



République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Abou Bekr Belkaïd – Tlemcen

Faculté de Technologie

Mémoire en vue de l'obtention du diplôme de **MASTER** en **Génie Mécanique**

Spécialité : **Construction Mécanique**

Thème

Conception et étude d'un moule de thermoformage
sous SolidWorks
Etude de cas

Présenté par : **ARZAZI Wafaa**

Soutenu publiquement le -- Juin 2019 devant le Jury :

Mr Bourdim A.	Président	Pr	UABB	Tlemcen
Mr Ghernaout MEA.	Encadreur	Pr	UABB	Tlemcen
Mr Kara Ali D.	Encadreur	MCB	UABB	Tlemcen
Mr Hamza Cherif S.	Examineur	MCA	UABB	Tlemcen
Mme Cheikh N.	Examinatrice	MAA	UABB	Tlemcen

Année Universitaire 2018 / 2019

Remerciement

Je tiens, d'abord, à exprimer toute ma reconnaissance à mes promoteurs , Monsieur KARA-ALI et Monsieur GHERNAOUT, pour leur patience, leur disponibilité et surtout leurs judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter ma réflexion.

Mes vifs remerciements vont également aux membres du jury, Monsieur BOURDIM, Monsieur HAMZA CHERIF et Madame CHEIKH pour l'intérêt qu'il a porté à ma recherche en acceptant d'examiner mon travail et de l'enrichir par leurs propositions.

Je désire aussi remercier les professeurs de l'université de Tlemcen , qui m'ont fourni les outils nécessaires à la réussite de mes études universitaires.

En fin j'adresse mes sincères remerciements à tous les professeurs, intervenants et toutes les personnes qui par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont guidé mes réflexions et ont accepté de me rencontrer et de répondre à mes questions durant mes recherches.

Merci

Dédicace

Avec l'expression de ma reconnaissance, Je dédie ce modeste travail :

A mes chers parents, Ahmed et Karima, quoi que je fasse ou que je dise je ne saurai point vous remercier comme il se doit, votre affectation me couvre, votre bienveillance me guide et votre présence à mes cotés a toujours été ma source de force pour affronter les différents obstacles.

A mes très chers frères Karim et Sidi Mohamed et mes chères sœurs, Imene et Radjaa pour leurs encouragements inestimables que dieu leur donne toute la joie et le bonheur.

A mon beau frère Guillaume et ses parents, Chantale et Jean-Marie, qui m'ont apporté leur encouragement moral et intellectuel tout au long de ma démarche.

A ma chère amie Hiba, qui été toujours là pour moi, ses encouragements ont été de grande aide.

A mes chères tantes, Halima et Rachida, pour leur soutien inconditionnel.

A Badrou et Hassan pour leur aide et pour avoir eu la patience de répondre à mes innombrables questions.

A mes tantes et mes oncles, que dieu leur donne une longue et joyeuse vie

A tous mes cousins, mes cousines et les amis que j'ai connue jusqu'à maintenant. Merci pour leur soutien et leur amour.

ARZAZI Wafaa

ملخص

يعرض العمل عمليات تصنيع الآلات في التصنيع الميكانيكي مع شرح لتقنيات الحصول على الاجزاء. التشكيل الحراري هو أسلوب ينطوي على أخذ مادة في شكل صحيفة وتسخينها لتليينها والاستفادة من هذه الليونة لتشكيلها باستخدام قالب. تصنع القطع مع قوالب إيجابية (اللف) او سلبية (الضغط). تقوم الاطروحة بدراسة وتطوير التصميم الفني لقالب التشكيل الحراري تحت Solidworks نمذجة و تصميم القالب T-SIM ثم محاكاة عملية التشكيل الحراري .

الكلمات المفتاحية التشكيل الحراري محاكاة عملية التصنيع

RESUME

Le travail présente les procédés d'usinage en fabrication mécanique avec des explications des techniques d'obtention des pièces.

Le thermoformage est une technique qui consiste à prendre un matériau sous forme de plaque, à le chauffer pour le ramollir, et à profiter de cette ductilité pour le mettre en forme avec un moule. Les pièces sont réalisées avec des moules positifs (drapage) ou négatifs (par pression).

Le mémoire étudie et élabore une conception technique d'un moule de thermoformage sous SolidWorks (modélisation et conception du moule) puis une simulation réalisée par le logiciel T-SIM (logiciel de simulation de processus de thermoformage).

Mots clés : thermoformage, simulation, processus de fabrication.

ABSTRACT

The work presents machining processes in mechanical manufacturing with explanations of techniques for obtaining parts.

Thermoforming is a technique that involves taking a material in the form of a plate, heating it to soften it, and taking advantage of this ductility to shape it with a mold. The pieces are made with positive (draping) or negative (pressure) molds.

The dissertation studies and develops a technical design of a thermoforming mold under SolidWorks (modeling and design of the mold) then a simulation realized by the T-SIM software (thermoforming process simulation software).

Key words: thermoforming, simulation, manufacturing process

Nomenclature

Symboles Latins :

Symboles	Not	Unités
A	longueur	mm
s	surface	mm ²
S	surface	mm ²
c	constante	/
R	rapport d'étirage	/
E	épaisseur	mm
T	temps	s
P	puissance	W
M	masse	g
r	rendement	/

Symboles grecs :

Symboles	Not	Unités
ρ	masse volumique	g/cm ³
ε	enthalpie	J/g

Abréviations :

CAO : Conception assistée par ordinateur

DAO : Dessin assisté par ordinateur

SW : Solidworks

2D : deux dimensions

3D : trois dimensions

Liste des figures

Chapitre I

Figure1 : Classement des matériaux.....	2
Figure2 : Procédé de fabrication	3
Figure3 : Opération de Fraisage sur fraiseuse verticale.....	3
Figure4 : Opération de chariotage sur un tour CN.....	4
Figure5 : opération de perçage	4
Figure6 : Opération d'alésage sur un tour parallèle.....	5
Figure7 : Outil broche cylindrique	5
Figure8: Opération forgeage	6
Figure9 : Opérations d'estampage sur presse.....	6
Figure10: Simulation 3D du matriçage	6
Figure11: Pièce réalisée par forgeage à froid.....	7
Figure12:Schéma d'opération de filage d'une barre	7
Figure13:Moulage en sable	8
Figure14: Moule métallique (coquilles).....	8
Figure15: Soudage à l'arc	9
Figure16:Assemblage par collage	9
Figure17:Dessin de deux pièces boulonnées.....	9
Figure18:Pièces rivetées.....	10
Figure19:Frettage	10
Figure20:Opération d'électroérosion	11
Figure21: Opération découpe laser	11

Figure22: Opération du découpage par jet d'eau.....	12
Figure23: schéma d'un dispositif de formage à haute pression.....	12

Chapitre II

Figure1: Moule négatif et positif.....	13
Figure2: Schéma de principe de thermoformage	14
Figure3: Processus de thermoformage	15
Figure4: moule en silicone	16
Figure5: Cavités à vide.....	16
Figure6: Moule sans et avec dépouille.....	17
Figure7: Démoulage d'un moule mâle (A) et femelle (B).	17
Figure9: Coefficient de concentration de tension en fonction du rayon de bordure.....	18
Figure10: Retrait de la pièce	20

Chapitre III

Figure1: Interface solidworks.....	23
Figure2: Property Manager	23
Figure3: Configuration Manager.....	23
Figure4 : Nouveau fichier.....	24
Figure5 : Dessin en 2D.....	25
Figure 6 : Dessin 3D.....	25
Figure7 : Dessin 3D avec perçage.....	26

Figure 8 : Mise en plan.....	26
Figure9 : Organigramme du module « mold tool »	27
Figure10: Dessin de la pièce en 2D.....	28
Figure11: Création du 3D.....	28
Figure12: Pièce finie en 3D.....	29
Figure13: Enregistrement du fichier	29
Figure14: Editer élément.....	30
Figure15: Dessin d'un rectangle sur le plan choisi.....	30
Figure 16: Application de la fonction « extruder ».....	31
Figure17: Application de la fonction « empreinte »	31
Figure18: Partie inférieure du moule	32
Figure19: Création de la pièce	32
Figure20: Analyse des dépouilles	33
Figure21: Application de la dépouille.....	33
Figure22: Deuxième analyse de dépouille	33
Figure23: Création des lignes de joint.....	35
Figure24: Création de la surface de joint	35
Figure 25: création du moule	36
Figure26: Partie supérieure du moule	36
Figure27: Partie inférieure du moule	37
Figure28: Vue éclatée moule et pièce	37

Chapitre IV

Figure 1: Interface du logiciel de T-SIM	38
--	----

Figure2: Pièce importée de SolidWorks.....	39
Figure3: Différence d'épaisseur après thermoformage	40
Figure4: Optimisation de la température initiale de la plaque	40
Figure 5: Distorsion de l'image	41
Figure 6: Pré-distorsion de l'image	41

Chapitre V

Figure1:Pièce étudiée	42
Figure2: Pièce étudiée en 2D et en 3D.....	42
Figure3: Dimensions de la plaque.....	44
Figure4: fenêtre propriétés masse	44
Figure5: Phase 1 de la création du moule en 3D.....	47
Figure6: Analyse de la dépouille.....	47
Figure7: Pas d'angle de dépouille	48
Figure 8: Forme de couleur jaune nécessite une dépouille	48
Figure9: création d'un nouveau plan	49
Figure 10: création de la forme des bordures.....	49
Figure 11: création du corps du moule.....	49
Figure12: création des lignes de joint	50
Figure13:création des surfaces de joint.....	51
Figure14:le moule d'emballage	51
Figure 15: Dessin du poinçon.....	51
Figure16: création du poinçon en 3D	52
Figure 17: Fenêtres à ouvrir	52

Figure 18 : Outil 1	53
Figure19: Outil 1 en vue XY	53
Figure 20 : Outil 2	54
Figure 21: Propriétés de l'outil 2	54
Figure 22: Déplacement de l'outil 2.....	55
Figure 23: Coordonnées modifiées	55
Figure 24: Création de la plaque	55
Figure 25: Interface T-SIM de la plaque à thermoformer.....	56
Figure 26: Déplacement de l'outil 2.....	56
Figure 27: Comportement du processus de thermoformage	57
Figure 28:Options des outils	57
Figure 29: Coefficient thermique et de frottement.....	58
Figure 30: Propriétés du matériau	58
Figure 31: Graphe contrainte-déformation.....	59
Figure 32: Fenetre nouveau projet	60
Figure 33: solution du projet	60

Liste des tableaux

Chapitre II

Tableau 1: les différences entre le moule positif et négatif	13
Tableau 2: Epaisseur de la feuille et le diamètre de cavité	17
Tableau 3: Epaisseur d'étirage.....	18
Tableau 4: Paramètres de retrait des pièces thermoformées	20

Chapitre V

Tableau 1: Caractéristiques physiques et thermiques	43
Tableau 2: Caractéristiques de thermoformage.....	43
Tableau 3: Propriétés physiques des alliages d'aluminium.....	46

Résumé

Listes des figures

Liste des tableaux

Liste des abréviations

Nomenclature

Sommaire

Chapitre 1 : Méthodes d'obtention des pièces

Introduction	2
Matériaux.....	2
Procédés de fabrication	2
Par enlèvement de la matière	3
Le fraisage	3
Le tournage.....	4
Le perçage	4
L'alésage	4
Le brochage	5
Sans enlèvement de la matière	5
Par déformation.....	5
A chaud	7
A froid	8
Par coulée	9
Procédés non conventionnels	10
L'électroérosion	10
La découpe laser.....	11
Jet d'eau	11
Formage par explosion.....	12
Conclusion.....	12

Chapire2 : Thermoformage

Introduction	13
Définition.....	13
Processus	14
Règles d'utilisation.....	15
Outillage	15
Cavités à vide	16
Angles de dépouille.....	17
Profondeur d'étirage.....	17
Rayons d'angles	18
Retrait	19
Retrait en moule	20
Retrait post formage.....	20
Post-retrait.....	21
Les facteurs qui influent sur le retrait	21
Avantages du thermoformage	21
Conclusion.....	21

Chapitre3 : Conception du moule

Introduction	22
Présentation du logiciel SolidWorks (SW)	22
Interface d'utilisateur	22
Fenêtres de documents SW	22
Arbre de création (Feature Manager).....	22
Proprety Manager.....	22
Configuration Manager	22

Module DAO.....	24
Méthode de travail.....	24
Module Moulage (mold tool)	27
Création d'un arbre avec épaulement.....	28
Création du moule d'une toupie.....	32
Calcul de la dépouille.....	34
Conclusion.....	37

Chapitre 4 : présentation de T-SIM

Introduction	38
Interface du logiciel.....	38
Utilisations et avantages.....	39
Conclusion.....	41

Chapitre 5 : Etude de cas

Introduction	42
Pièce à réaliser.....	42
Dimensions de la plaque à thermoformer	43
Détermination des marges.....	44
Détermination de l'épaisseur de la feuille	45
Le temps de chauffage	45
Création du moule	46
Etapas de la création du moule par SW	46
Création du poinçon	52
Simulation par T-SIM	53
Fichier outillage.....	53
Outil 1 (moule supérieur).....	53
Outil 2 (moule inférieur).....	55

Fichier plaque	57
Fichier contrôle de processus	58
Fichier coefficient thermique et coefficient de frottement	59
Fichier matériau.....	60
Simulation du projet.....	61
Confirmation de la simulation.....	62
Conclusion.....	63
Conclusion générale.....	64
Références bibliographique.....	65

Glossaire

Introduction générale

L'utilisation des outils de modélisation dans la réalisation des produits manufacturés facilite la tâche et accélère la mise en œuvre du processus à atteindre. Ces outils permettent à limiter, voire à remplacer, les essais nécessaires avant la réalisation des produits conçus au préalable.

Le thermoformage qui est procédé d'obtention de pièces par chauffage de plaques plastiques et les former à l'aide de moules.

Ce travail a pour but d'étudier et concevoir un moule de thermoformage en utilisant deux logiciels compatibles (solidworks et T-SIM).

Ce mémoire comporte cinq chapitres :

Le premier chapitre présente un aperçu sur les différents procédés d'usinage.

Le deuxième est dédié à l'élucidation de la technique de thermoformage.

Le troisième décrit les différentes étapes de la conception d'un moule sous le logiciel (Solidworks).

Le quatrième présente le logiciel de simulation (T-SIM).

Le dernier chapitre a été réservé spécialement à une étude de cas.

Une conclusion générale parachève ce mémoire.

Chapitre I :

Méthodes d'obtention des pièces

1. Introduction

Nous commençons notre chapitre par présenter les différents matériaux puis nous développerons d'une façon simple les procédés de fabrication.

2. Matériaux

Le classement des matériaux se fait suivant trois grandes classes suivantes (fig.1) :

- Métaux et alliages métalliques
- Polymères organiques
- Verres et céramiques

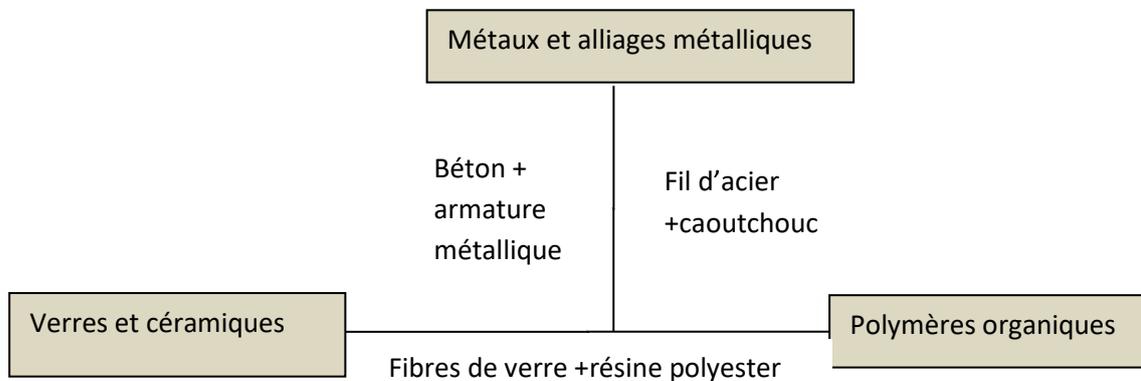


Fig.1 : Classement des matériaux

3. Procédés de fabrication :

C'est un ensemble de techniques visant l'obtention d'une pièce ou d'un objet par transformation de matière brute. Obtenir la pièce désirée nécessite parfois l'utilisation successive de différents procédés de fabrication. Ces procédés de fabrication font partie de la construction mécanique.[1]

L'organigramme (fig.2) montre les différents procédés de fabrication.

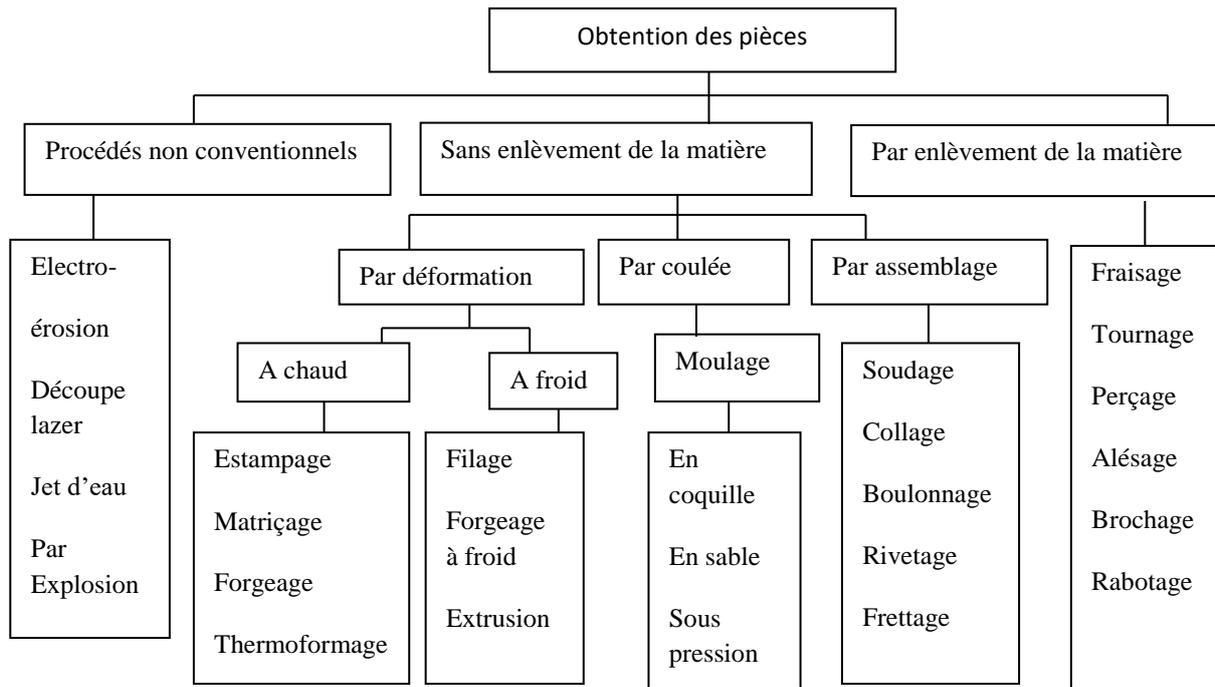


Fig.2 : Procédés de fabrication

3.1 Par enlèvement de la matière :

Consiste à obtenir la forme finale par arrachements de copeaux. Il existe plusieurs procédés tels que :

Le fraisage : L'enlèvement de matière résulte de la combinaison de deux mouvements : rotation de l'outil de coupe d'une part, et avance de la pièce à usiner d'autre part. La fraiseuse est particulièrement adaptée à l'usinage de pièces prismatiques et permet également, si la machine est équipée de Commande Numérique, de réaliser tout type de formes mêmes complexes (Fig. 3).[2]

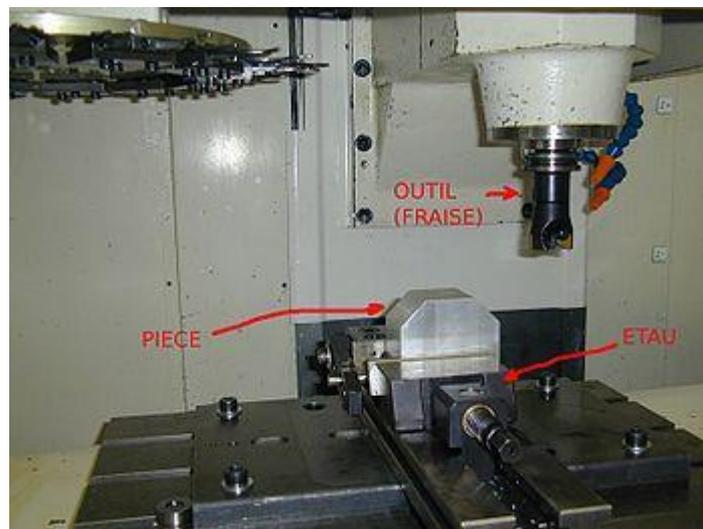


Fig. 3: Opération de Fraisage sur fraiseuse verticale[2]

Le tournage : Il consiste en l'obtention de pièces de forme cylindrique ou conique à l'aide d'outils coupants sur des machines appelées tour. La pièce à usiner est fixée dans une pince, dans un mandrin, ou entre pointe (Fig.4). En tournage, le mouvement de coupe est obtenu par rotation de la pièce alors que le mouvement d'avance est obtenu par le déplacement de l'outil [3].

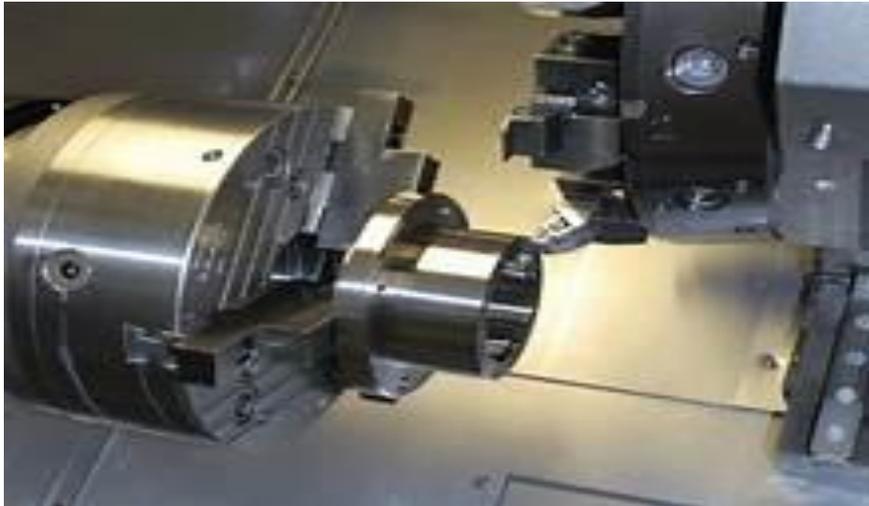


Fig.4: Opération de chariotage sur un tour CN.[4]

Le perçage : Il consiste à faire un trou dans une pièce qui peut traverser la pièce de part en part ou bien ne pas déboucher .Ce trou peut être effectué par un foret sur une perceuse .Le mouvement de coupe et d'avance est donné par l'outil.[5]



Fig.5: opération de perçage[5]

L'alésage : C'est l'opération qui consiste à usiner avec soin (retoucher) la surface intérieure d'un cylindre ou de toute autre pièce creuse en utilisant un foret, un alésoir, outil à aléser ou barre d'alésage sur tour, sur fraiseuse ou aléseuse pour les grosses pièces.[6]



Fig. 6: Opération d'alésage sur un tour parallèle [7]

Le brochage : C'est un procédé d'usinage fondé sur l'utilisation d'un outil broche monté sur une brocheuse. Une broche (fig.7) est typiquement utilisée pour agrandir un trou circulaire à une forme non circulaire plus grande comme un carré ou autre forme désirée.[8]



Fig.7: Outil broche cylindrique[9]

3.2 Sans enlèvement de la matière :

Consiste à obtenir la forme finale sans arrachements de copeaux. Il existe plusieurs procédés tels que : Par déformation, par coulée ou par assemblage.

Par déformation : on distingue deux manières :

- **A chaud** :

Le forgeage : est l'ensemble des techniques permettant d'obtenir une pièce mécanique en appliquant une force importante sur une barre de métal, à chaud, afin de la contraindre à épouser la forme voulue (Fig. 8).[10]



Fig. 8: Opération forgeage[11]

L'estampage : L'estampage industriel consiste à déformer plastiquement un objet métallique grâce à une "matrice" installée sur une presse (hydraulique, mécanique, à vis) ou un marteau -pilon (Fig. 9). [12]

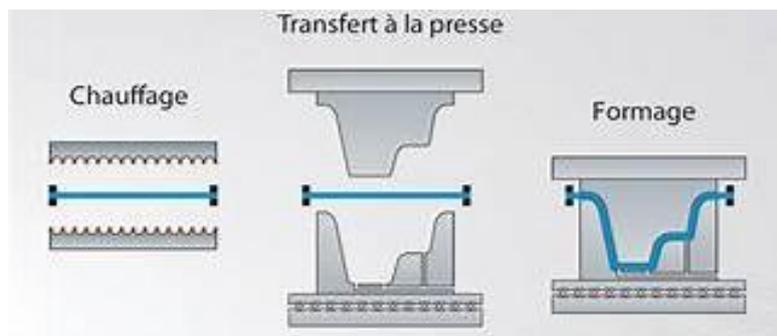


Fig. 9: Opérations d'estampage sur presse[13]

Le matriçage : Consiste à rapprocher deux matrices forçant ainsi le métal à épouser les formes des gravures.[14]

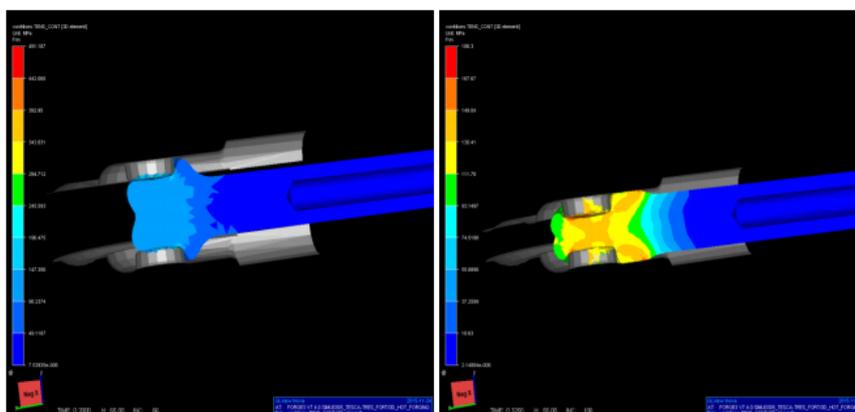


Fig.10: Simulation 3D du matriçage[15]

- **A froid :**

Le forgeage à froid : repose sur le principe de la déformation des matières en quelques centièmes de seconde : un lopin (de masse identique à la pièce finale voulue) est cisailé, puis refoulé par plusieurs frappes successives qui lui donneront sa forme finale.

