

République Algérienne démocratique et populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Aklî Mohand Oulhadj

Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées



Département de Génie Mécanique

OPTION: Energétique

Projet de fin d'étude

On vue de l'obtention du diplôme master

THEME

*Analyse théorique et expérimentale d'un circuit
de refroidissement d'un moule d'injection
plastique*

Réalisé par :

M^{lle}: Khaber Imene

M^{lle}: Bouguenna Imane

Promoteur :

Mr. Lattari Kamel

Encadreur :

Mr. Hamadini Aghilas

2018-2019



Remerciements

Nous remercions avant tout DIEU tout puissant, de nous avoir aidé et de nous avoir donné autant de courage et de volonté pour la réalisation de ce travail.

A notre promoteur Mr. Lattari pour toute l'aide précieuse et les orientations constructives qu'il nous a apporté tout au long de ce travail.

A Mr. Karmoun Ali pour son aide au stage.

A Mr. Hamadini pour son aide au cours de ce travail.

A Monsieur le chef de département de Génie mécanique Bouira sans oublier tous nos enseignants pour leurs encouragements.

A tous l'équipe de 'l'ENIEM' Tizi-Ouzou.

A nos famille, amis, collègues et tous ceux qui nous ont soutenus au cours de ce travail.

IMENE _IMANE



Dédicaces

*Au nom de l'amour et
de respect Nous dédions ce modeste travail :
A nos chers parents qui se sont sacrifiés pour que nous grandissions avec
un savoir-faire.*

A Nos chères familles Khaber, Bouguenna et Zennouche

*A mon ami Mouloudj Abd ELghani qu'il m'a aidé de début jusqu'à la
fin de mes études supérieures*

*A mon ami Rafik qu'il m'a aidé de début jusqu'à la fin de mes études
supérieures*

*A tous nos amis avec lesquelles nous avons passés ces bonnes années
Surtout Sabrina, Kahina, Syla, Tasedda et Celina*

*A toute la promotion de génie mécanique 2019 surtout notre amis
Bouazza Djamel et Cherouali Youcef
A tous ceux qui m'aiment et que j'aime.
Je dédie ce modeste travail*

IMENE ET IMANE

Sommaire

| | |
|-----------------------------------|----------|
| Introduction générale..... | 1 |
|-----------------------------------|----------|

Chapitre I

Généralités sur les matières plastiques et le moulage

| | |
|---|---|
| I.1. Introduction..... | 3 |
| I.2. Les matières plastiques | 3 |
| I.2.1 Historique..... | 3 |
| I.2.2. Définition..... | 4 |
| I.2.3. Les types des matières plastiques | 4 |
| I.2.4. Polystyrène choc (PSB)..... | 4 |
| I.2.4.1. Avantages du PSB | 5 |
| I.2.4.2. Inconvénients du PSB..... | 5 |
| I.2.4.3. Différentes applications du PSB..... | 5 |
| I.2.4.4. Forme commerciale du PSB..... | 5 |
| I.2.4.5. Les propriétés thermiques et mécaniques de PSB | 5 |
| I.3. La presse d'injection | 6 |
| I.3.1.Définition | 6 |
| I.3.2. Description | 6 |
| I.3.3. Principe de fonctionnement | 7 |
| I.3.4. Fiche technique d'une presse à injecter | 7 |
| I.4. Définition du moulage | 8 |
| I.4.1. Techniques de moulage | 8 |
| I.4.2. Les différents types des moules | 8 |
| I.5. Moule d'injection | 9 |
| I.5.1. Définition | 9 |

| | |
|---|----|
| I.5.2. Composants d'un moule d'injection plastique | 9 |
| I.5.3. Canaux d'alimentations | 10 |
| I.6. Procédé d'injection | 11 |
| I.6.1. Phase de plastification | 11 |
| I.6.2. Phase de remplissage | 11 |
| I.6.3. Phase de compactage | 12 |
| I.6.4. Phase d'éjection | 12 |
| I.7. Circuit de refroidissement | 12 |
| I.7.1. Différentes formes des circuits de refroidissement | 12 |
| I.8. Conclusion | 13 |

CHAPITRE II :

Présentation du moule

| | |
|---|----|
| II.1. Introduction | 15 |
| II.2. présentation de logiciel SolidWorks..... | 15 |
| II.3.Etapes principale de modélisation du moule | 15 |
| II.4. Présentation des composants du moule | 16 |
| II.4.1. Couvercle boîtier | 16 |
| II.4.2. Empreintes | 17 |
| II.4.3. Portes empreintes | 18 |
| II.4.4. Semelles | 18 |
| II.4.5. Buse d'injection | 19 |
| II.4.6. Bague de centrage | 19 |
| II.4.6.Element standards d'un moule | 19 |
| II.5.Vue d'ensembles du moule | 20 |
| II.6.Circuit de refroidissement | 20 |
| II.7. Conclusion | 22 |

