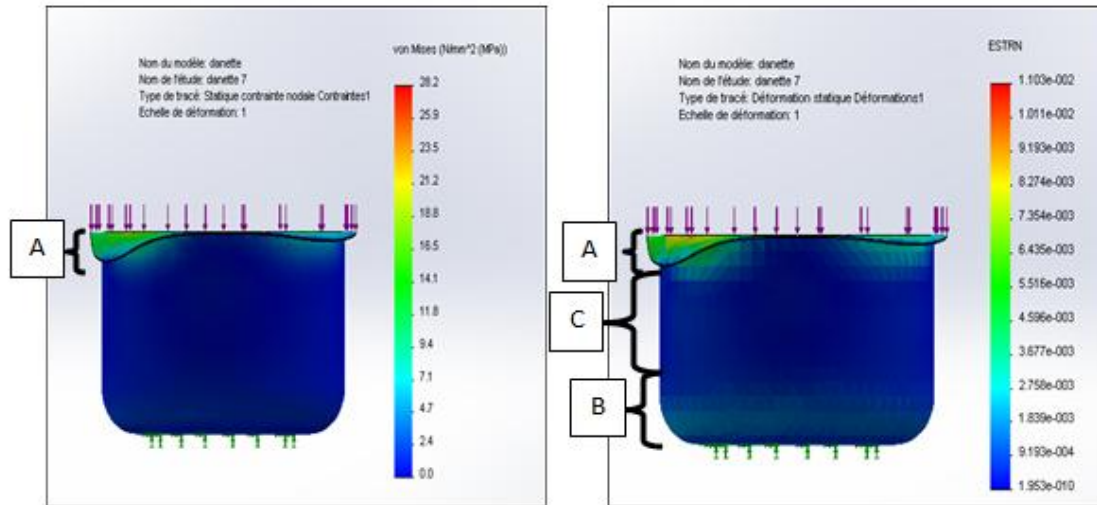
***Résultats**

Figure IV.16 : A gauche distribution des contraintes, à droite distribution des déformations, du pot de yaourt Danette.

Pour ce cas de pot de yaourt, nous remarquons un autre comportement différent au précédent, la concentration des contraintes est en haut du pot (partie A de la figure à gauche de la figure IV.16) est de l'ordre 28.2 MPa, les déformations sont localisées sur le haut du pot (partie A à droite) et en bas de la figure (partie B) qui varie entre $5.5 \cdot 10^{-3}$ et $1.1 \cdot 10^{-2}$, on remarque que entre les deux parties le pot se déforme de manière très faible (Partie C), en pratique ce type de pot a donné une très bonne résistance aux charges (45N), donc cette configuration des déformations diminue leur concentration locale et augmente ainsi la résistance de ce type de pot.

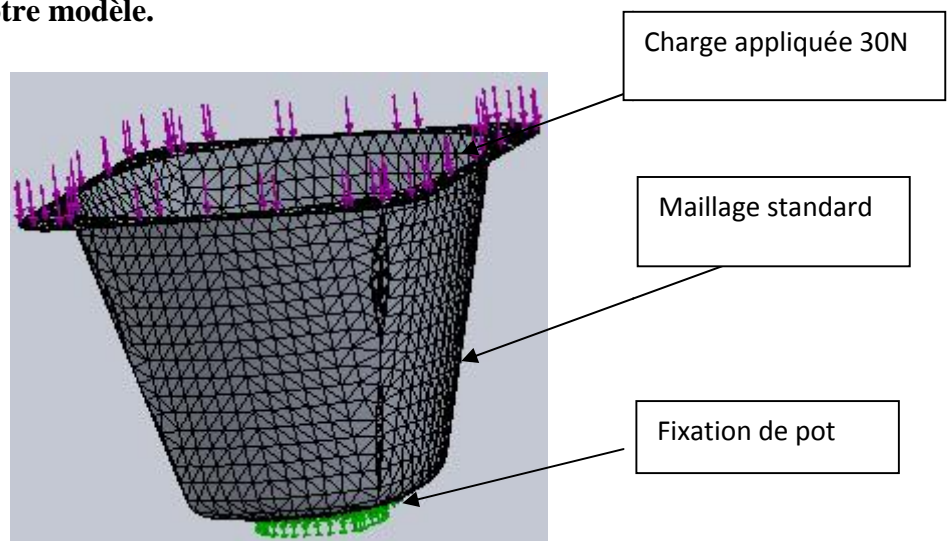
C. Comportement de notre modèle.