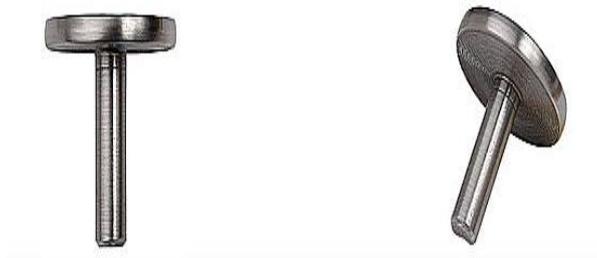


Fig. 11: Pièce réalisée par forgeage à froid

Le filage ou extrusion : est une méthode de mise en forme des métaux par compression. Elle consiste à pousser un matériau ductile à travers une filière.[16]

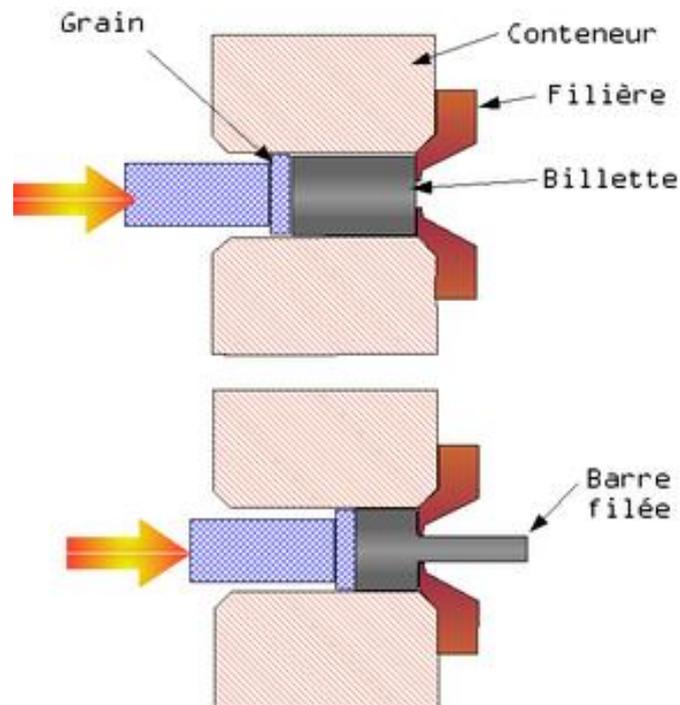


Fig.12: Schéma d'opération de filage d'une barre.[16]

- **Par coulée :**

Le moulage est un procédé qui consiste à réaliser des pièces par coulée et solidification d'un matériau dans un moule présentant l'empreinte de la pièce à obtenir[17]

- ✓ Moulage en sable : Le matériau est coulé dans un moule en sable qui sera détruit après l'élaboration de chaque pièce.[18]

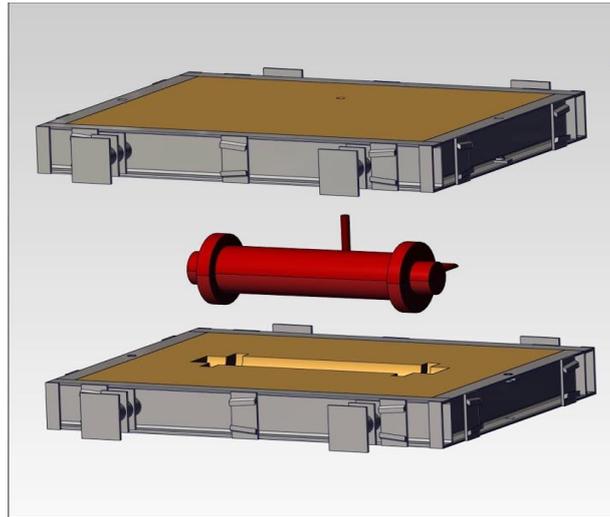


Fig. 13: Moulage en sable[19]

- ✓ Moulage en coquille : Procédé très ancien, Il consiste à obtenir une pièce à partir d'un moule métallique, appelé coquille, constitué d'éléments assemblés dans lesquels une cavité ayant la forme extérieure de la pièce a été réalisée.[20]



Fig. 14: moule métallique (coquilles).[21]

- **Par assemblage :**

Le soudage : C'est un procédé d'assemblage permanent. Il permet d'obtenir une continuité de la nature des matériaux assemblés : matériau métallique, matière plastique ou bois.[22]



Fig. 15: Soudage à l'arc[23]

Le collage : est un assemblage de matériaux au moyen d'une colle synthétique [24]



Fig. 16: Assemblage par collage[25]

Le boulonnage : Le boulonnage est une méthode d'assemblage mécanique démontable, Le boulon (vis et écrou) sert à créer une liaison de continuité entre éléments qui sont serrés entre la face d'appui de la tête de vis et celle de l'écrou.[26]

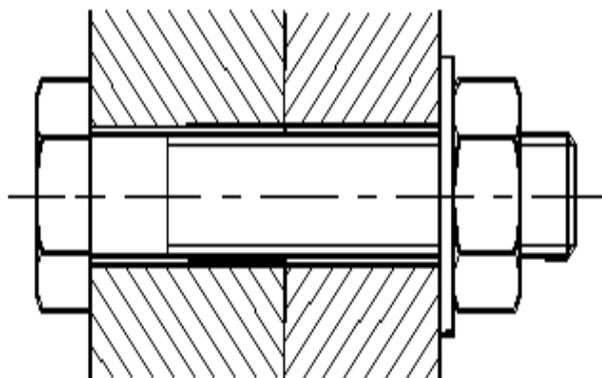


Fig. 17: Dessin de deux pièces boulonnées.[27]

Le rivetage : est un assemblage de pièces à l'aide de rivets. C'est un assemblage définitif, c'est-à-dire non démontable sans destruction de l'attache. [28]

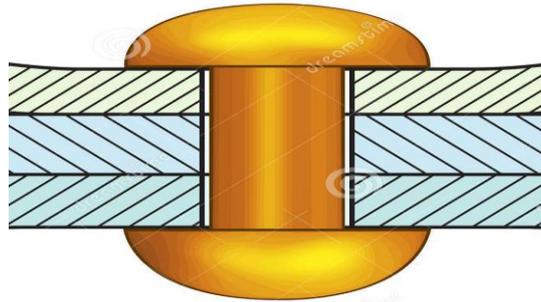


Fig. 18: Pièces rivetées [29]

Le frettage : est l'assemblage de deux pièces grâce à un ajustement serré ($\varnothing 10\text{ H7/f7}$). [30]

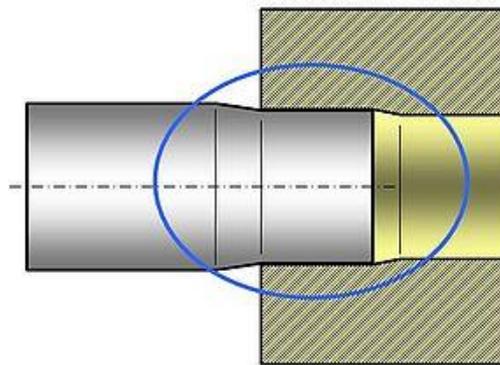


Fig. 19: Frettage [30]

3.3 Procédés non conventionnels

Ce sont les procédés d'usinages modernes et de nouvelle technologie.

L'électroérosion : est l'enlèvement de matière généré par une décharge électrique entre l'électrode pièce et l'électrode outil, immergées dans un liquide isolant (le diélectrique). La pièce doit donc nécessairement être conductrice. [31]



Fig. 20: Opération d'électroérosion[32]

La découpe laser : La découpe laser est un procédé de fabrication qui consiste à découper la matière grâce à une grande quantité d'énergie générée par un laser et concentrée sur une très faible surface.[33]

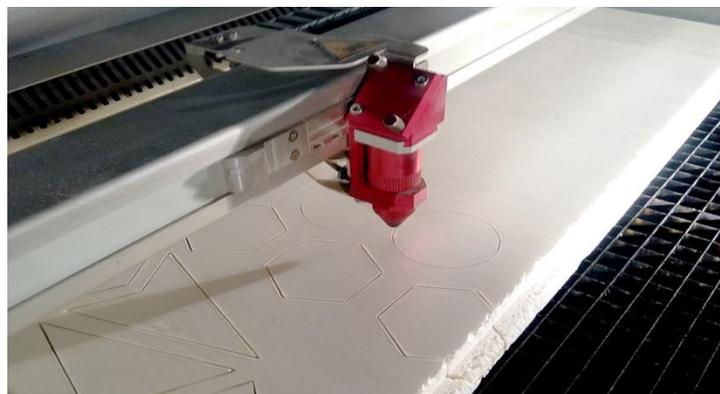


Fig. 21: opération découpe laser[33]

Jet d'eau : L'eau, peut contenir des additifs, notamment pour faciliter la coupe du matériau comme les pierres et le verre. [34]

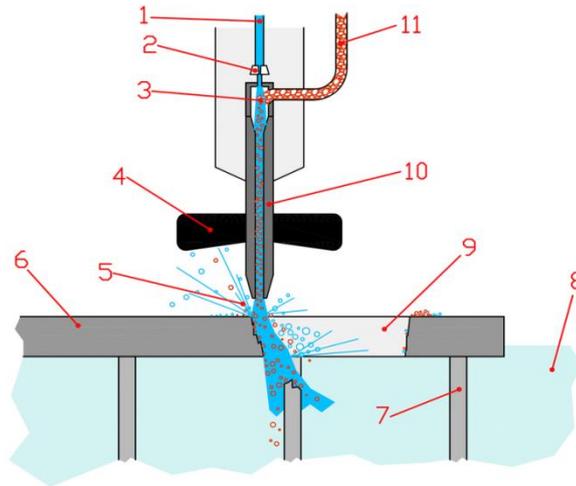


Fig.22: opération du découpage par jet d'eau [34]

Formage par explosion : La pression à exercer sur le métal, des pièces d'aviation, exige un effort supérieur à celui qu'exerce l'huile comprimé mécaniquement dans la presse alors on provoque une explosion et ce la sert à former la pièce autour du modèle [35]

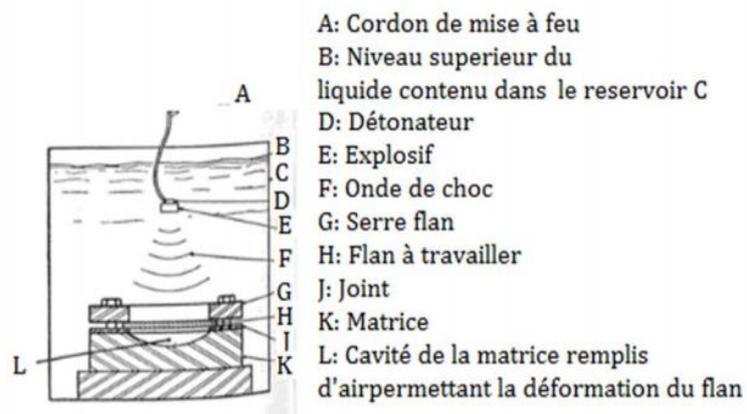


Fig.23: schéma d'un dispositif de formage à haute pression [35]

4. Conclusion :

D'une façon succincte ce chapitre présente les différentes méthodes d'obtention des pièces.

Chapitre II :

Thermoformage

1. Introduction :

Le chapitre suivant présente le thermoformage ainsi que les règles d'utilisation.

2. Définition :

Le thermoformage est une technique qui consiste à prendre un matériau sous forme de plaque, à le chauffer pour le ramollir, et à profiter de cette ductilité pour le mettre en forme avec un moule[36]. Les pièces sont réalisées avec des moules positifs (drappage) ou négatifs (par pression).

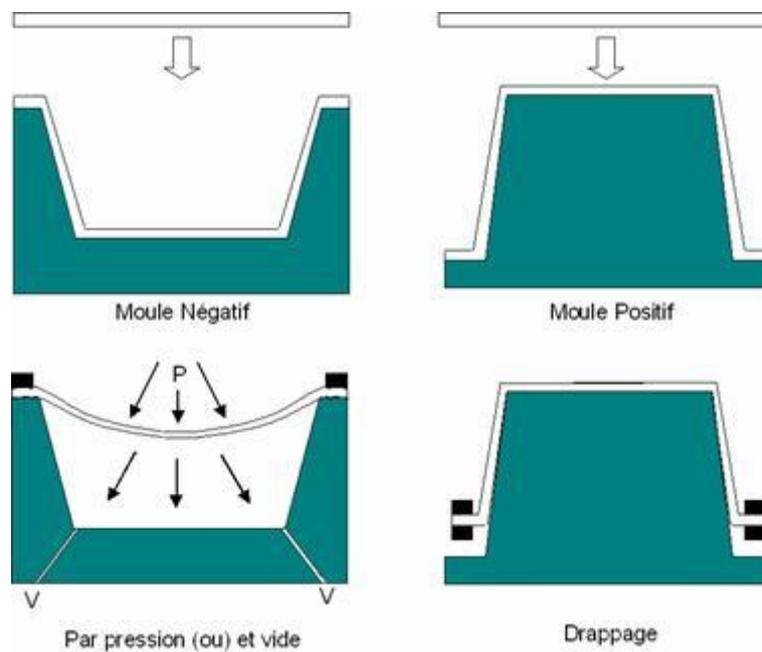


Fig. 1: Moule négatif et positif.[37]

Tableau 1 : montre les différences entre le moule positif et négatif [38]

	Moule positif	Moule négatif
La qualité de la surface extérieure	Identique à la qualité de la surface de la plaque avant le thermoformage (pas de contact avec le moule)	En fonction de l'état de surface du moule
La qualité de la surface intérieure	En fonction de l'état de surface du moule	Identique avec la qualité de la surface de la plaque avant le thermoformage

Le démoulage	Difficile pour les pièces profondes ou sans dépouille car le retrait de la pièce se fait sur le poinçon	Aisé car le retrait ne provoque pas de serrage sur le moule
La qualité d'air aspiré	minime (formage rapide)	Importante (formage lent)
La variation d'épaisseur	Fond épais (~ épaisseur de la plaque) Bords minces	Fond mince Bords épais
La formation des plis sur les pièces	Possible dans le du moule multi empreinte	Pas de plis dans le cas multi empreinte
Le coût du moule	Moule plus simple et meilleur marché	Moule plus cher

3. Processus :

- Le moule est placé sur le plateau porte-moule et abaissé dans la machine.
- Le matériau est fixé sur un cadre de resserrage.
- L'appareil de chauffage est placé au dessus de la feuille à chauffer jusqu'à l'obtention de la température requise pour le formage (fig.2).
- Une fois la température optimum de thermoformage du matériau atteinte, on retire les appareils de chauffage.
- Le formage est réalisé par pression sous vide ou par un renfort mécanique.
- La pièce est suffisamment refroidie afin de pouvoir la retirer sans défection.
- Démoulage et découpage.
- Le processus est montré sur la figure3.

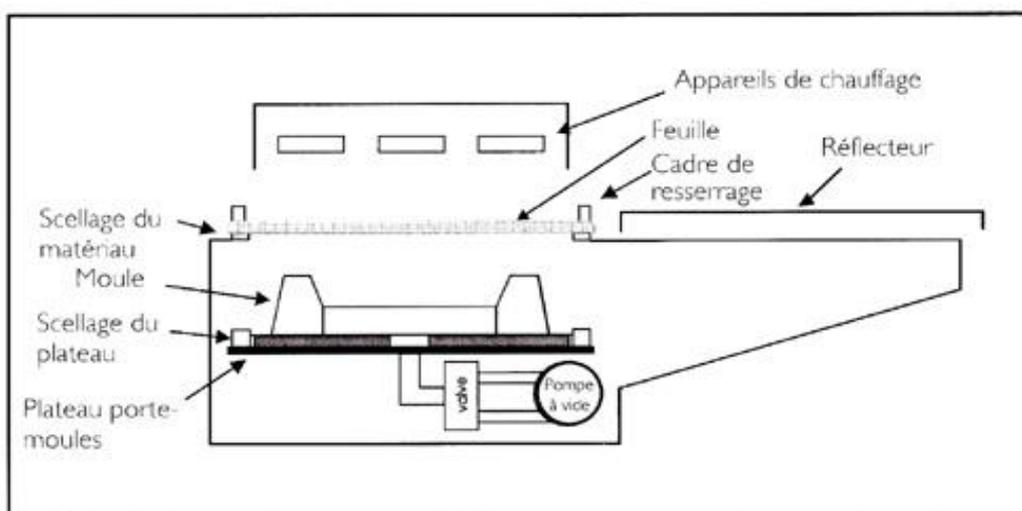


Fig. 2: Schéma de principe de thermoformage[39]

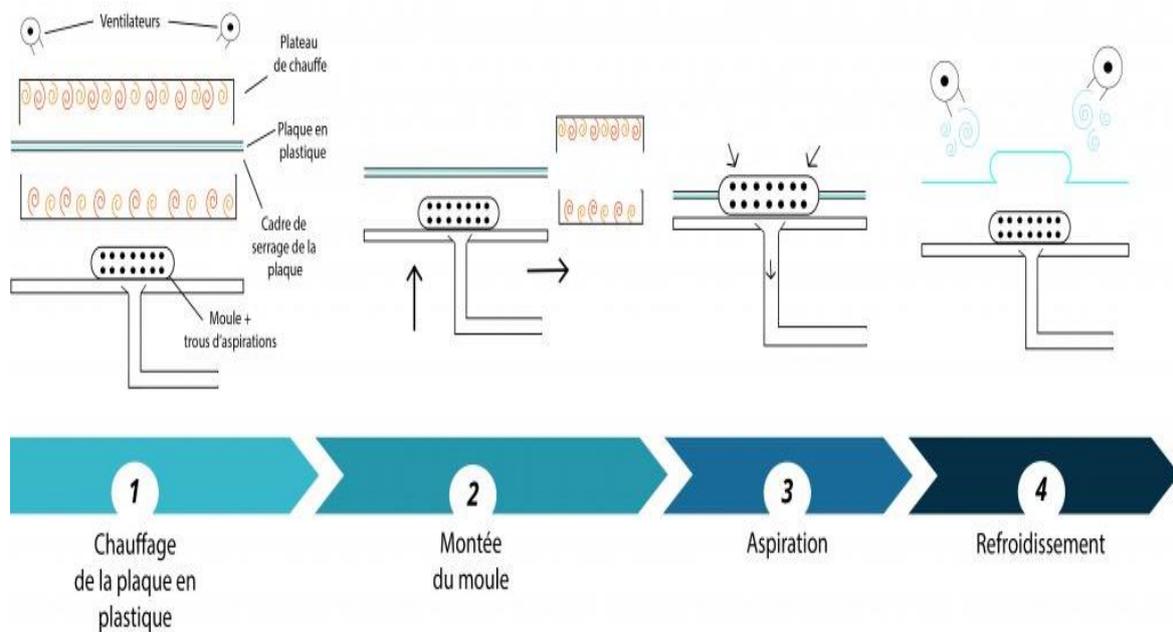


Fig. 2: Processus de thermoformage.[40]

4. Règles d'utilisation [41] :

■ **Outillage** : Les techniques de thermoformage permettent d'utiliser un large éventail d'outillage destiné à la fabrication des moules. Les moules prototypes sont souvent fabriqués en bois, plâtre ou résine.

En ce qui concerne les applications à haut débit, on choisit en général des matériaux qui conduisent bien la chaleur, lorsqu'il est impératif de contrôler la température. En général, on sélectionne l'aluminium, facilement coulé et usiné, et qui se prête bien à l'incorporation de spirales de refroidissement.



Fig. 4 : moule en silicone [42]

■ **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 (fig.6). 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.

Le détail est montré sur le tableau 1.

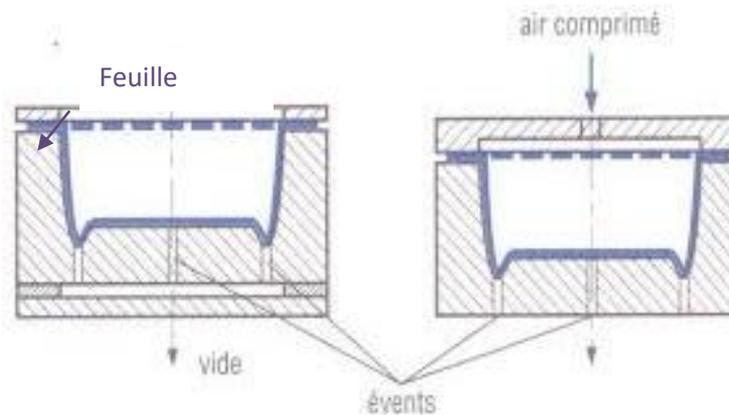


Fig. 5 : Cavités à vide. [43]

Tableau 2 : Epaisseur de la feuille et le diamètre de cavité

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

■Angles de dépouille :

Au démoulage, certains moules femelles ne nécessitent aucun angle de dépouille sur la surface externe de la pièce (fig.6) car la pièce peut se retirer d'elle-même. En général, les moules femelles doivent cependant être pourvus d'un angle de dépouille de 2 à 30°. Pour faciliter le démoulage, les moules mâles doivent être pourvus d'un angle de dépouille compris entre 5et7°. Les moules femelles sont plus faciles à démouler que les moules mâles (fig.7).



Fig. 6: Moule sans et avec dépouille[44]

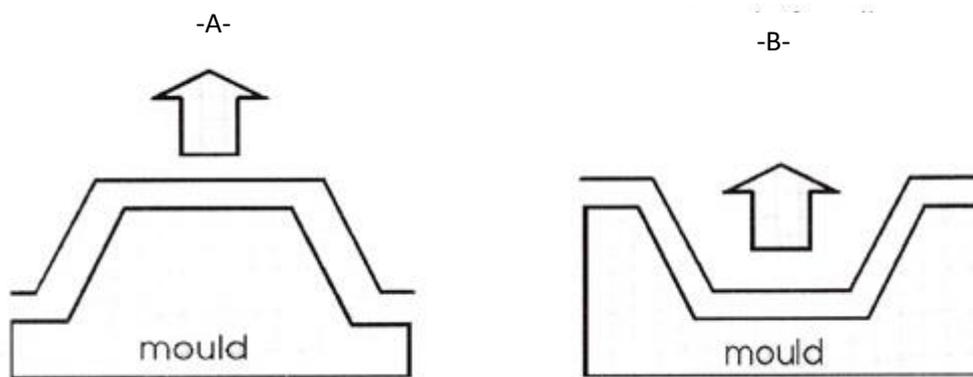


Fig. 7: Démoulage d'un moule mâle (A) et femelle (B).[45]

▪ **Profondeur d'étirage :**

La profondeur de l'étirage est le rapport de l'épaisseur moyenne de la feuille divisé par l'épaisseur moyenne de la pièce moulée. Il s'agit d'un facteur primordial qui détermine l'épaisseur moyenne finale de la pièce formée. En ce qui concerne les étirages moyennement profonds (soit $< 1/1$), un drapage mâle (la pièce doit être soulevée au démoulage (fig.7-A) produira une épaisseur de paroi plus uniforme que le simple formage sous vide femelle. En ce qui concerne les étirages très profonds, ou pour ce qui est des rapports $> 1/1$, il est conseillé d'avoir recours au formage femelle à tampon de renfort, afin d'optimiser la distribution uniforme du matériau (tableau 2).

Tableau 3: Epaisseur d'étirage

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

- **Rayons d'angles / concentration de tension :**

Il a été démontré que la durée de vie utile et la résistance structurelle d'une pièce ne jouent qu'à 30% dans la conception d'une pièce, lorsque le facteur de concentration de tension est élevé. La concentration excessive de tension mécanique est le résultat d'un manque de rayons d'angle adéquats. Dans toute pièce qui présente une entaille, une rainure ou toute dépression transversale, si petite soit-elle, la tension maximale se concentre immédiatement autour de ces secteurs (figure 8). Donc il faut minimiser les dépressions transversales abruptes et les angles aigus.

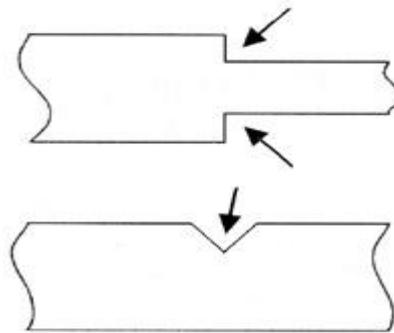


Fig. 8 : Concentration de tension

Afin d'optimiser la résistance des pièces formées, il suffit d'avoir recours à une bordure ou à des rayons d'angles appropriés. Le rayon doit au moins être équivalent à l'épaisseur de la paroi de la feuille et ne jamais être inférieur à 0,8 mm.

La figure 9 illustre l'effet du rayon de bordure ou d'angle sur la concentration de tension. Les concentrations de tension sur la pièce moulée sont inversement proportionnelles à la taille du rayon d'angle.