CHAPITRE III

Bilan thermique d'un moule

| | |
|---|----|
| III.1. Introduction | 24 |
| III.2 .formulation d'un problème de transfert de chaleur..... | 24 |
| III.2.1.bilan d'énergie | 24 |
| III.2.2.Expression des différents flux d'énergie..... | 25 |
| III.3. bilan thermique du moule..... | 27 |
| III.3.1. Temps de refroidissement | 27 |
| III.3.2. Temps de cycle..... | 31 |
| III.3.3.Les échanges de chaleur dans un moule | 31 |
| III.4.Calcul de la température de sortie d'eau | 33 |
| III.5.Surface nécessaire des canaux | 34 |
| III.6.Longueur des canaux de refroidissement | 35 |
| III.7.La distance canal-surface moulante | 35 |
| III.8.Entraxe..... | 36 |
| III.9. Conclusion..... | 36 |

CHAPITRE IV

Calcul de vérification

| | |
|---|----|
| IV.1. Introduction | 38 |
| IV.2 .Dimensionnement des circuits de refroidissement | 38 |
| IV.2.1. Temps de refroidissement..... | 38 |
| IV.2.2. Temps de cycle | 38 |
| IV.2.3.Les échanges de chaleur dans un moule | 39 |
| IV.2.4.Calcul de la température de sortie d'eau..... | 41 |
| IV.2.5.Surface nécessaire des canaux | 41 |
| IV.2.6.Longueur des canaux de refroidissement | 42 |

| | |
|---|----|
| IV.2.7.La distance canal-surface moulante | 42 |
| IV.2.8.Entraxe | 43 |
| IV.3.Comparaison des résultats..... | 43 |
| IV.4.Analyse expérimentale du moule sans circuit de refroidissement | 44 |
| IV.5.Conclusion..... | 46 |
| VI. Conclusion générale..... | 47 |
| Références bibliographiques | |
| Annexe 1 : Mise en plan | |
| Annexe 2 : Masse de ma grappe | |
| Annexe 3 : Calcul d'enthalpie | |
| Annexe 4 : Caractéristique thermique d'eau | |
| Annexe 5 : Caractéristique de l'Acier | |

Liste des figures

Figure I.1 : Extraction des matières plastiques

Figure I.2 : Presse d'injection

Figure I.3 : Dessin de définition d'une presse d'injection

Figure I.4 : Moule à deux plaques

Figure I.5 : Moule à trois plaques

Figure I.6 : Moule à tiroir

Figure I.7 : Moule à canaux chauds

Figure I.8 : Constituants d'un moule d'injection

Figure I.9 : Les différents types de canaux d'alimentations

Figure I.10 : Les différents composants de canaux d'alimentations

Figure I.11.a. : Circuits de refroidissement avec plusieurs entrées/sorties

Figure I.11.b. : Circuits de refroidissement en forme de boucle pour le refroidissement d'une pièce cylindrique

Figure I.11.c. : Circuits de refroidissement en forme de serpent

Figure II.1 : Fenêtre principale de SolidWorks

Figure II.2 : Pièce moulée

Figure II.3 : La grappe moulée

Figure II.4 : Les empreintes d'un moule d'injection plastique

Figure II.5 : Vue d'ensemble des portes empreintes

Figure II.6 : Semelle fixe

Figure II.7 : Vue de coupe d'une buse d'injection

Figure II.8 : La bague de centrage

Figure II.9 : L'assemblage d'un moule d'injection plastique

Figure II.10 : Forme et trajectoire du circuit de refroidissement partie fixe

Figure II.11 : Forme et trajectoire du circuit de refroidissement partie mobile

Figure II.12 : Position des canaux de refroidissement conditionné par celle des éjecteurs

Figure III.1 : Système et bilan énergétique

Figure III.2 : Schéma d'une plaque avec température imposée en surface

Figure III.3 : échanges de chaleur dans un moule d'injection

Figure III.4 : Schéma explicatif de la distribution de température dans l'empreinte du moule

Figure III.5: Schéma explicatif de position d'entraxe dans une empreinte

Figure IV.1: L'influence des éjecteurs sur l'entraxe

Figure IV.2: Evolution de la température de l'empreinte et du porte-empreinte en fonction du nombre de cycle

Figure IV.3: Evolution de la température de l'empreinte en fonction du nombre de cycle