Figure IV.17 : Maillage et condition aux limites.

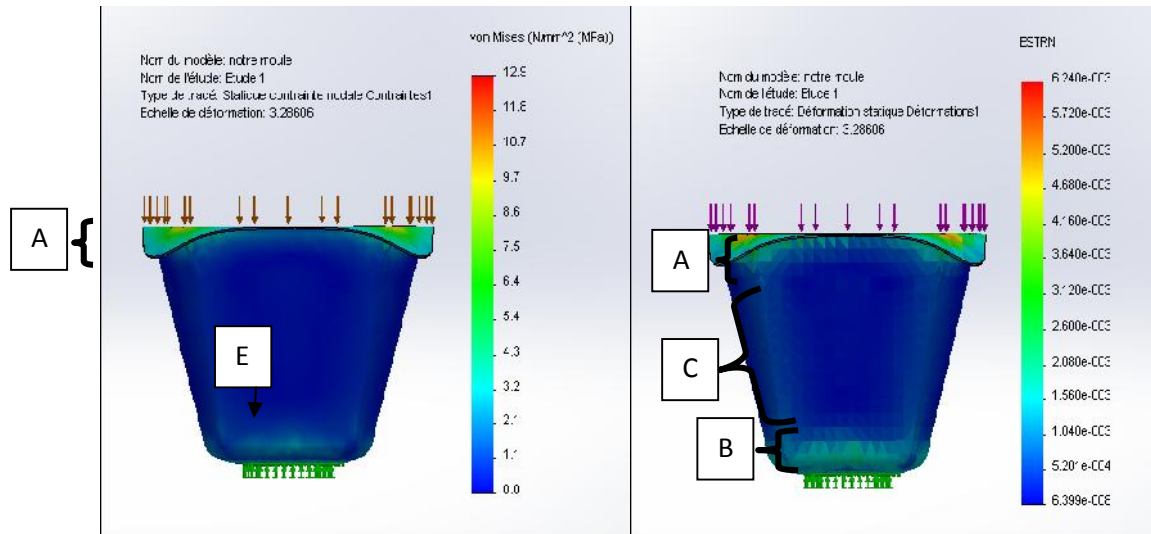
***Résultats**

Figure IV.18 : A gauche distribution des contraintes, à droite distribution des déformations, du pot de yaourt de notre conception.

L'étude de résistance de notre pot de yaourt que nous avons proposé parmi les autres modèles que nous avons jugé non adéquat durant nos discussions et critiques des designs proposés, ce pot présente un résultat très intéressant qui est une distribution des contraintes en haut (A de la figure à gauche de la figure IV.18), en plus ce pot présente des contraintes à la base (E), ce qui engendre une dissipation des contraintes sur le maximum du volume du pot, pour une même épaisseur que le pot de type « Fort » et un chargement similaire (30N) il présente une concentration des contraintes de l'ordre de 12.9 MPa alors que le pot type 'Fort' présente une concentration de 20.4 MPa, sur la figure à droite on remarque que les déformations sont elles aussi bien distribuées sur le volume du pot et donc elles sont atténuées et passent de 9×10^{-3} pour le pot type 'Fort' à 6×10^{-3} pour notre conception.

La forme géométrique du pot que nous avons conçu fait objet à la fois de la faible épaisseur du modèle 'Fort' (0.4mm) et donne un comportement de résistance similaire au pot type Danette qui a donné de bonnes performances lors des essais réels.