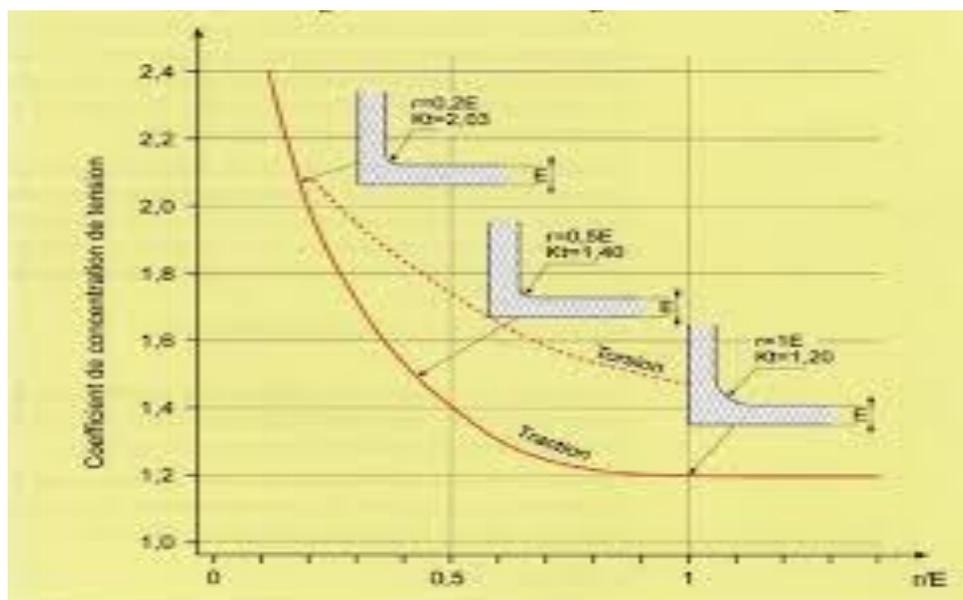


Fig.9: Coefficient de concentration de tension en fonction du rayon de bordure. [46]

■ Retrait :

Par retrait on entend la différence des dimensions entre le moule froid et la pièce injectée refroidie (environ 24 heures après le démoulage). Il s'exprime généralement en pourcentage par rapport aux cotes du moule. Le tableau suivant donne les retraits des différents polymères.

Tableau 4: Paramètres de retrait des pièces thermoformées

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

A – Retrait en moule :

Lorsque le thermoplastique est chauffé et formé sur moule, un retrait du matériau se manifeste durant le cycle de refroidissement. Après obtention d'une température en surface se prêtant au démoulage de la pièce formée, les dimensions de celle-ci auront légèrement diminué par rapport à ses dimensions de formage. Ce phénomène de retrait en moule varie selon le traitement et les modèles mais aussi selon le matériau employé. En ce qui concerne le dragage mâle, le retrait est moins critique par rapport aux dimensions finales de pièce. En effet, au refroidissement, le matériau se rétracte sur le moule rigide, ce qui retarde l'effet de retrait. Ce procédé présente des avantages en ce qui concerne les dimensions de la pièce finale, les moules doivent être pourvus d'angles de dépouille adéquats afin de soulever la pièce du moule. Inversement, au formage sous vide femelle, le matériau se rétracte du moule.

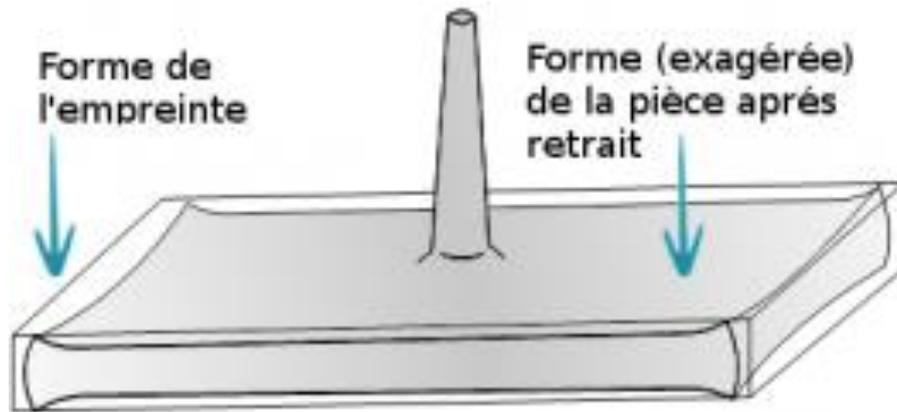


Fig.10: Retrait de la pièce[47]

B – Retrait post formage :

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

C – Post-retrait :

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

Le retrait s'effectue en quasi-totalité en ce qui concerne les polymères amorphes et à 75% pour ce qui est des thermoplastiques cristallins, dans les quelques heures qui suivent le moulage. Le retrait résiduel de 25 % en ce qui concerne les polymères cristallins se termine après 24 heures, à moins que l'emploi ultérieur d'éléments à haute température ne vienne susciter un nouveau phénomène de cristallisation et de retrait. Environ 50% du retrait s'effectue sur le moule. Le coefficient de retrait est tributaire de la température de formage du matériau, de sa température de transition vitreuse ainsi que de la température du moule. Il est également fonction du degré de cristallinité: les matériaux à haute teneur cristalline se rétractent généralement plus que les polymères amorphes. Les paramètres de retrait standard des pièces en polymères thermoformés sont exprimés dans le tableau 4

D- Les facteurs qui influent sur le retrait :

- Le type de plastique.
- 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. [48]

5. Avantages du thermoformage :

- C'est une technique très compétitive qui sert à réaliser des produits en grande ou petite série et de produire des pièces de parois minces et de grande surface.
- Son opportunité est intéressante grâce au faible coût de l'outillage dont on s'en sert et la disponibilité de la matière première nécessaire.
- Le processus de production avec cette technique est rapide et plus efficace .
- On peut rénover les produits selon la demande et les fonctions prévues conformément aux modifications qu'on porte aux outils (moule).

6. Conclusion :

Le thermoformage nous offre la possibilité de créer des pièces simples ou complexes, si on se soumet aux règles de formation, à un prix raisonnable et attractif, avec un apport purement technique.

Chapitre III :

Conception du moule exemples

1. Introduction

La conception de moule est faite par le logiciel Solid Works. Une présentation de celui-ci est donnée dans ce chapitre, suivi de son module de moulage « **mold tool** » et son application.

2. Présentation du logiciel SolidWorks (SW):

SW a été créé en 1993 et a été acheté en 1997 par la société Dassault Systèmes Le logiciel SW de CAO "Conception Assistée par Ordinateur" également qualifié de logiciel de DAO "Dessin Assistée par Ordinateur" est une application de conception mécanique 3D paramétrique qui permet aux concepteurs d'esquisser rapidement des idées, d'expérimenter des fonctions et des cotes afin de produire des modèles et des mises en plan précises. SW est assez intuitif. Modéliser une pièce est assez rapide contrairement à d'autres logiciels de CAO. La version utilisée dans notre travail est celle de 2013. [1].

2.1 Interface d'utilisateur [2]

L'application SW offre des outils et des fonctionnalités d'interface utilisateur qui vous aident à créer et à éditer efficacement les modèles, notamment des fonctionnalités Windows connues, comme le glissement et le redimensionnement des fenêtres. Un bon nombre de ces fonctionnalités, comme imprimer, ouvrir, enregistrer, couper et coller, etc., sont représentées dans SW par les mêmes icônes.

- **Fenêtres de documents SW**

Les fenêtres de documents SW sont constituées de deux panneaux. Le panneau de gauche, ou Manager Pane, contient :

- **Arbre de création (Feature Manager)**

Affiche la structure de la pièce, de l'assemblage ou de la mise en plan. Sélectionnez un élément dans l'arbre de création Feature Manager afin d'éditer l'esquisse sous-jacente, d'éditer la fonction, et de supprimer ou d'annuler la fonction ou le composant (fig.1).

- **Propriety Manager**

Fournit des paramètres pour de nombreuses fonctionnalités, telles que les esquisses, les fonctions de congé et les contraintes d'assemblage (fig.2).

- **Configuration Manager**

Permet de créer, de sélectionner et d'afficher plusieurs configurations de pièces et d'assemblages dans un document. Les configurations sont des variations d'une pièce ou d'un

assemblage dans un document unique (fig.3).

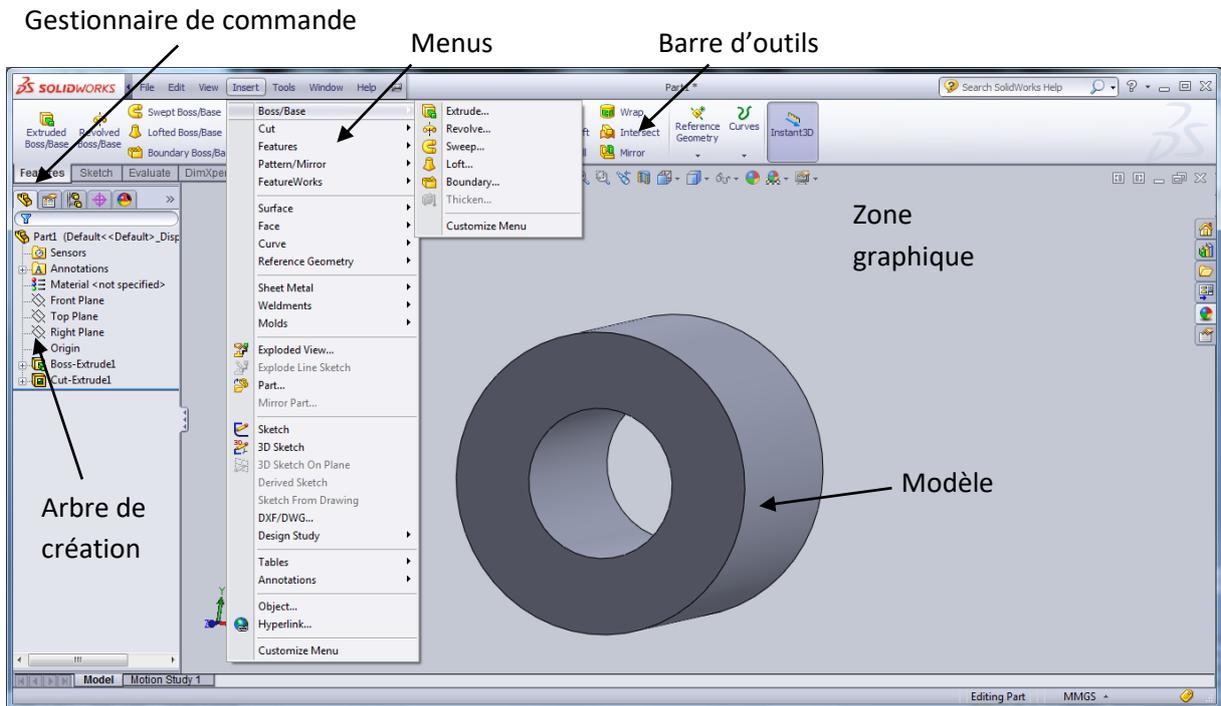


Fig.1: Interface solidworks

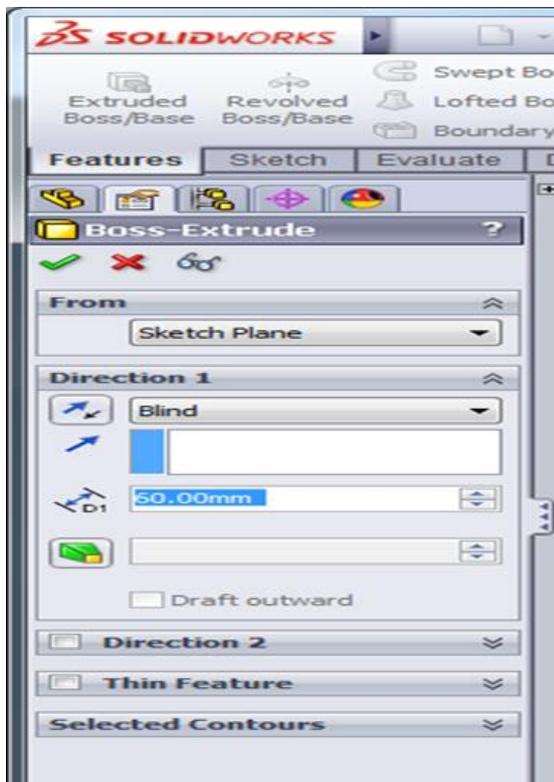


Fig.2: Property Manager

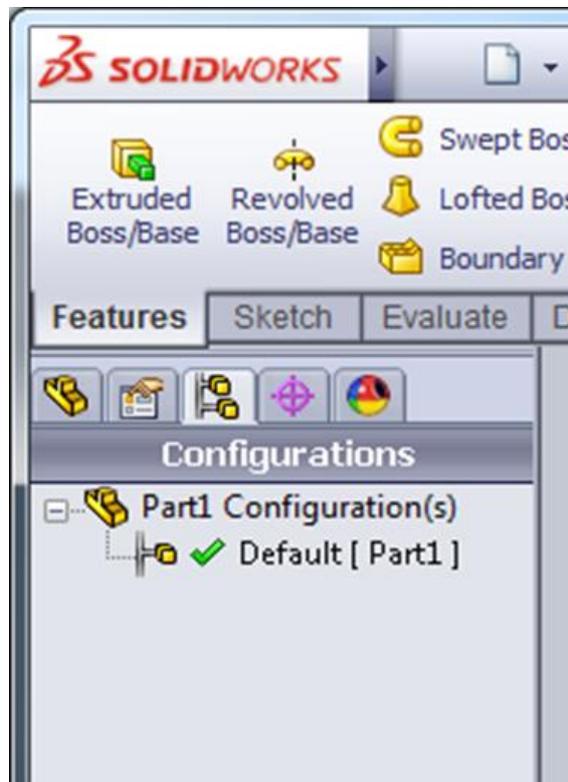


Fig.3: Configuration Manager

3. Module DAO :

Le dessin assisté par ordinateur DAO est un outil d'aide à la production de dessins de communication : " la transmission d'informations sous forme de plans".

C'est une discipline permettant de produire des dessins techniques avec un logiciel informatique. On le distingue de la synthèse d'image dans la mesure où il ne s'agit pas du calcul de rendu d'un modèle numérique mais de l'exécution de commandes graphiques (traits, formes diverses...). De ce fait, en DAO, la souris et le clavier remplacent le crayon et les autres instruments du dessinateur. Les dessins produits sont le plus souvent réalisés en mode vectoriel (traits cohérents). Les logiciels de DAO attribuent des coordonnées (X, Y pour les plans 2D et X, Y, Z pour les modèles 3D). Chaque élément d'un dessin est appelé entité et chaque entité contient donc des propriétés de couleur, d'épaisseur, de calque, de type de ligne.[3]

3.1 Méthode de travail

On montre d'une façon succincte les étapes pour dessiner une pièce simple qui se résume comme suit :

Lancer le logiciel, ouvrir un nouveau fichier, cliquer sur pièce et puis OK (Fig. 4).

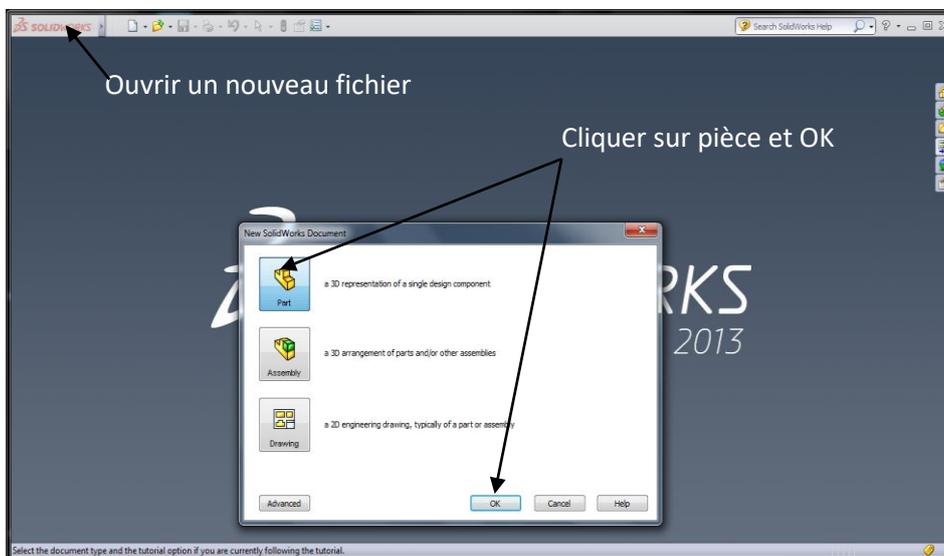


Fig. 4 : Nouveau fichier

Sur l'interface, cliquer sur esquisse, puis commencer à dessiner en cliquant sur les icones de dessin (dans notre cas c'est le cercle, coter et valider comme le montre la fig.5).

Ensuite pour avoir le 3D on clique sur l'icône fonction puis extruder, coter l'épaisseur puis valider (fig.6). La fonction enlèvement de matière pour faire le perçage (fig.7) sans oublier d'enregistrer le fichier.

Une fois le dessin de la pièce terminée on fait une mise au plan (fig.8).

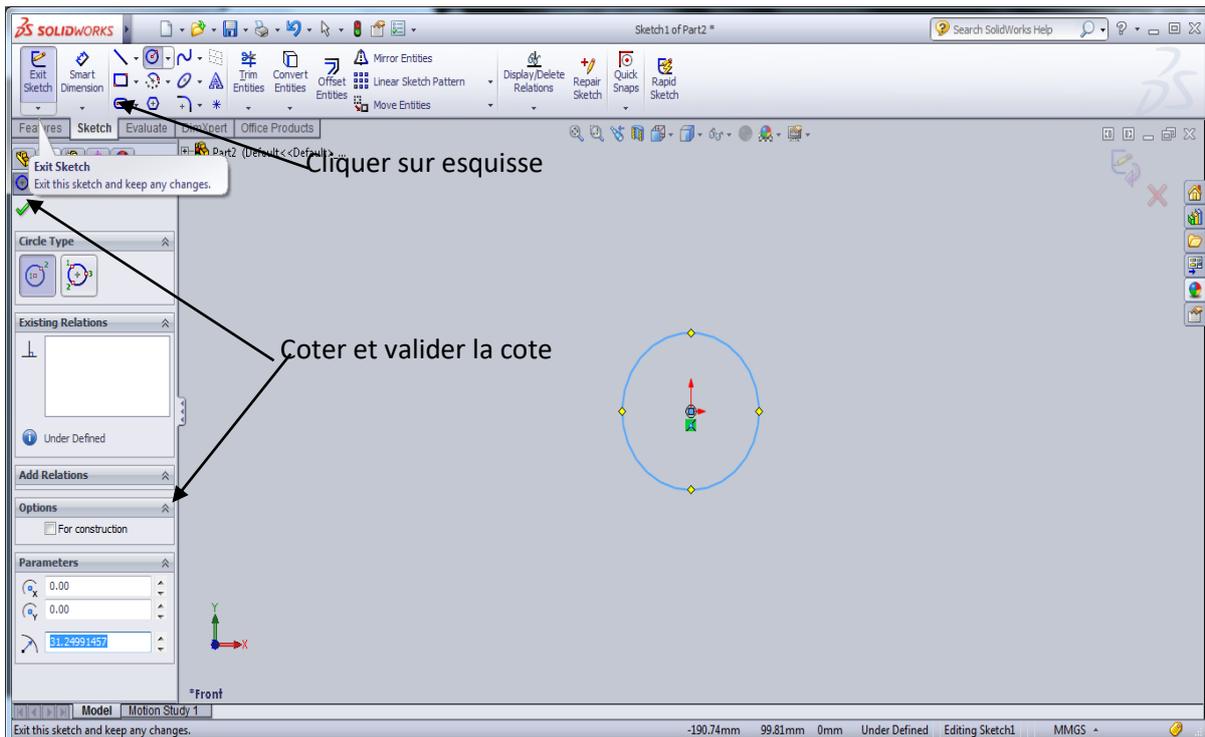


Fig. 5 : Dessin en 2D

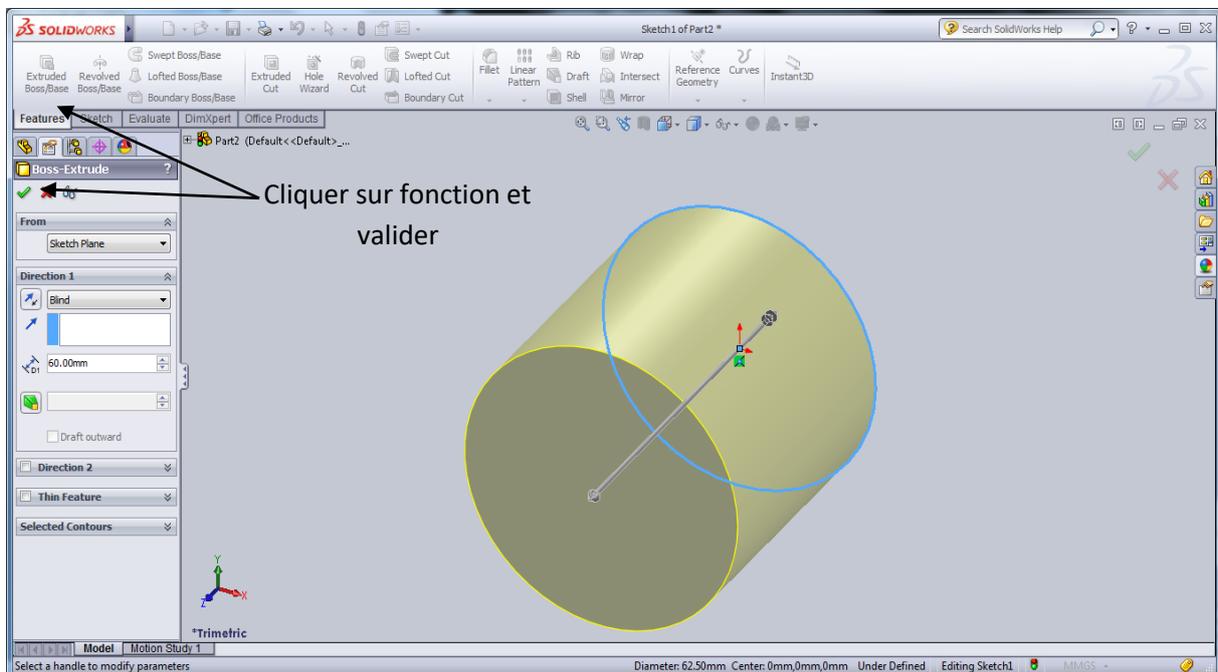


Fig. 6 : Dessin 3D

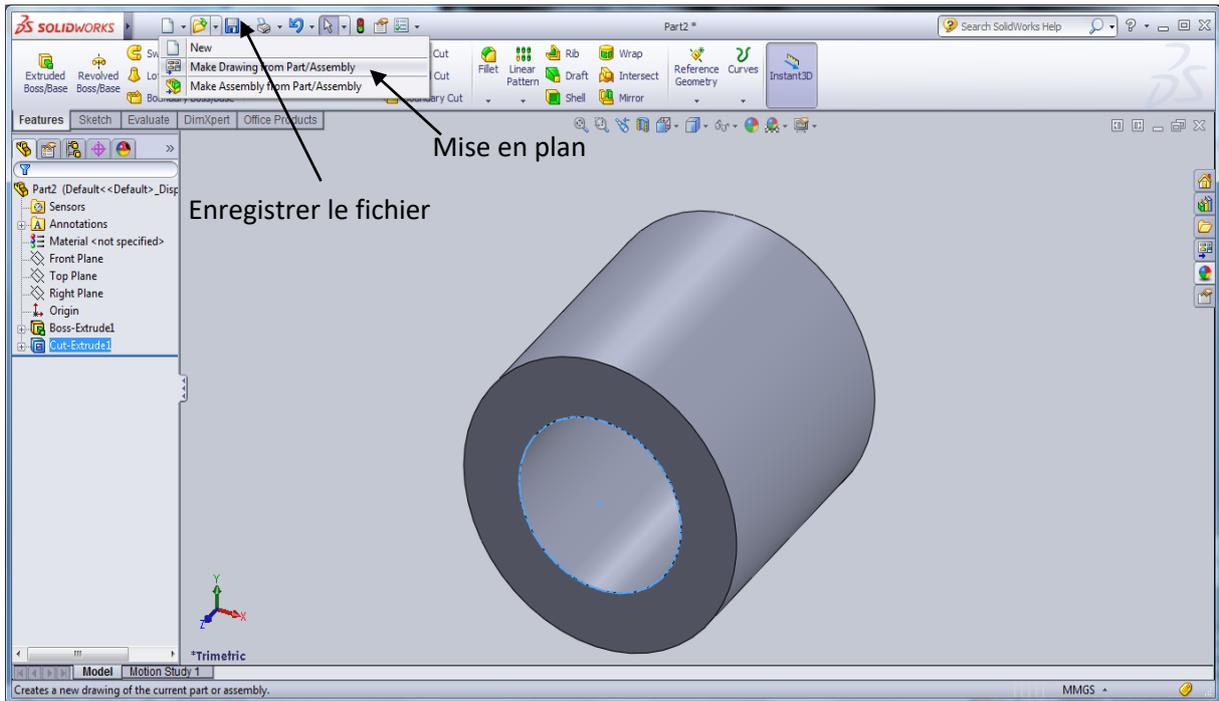


Fig. 7 : Dessin 3D avec perçage

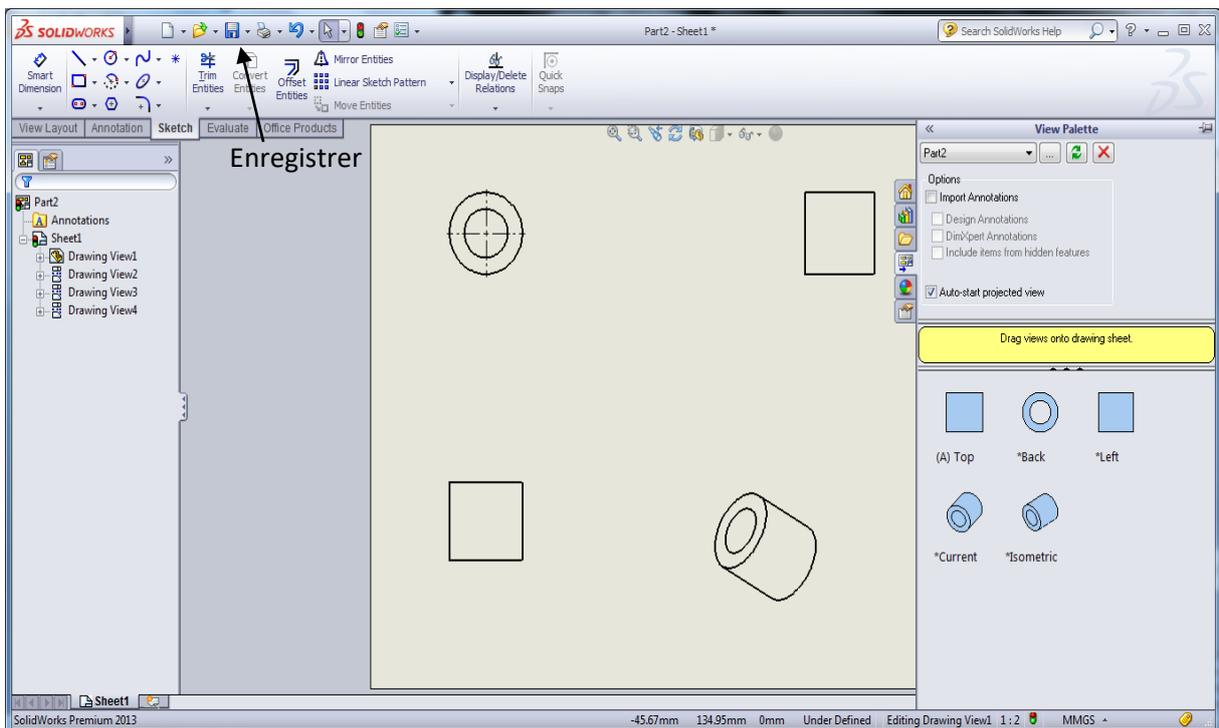


Fig. 8 : Mise en plan

4. Module Moulage (mold tool) :

Le logiciel SW donne la possibilité de créer des moules simples ou complexes. Il est conçu suivant l'organigramme ci-dessous:

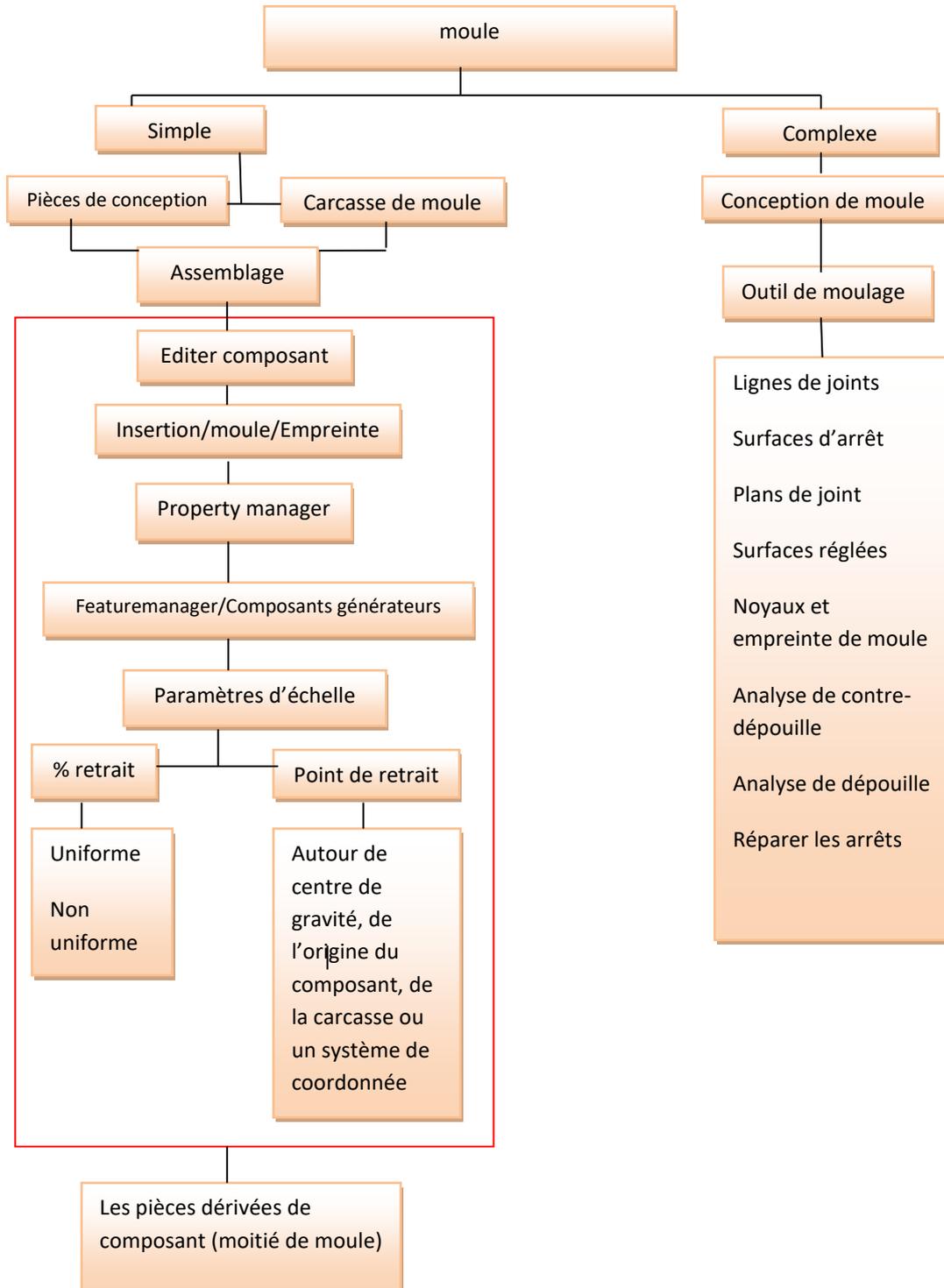
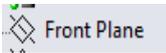


Fig.9 : Organigramme du module « mold tool »

Nous montrons l'application du module pour la création du moule d'un exemple simple (**arbre avec épaulement**) et d'un autre exemple (**toupie**).

✓ **Création d'un arbre avec épaulement :**

Pour dessiner la demi-forme de l'arbre épaulé on suit les étapes suivantes :

- Choisir le plan de face  → cliquer esquisse  → cliquer ligne  et dessiner la forme donnée (fig.9).

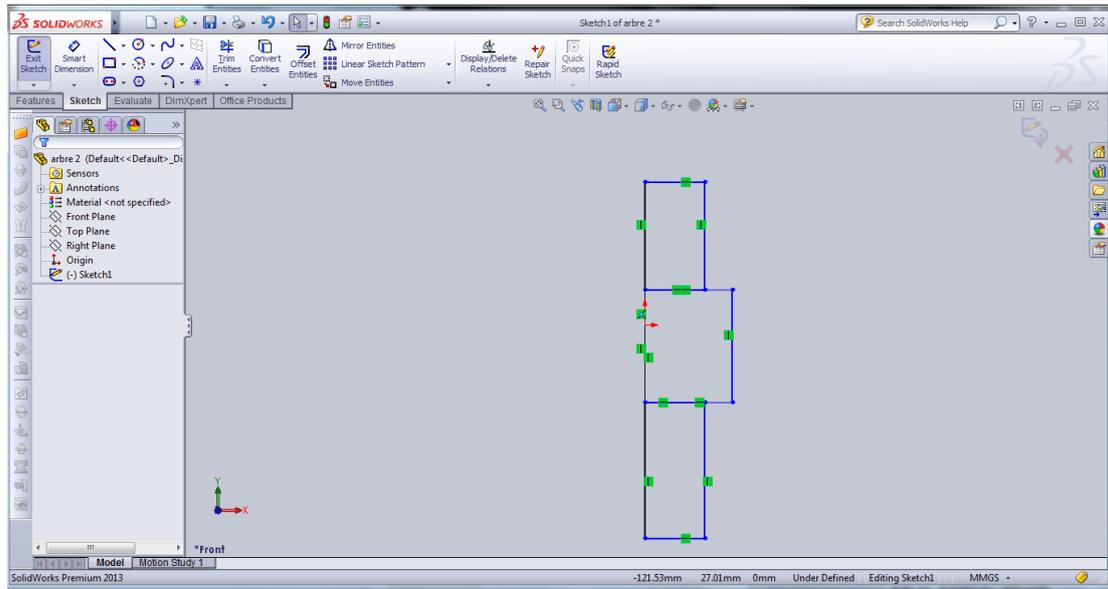
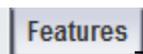


Fig. 10 : Dessin de la pièce en 2D

Puis appliquer la fonction « extruder » en révolution (fig. 10).

Cliquer sur fonction  → choisir bossage en révolution 

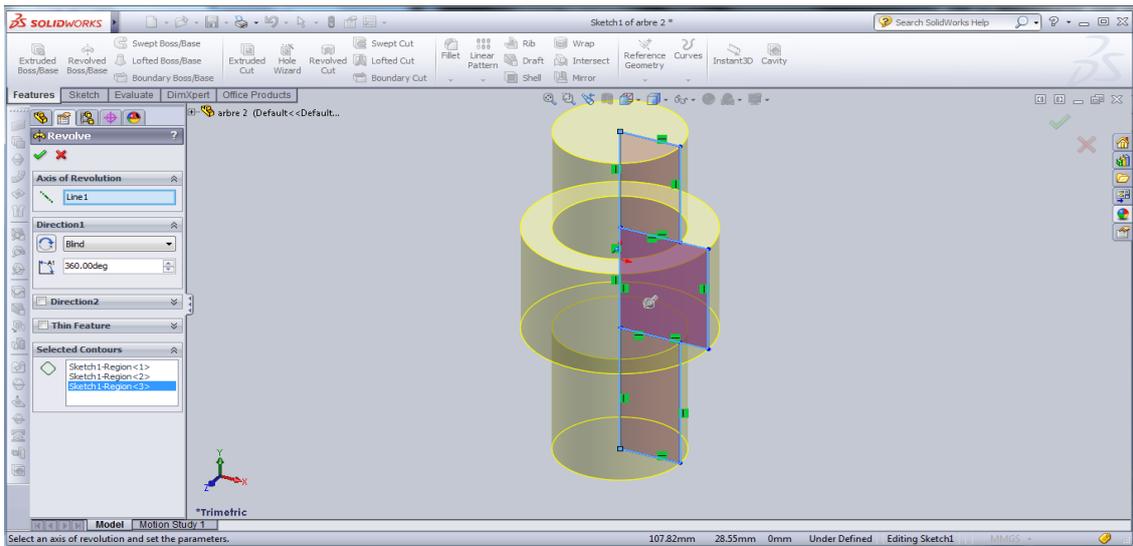


Fig. 11 : Création du 3D

- ouvrir un assemblage

Nouveau  → cliquer assemblage  Make Assembly from Part/Assembly

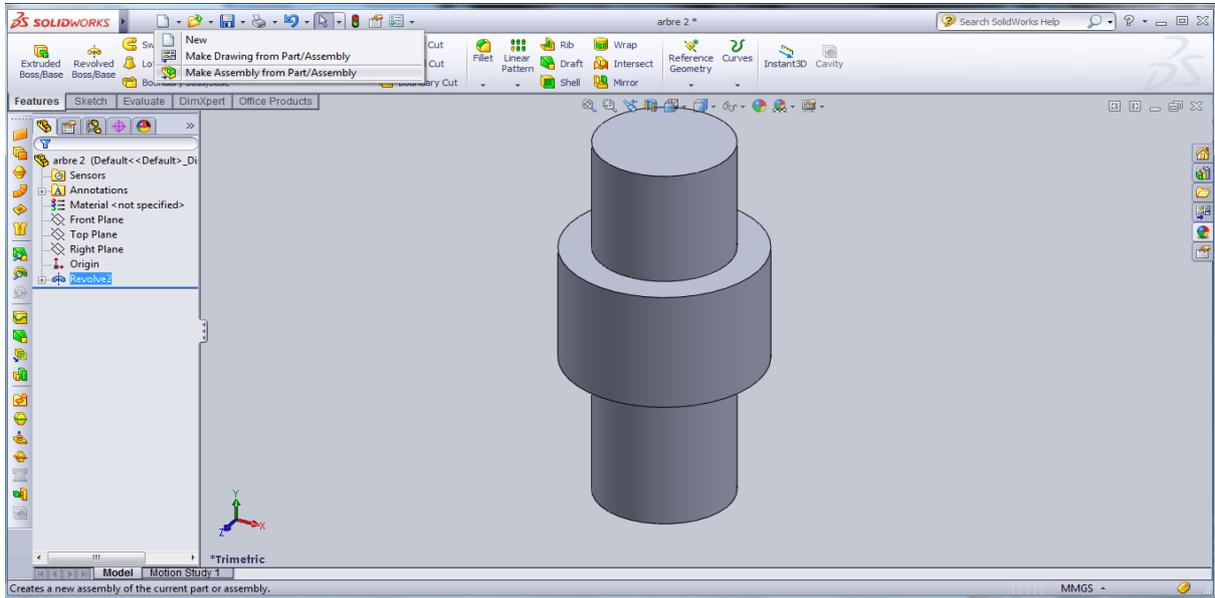


Fig.12 : Pièce finie en 3D

- Enregistrer le fichier.

Cliquer  insérer le nom de fichier puis cliquer 

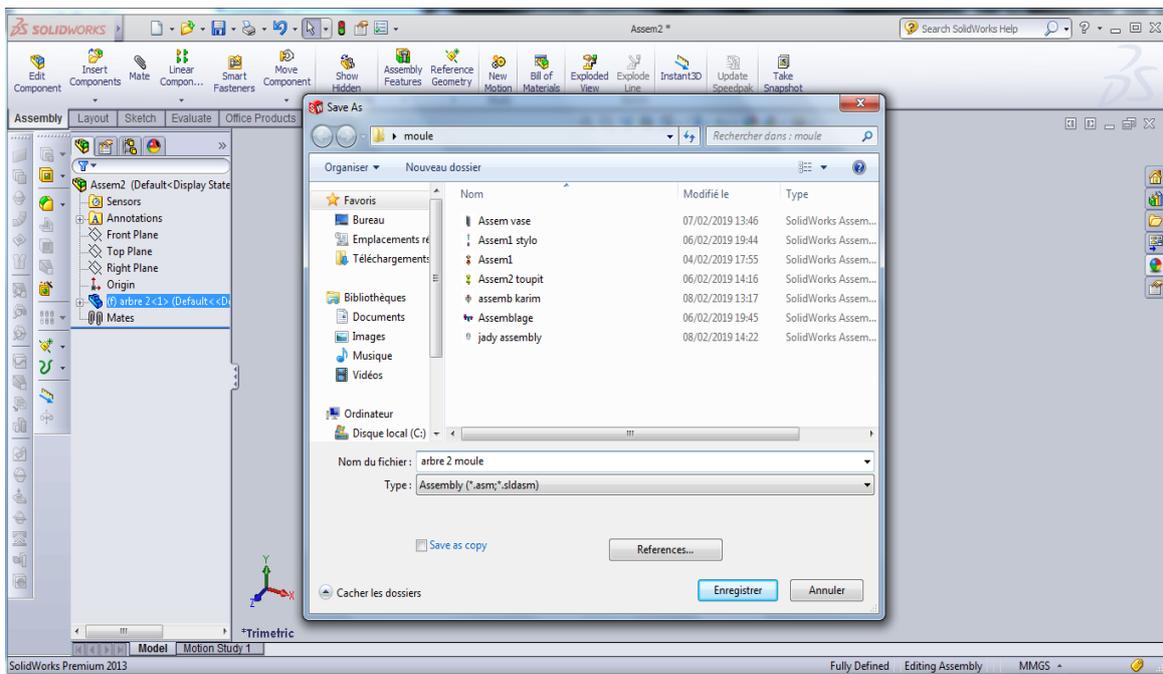


Fig. 13 : Enregistrement du fichier

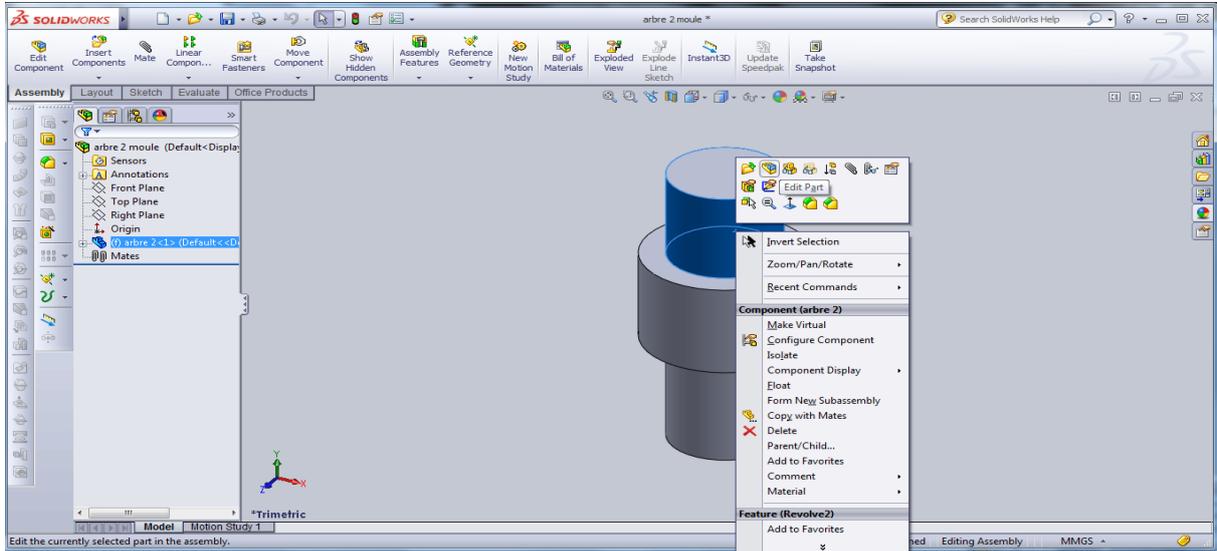
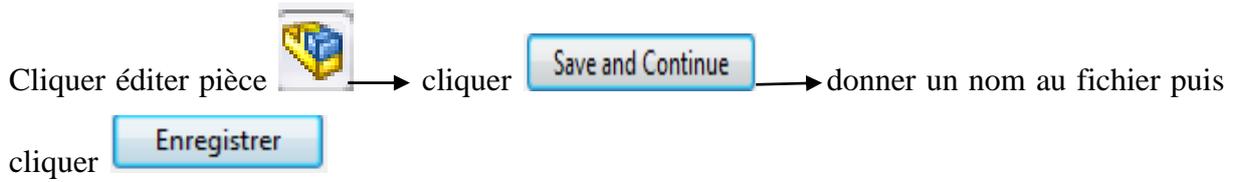


Fig.14: Editer élément.

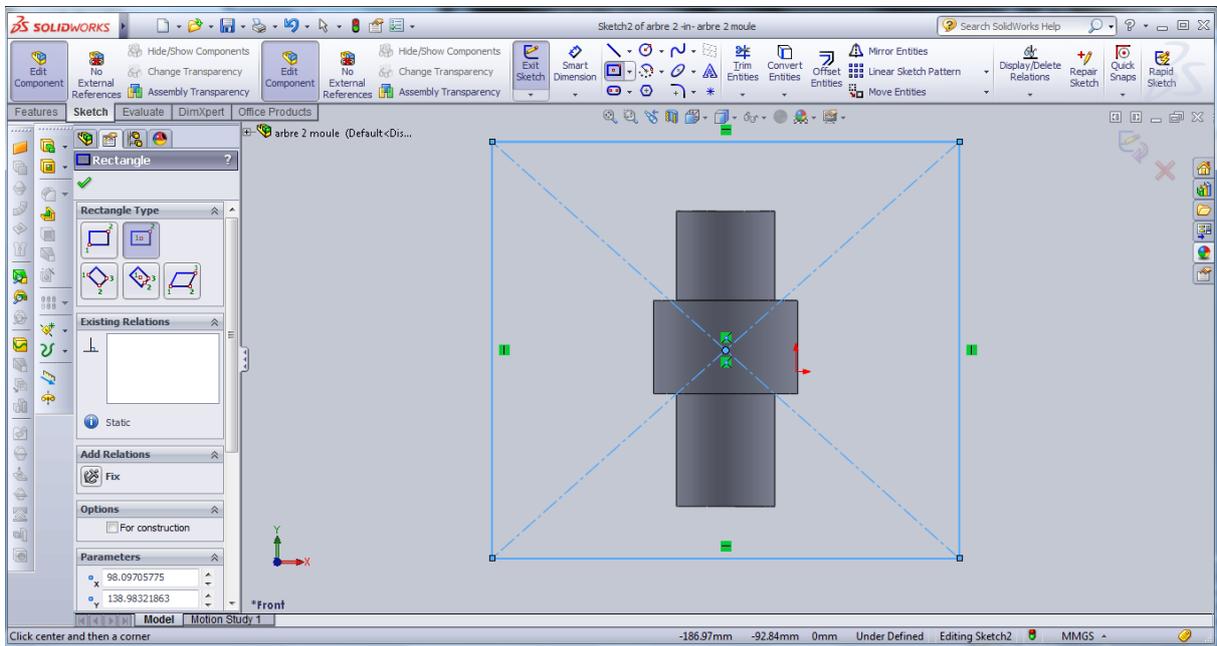
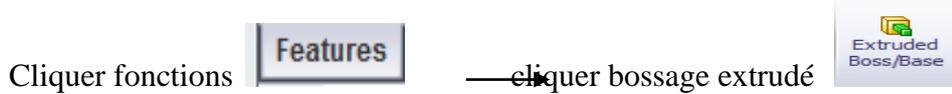


Fig.15: Dessin d'un rectangle sur le plan choisi.



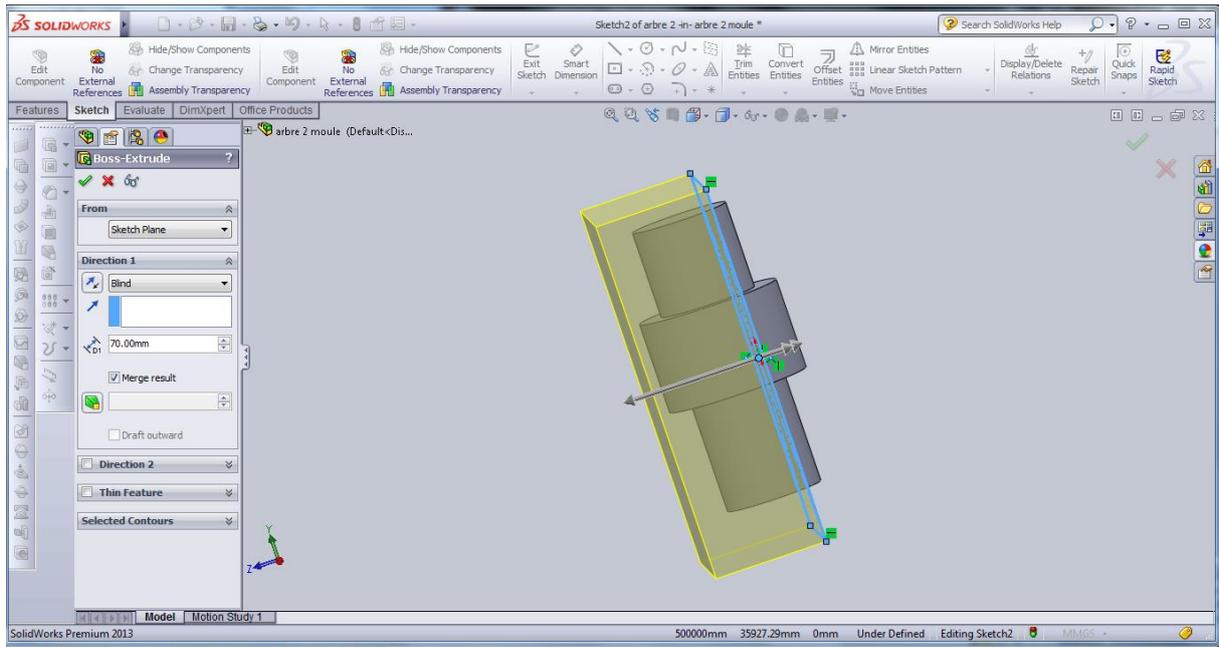


Fig.16: Application de la fonction « extruder »

Cliquer fonction empreinte 

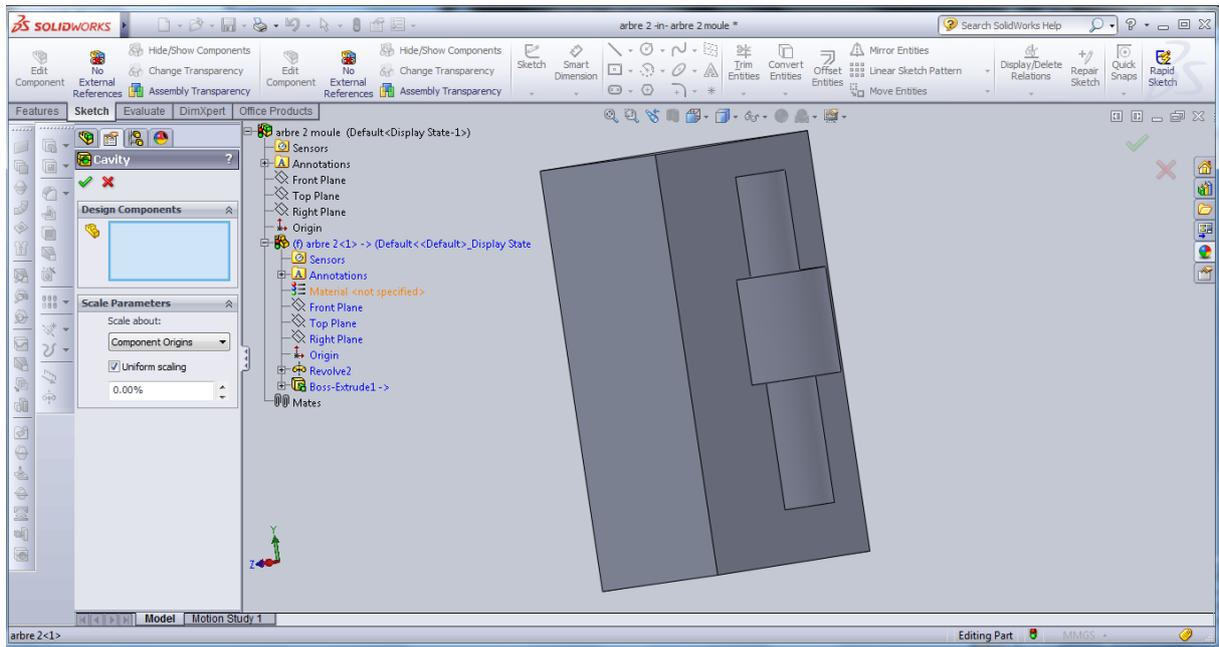


Fig. 17 : Application de la fonction « empreinte »

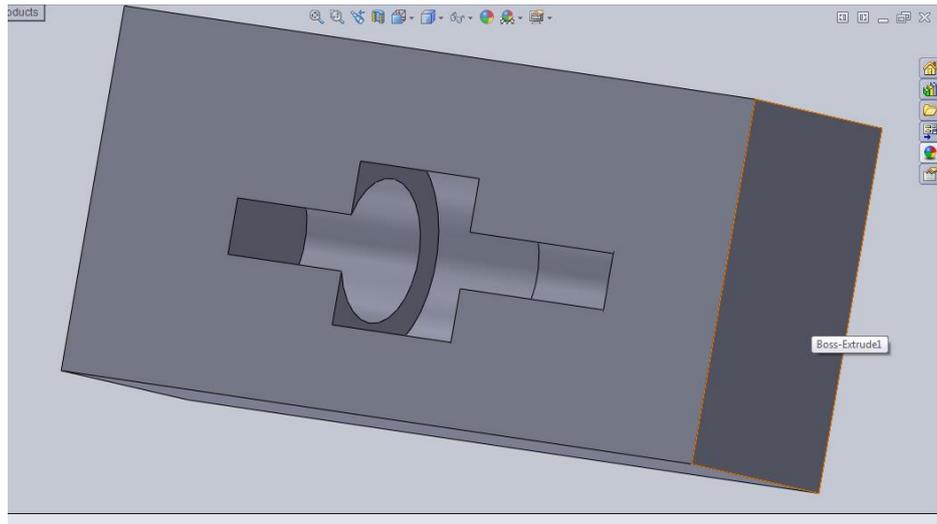


Fig.18: Partie inférieure du moule

Pour réaliser la partie supérieure du moule, on suit les mêmes étapes (la figure 15, 16,17).