Figure A.1 : La grappe moulée

Figure A.2 : Variation d'enthalpie des polymères en fonction de la température

Liste des tableaux

Tableau I-1 : Propriétés mécaniques du Polystyrène choc

Tableau I-2 : Propriétés thermiques de Polystyrène choc

Tableau I.3 : Caractéristiques de la presse dinjection 350T

Tableau IV.1 : comparaison des résultats

Tableau A.1 : Caractéristiques thermique de l'eau

Tableau A.2 : Caractéristiques thermiques de l'Acier

Liste des symboles

| Symboles | Désignation | Unités |
|------------------|---|-----------------|
| A | Aire de la section de passage du flux de chaleur | (m^2) |
| a | la diffusivité thermique | (m^2/s) |
| C_p | Chaleur spécifique | (J/kg k) |
| d_c | Diamètre des canaux | (m) |
| e | Epaisseur de la pièce | (m) |
| h | Coefficient de transfert de chaleur par convection | (W/m K) |
| k | Coefficient de transfert de chaleur | (W/ $m^2.K$) |
| L_c | La longueur totale des canaux | (m) |
| m_M | Masse de la grappe moulée | (kg) |
| \dot{m} | Débit massique | (kg/s) |
| P_r | Nombre de Prandtl | |
| \dot{q} | Densité volumique d'énergie générée | (W/ m^3) |
| R_e | Le nombre de Reynolds | |
| t_o | Le temps d'ouverture | (s) |
| $t_é$ | Le temps d'éjection | (s) |
| t_f | Le temps de fermeture | (s) |
| t_i | Le temps d'injection | (s) |
| t_R | Le temps de refroidissement | (s) |
| T_c | Température de la paroi des canaux | (k) |
| T_e | Température au milieu de la pièce injectée lors du démoulage | (k) |
| T_i | Température de la matière à l'injection | (k) |
| T_m | Température de moule | (k) |
| T_p | Température de surface du solide | |
| T_∞ | Température du fluide loin de la surface du solide \hat{T} : Température moyenne de la section lors du démoulage | (K) |
| v | Volume | (m^3) |
| v_f | vitesse de fluide de refroidissement | (m/s) |
| ϑ | La viscosité cinématique du fluide | (m^2/s) |
| x | Variable d'espace dans la direction du flux | (m) |
| \emptyset | Le flux de chaleur | (W) |
| \emptyset_{cd} | Flux de chaleur transmis par conduction | (W) |
| \emptyset_{cv} | Flux de chaleur transmis par convection | (W) |
| \emptyset_e | Flux de chaleur entrant | (W) |
| Q_E | Flux échangé avec l'environnement | (W) |
| Q_f | Flux échangé par convection avec le fluide de refroidissement | (W) |
| \emptyset_g | Flux de chaleur généré | (W) |
| Q_h | Flux dégagé par la matière plastique | (W) |
| \emptyset_R | Flux de chaleur transmis par rayonnement | (W) |
| \emptyset_s | Flux de chaleur sortant | (W) |
| \emptyset_{st} | Flux de chaleur stocké | (W) |
| λ | Conductivité thermique du milieu | (W/ m k) |
| σ | Constante de Stefan ($5,67.10^{-8}$) | (W/ $m^2 K^4$) |
| ε_p | Facteur d'émission de la surface | |
| ρ | Masse volumique | (kg/ m^3) |
| μ | Une constante | |

Abréviation

| Abréviation | Désignation |
|--------------------|--|
| CFAO | Conception et Fabrication Assistées par Ordinateur |
| ENIEM | Entreprise National Industrielle d'électroménager |
| PSB | Polystyrène choc |
| S | Système |
| 3D | Trois dimensions |

Présentation de l'ENIEM



I. Introduction

L'Entreprise Nationale des Industries de l'Électroménager (E.N.I.E.M) est constituée par le décret n°83 du 02 janvier 1983. Elle est issue de la restructuration organique de la SONELEC, créée en 1974 dont la production dans le domaine a démarré en 1977. L'ENIEM a été transformée en entreprise publique économique (société par actions) le 08/11/1989.

Son siège social se situe au chef-lieu de la wilaya de TIZI OUZOU. Les unités de productions froides, cuisson, et climatisation sont implantées à la zone industrielle Aissat Idir de Oued Aissi (Tizi ousou).

II. Champ d'activité de l'entreprise ENIEM

ENIEM est leader de l'électroménager en Algérie, elle possède des capacités de production et une expérience de plus 40 ans dans la conception, la fabrication et la commercialisation des équipements électroménagers.

Actuellement, elle est constituée de :

- _ La direction générale (DG) ;
- _ L'unité froid (UF) ;
- _ L'unité cuisson (UCuis) ;
- _ L'unité climatisation (UCL) ;
- _ L'unité prestation technique (UPT) ;
- _ L'unité commerciale (UC) ;
- _ L'unité sanitaire (US) est installée à Miliana, wilaya d'Ain Defla ;
- _ La filiale LAMPE à Mohammedia, wilaya de Mascara.

III. Principales missions et activités de l'entreprise

a) Direction générale

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

b) Unité froid

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

- _ Transformation des tôles,
- _ Traitement et revêtement de surface (peinture, plastification),
- _ Injection plastique
- _ Fabrication de pièces métalliques,
- _ Isolation,
- _ Thermoformage,
- _ Assemblage.

c) Unité cuisson

La mission principale de l'unité est de produire et développer la cuisson à gaz, à énergie électrique ou mixte et tout produit de technologie similaire. Ses activités sont :

- _ Transformation de la tôle.
- _ Traitement et revêtement de surface (Zingage, Chromage).
- _ Assemblage.

d) Unité climatiseur

La mission globale de l'unité est de développer les produits de climatisation. Ses activités sont:

- _ Transformation.
- _ Traitement et revêtement de surface (peinture).
- _ Assemblage.