V.1: Partie usinage

L'étude numérique menée précédemment a eu pour but de vérifier la faisabilité de notre projet, ainsi les résultats obtenus confirment bien que notre pot de yaourt peut résister à une contrainte de compression raisonnable.

La validité de l'étude étant concrétisée, nous pouvons passer à l'étape suivante et réaliser le moule qui servira durant le processus de thermoformage, la fabrication se fera sur fraiseuse numérique, à l'aide du logiciel de FAO qui est Rhino CAM, un module d'usinage du logiciel américain « Rhinoceros », ce module permet de générer un G-code pour piloter la fraiseuse numérique.

V.2 : Simulation Rhino-Cam

Avant de commencer la simulation, sur Rhino-Cam pour pouvoir générer le G-code qui pilotera notre fraiseuse numérique, il est nécessaire au préalable de définir certains paramètres de base,

Après avoir importé le modèle de notre pot sous format IGES sur Rhino-Cam, il faut spécifier les dimensions générales du brut dans lequel va être usiné notre pièce, cela étant fait nous devons définir une origine qui servira de repère pour calculer la trajectoire de l'outil tout en tenant compte des dimensions de la pièce importée, la position de la fraise à l'instant $t=0s$ doit être spécifiée, dans ce repère

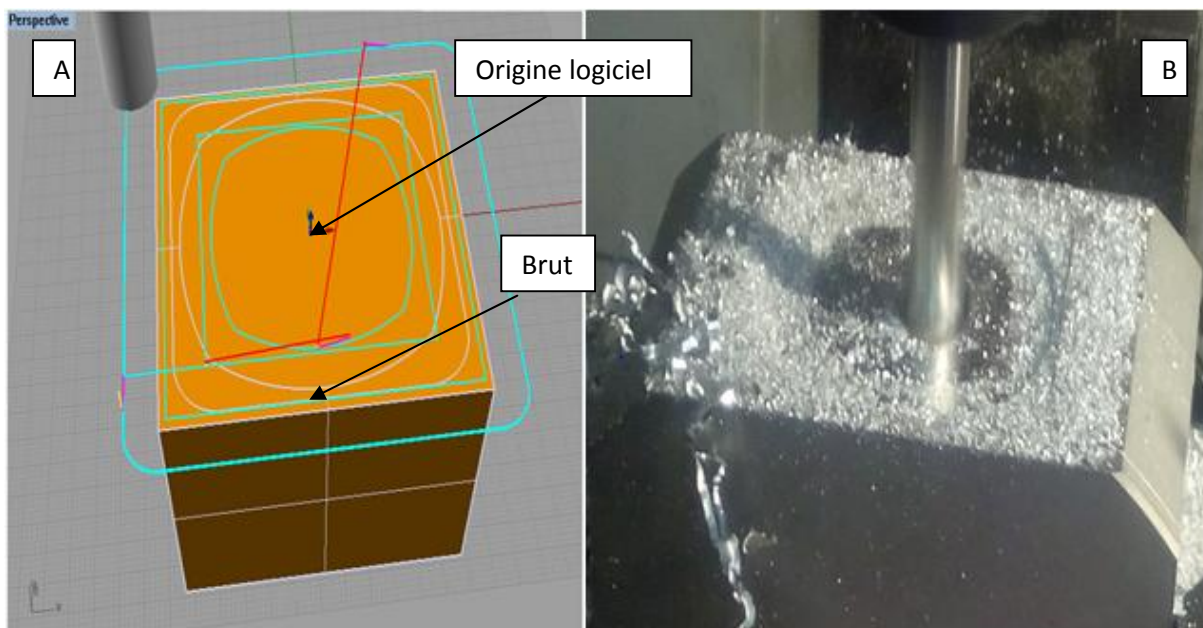


Figure V.1:Définition du brut et de l'origine programme

.Une fois que ces paramètres de base spécifiés, la procédure suivante consiste à définir les paramètres de l'étape ébauche qui sera réalisé avec une fraise cylindrique à deux dent de diamètre $\phi = 10\text{mm}$, nous définissons une vitesse de coupe $V_c = 38\text{m/min}$ et une vitesse de rotation de $N = 1200\text{tr/min}$ et un type d'usinage mixte de profondeur de passe $a_p = 0.2\text{ mm}$, il est à noter que ces données ont été spécifiquement calculé pour le matériau utilisé pour la fabrication du moule à savoir l'Aluminium (désignation).