✓ **Création du moule d'une toupie**

Pour créer la pièce ; Choisir le plan de face  → cliquer esquisse  → cliquer ligne  et spline  dessiner la forme donnée .
Cliquez sur fonction  → choisir bossage en révolution  appliquer.

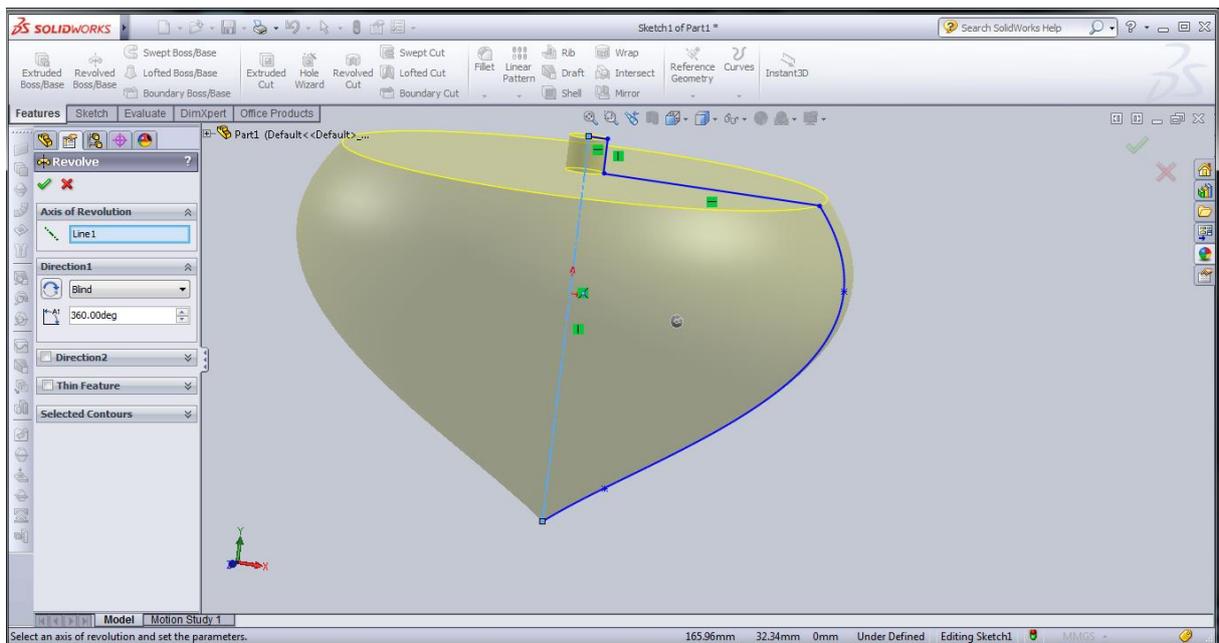


Fig.19: Création de la pièce

Cliquer sur l'icône suivante  pour analyser les dépouilles

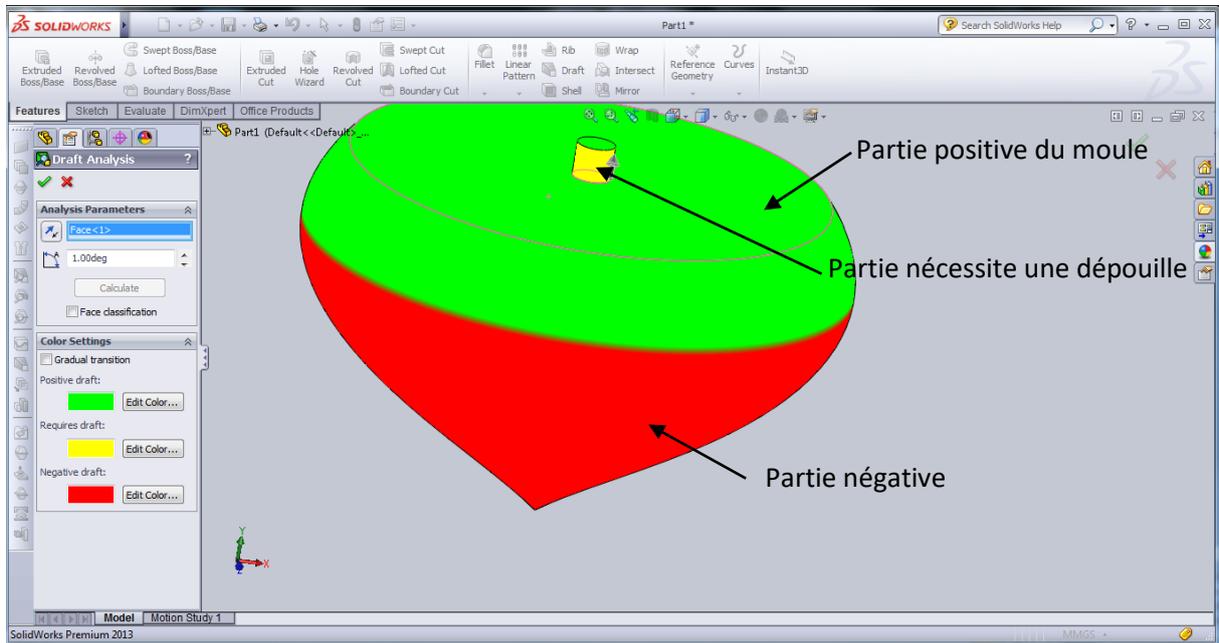


Fig.20: Analyse des dépouilles

Cliquer sur l'icône de dépouille  pour l'application de dépouille

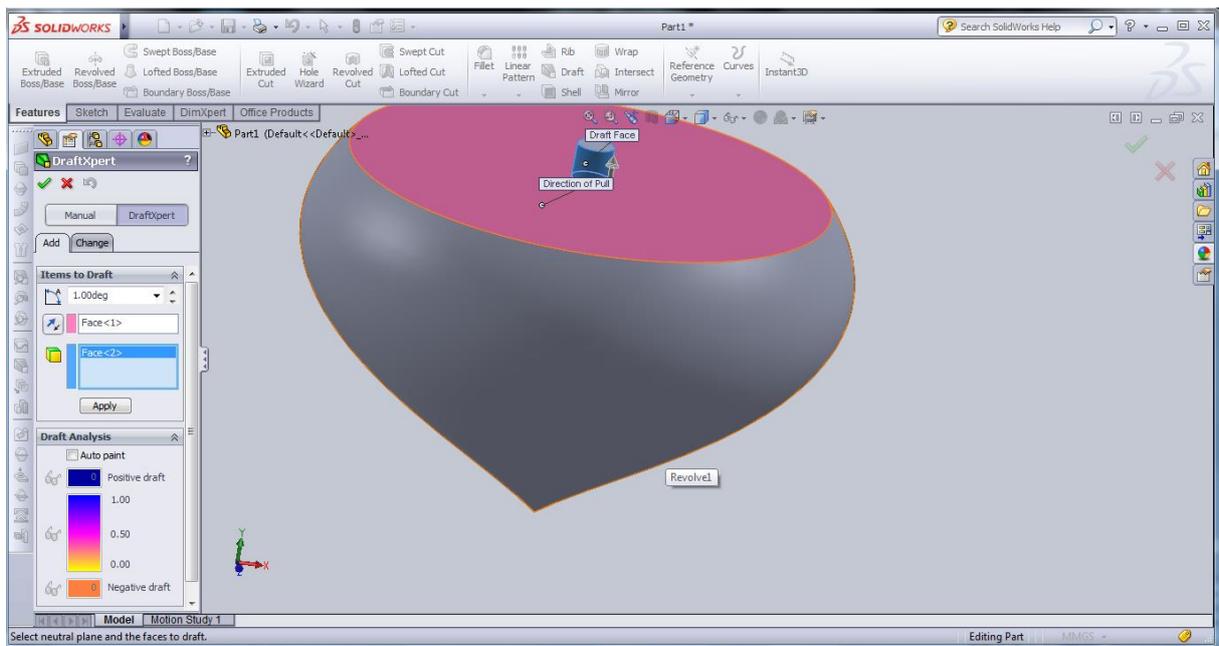


Fig.21: Application de la dépouille

Calcul de la dépouille [4]:

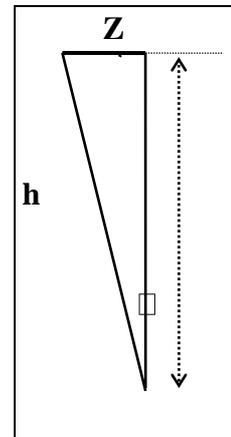
En moulage, la dépouille ou angle de dépouille est l'inclinaison des parois du moule nécessaire pour faciliter le démoulage de la pièce.

Pour calculer la dépouille Z, on calcule la $\tan\alpha$ qui est

$$\tan\alpha = \frac{\text{mesure de coté opposé à } \alpha}{\text{mesure de coté adjacent à } \alpha}$$

si on défini α et h comme le montre le schéma ci-contre, donc on aura :

$$z = h \cdot \tan \alpha$$



Cliquer sur analyser les dépouilles  pour une deuxième analyse

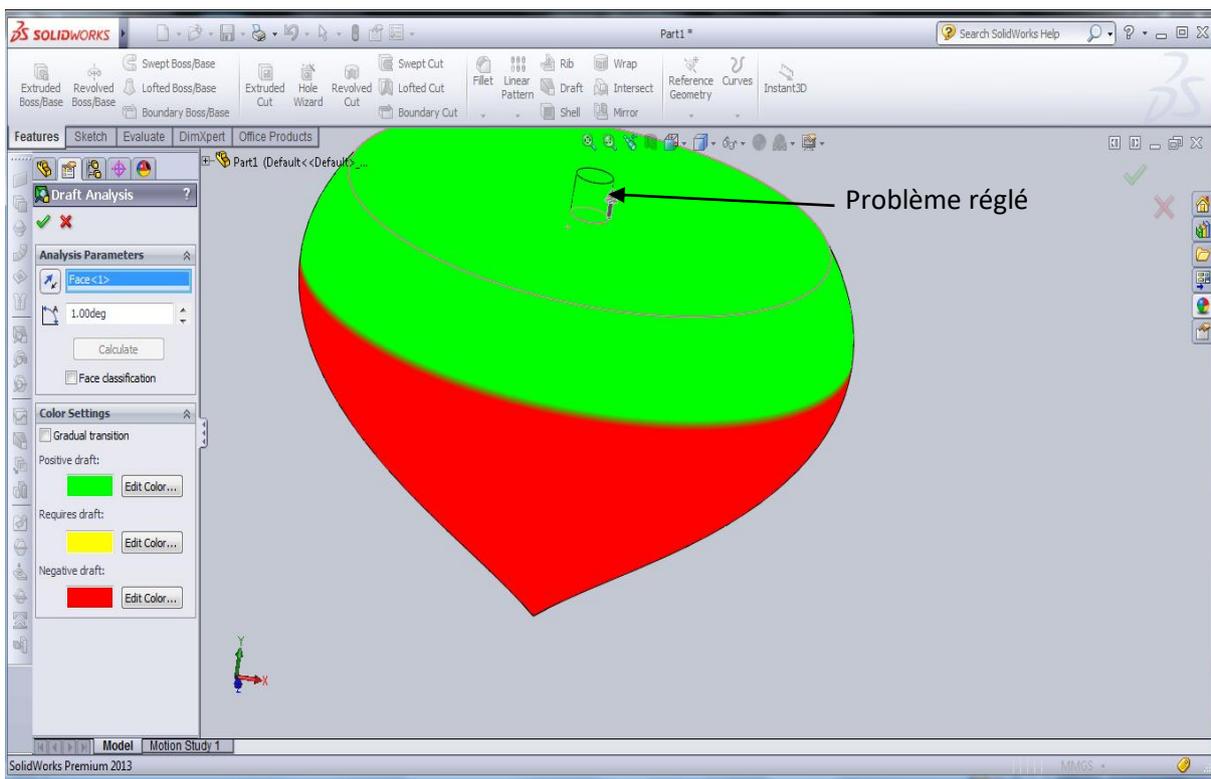


Fig.22: Deuxième analyse de dépouille

Cliquer l'icône ligne de joint  pour la création de la ligne de joint

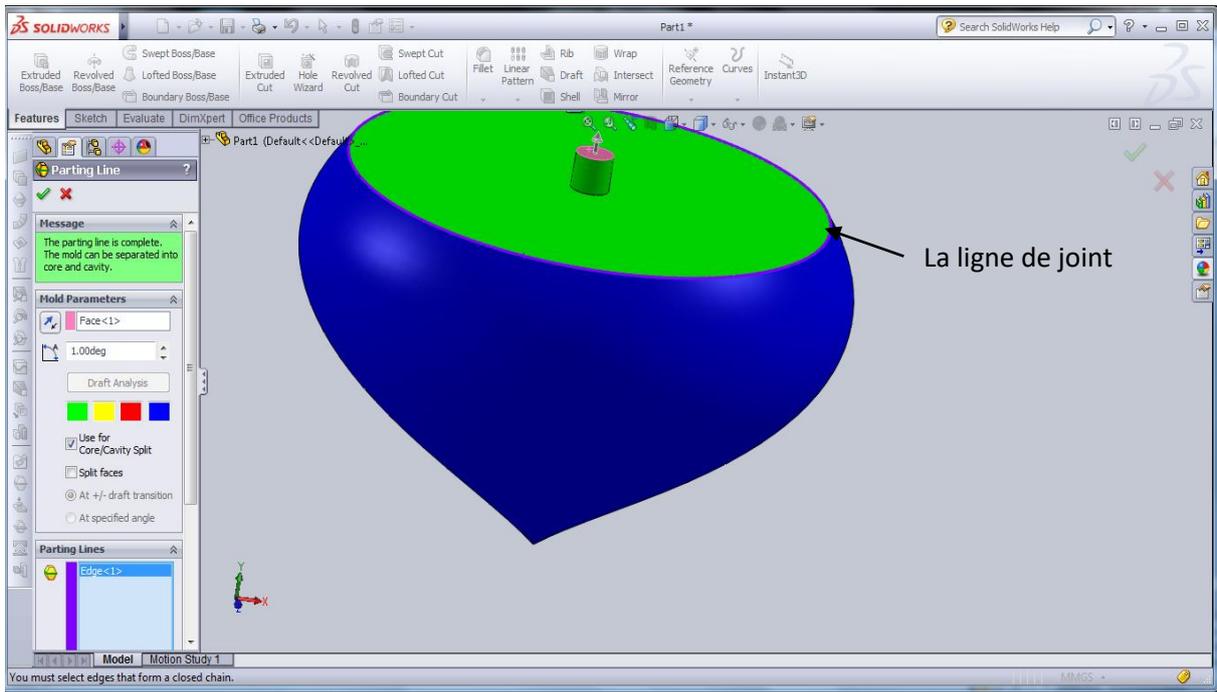


Fig.23: Création des lignes de joint

Création de la surface de joint

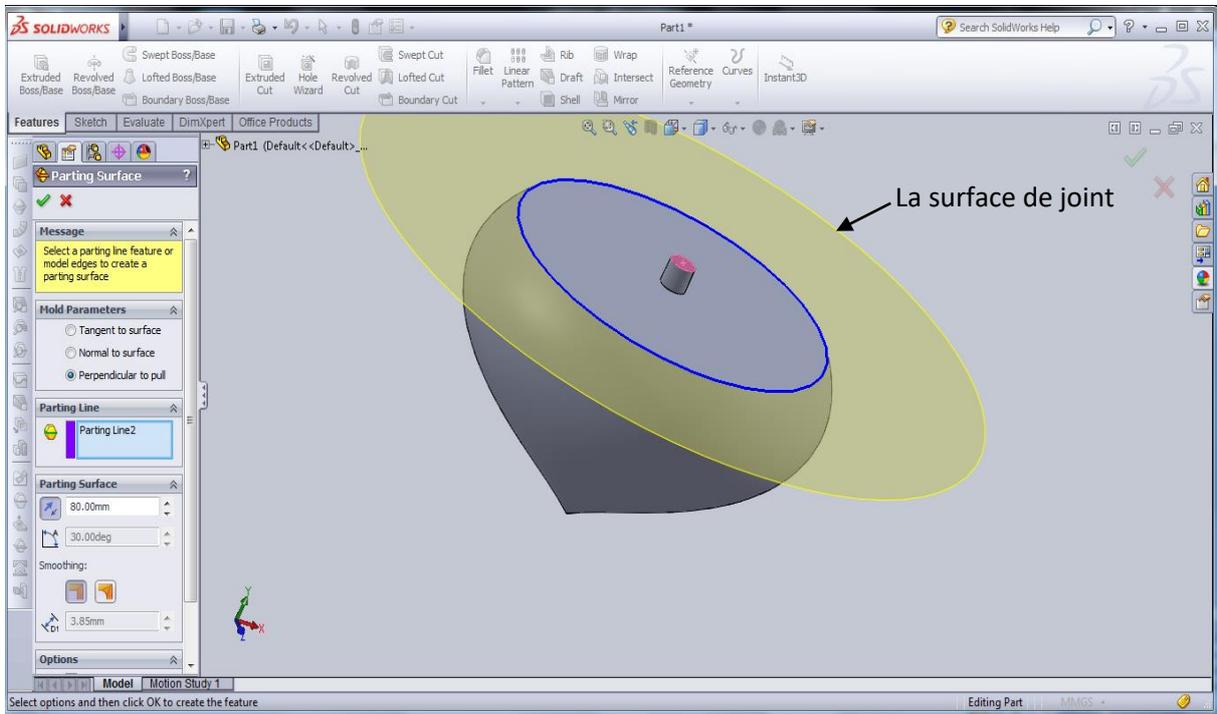


Fig. 24: Création de la surface de joint

Cliquer surface de joint  pour la création du moule

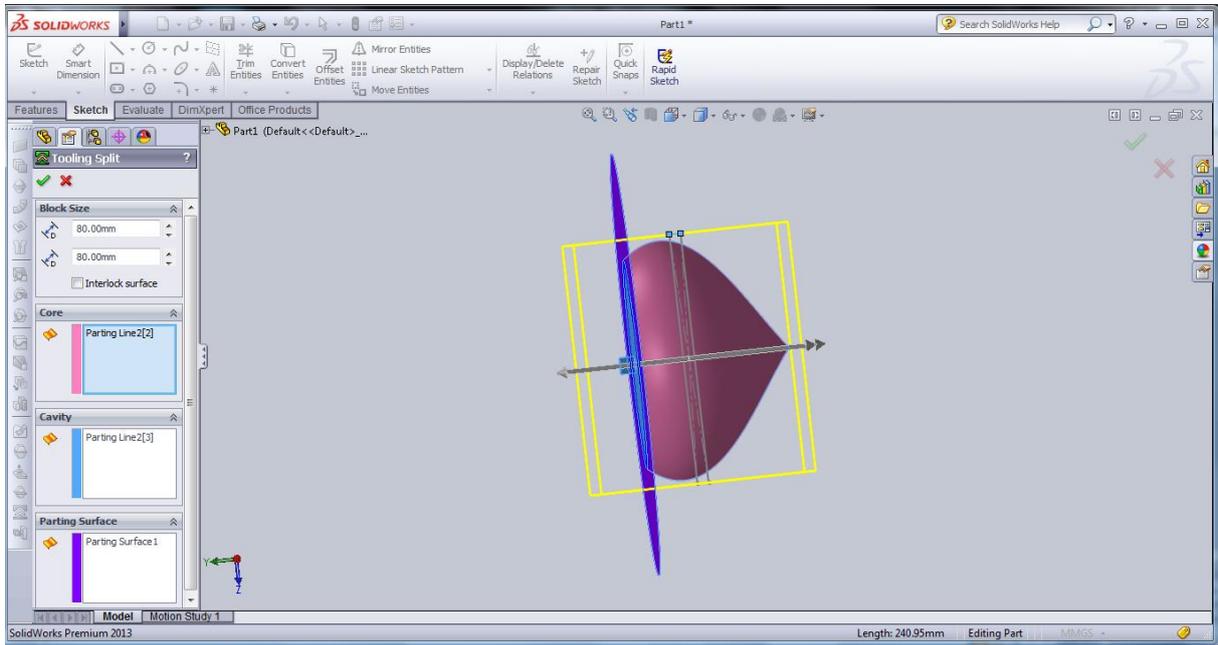


Fig.25: création du moule

Cliquer sur outil moule  pour la vérification de la partie supérieure du moule.