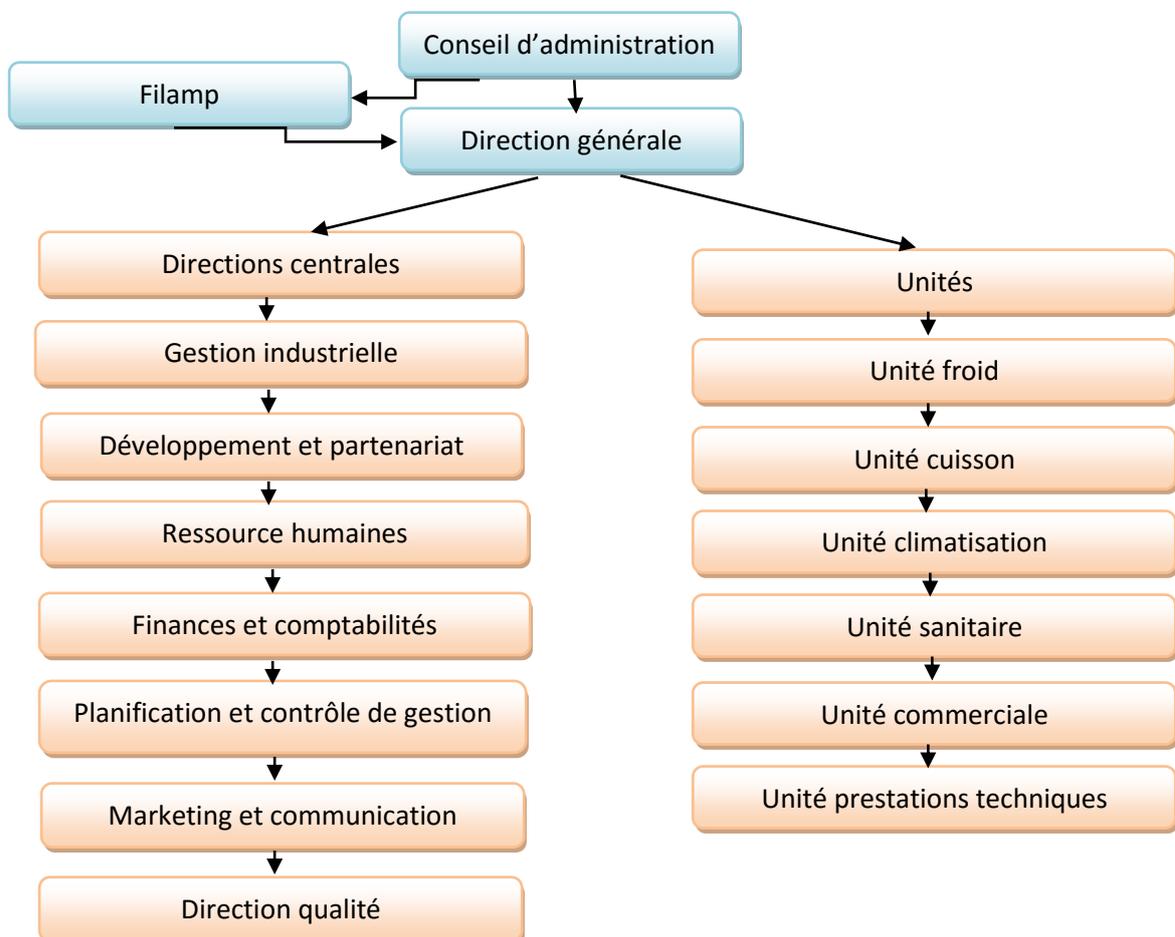
e) Unité sanitaire

L'unité sanitaire de Miliana est acquise par l'entreprise ENIEM en l'an 2000 mais elle n'entre pas dans le champ de certification de l'entreprise. La mission globale de cette unité est de produire et développer les produits sanitaires (baignoires, lavabos ...).

f) Filiale Filamp

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

IV. Organisation générale de l'ENIEM



Résumé

L'objectif de cette étude consiste à développer une méthode de calcul théorique, simple et suffisamment précise, permettant d'aborder le calcul thermique d'un moule d'injection plastique afin de dimensionner ses circuits de refroidissement et d'évaluer son temps de cycle. Les équations mathématiques ont été présentées d'une manière détaillée, en exploitant fondamentalement les formules de base du transfert de chaleur, puis appliquées au cas d'un moule opérationnel où nous constatons une bonne concordance des résultats.

Mots clés : Moule, injection, plastique, polymère, refroidissement, transfert thermique, PSB.