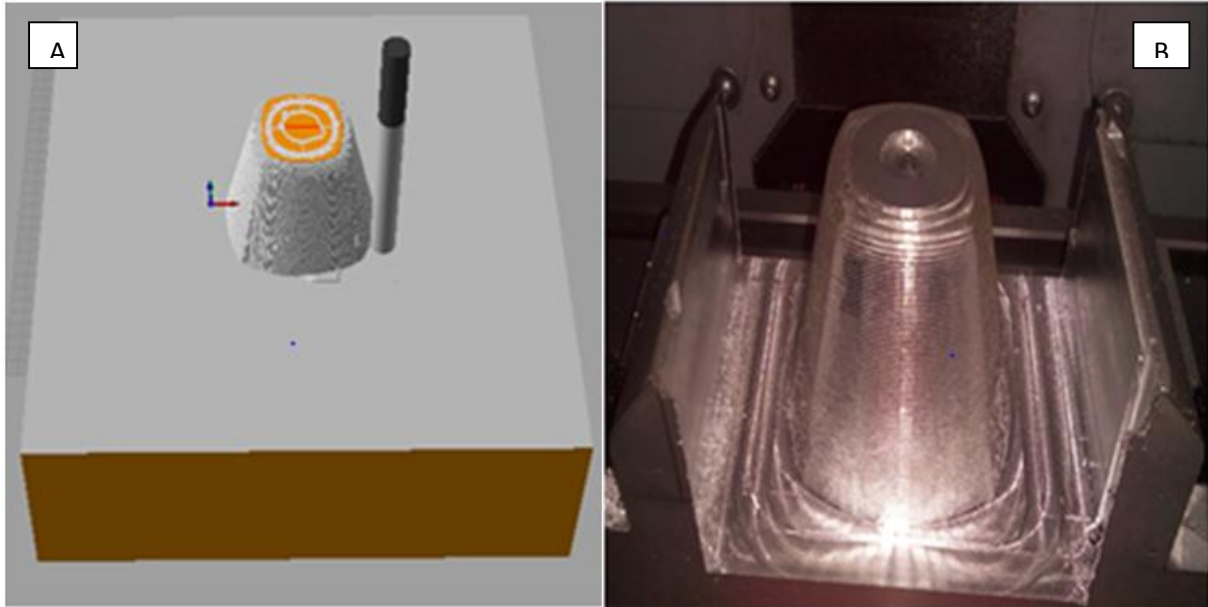


Figure V.2: A simulation de l'usinage des ébauches de pot, B image réel résultats obtenu à l'extérieur de programme

Pour la finition nous avons choisis un usinage en avalent qui garantis un meilleur état de surface, en utilisant une fraise hémisphérique de diamètre $D = 8\text{ mm}$, et un nombre de dent de $Z = 2$, et même vitesse de rotation de $N = 1500\text{ mm/min}$ et une vitesse de coupe $V_c = 38\text{m/min}$, et une profondeur de passe $a_p = 0.01\text{mm}$.