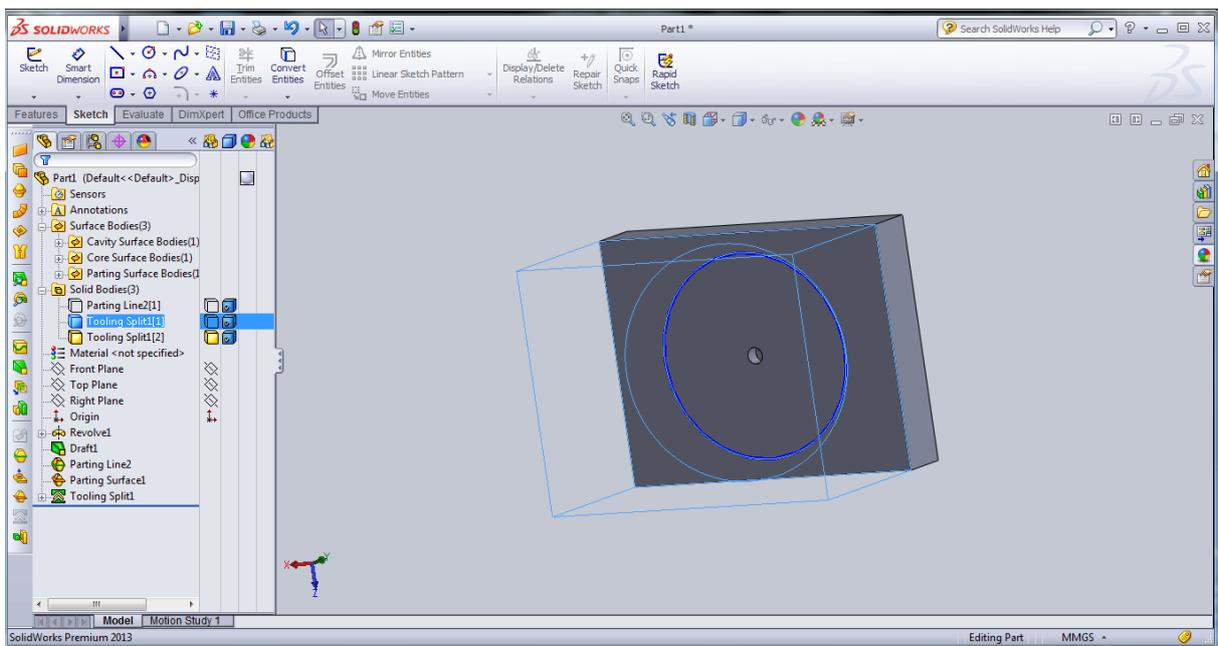


Fig.26: Partie supérieure du moule

Vérification de la partie inférieure du moule

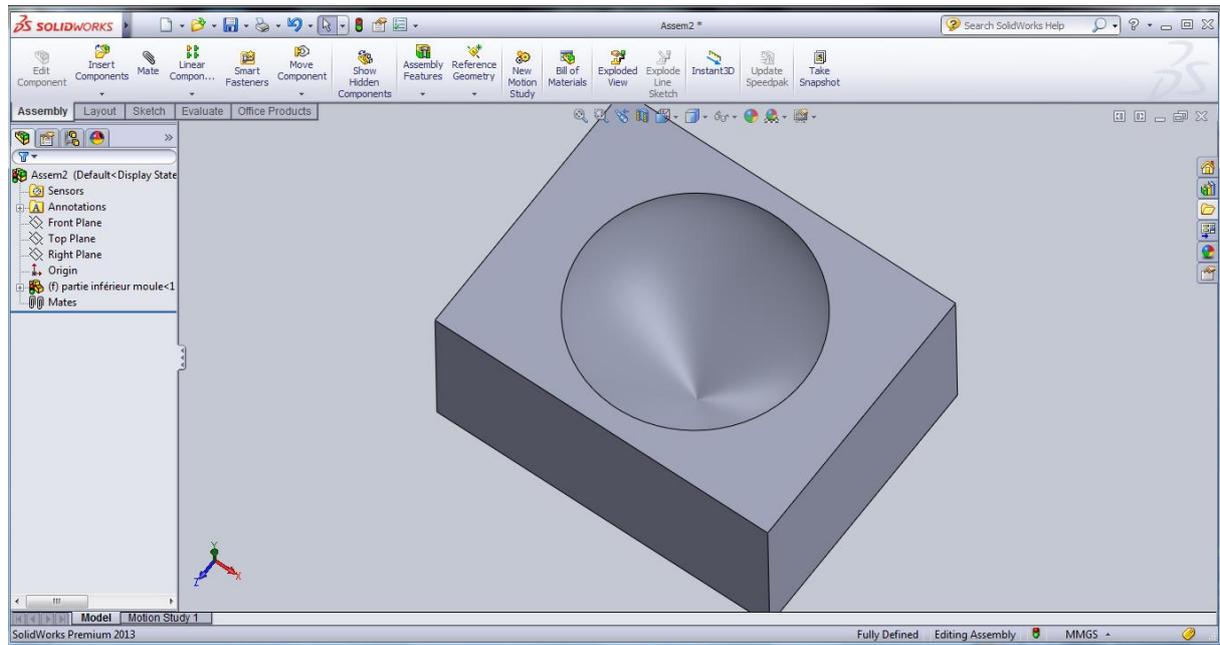


Fig.27: Partie inférieure du moule

Vue éclatée du moule et de la pièce

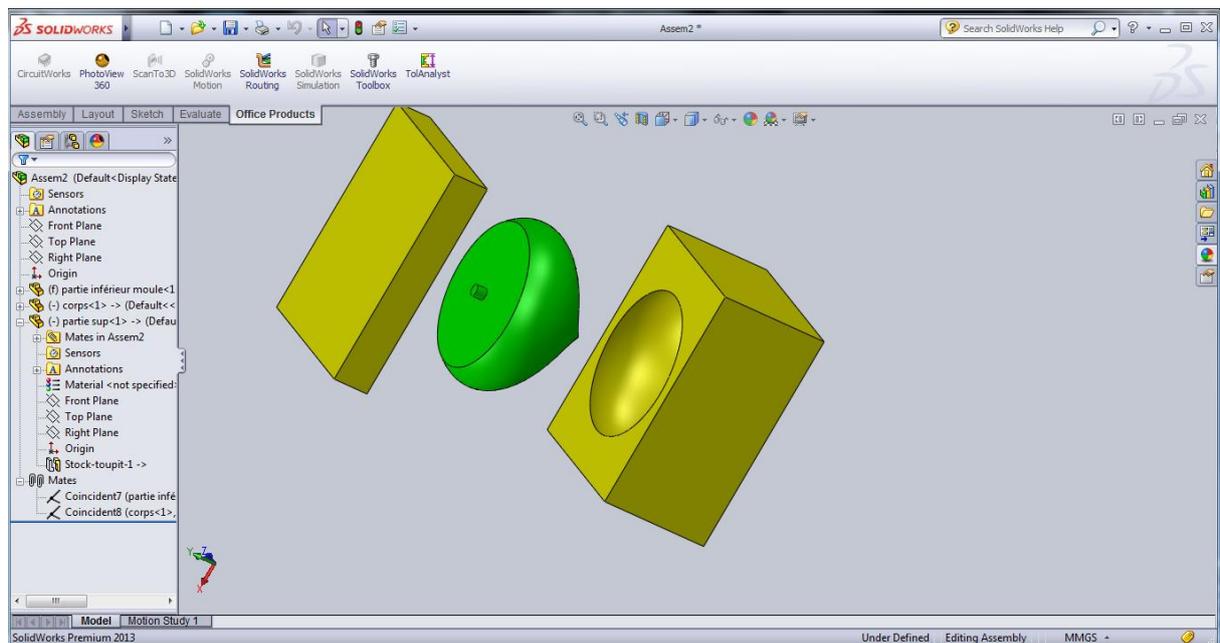


Fig.28: Vue éclatée moule et pièce

5. Conclusion :

Ce chapitre montre les différentes étapes simplifiées pour l'utilisation du module « Outils de moulage , fonction empreinte » existant dans le logiciel SW version 2013.

Chapitre IV :

Présentation du T-SIM

1. Introduction :

Nous présentons dans ce chapitre le logiciel de simulation du processus de thermoformage **T-SIM®**. S'appuyant sur un modèle de résolution viscoélastique, il permet de simuler tout type de thermoformage : formage positif, formage négatif, formage assisté avec poinçons.....

2. Interface du logiciel :

Son interface conviviale (fig.1) permet une prise en main rapide et sa compatibilité avec les logiciels de CAO (Solidworks, TopSolid, Catia, AutoCAD, ...). Il permet la réalisation de projets professionnels de qualité.[1]

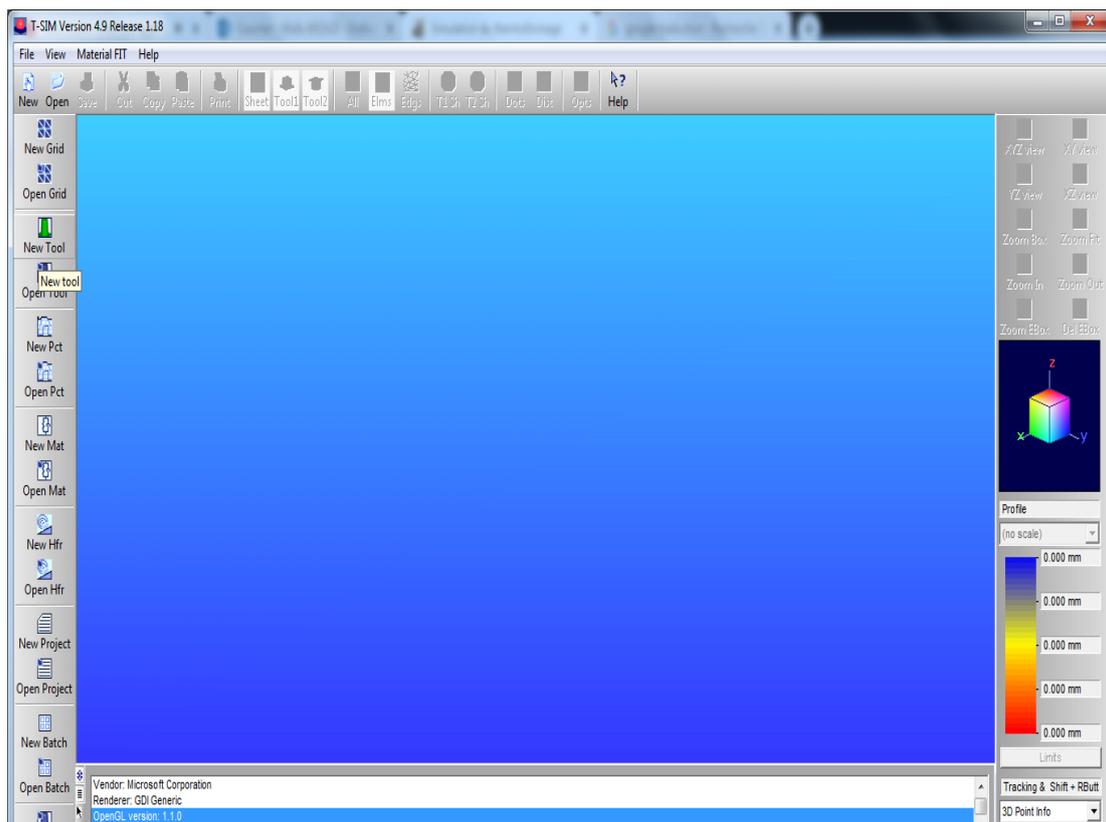


Fig. 1: Interface du logiciel de T-SIM

La pièce dessinée par SW (fig.2) est importée facilement par le logiciel

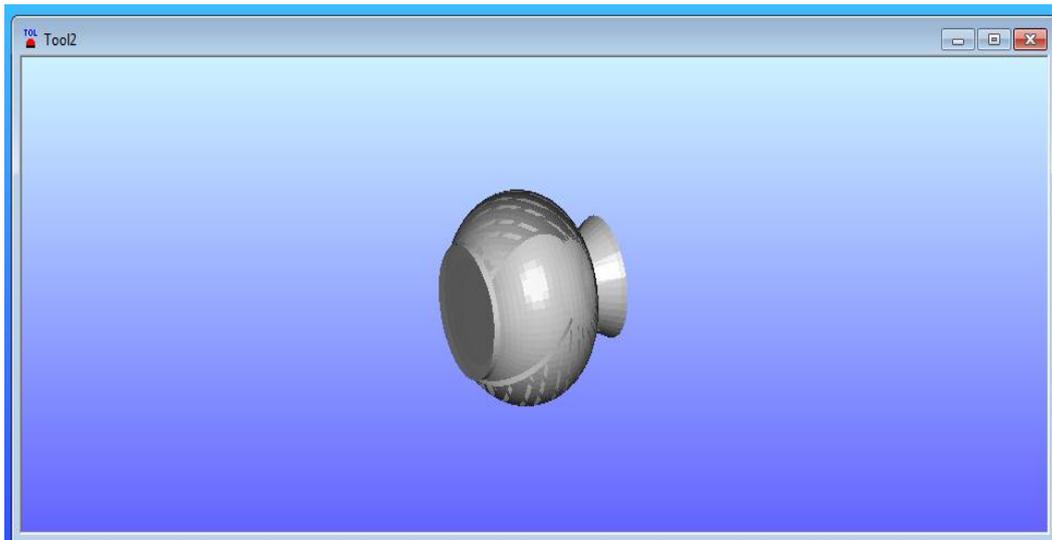


Fig. 2: Pièce importée de SolidWorks

3. Utilisations et avantages[2] :

T-SIM® autorise une utilisation avancée au travers d'une description détaillée du processus de thermoformage.

Il peut prendre en compte jusqu'à 10 outils indépendants lors d'une même simulation (chaque outil a un déplacement différent).

Les résultats obtenus permettent d'optimiser aussi bien l'outillage que le processus de thermoformage.

Il permet d'afficher tout au long de la simulation et sur une carte 3D (fig.3) :

- l'épaisseur
- la température
- les contraintes
- l'étirement

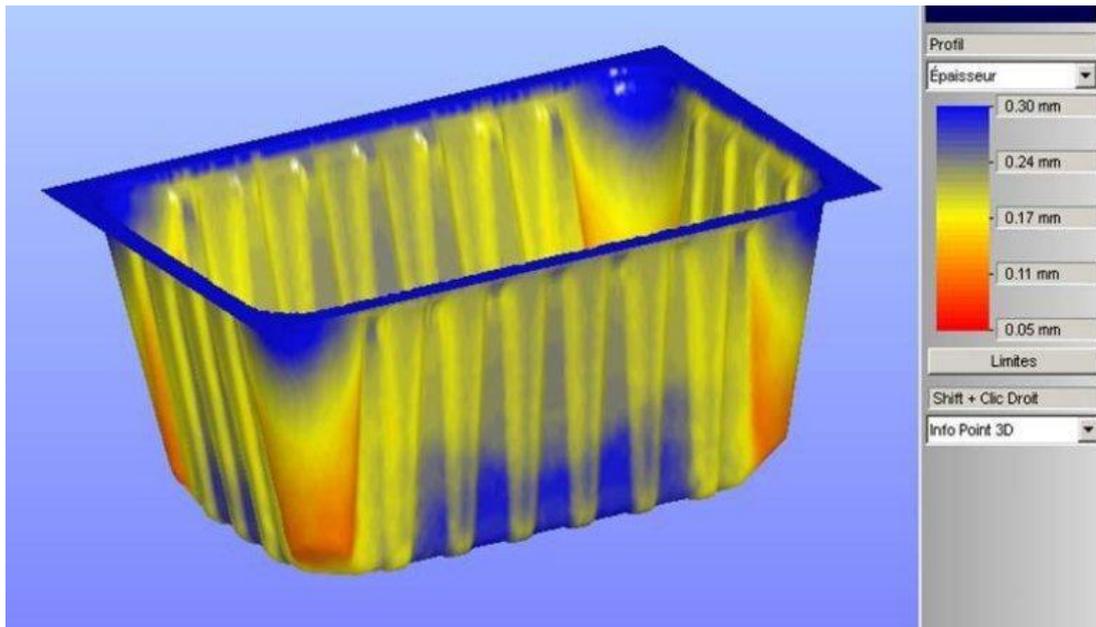


Fig.3: Différence d'épaisseur après thermoformage[3]

Pour affiner l'analyse des résultats, il offre de nombreuses fonctionnalités :

- le raffinement facile du maillage
- l'optimisation de la température initiale de la plaque (fig.4)
- le calcul du temps de refroidissement
- l'export des résultats pour analyse structurale

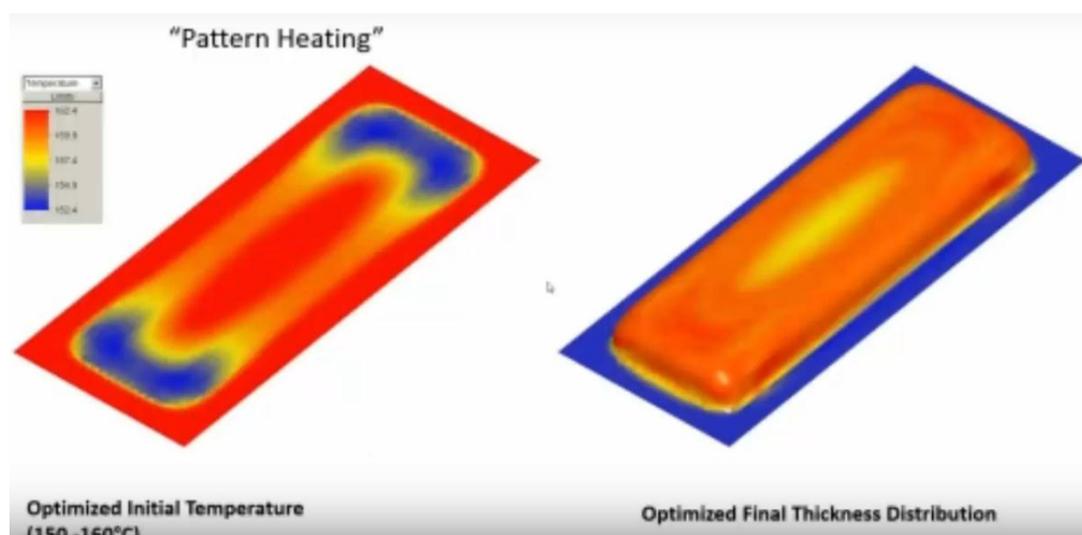


Fig. 4: Optimisation de la température initiale de la plaque

De plus, il propose un module permettant de distordre (fig.5) pré-distordre (fig.6) les images en vue de leur intégration dans le processus de thermoformage.

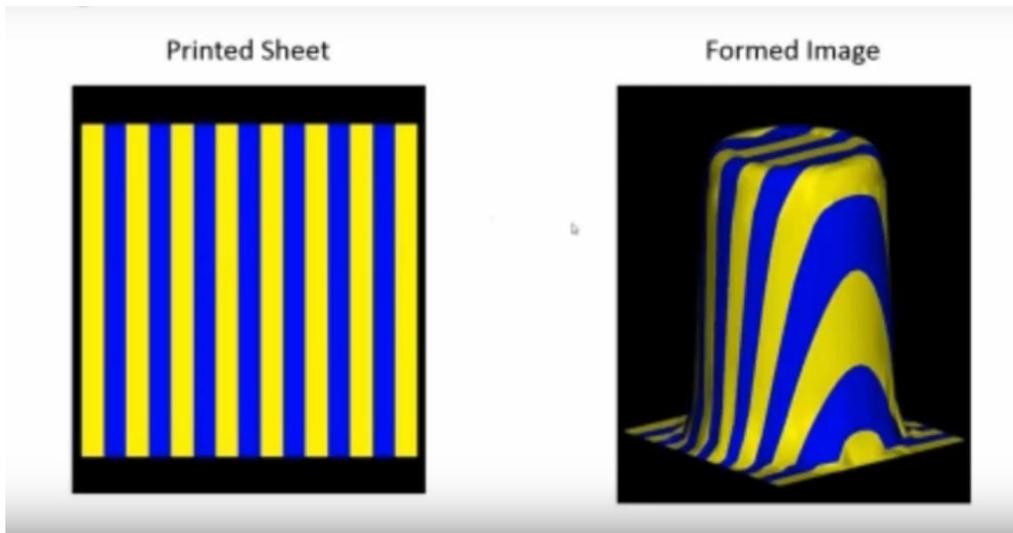


Fig. 5: Distorsion de l'image

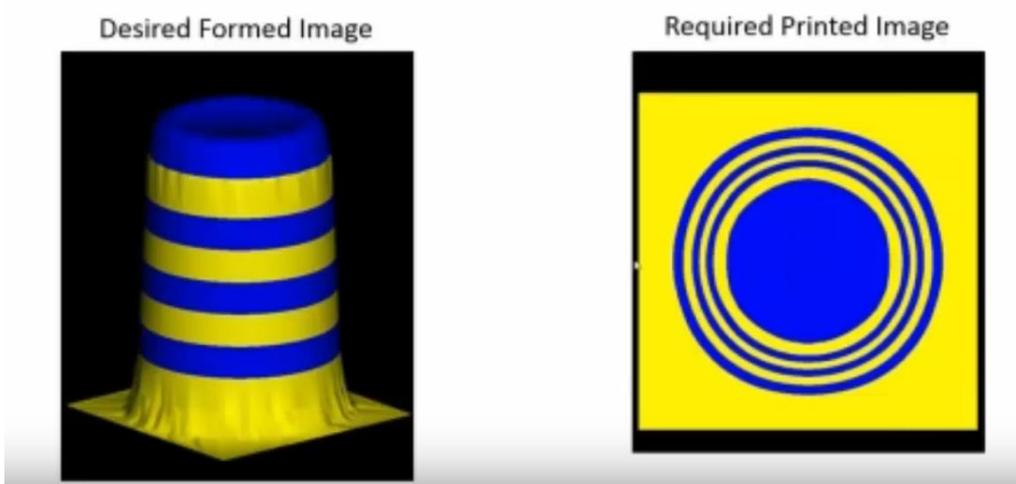


Fig. 6: Pré-distorsion de l'image

4. Conclusion :

T-SIM® s'impose de par la fiabilité de ses résultats, ses fonctionnalités et sa convivialité comme le logiciel de référence pour la simulation professionnelle du thermoformage.

C:\Users\Lakhdar\Desktop\
New folder (3)

Chapitre V :

Etude de cas

1. Introduction :

Dans le cadre de ce chapitre, nous développons, les différentes étapes à suivre afin de vérifier par la simulation, le bon déroulement de diverses séquences de thermoformage d'une pièce.

2. Pièce à réaliser :

La pièce à réaliser est un emballage de « mousse dessert » en **polypropylène** (fig.1). Les caractéristiques dimensionnelles de ce produit sont :

- coté de 60 mm
- hauteur de 60 mm
- épaisseur de 1mm.

Le dessin de définition de cette pièce est donné par figure 2.

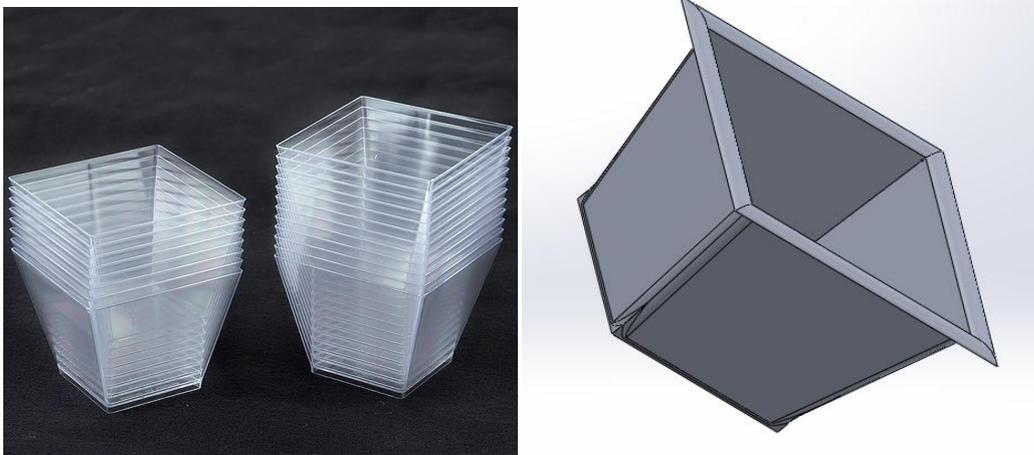


Fig. 1:Pièce étudiée

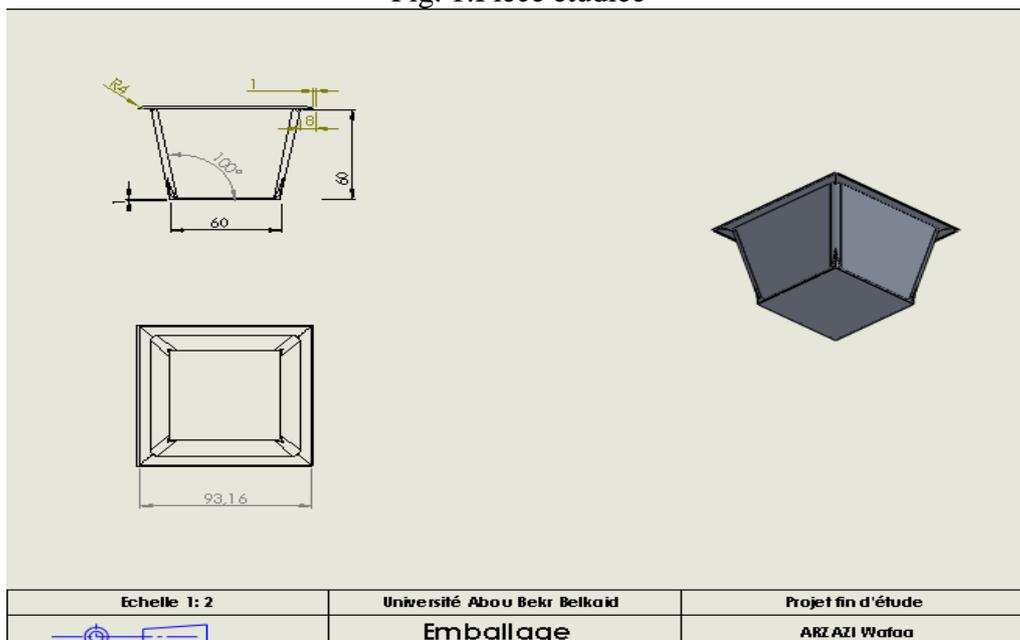


Fig.2: Pièce étudiée en 2D et 3D

2.1 Dimensions de la plaque à thermoformer :

Le matériau de la plaque à thermoformer est le **polypropylène**. C'est un polymère thermoplastique semi-cristallin alimentaire de grande consommation de formule chimique $(-\text{CH}_2-\text{CH}(\text{CH}_3)-)_n$. Le module de Young est de 1,1 à 1,6 GPa et admet un retrait de 1 à 2,5 % [56].

Les tableaux suivant représentent les caractéristiques physiques, thermiques et de thermoformage du matériau.

Tableau 1: Caractéristiques physiques et thermiques [57]

	DIN	Unités	Valeurs
Densité	53479	g/cm ³	0,91
Absorption d'eau à 23 °C HR 50 %	53495	%	0,02
Dureté	53505	Echelle D	73-100
Résilience	53453	KJ/m ²	SR 10
Allongement à la rupture	53455	%	650
Résistance à la traction	53455	N/mm ²	21-37
Module d'élasticité en traction	43457	N/mm ²	1300
Etat à 20°C	-	-	Très dur
T° d'utilisation en continu	52612	°C	-30/+100
T° maxi d'utilisation temporaire	-	°C	140
Point de Fusion	53736	°C	180
Coefficient de dilatation thermique linéaire	52328	10 ⁻⁵ mm/°C	15
T° de déformation sous charge	1,85	N/mm ² - °C	65
Conductivité thermique	52612	W/°C.m	0,22 C

Tableau 2: Caractéristiques de thermoformage[57]

Retrait	1% à 2.5%
T° de thermoformage	150° à 165° C

- **Détermination des marges**[58]:

La détermination des dimensions de la plaque, débute par la définition des marges. Pour notre cas, la marge nécessaire entre le bord intérieur du cadre et le bord de la pièce doit être égale au **1/10** de la largeur et de la longueur de la pièce .