Abstract

The objective of this study is to develop a theoretical, simple and sufficiently precise method of calculation, allowing to approach the thermal calculation of a plastic injection mold in order to size these cooling circuits and evaluate its cycle time. The mathematical equations were presented in detail, basically using the basic formulas of heat transfer, and then applied to an operational mould where we see a good match of the results.

Keywords: Mold, injection, plastic, polymer, cooling, thermal transfer, PSB.

ملخص

الهدف من هذه الدراسة هو تطوير طريقة حسابية نظرية، بسيطة ودقيقة بما فيه الكفاية، لمعالجة الحساب الحراري لقالب حقن البلاستيك من أجل قياس دوائر التبريد هذه وتقييم وقت الدورة. تم تقديم المعادلات الرياضية بطريقة مفصلة، مستغلة بشكل أساسي الصيغ الأساسية لنقل الحرارة، ثم طبقت على حالة القالب التشغيلي حيث وجدنا توافقاً جيداً بين النتائج.

INTRODUCTION GENERALE

De nos jours, les pièces en plastique occupent une place grandissante dans notre univers quotidien et ce en raison de leur grand nombre d'avantages à savoir leur facilité de mise en œuvre, gain de poids important, suppression de la corrosion, recyclage des déchets...etc.

Parmi les procédés de mise en œuvre des matières plastiques, le procédé par injection est le plus répondu et le plus utilisé car il permet d'obtenir des pièces finies ayant des formes complexes à des temps très réduits. Ce procédé consiste à injecter de la matière plastique préalablement fusionnée dans un moule métallique, dont lequel la matière moulée sera modelée et refroidie puis éjectée. La qualité des pièces obtenues ainsi que le temps de cycle sont fortement conditionnés par la phase de refroidissement du polymère dans la cavité moulante. Cette opération est effectuée, en général, à l'aide des perçages circulaires en forme de serpent, réalisés sur le moule, à l'intérieur desquels circule un liquide de refroidissement.

L'objectif de cette étude consiste à développer un bilan thermique de l'ensemble du moule afin de dimensionner les circuits de refroidissement et d'évaluer le temps de cycle. Ce bilan est présenté d'une manière détaillée en exploitant fondamentalement les formules de base de transfert de chaleur, puis appliqué au cas d'un moule opérationnel dans le but de valider l'approche suivie.

Afin de mieux présenter ce mémoire, il sera organisé en quatre chapitres dont le premier est consacré essentiellement à la description des matières plastiques et du procédé de mise en forme par injection. Puis, dans le second chapitre nous avons présenté les différentes pièces d'un moule d'injection plastique destiné à la fabrication d'un couvercle de boîtier d'un réfrigérateur ENIEM type 220F. Dans le troisième chapitre nous avons développé le bilan thermique de l'ensemble du moule en considérant les différents modes d'échange avec le fluide caloporteur et l'environnement. Le quatrième chapitre sera réservé à une application numérique du bilan thermique sur le moule susmentionné suivi de quelques résultats expérimentaux. Enfin, nous terminerons ce travail par une conclusion générale qui débouchera sur quelques perspectives et recommandations futures.

Chapitre I :

*Généralité sur
les matières
plastique et le
moulage*

Chapitre I

Généralités sur les matières plastiques et le moulage

I.1. Introduction

Le processus de moulage par injection est l'une des méthodes les plus importantes pour la mise forme des pièces en plastiques. L'avantage principal de cette technique réside dans la possibilité d'obtenir des pièces de forme complexe tout en ayant des temps de cycle très courts permettant une production à très haute cadence.

Au cours de ce chapitre, nous présenterons les différents types de matières plastiques ainsi que leur procédé de mise en forme par moulage. Nous avons également présenté les différents types d'architecture du moule et les caractéristiques des presses d'injection. Enfin, une attention particulière sera réservée aux circuits de refroidissement dont particulièrement leurs formes, leurs trajectoires et leurs dimensions.

I.2. Matières plastiques

I.2.1 Historique [01]

C'est on peut faire remonter l'histoire des matières plastiques à l'antiquité, c'est surtout à partir de la fin du XIX^e siècle que leur utilisation s'est développée avec la mise au point de plastiques synthétiques. Des centaines de chercheurs et de bricoleurs de génie sont à l'origine de cet essor. Les premiers plastiques, résultaient de la transformation chimique de polymères naturels.