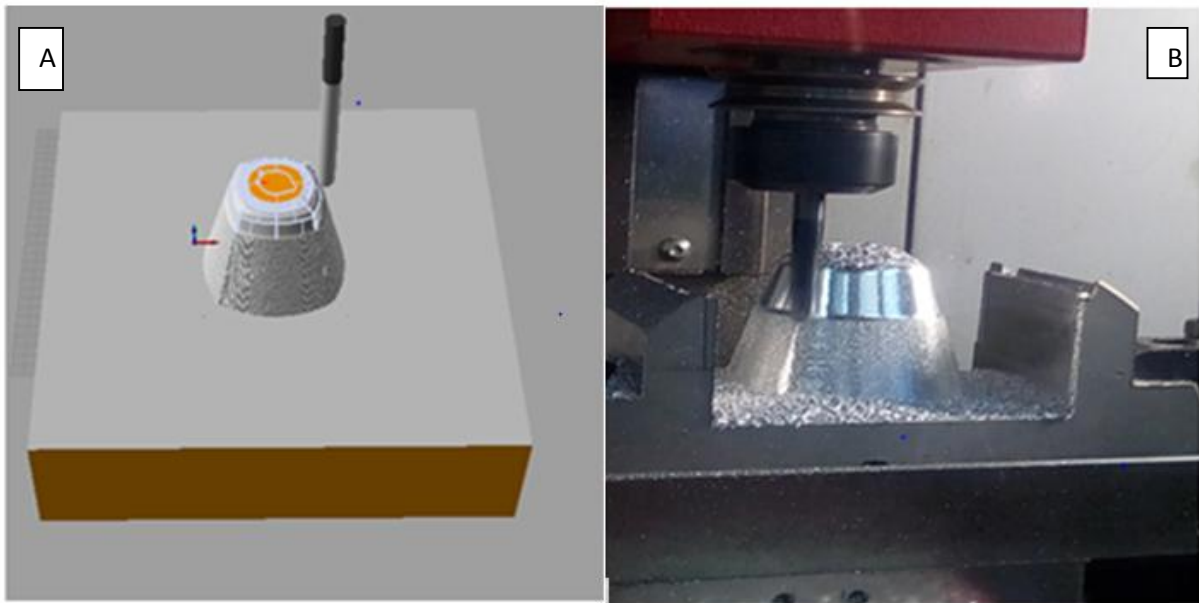


Figure V.3:A. Simulation de l'usinage en finition de pot, B image réelle résultats obtenu à l'exécution du programme

Pour la réalisation du moule, nous suivrons la même procédure, lui aussi étant fait en aluminium nous définirons les mêmes données que ce soit vitesses de coupe, vitesse de rotation, profondeur de passe ap, ou le type d'usinage à utiliser pour chaque étapes.