La longueur et la largeur de la pièce étudiée sont identiques car la boîte est de forme carrée

$$A = 2 \text{ marges} + \text{Largeur} \quad (1)$$

$$A = 2 \times 0.1 L + L = L(0.2+1)$$

$$A = 93.16 (0.2+1)$$

$$A = 111.792 \text{ mm}$$

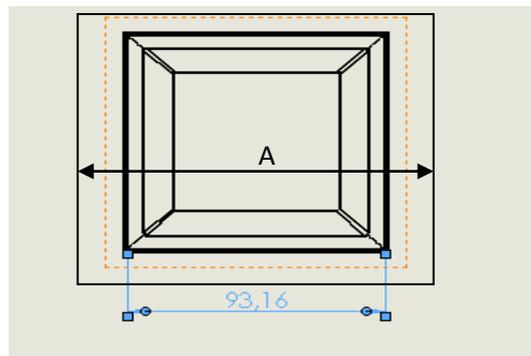


Fig. 3 : Dimensions de la plaque

La surface de la feuille intérieure avant formage « s » :

$$s = A^2 \quad (2)$$

$$s = 12486.72 \text{ mm}^2$$

La surface totale développée de la pièce à l'intérieur après formage « S »:

Elle est déterminer par solidworks : cliquer outil \rightarrow propriétés masse

$$S = 46470.66 \text{ mm}^2$$

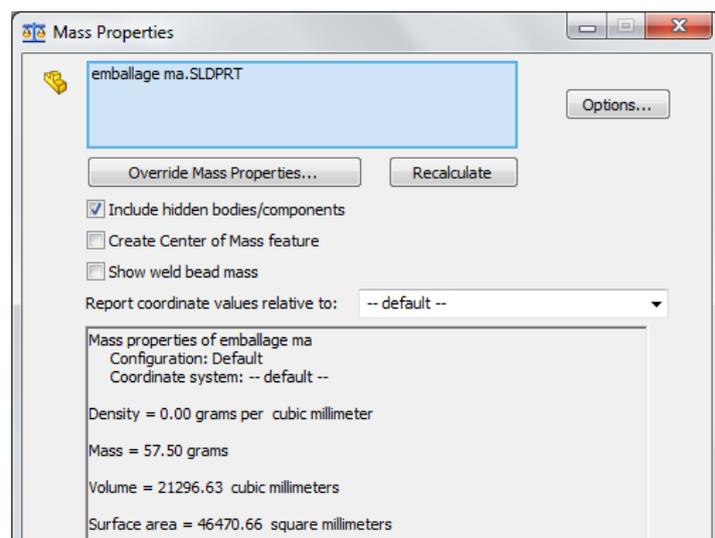


Fig.4: fenêtre propriétés masse

- **Détermination de l'épaisseur de la feuille :**

Elle est déterminée par la formule suivante :

$$E=C \times R \times e \quad (3)$$

Avec :

E : épaisseur de la plaque

$$C : \text{constante} \begin{cases} = 1.3 \text{ pour le formage négatif} \\ = 1.2 \text{ pour le formage positif} \end{cases}$$

R : rapport d'étirage

e : épaisseur de la pièce finie = 1 mm

Pour notre cas présent, nous avons :

- Le formage choisi négatif : $C=1.3$
- Le rapport d'étirage : $R = S/s = 3.74$ (4)

On trouve : $E = 4.86 \text{ mm}$

- **Le temps de chauffage :**

Calculé suivant la formule :

$$T= \varepsilon \times M / (P \times r) \quad (5)$$

T : temps en s

P : puissance de chauffe en W

ε : enthalpie en J/g

M : masse en g

r : rendement

On a :

$$M= s \times E \times \rho \quad (6)$$

$$M=12486.72 \times 10^{-2} \times 4.86 \times 10^{-1} \times 0.91= 55.22 \text{g}$$

E: épaisseur de la plaque en cm

s : surface de la plaque en cm^2

ρ : la masse volumique de la plaque en g/cm^3

On prend :

$$r=0.42$$

$$P=11000w$$

$$\varepsilon=165 \text{ J/g}$$

Donc le temps de chauffage est :

$$T= 165 \times 55.22 / (11000 \times 0.42) = 1.97 \text{ s}$$

2.3 Création du moule :

Le matériau utilisé pour le moule est l'aluminium sans éléments d'addition **1050A**. Les alliages de la série 1000 sont constitués d'aluminium pur à 99% ou plus. Cette série présente une excellente résistance à la corrosion, une excellente maniabilité, ainsi qu'une haute conductivité thermique et électrique[59].

Tableau 3: Propriétés physiques des alliages d'aluminium [60]

Alliages	Masse Volumique Kg/dm3	Intervalle de fusion * Approximatif en C°	Coefficient de dilatation linéique °c-1*10 ⁶	Capacité thermique massive ** J/Kg°C
1050A	2.7	646 - 657	23.6	945
2011	2.83	540 - 645	23.2	905
2014	2.8	508 - 635	22.5	920
2017A	2.79	510 - 640	23.0	920
2024	2.77	500 - 638	22.9	920

Le moule est un moule femelle avec les caractéristiques suivantes :

- **Cavité à vide** : pour une épaisseur de 4.86 mm le diamètre de la cavité à vide = 1mm
- **Angles de dépouille** : angle = 10° qui vérifie la condition 2° < angle de dépouille < 30°
- **Rayons d'angle** : $R \approx$ épaisseur de la feuille et $R > 0.8$ mm, on prend $R=4$ mm.

- **Etapes de la création du moule par SW :**

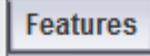
- ✓ **Création de l'empreinte :**

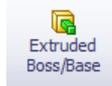
- Phase 1 :**

Nous énumérons quelques étapes et outils pour le dessin 2D ainsi que le 3D du moule

Pour la création du 2D, Choisir le plan de dessus → cliquer esquisse 

cliquer  → Cliquer  et faire entrer les cotations.

Pour la création du 3D, Cliquer fonctions  → cliquer bossage extrudé



→ Cliquer dépouille et faire entrer un angle de 10° (fig.5)

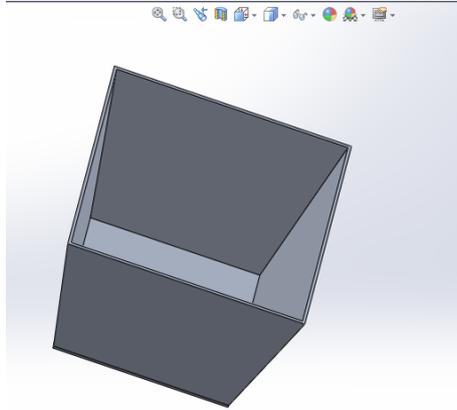


Fig.5: Phase 1 de la création du moule en 3D

Pour l'analyse de la dépouille on clique sur l'outil : analyse de dépouille

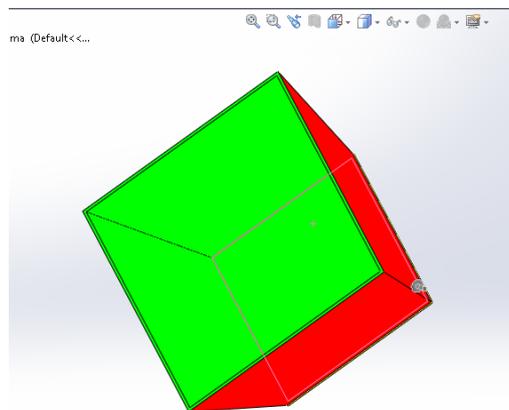


Fig.6: Analyse de la dépouille

Puisque la couleur du moule est verte alors on peut faire le démoulage sans aucun problème.

Remarque :

- La couleur verte est donnée pour les dépouilles positives du moule.
- La couleur rouge pour les dépouilles négatives (opposé au sens de démoulage).
- La couleur jaune est donnée pour le moule nécessitant une dépouille.

L'exemple est donné en figures 7 et 8.

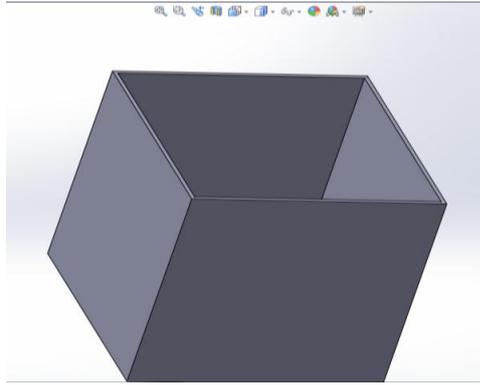


Fig.7 : Pas d'angle de dépouille

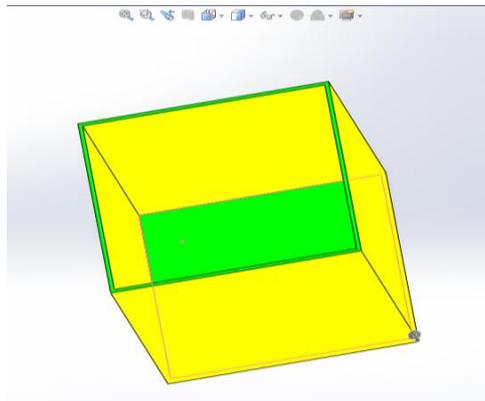


Fig.8 : Forme de couleur jaune nécessite une dépouille

Phase 2 :

Créer un nouveau plan en cliquant sur  (fig.9)

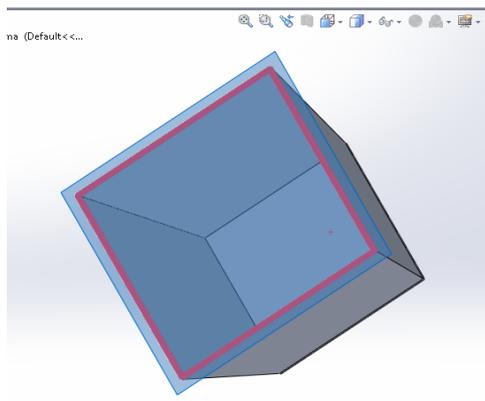


Fig.9 : création d'un nouveau plan

Choisir le plan de face cliquer esquisse  → dessiner la forme en (fig.10)

Cliquer  et faire entrer les cotations.

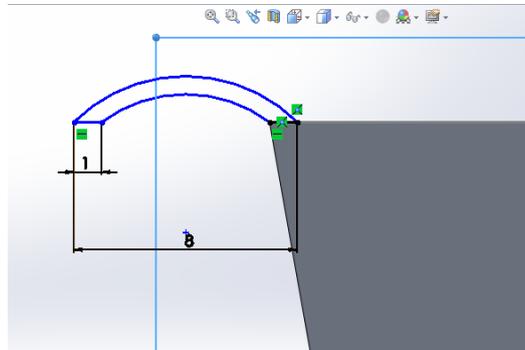


Fig.10 : création de la forme des bordures

Choisir le nouveau plan et cliquer  → cliquer  (fig.11)

✓ **Le corps du moule :**

Cliquer  **Shut-Off Surface2** pour fermer le vide (fig.11)

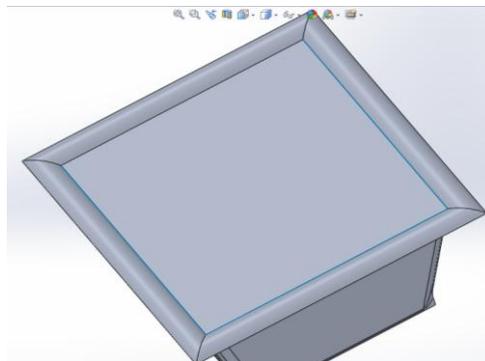


Fig.11: création du corps du moule

Cliquer  **Parting Line2** pour créer la ligne de joint entre les deux parties du moule (fig.13)

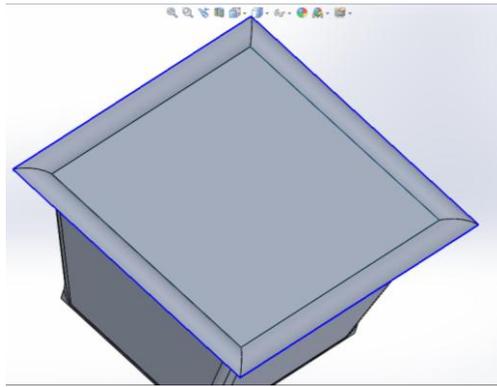


Fig.12: création des lignes de joint

Cliquer  ensuite dessiner un rectangle sur cette surface et faire entrer les cotations(fig.13)

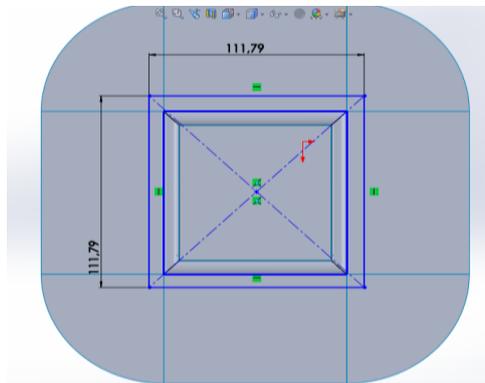


Fig.13:création des surfaces de joint

Cliquer  outil moule ensuite enregistrer les corps en cliquant sur  Solid Bodies(3) dans l'arbre de création puis ouvrir le moule dans un nouveau fichier

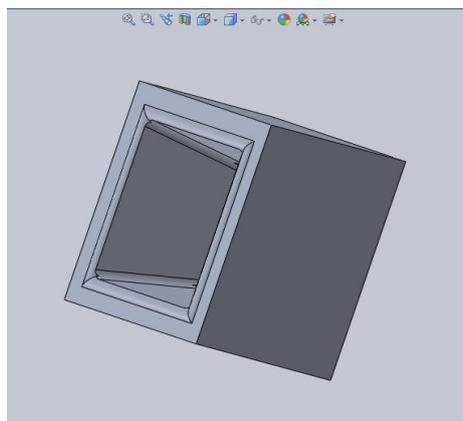
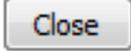
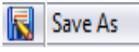


Fig.14 : moule d'emballage

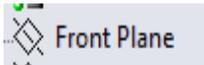
Pour appliquer le matériau au moule, cliquer  Material dans l'arbre de création cliquer éditer le matériau → cliquer  Aluminium Alloys → choisir  1060 Alloy car

le 1050A ne figure pas dans la liste → cliquer  ensuite 

Pour enregistrer cliquer  → faire entrer le nom de fichier « moule » et choisir le type  et cliquer 

2.4 Création du poinçon :

La conception est faite par le logiciel SW

Choisir le plan de face  → cliquer esquisse  → cliquer

 → Cliquer  et entrer les cotations données.

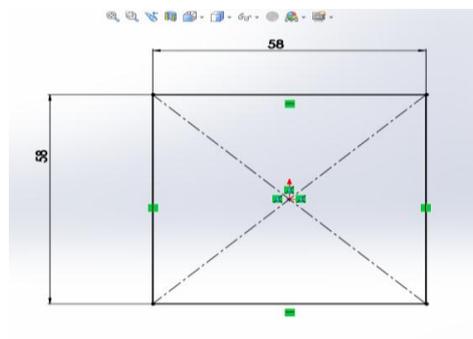


Fig.15: Dessin du poinçon

Cliquer fonctions  → cliquer bossage  → Cliquer dépouille et faire entrer un angle de 10° → Cliquer  et faire entrer 10mm

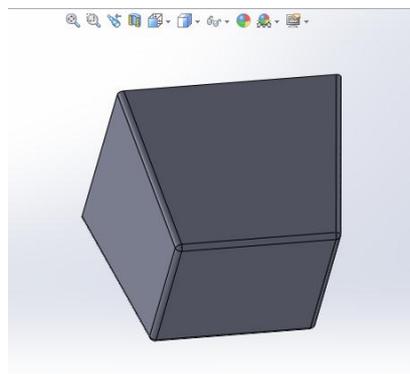
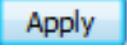
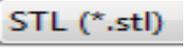
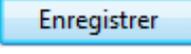


Fig.16: création du poinçon en 3D

Pour appliquer le matériau au poinçon cliquer  **Material** dans l'arbre de création cliquer éditer le matériau → cliquer  **Aluminium Alloys** → choisir  **1060 Alloy**
 cliquer  ensuite 

Pour enregistrer cliquer  **Save As** → faire entrer le nom de fichier « poinçon » et choisir le type  **STL (*.stl)** et cliquer .

3. Simulation par T-SIM :

Afin de simuler le processus de thermoformage sous le logiciel T-SIM, il faut créer un projet contenant les liens vers les différents fichiers nécessaires :

- Le fichier contenant les informations sur l'outillage
- Le fichier contenant les informations sur la plaque
- Le fichier contenant les informations sur le processus
- Le fichier contenant les informations sur les coefficients thermiques et de frottements
- Le fichier contenant les informations sur le matériau

3.1 Fichier outillage :

On va utiliser deux outils :

- Le premier comme moule supérieur
- Le second comme moule inférieur.

• Outil 1 (moule supérieur) :

Cliquer nouveau outil  → cocher  **Import new tool from STL file** → cliquer ok
 Choisir « emballage » dans la fenêtre ouvrir et cliquer ouvrir.

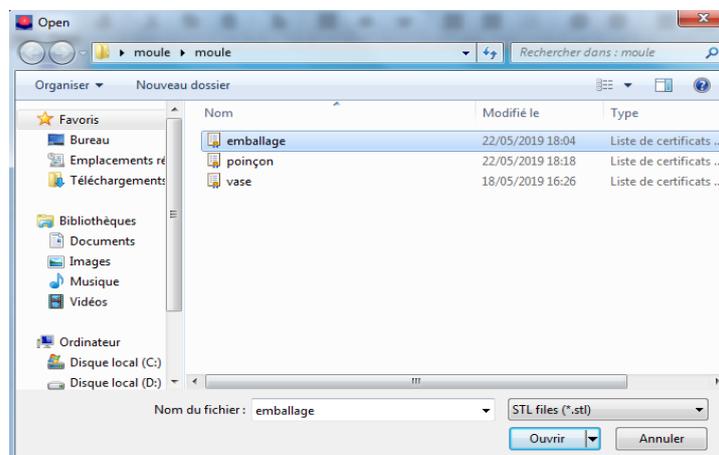


Fig. 17: Fenêtres à ouvrir

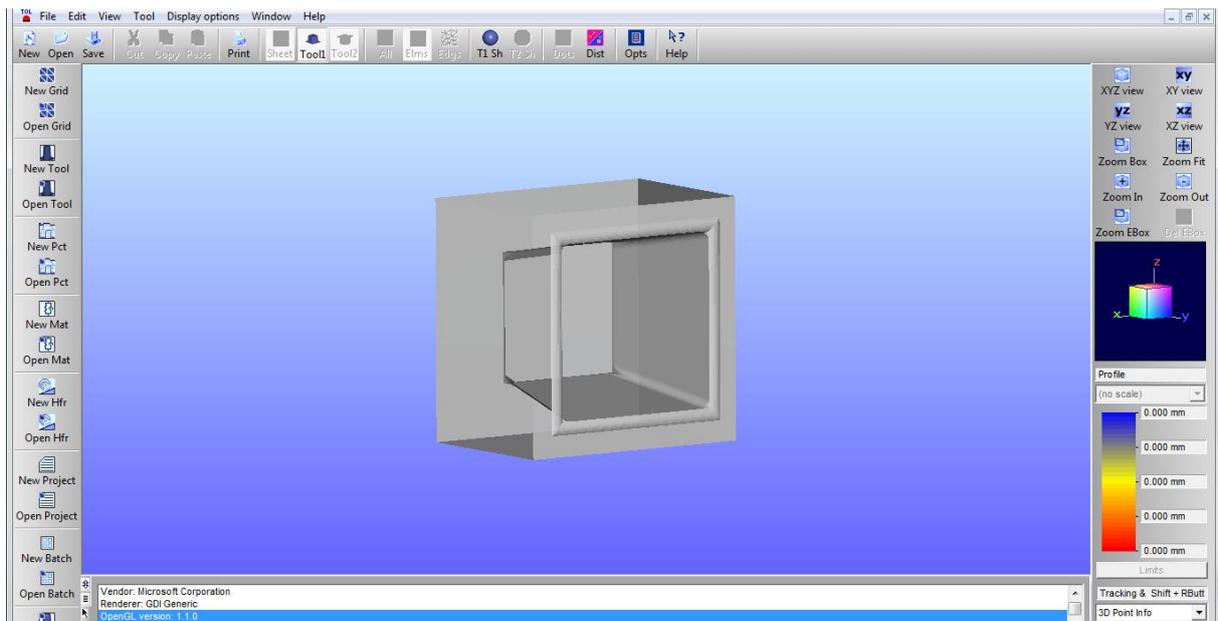
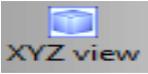


Fig. 18 : Outil 1

Remarque 1:

On peut changer les vues en cliquant sur  ,  ,  ou 

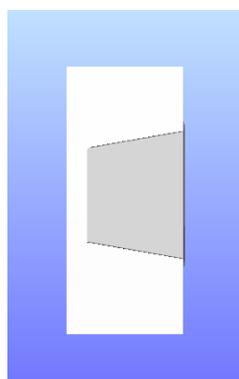
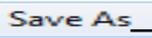


Fig. 19: Outil 1 en vue XY

Cliquer fichier  → enregistrer sous  → faire entrer le nom de fichier « tool1 » → cliquer enregistrer.

- **Outil 2 (moule inférieur) :**

Cliquer nouveau outil  → cocher  → cliquer ok
 Choisir « poinçon » dans la fenêtre ouvrir et cliquer ouvrir.

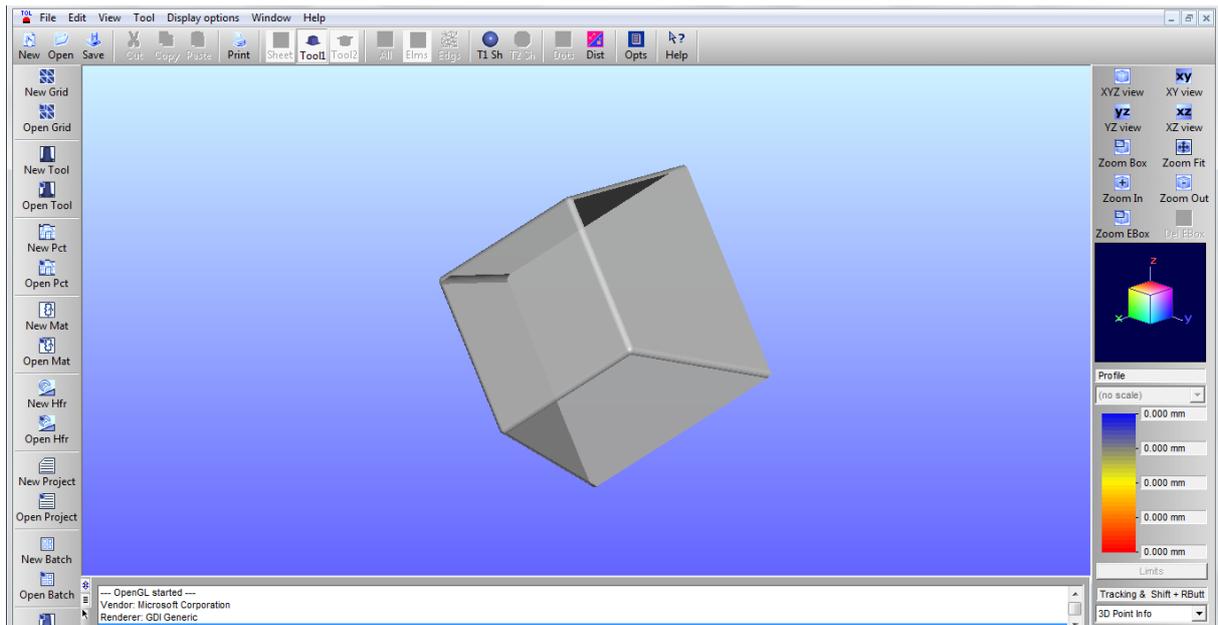


Fig.20: Outil 2

Cliquer fichier **File** → enregistrer sous **Save As** → faire entrer le nom de fichier « tool2 » → cliquer enregistrer.

Remarque 2 : On constate que l’icône de l’outil 1  qui désigne le thermoformage négatif est active.

Pour un thermoformage négatif l’outil 2 (poinçon) doit être sous la plaque. Donc il faut le déplacer vers le bas.

On doit, d’abord, connaître les coordonnées de l’outil 2 : Cliquer **Tool** → **Properties**

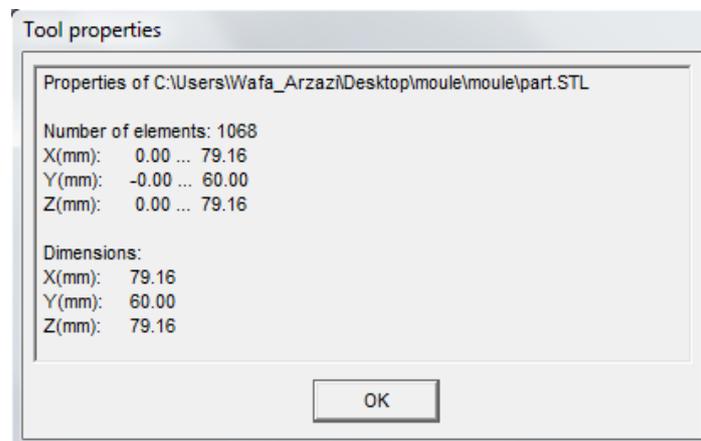


Fig.21: Propriétés de l'outil 2

Le max de l'outil 2 est en $z = 79.16$ mm et le min en $z = 0$ mm.

Donc il faut le déplacer vers le bas de 79.12mm.