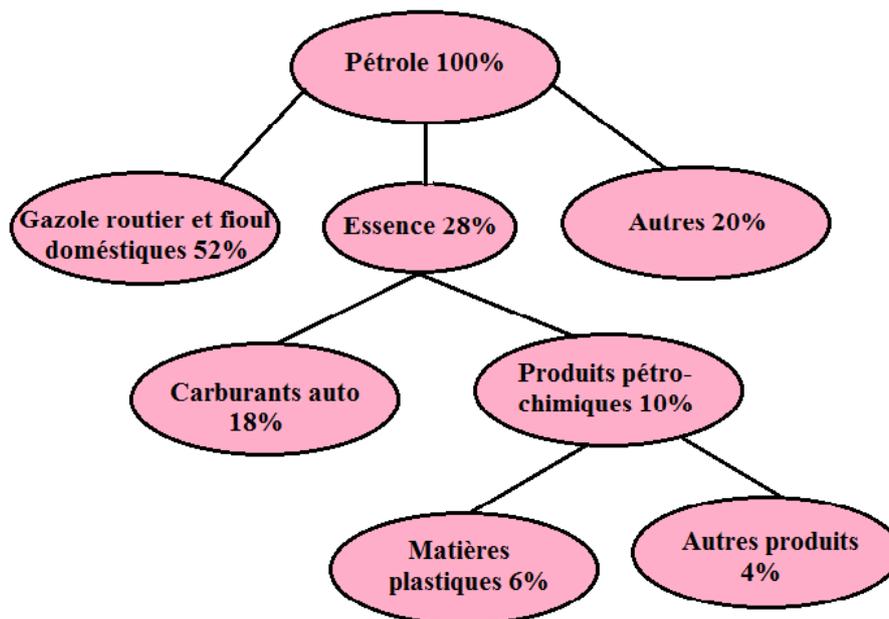


Figure I.1 : Extraction des matières plastiques

I.2.2. Définition [01]

La matière plastique est un produit dérivé du pétrole constitué de chaînes de polymère brut, appelées aussi matière de base, et de plastifiants additifs. Certaines d'entre elles peuvent être recyclées, d'autres non. Elles se résument en une formule :

Matière plastique = polymère brut + charge + additifs.

I.2.3. Types de matières plastiques [02]

On peut classer les matières plastiques de différentes manières, par exemple en fonction de leur origine ou de leur parenté chimique. Sur la base de leur structure, on distingue trois types :

➤ Les thermoplastiques :

Les thermoplastiques ramollissent sous l'effet de la chaleur. Ils deviennent souples, malléables et durcissent à nouveau quand on les refroidit. Comme cette transformation est réversible, ces matériaux conservent leurs propriétés et ils sont facilement recyclables. Dans cette catégorie se trouvent les polymères suivants : polychlorure de vinyle (PVC), polyamides (PA), Acrylonitrile butadiène styrène (ABS), Polystyrène (PS) ...etc.

➤ Les thermodurcissables :

Les thermodurcissables sont des plastiques qui prennent une forme définitive au premier refroidissement. La réversibilité de forme est impossible car ils ne se ramollissent plus une fois moulés. Sous de très fortes températures, ils se dégradent et brûlent (carbonisation). Parmi cette classe de matériaux, on peut citer : polyesters instaurés (PI), les aminoplastes (MF), ...etc.

➤ Les élastomères :

Ces polymères présentent les mêmes qualités élastiques que le caoutchouc. Un élastomère au repos est constitué de longues chaînes moléculaires repliées sur elles-mêmes. Sous l'action d'une contrainte (force), les molécules peuvent glisser les unes par rapport aux autres et se déformer.

I.2.4. Polystyrène choc (PSB) [03]

Dans ce mémoire, l'entreprise ENIEM nous a confié l'étude des circuits de refroidissement d'un moule d'injection plastique pour l'obtention d'une pièce en polystyrène choc (PSB).

Le polystyrène choc (PSB) est un polymère thermoplastique appartenant à la famille des polystyrènes qui sont très utilisées en raison de son opacité qui se présentent sous trois formes :

- Polystyrène acrylonitrile SAN ;
- Polystyrène cristal PSE ;
- Polystyrène Choc PSB.

I.2.4.1 Avantages du polystyrène choc [03]

- Facilement thermo-formable
- Bonne résistance aux chocs
- Faible retrait
- Facilement usinable

I.2.4.2 Inconvénients du polystyrène choc [03]

- Difficile à souder
- Opaque
- Moins rigide que PS

I.2.4.3 Différentes applications du polystyrène choc [03]

- Ameublement : armoires de toilette, contre-portes de réfrigérateur ou de congélateur
- Rasoirs jetables, cintres
- Coffres de toit
- Solarium

I.2.4.4. Forme commerciale du PS choc [03]

Il est livré sous des formes commerciales diverses : poudres, granulés, billes, plaque semi-finie.

I.2.4.5. Propriétés thermiques et mécaniques du PS choc [03]

| | |
|--------------------------------------|-------------|
| Masse volumique (g/cm ³) | 1,01 - 1,04 |
| contrainte à la rupture (MPa) | 20 - 35 |
| Résistance à la flexion (MPa) | 1600 - 2900 |
| Module d'élasticité traction (MPa) | 2000 - 2500 |
| Dureté | 75-85 |

Tableau I-1 : Propriétés mécaniques du Polystyrène choc

| | |
|--|----------------|
| Conductivité thermique W /m k | 0.12-0,16 |
| Dilatation thermique 1/K | 0.00008-0,0001 |
| Température de fusion (°C) | 180 -280 |
| Température maximal d'utilisation (°C) | 60-80 |
| Température fragilité à froid (°C) | -40 -20 |
| Chaleur spécifique J/kg k | 1420 |

Tableau I-2 : Propriétés thermiques de Polystyrène choc

I.3. Presse d'injection

I.3.1. Définition

La presse d'injection est une machine de production sur laquelle est monté un moule permettant la fabrication des pièces plastiques en grandes séries. Un exemple de presse d'injection est montré à la figure I-2 [04]. Une presse se caractérise par deux fonctions essentielles :

- Une fonction injection.
- Une fonction mécanique (mouvements du moule et commande d'éjection).