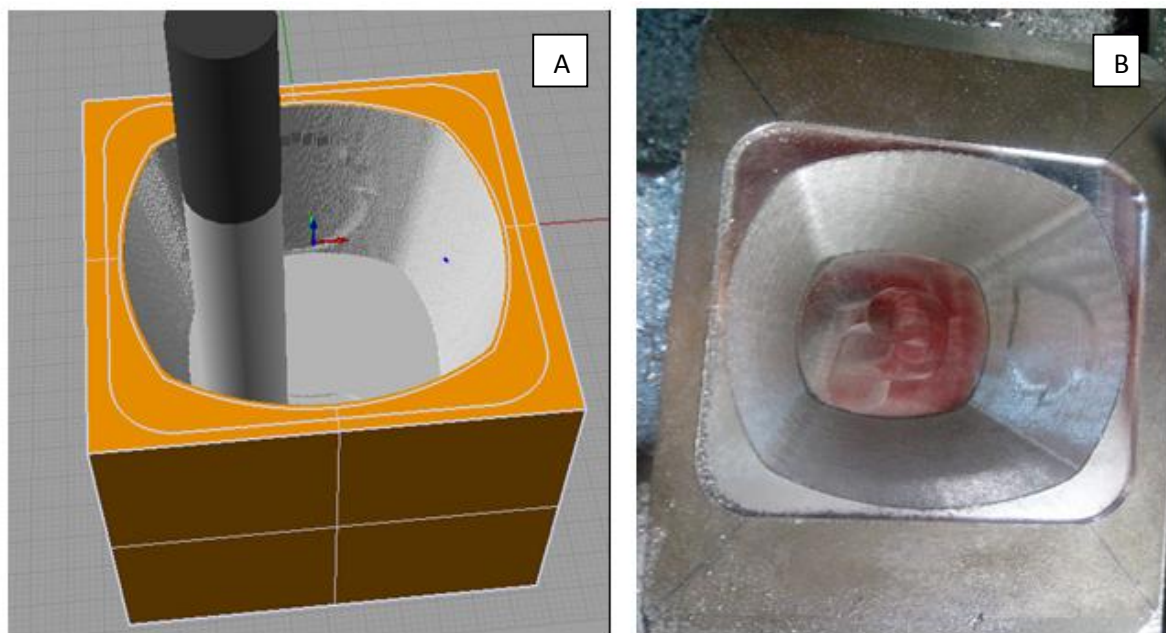


Figure V.4 : A.simulation de l'usinage des ébauches de moule, B. image réelle résultats obtenu à l'exécution de programme

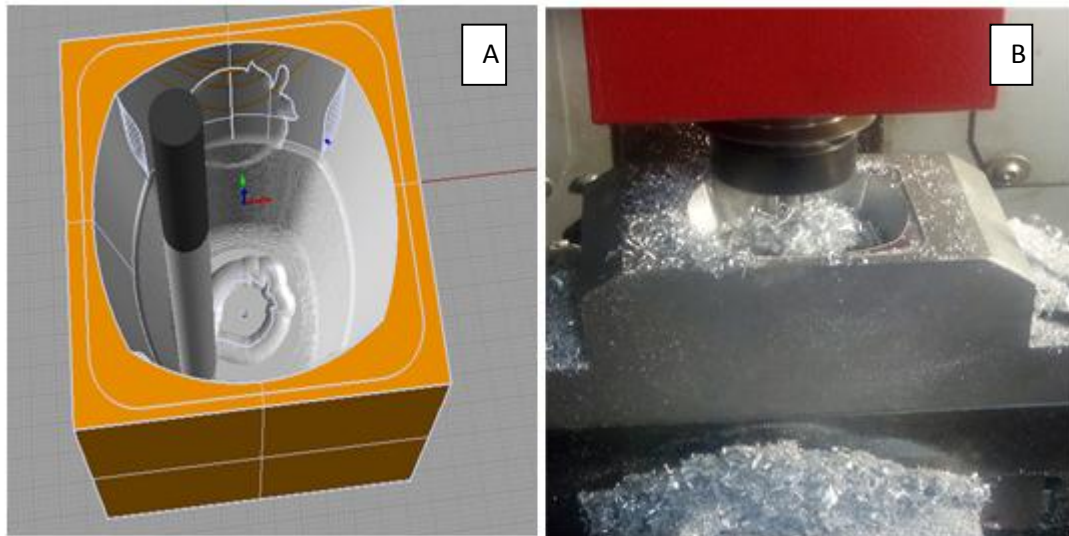


Figure V.5 A simulation de l'usinage en finition de moule, B image réelle résultats obtenu à l'exécution de programme.

Après usinage nous avons obtenus les pièces suivantes :



Figure IV.6: Prototype du Potet le moule fini de notre conception.

Sur la figure suivante nous présentons quelques essais que nous avons réalisés sur le moule que nous avons fabriqué, les défauts constatés sur ces produits sont attendus vue que c'est juste un échauffement et ramollissement de la matière qui donne ce résultat, l'utilisation du PE comme matière première et une aspiration adéquate, le produit sera beaucoup plus amélioré.

V.3: Proposition d'idées d'éco-conception du pot de yaourt.

Sur la figure suivante (figure V.7), on remarque la présence ici de la forme d'un fruit (fraise) cette forme peut être la forme d'un jouet que l'utilisateur ou consommateur (enfant) peut par la suite de consommer le produit contenu dans le pot, ce même pot devient un moule de fabrication d'empreinte sur de la pâte à modeler, ce qui donnera une deuxième vie au pot au lieu de le jeter.