Pour cela, cliquer **Tool** → **Move** → modifier le Z (fig.21) → cliquer ok

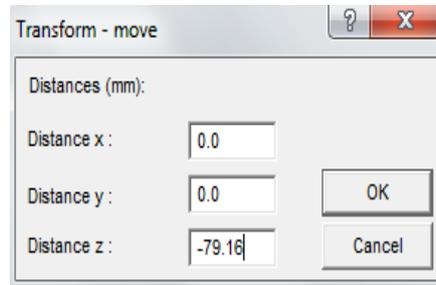


Fig.22 : Déplacement de l'outil 2

Cliquer enregistrer pour sauvegarder le déplacement de l'outil 2.

Pour vérifier les modifications: Cliquer **Tool** → **Properties**

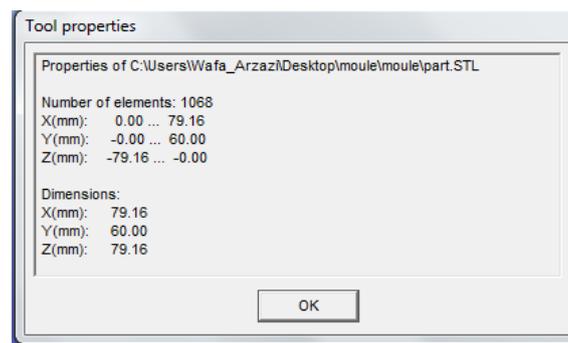


Fig.23: Coordonnées modifiées

3.2Fichier plaque :

Pour créer une plaque, il suffit de cliquer **New Grid** et remplir la fenêtre qui apparait par les dimensions calculées (A). La température utilisée est celle moyenne de thermoformage puis cliquer « create »

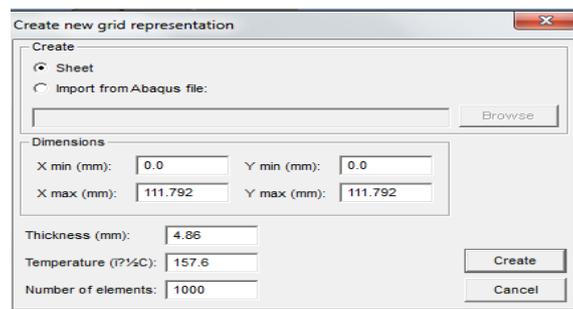


Fig. 24: Création de la plaque

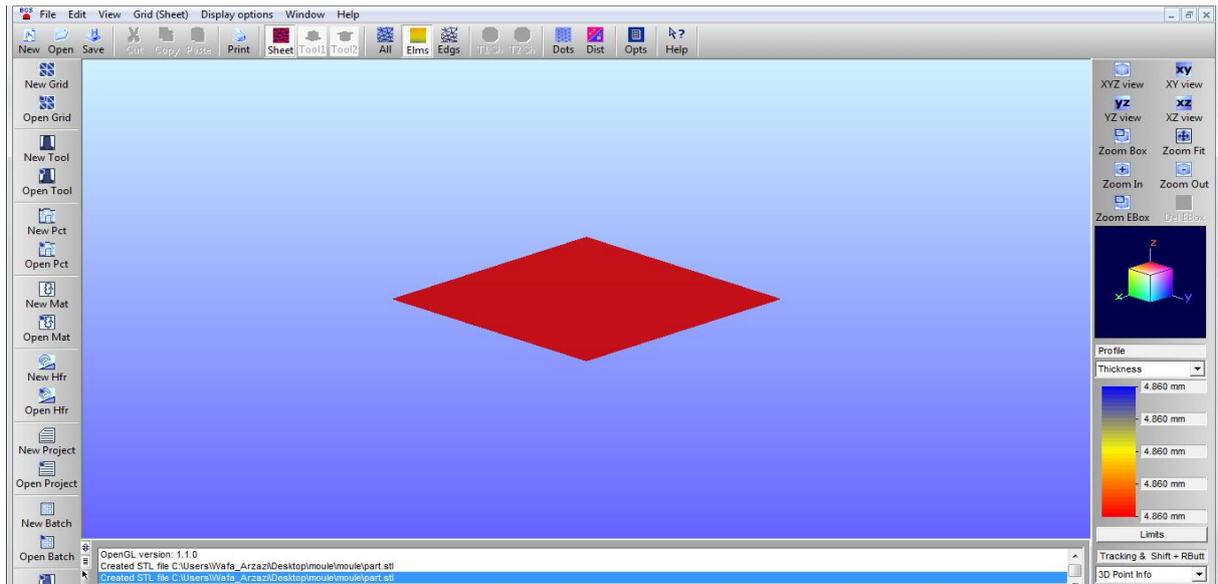


Fig.25: Interface T-SIM de la plaque à thermoformer

Cliquer fichier **File** → enregistrer sous **Save As** → faire entrer le nom de fichier « plaque » → cliquer enregistrer.

3.3 Fichier contrôle de processus :

L'outil 1 (moule supérieur) est au-dessus de la plaque, il ne bouge pas.

L'outil 2 (moule inférieur) commence son mouvement sous la plaque. Une fois aboutissant sa position finale, une pression est appliquée pour gonfler la plaque.

Pour cela cliquer  **New Pct**

	t (ms)	P (kPa)	T1 (mm)	T2 (mm)
1	0	0	0	0
2	200	0	0	79.16
3	500	50	0	79.16

Fig.26 : Déplacement de l'outil 2

L'outil 1 (T1) ne bouge pas alors sa colonne est nulle, l'outil 2 (T2) bouge de Z=79.16 mm

Cliquer  **Settings** pour dessiner le graphe qui montre le comportement du processus de thermoformage (fig.27) :

- L'outil 1 (T1) reste immobile lors du processus (courbe en beige)

- L'outil 2 (T2) bouge de 200 ms jusqu'à la fin du processus d'une valeur constante de 79.16 mm (courbe en bleu)
- La pression croit de 0 à 50 kPa à la fin du processus (courbe en rouge)

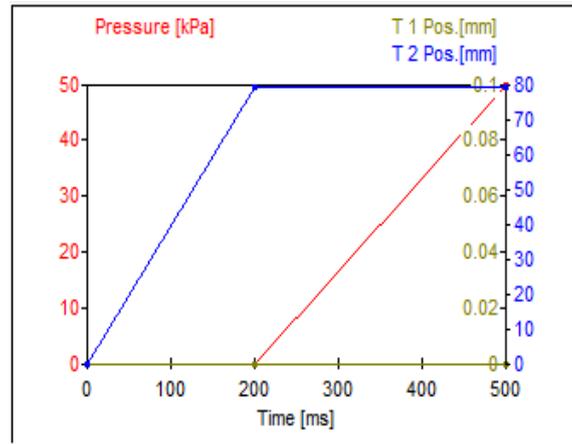


Fig.27 : Comportement du processus de thermoformage

Il faut au préalable spécifier le comportement des outils (supérieur ou inférieur) (figure 29)

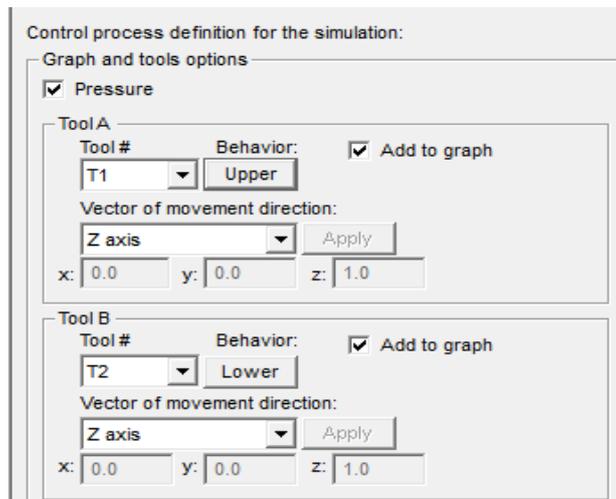


Fig.28 :Options des outils

Cliquer fichier **File** → enregistrer sous **Save As** → faire entrer le nom de fichier
 « controle de processus » → cliquer enregistrer.

3.4 Fichier coefficient thermique et coefficient de frottement :

Pour cela, cliquer  → reporter les informations nécessaires dans la fenêtre suivante :

Cliquer « apply to all » car les deux outils ont les mêmes coefficients

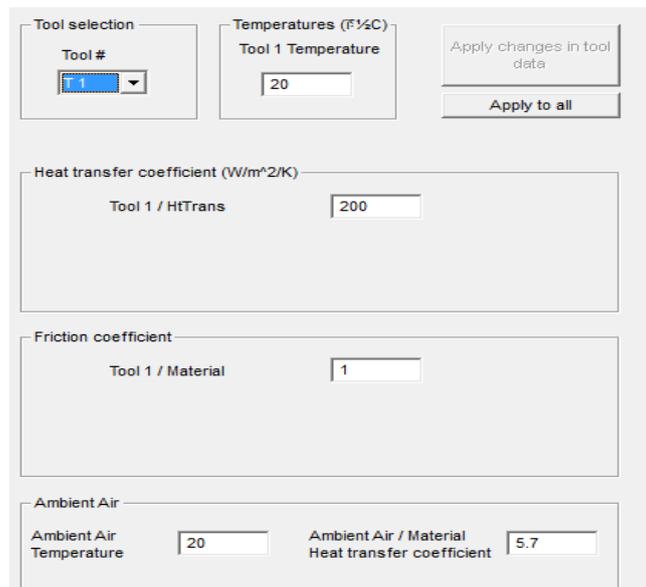


Fig. 29: Coefficient thermique et de frottement

Cliquer fichier **File** → enregistrer sous **Save As** → faire entrer le nom de fichier « coefficients » → cliquer enregistrer

3.5 Fichier matériau :



Il suffit de cliquer **New Mat**, pour la description du matériau cliquer « help » et choisir le matériau. Les autres propriétés vont apparaître automatiquement.

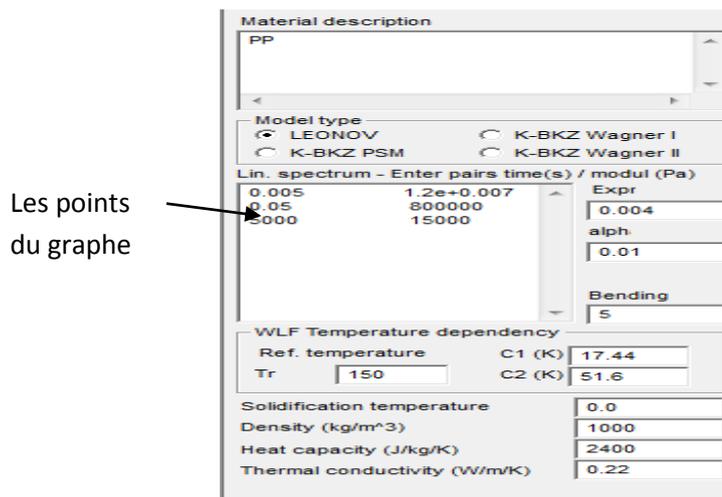


Fig.30: Propriétés du matériau

En cliquant « Repaint » un graphe de contrainte-déformation va apparaître

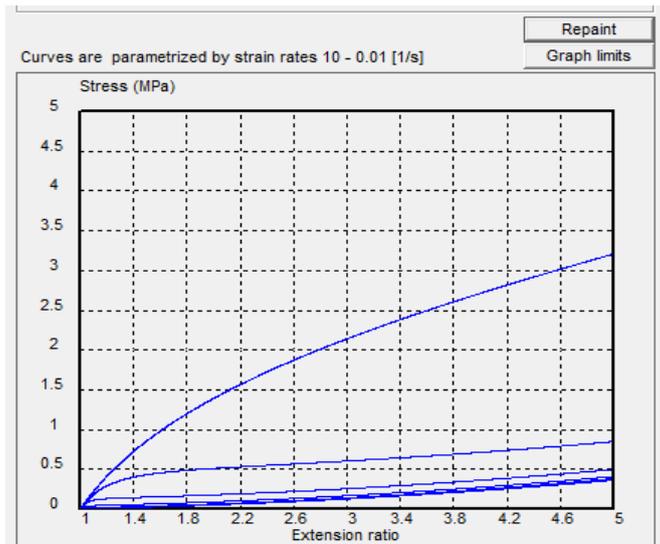


Fig. 31: Graphe contrainte-déformation

Cliquer fichier **File** → enregistrer sous **Save As** → faire entrer le nom de fichier « matériau » → cliquer enregistrer

3.6 Simulation du projet :

Pour cela cliquer  et faire entrer les paramètres suivants:

Tableau 4: Paramètres du projet

Fichier plaque	 plaque.bcs
Fichier outil 1	 tool1.tol
Fichier outil 2	 Tool2.tol
Fichier control de processus	 control de processus.pct
Fichier matériau	 matériau.vie
Fichier coefficient thermique et de frottement	 coefficients.hfr

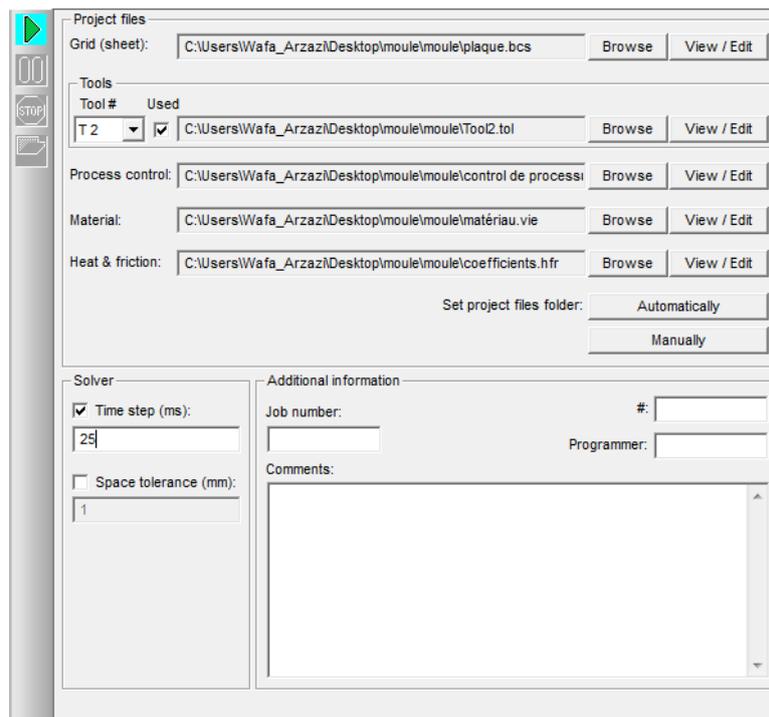


Fig.32 : Fenetre nouveau projet

Cliquer à chaque étape « browse » pour ouvrir les six fichiers paramètres

Cliquer fichier **File** → enregistrer sous **Save As** → faire entrer le nom de fichier « projet » → cliquer enregistrer.

Pour la simulation, il suffit de cliquer l'icone .

3.7 Confirmation de la simulation :

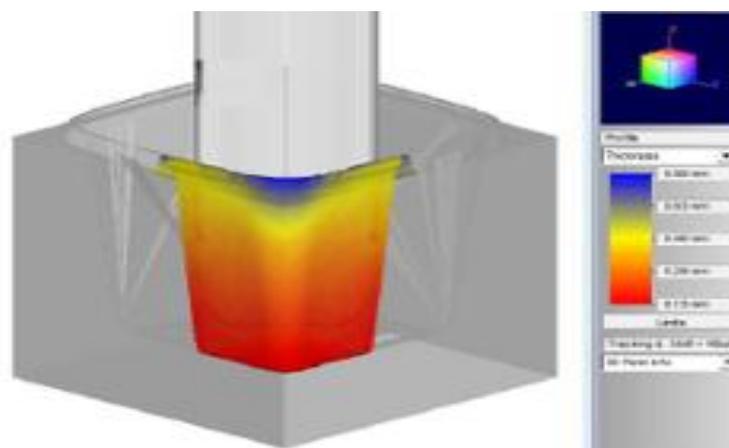


Fig.33 : solution du projet

Les trois couleurs (rouge, bleue et jaune) montrent la différence d'épaisseur de la plaque après thermoformage suivant une échelle (fig.33) :

- Le rouge indique les parties les plus minces ;
- Le bleu , celles les plus épaisse ;
- Et le jaune, pour les parties d'une épaisseur moyenne.

Le solveur de la simulation nous donne aussi les informations suivantes :

- Le temps estimé dans le contrôle de processus;
- La pression définie dans le contrôle de processus;
- Le volume de la feuille thermoformée ;
- Le progrès de la configuration de la matrice de chaque élément;
- L'avancement global de la solution du projet.

4. Conclusion :

La réussite du processus à réaliser nécessite la réunion des étapes citées précédemment, connaissance approfondie des paramètres du moule, facteurs techniques, et la maîtrise des outils de conception et de simulation.

Conclusions générales et perspectives

Dans le cadre de ce projet nous développons les différentes étapes de conception d'un moule de thermoformage sous le logiciel solidworks et de simulation du processus de fabrication sous le logiciel T-SIM. L'analyse menée dans ce travail a permis de déduire les constatations suivantes :

- Il existe différents procédés d'usinage pour obtenir des pièces
- Le thermoformage consiste à prendre un matériau sous forme de plaque ou de feuille, à le chauffer pour le rendre plus malléable, et à profiter de cette ductilité pour le mettre en forme à l'aide d'un moule.
- Le choix du moule dépend de plusieurs facteurs tels que les dimensions, les conditions de démoulage et le matériau thermoformé.
- Le polypropylène est un polymère très utilisé dans ce domaine grâce à ses propriétés favorables.
- L'aluminium, avec ses caractéristiques mécaniques et son adaptation à l'usinage, reste le meilleur matériau qu'on puisse utiliser pour le moule,
- Avant de lancer une production, on devrait d'abord réaliser des prototypes virtuels qui seront susceptibles de concevoir la pièce sous CAO et simuler son processus de fabrication afin d'éviter les erreurs et assurer des résultats adéquats.

La réalisation d'un projet quelconque nécessite une étude sereine, profonde et qui dure dans le temps afin d'approfondir la recherche et atteindre des meilleurs résultats à l'avenir.

Bibliographie

- [1][http:// fr.wikipedia.org /procédées de fabrication](http://fr.wikipedia.org/procédées%20de%20fabrication)
- [2]<https://fr.wikipedia.org/wiki/Fraisage>
- [3][http://fr.wikipedia.org/wiki/tournage mécanique](http://fr.wikipedia.org/wiki/tournage%20m%C3%A9canique)
- [4]<http://www.pmgmassieux.fr/wp-content/uploads/2015/03/tournage800x600.gif>
- [5][http://fr.wikipedia.org/wiki/perçage](http://fr.wikipedia.org/wiki/per%C3%A7age)
- [6][http://fr.wikipedia.org/wiki/alésage](http://fr.wikipedia.org/wiki/al%C3%A9sage)
- [7]<https://thumbs.gfycat.com/AlarmingMiniatureHairstreak-poster.jpg>
- [8]<http://fr.wikipedia.org/wiki/brochage>
- [9]http://www.bertholet-ribouleau.com/images/anim_brochage.gif
- [11]<https://eduscol.education.fr/sti/sites/eduscol.education.fr.sti/files/formations/2017-bts-mise-en-forme-des-materiaux-par-forgeage/images/2017-bts-mfmf-01.jpg>
- [12]<http://fr.wikipedia.org/wiki/estampage>
- [13]<https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images>
- [14][http://eduscol.education.fr/le matriçage](http://eduscol.education.fr/le%20matri%C3%A7age)
- [10]<http://fr.wikipedia.org/wiki/forgeage>
- [15]<https://eduscol.education.fr>
- [16]<http://fr.wikipedia.org/wiki/filage>
- [17]<https://www.technologuepro.com>
- [18]<https://www.technologuepro.com/cours-moulage/12-moulage-en-sable.pdf>
- [19]<https://i.ytimg.com/vi/maxresdefault.jpg>
- [20][http://eduscol.education.fr/moulage en coquille](http://eduscol.education.fr/moulage%20en%20coquille)
- [21]https://fr.123rf.com/photo_30949722_moule-%C3%A0-matrice-m%C3%A9tallique-industrielle-font-de-fer-d%C3%A9blanc-de-silencieux-fraisage-tour-et-de-l-indust.html
- [22]<http://fr.wikipedia.org/wiki/soudage>

- [23]<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/a/aa/GMAW.welding.af.ncs.jpg/225px-GMAW.welding.af.ncs.jpg>
- [24]<http://fr.wikipédia.org/wiki/collage>
- [25]<https://www.sts24.net/ressources/images/fce7cb8a76c9.JPG>
- [26]<http://www.planète-tp.com/boulonnage>
- [27]<https://tse3.mm.bing.net>
- [28]<http://fr.wikipédia.org/wiki/rivetage>
- [29]<https://thumbs.dreamstime.com/z/rivetage-34590283.jpg>
- [30]<http://fr.wikipédia.org/wiki/frettege>
- [31]<https://fr.wikipedia.org/wiki/lectro-érosion>
- [32]<http://www.communique-en-folie.fr/wp-content/uploads/2017/07/electroerosion.jpg>
- [33]https://fr.wikipedia.org/wiki/Découpe_laser
- [34]https://fr.w.ikipedia.org/wiki/découpage_jeteau
- [35]<http://techniques de fabrication conventionnelles et avancées.pdf>
- [36]<http://www.thermofomage.com/transformation de matière plastique>
- [37]<http://www.idverre.net/veille/dostec/thermoformage/definition.jpg>
- [38]J.GOSSOT, les matières plastique fabrication technologie, BORDAS, Paris, 1977.
- [39]<http://www.thermoformage.com/images/fig401.jpg>
- [40]<http://www.velfor.com/wp-content/uploads/2016/02/Schema-thermoformage-forte-epaisseur-1024x396.jpg>
- [41]<http://www.thermoformage /accueil/moules à thermoformer>
- [42]<https://www.dsystems.fr/img/savoir-faire/moule-silicone/silicone2a.jpg>
- [43]<https://encrypted- tbn0.gstatic.com/images>
- [44]<data:image/jpeg>
- [45]<http://www.thermoformage.com/images/fig406.jpg>
- [46]<https://docplayer.fr/47737473-Les-regles-de-trace-des-pieces-moulees-cyclatef-2015-f-mollet.html>

- [47] <https://conceptec.net/techniques-de-base/conception/moules-et-outils/296-le-retrait-des-pieces-apres-le-moulage>
- [48] <http://thème.bejaia.pdf>
- [49] <http://www.openclassrooms.com/acceuil/cours/apprenez-à-utiliser-solidworks/presentation-et-preparation-de-solidworks>
- [50] <http://dassaultsystemes.com/solidworks/introduction-à-solidworks.pdf>
- [51] <http://ft.univ-tlemcen.dz/département-hydroinformatique/cours/chapitre2-DAO>
- [52] <http://maths.ip-spirales.ac-orleans-tours.fr/php5/articles/recherche/spirales/sp5-06-doc/démarches-et-méthodes>
- [53] <https://www.cadflow.fr/index>
- [54] <http://www.youtube.com/T-SIM-webinar>
- [55] <https://www.knauf-industries.com/wp-content/uploads/2018/02/image-manquante-1-768x425.jpg>
- [56] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Polypropylène>
- [57] http://sii-technologie.ac-rouen.fr/Microtechniques/BTS_CIM/Moule_Attache_Pin/export.pdf
- [58] <http://baccalauréat-professionnel-plastique-et-composites/sciences-et-technologie/session-2014/ressources.pdf>
- [59] <http://ceal-aluquebec.com/alliage-et-application>
- [60] <http://www.metaux-detail.com/pdf/caracteristique/PROPRIETESPHYSIQUESDES-ALUMINIUM.pdf>

Glossaire

Conception : inventer, développer et commercialiser.

Contrainte : les forces exercées par les éléments d'un milieu les un sur les autres par unité de surface.

Déformation : la variation de dimension relative d'une pièce.

Dessin de définition : présentation d'une pièce projetée sur un plan avec tous les détails.

Logiciel : un ensemble de séquences d'instructions interprétables par une machine.

Matrice : tableau de nombres.

Mold tool : outil de moule.

Processus : un ensemble d'activités corrélées.

Simulation : étude des résultats d'une action sur un élément sans réaliser l'expérience sur l'élément réel.

Viscoélastique : la propriété de matériaux qui présentent des caractéristiques à la fois visqueuses et élastiques.

ملخص

يعرض العمل عمليات تصنيع الآلات في التصنيع الميكانيكي مع شرح لتقنيات الحصول على الاجزاء. التشكيل الحراري هو أسلوب ينطوي على أخذ مادة في شكل صحيفة وتسخينها لتليينها والاستفادة من هذه الليونة لتشكيلها باستخدام قالب. تصنع القطع مع قوالب إيجابية (اللف) او سلبية (الضغط). تقوم الاطروحة بدراسة وتطوير التصميم الفني لقالب التشكيل الحراري تحت Solidworks نمذجة و تصميم القالب T-SIM ثم محاكاة عملية التشكيل الحراري

RESUME

Le travail présente les procédés d'usinage en fabrication mécanique avec des explications des techniques d'obtention des pièces.

Le thermoformage est une technique qui consiste à prendre un matériau sous forme de plaque, à le chauffer pour le ramollir, et à profiter de cette ductilité pour le mettre en forme avec un moule. Les pièces sont réalisées avec des moules positifs (drapage) ou négatifs (par pression). Le mémoire étudie et élabore une conception technique d'un moule de thermoformage sous SolidWorks (modélisation et conception du moule) puis une simulation réalisée par le logiciel T-SIM (logiciel de simulation de processus de thermoformage).

ABSTRACT

The work presents machining processes in mechanical manufacturing with explanations of techniques for obtaining parts.

Thermoforming is a technique that involves taking a material in the form of a plate, heating it to soften it, and taking advantage of this ductility to shape it with a mold. The pieces are made with positive (draping) or negative (pressure) molds. The dissertation studies and develops a technical design of a thermoforming mold under SolidWorks (modeling and design of the mold) then a simulation realized by the T-SIM software (thermoforming process simulation software).