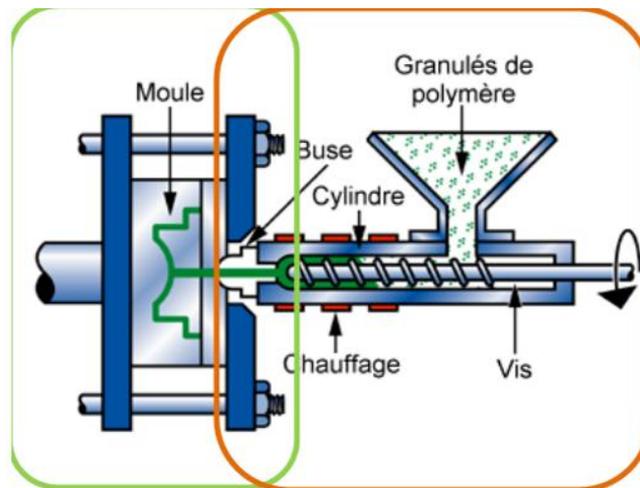


Figure I.2 : presse d'injection

I.3.2. Description

Les différents éléments qui constituent une presse d'injection sont décrits dans la figure ci-dessous :

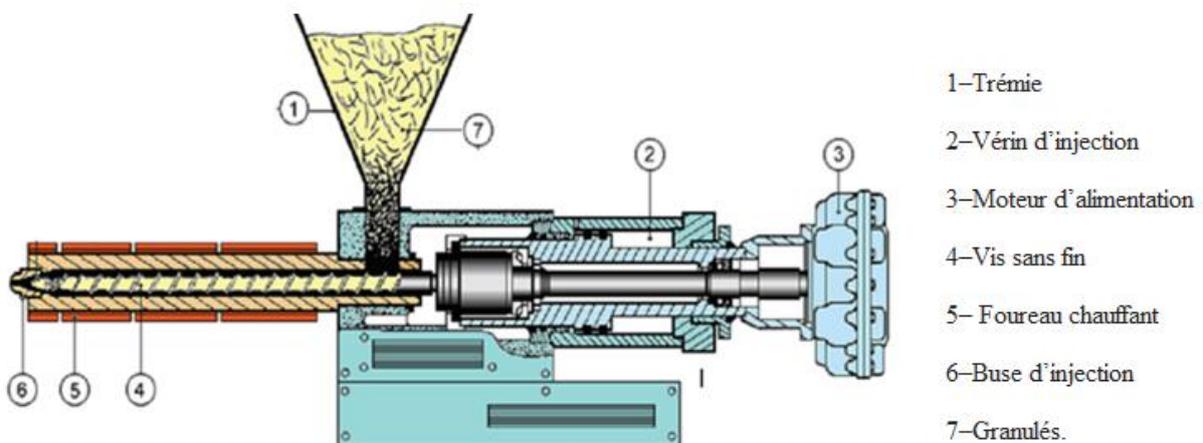


Figure I.3 : dessin de définition d'une presse d'injection

I.3.3. Principe de fonctionnement [04]

La matière plastique sous forme de granulés est versée dans une trémie pour alimenter une vis sans fin logée dans un tube où elle est comprimée, malaxée et chauffée. Ce traitement mécanique et thermique fournit une pâte fondante et homogène qui est poussée par la vis en rotation vers un orifice. La matière expulsée sous pression par la vis d'injection à travers ce trou vient remplir un moule fermé. Au contact des parois froides, elle prend la forme du moule et une fois refroidie, le moule s'ouvre pour éjecter la pièce.

On obtient après démoulage des produits finis ou semi-finis de formes complexes en une seule opération. C'est une méthode de production très rapide pour des objets en très grandes quantités. Le choix de la presse d'injection dépend de la :

- Quantité d'injection ;
- Capacité de plastification ;
- Epaisseur minimale du moule ;
- Epaisseur maximale du moule ;
- Distance entre les colonnes de guidage.