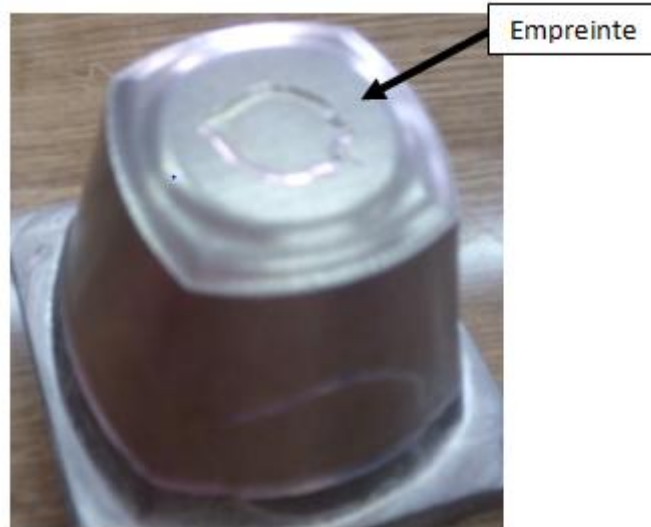


Figure V.7: Insertion d'une forme au fond du pot de yaourt, après consommation du produit, celui-ci devient moule pour pâte à modeler

Une deuxième idée consiste à ajouter lors de la coupe des barquettes des pots de yaourt (figure v.7), on ajoute des pièces supplémentaires sur la plaque formant les pots, ces pièces peuvent faire l'objet de pièces complémentaires pour les pièces modelées sur la pâte à modeler.



Figure V.8: Quelque essai de thermoformage.

Conclusion générale

Conclusion générale.

L'étude menée dans le présent manuscrit suit une démarche d'éco-conception qui servira à évaluer l'impact environnemental de notre produit fini, elle nous a permis de nous initier aux procédés de fabrication des pots de yaourt et des moules, et plus précisément aux procédés de thermoformage. L'analyse menée sur ce processus a souligné la complexité de la mise en œuvre de ce procédé et a permis d'aboutir aux constations suivantes :

Le thermoformage est une technique de formage à chaud, qui est subdivisée en plusieurs catégories à savoir le thermoformage mécanique, pneumatiques et mixtes, le thermoformage pneumatique peut s'effectuer par moule en relief (pneumatique positif) ou par moule creux (pneumatique négatif), le choix de ces moules dépend de plusieurs facteurs essentiels tel que les dimensions et la précision de la pièce demandée, le type de la machine de thermoformage ou encore les matériaux à thermoformer.

Parmi les matériaux les plus utilisés dans ce domaine, on trouve les polymères comme (ABS, PP, PE, PET... etc.), ces polymères peuvent être classés selon l'origine et le type d'architecture, domaine d'application ainsi leur synthèse et propriétés, le polymère utilisé pour les pots de yaourt est le polyéthylène noté PE, il s'agit d'un matériau simple et semi-cristallin obtenu par polymérisation de l'éthylène, selon la classification en fonction de sa densité on distingue (PEHD PEHD PEHBDL ... etc.).

L'aluminium a été employé pour le moule car il s'agit d'un matériau qui joue un rôle très important dans le domaine industriel grâce à ses caractéristiques et propriétés mécaniques.

Nous avons compris que l'objectif de la démarche éco-conception et de diminuer les impacts de produit sur l'environnement tout en gardant ses qualités et ses performances. La géométrie joue un rôle important dans la répartition des contraintes sur les pots et par la même occasion sur la distribution des déformations.

Pour faute de temps, nous n'avons pas pu entamer la fabrication du produit, ce qui peut être une perspective à venir

Référence bibliographique

- [1] thermoformage, transformation de matière plastique www.dxplastique.com, vue décembre 2016
- [2] J.GOSSOT, les matières plastique fabrication technologie, BORDAS, Paris, 1977.
- [3] Aliza ERNER, étude expérimentale du thermoformage Assisté par poinçon d'un mélange des polystyrènes, Ecole des Mines de Paris, 15 mars 2005.
- [4] Information Produit. Thermoformage, Formage sous vide, Emboutissage, Formage à chaud, Pliage, SIMONA, 2005.
- [5] Catalogue mode d'emploi pour la fabrication d'une pièce à l'aide de l'Appareil Simple de Thermoformage de l'Université de Sherbrooke.
- [6] L'habitat individuel : ADEM Agence de l'environnement
- [7] Paul Sabtier Laboratoire Hétérochimie fondamental et appliqué (UMRCNRS), université Toulouse III
- [8] zaqueCognard, Science et technologie de collage, Presses polytechnique et universitaire Romandes.
- [9] Formation thermoformage www.thermoformage.com, vue décembre 2016
- [10] J.-M. HAUDIN, cours élaboration des polymères, cours matériaux, centre de mise en forme des matériaux, paris, 2008.
- [11] Thèse, BOUDRAA KAMEL EDDINE, Elaboration et caractérisation de réseaux de polymères interpénétrés à base de monomères d'acrylate de butyle (ABu) et l'éthyle-héxyl-acrylate(EHA) : Gonflement dans des solvants isotropes, Université Abou BekrBelkaid – Tlemcen, 03 juillet 2006.
- [12] Thèse, Hamza Djamel Eddine, synthèse et caractérisation de nanoblend polyéthylène haute densité polystyrène/montmorillonite (pehd-ps/mmt) et polyéthylène basse densité-polystyrène/montmorillonite (pebd-ps/mmt), 2009
- [13] Thèse, BOUTERFA Meriem, Etude de la détermination du paramètre d'interaction entre deux polymères par voie mécanique "effet du comptabilisant sur ce paramètre, Université Ferhat Abbas Sétif, 01 /12 / 2011

Référence bibliographique

- [14] Thèse, Vincent CHAFFRAIX, étude de l'extrusion du polyéthylène téréphtalate et de ses mélanges non-compatibilités avec le Polyéthylène haute densité application au recyclage, Ecole des Mines de Paris, 2002.
- [15] PAULE SABATIER, Institut de chimie de Toulouse, université de Toulouse III.
- [16] Thèse, Sara MECHERI, Etude des réactions de transformation des phases dans les alliages aluminiums sous des tôles, université MENTOURI Constantine, 2007.
- [17] Thèse, Simon THIBAULT, Modifications des propriétés physico-chimiques et de la microstructure de l'aluminium après nitruration par implantation d'ions multichargés, Université de CAEN, 2009.
- [18] the aluminium association www.aluminum.org , vue février 2017.
- [19] R. Vennekens et EWE. Fweldl, Notice d'information sur l'aluminium, deuxième partie, institue de la belge de la soudure, avril 2003.
- [20] Thèse, Abdelhak FEKRACHE, Etude microstructural des alliages aluminium- fer, université BADJI d'Annaba, 2008.
- [21] Livre, Michel DEQUATREMARE, Thierry DEVERS, précis des matériaux de la conception aux contrôles, DUNOD, Paris, 2012
- [22] Philippe DEPEREYRE, cours fabrication mécanique, Université de la réunion, 2004-2005.
- [23] **Fiche de Connaissances Enlèvement de matière: fraisage Innovation Technologique et Eco-Conception**, académie de Lyon.
- [24] l'éco-conception en action, ADEM deuxième édition, 2006.
- [25] Thèse, Bartoli Rudy, Martinez Fabien, Eco-conception et application à la plasturgie (éco-design and application in the plastic processing industry), écoles des mines de Douai, promotion 2010.
- [26] H. Maire, Eco-conception cours fondamental et application, ENS de Renne, 2012.
- [27] Jacques BOUVET, Eco-conception pour les mécaniciens, CETIM, 2003.
- [28] Louise Saint-Pierre, Eco-conception un domaine en émergence au Québec état de l'art, institue de développement des produits, décembre 2008.

Annexe