I.3.4 Fiche technique d'une presse à injecter [05]

La presse utilisée dans ce travail est nommée **T350** dont les caractéristiques sont résumées dans la figure I.3.

| | |
|-----------------------------------|--------------------------|
| Pression d'injection | 1860 Kg/cm ² |
| Taux d'injection | 266 cm ³ /sec |
| Quantité d'injection | PS 855Gr |
| | PE 680Gr |
| Diamètre de la vis | 60 mm |
| Puissance de plastification (PS) | 190 Kg/h |
| Puissance de serrage | 350 tonnes |
| Puissance d'ouverture | 18,9 tonnes |
| Vitesse max de rotation de la vis | 210 t pm |
| Intervalle des tirants | 710*710 |
| Dimensions de la plaque matrice | 1000*1000 mm |
| Course de serrage | 950 mm |
| Epaisseur minimale du moule | 300 mm |
| Ouverture | 1250 mm |
| Puissance de foulage | 9,9 tonnes |
| Course de foulage | 125 mm |
| Quantité d'huile d'usage | 1000 litres |
| Moteur destiné à la pompe | 45 KW |
| Capacité du réchauffage | 20,3 KW |
| Dimensions de la machine (L*I*H) | 7,5*1,8*2,4 m |
| Poids de la machine | 17,5 tonnes |

Tableau I.3 : Caracteristiques de la presse dinjection 350T

I.4. Définition du moulage [06]

En industrie, le moulage prend une place très importante car beaucoup de produits sont élaborés grâce à ce procédé. C'est une technique de fabrication permettant de produire très rapidement des objets de haute qualité et en grande quantité, même si les formes sont complexes.

I.4.1. Techniques de moulage [07]

Il existe beaucoup de techniques de moulage et les plus connues sont les suivantes :

- Moulage en sable (manuel ou mécanique) : Pour les fontes et aciers.
- Moulage en carapaces ;
- Moulage en coquilles ;
- Moulage par injection (le procédé qui sera utilisé dans ce mémoire) : Pour les matières plastiques, alliages de cuivre et d'aluminium.

I.4.2. Les différents types des moules : il existe plusieurs types des moules, les modèles les plus répandus sont : [07]

- **Moule à deux plaques :** c'est le modèle le plus simple. Il est composé de deux parties l'une fixe et l'autre mobile.

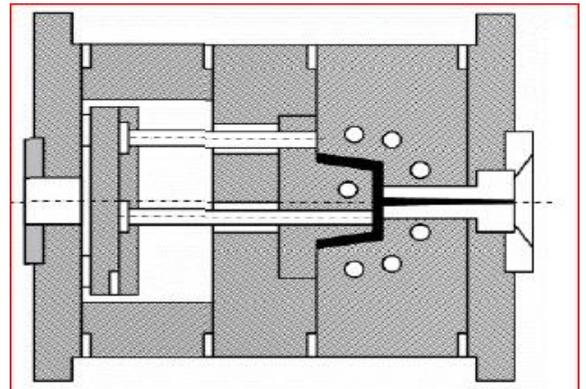


Figure I.4 : moule à deux plaques

- **Moule à trois plaques :** Très utilisé, pour les pièces volumiques, lorsque le point d'injection ne doit pas apparaître, ce type nous assure un décarottage automatique.

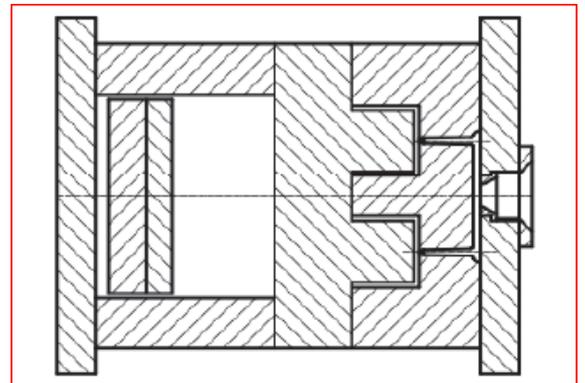


Figure I.5: moule à trois plaques

- **Moule à tiroirs :** Ce modèle est utilisé lorsque la pièce à mouler présente des contres dépouille. Le tiroir est une troisième empreinte mobile. Le tiroir se retire à l'ouverture de la partie mobile pour permettre l'éjection de la pièce.

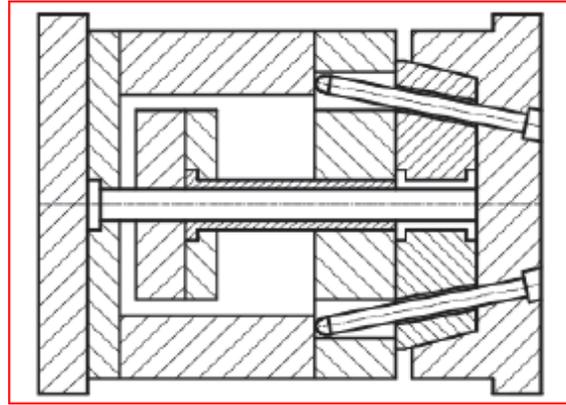


Figure I.6: moule à tiroir

- **Moule à canaux chauds :** Il est utilisé lorsque la longueur des canaux d'alimentation est importante. Il nous permet d'économiser le temps de cycle et la matière injectée.

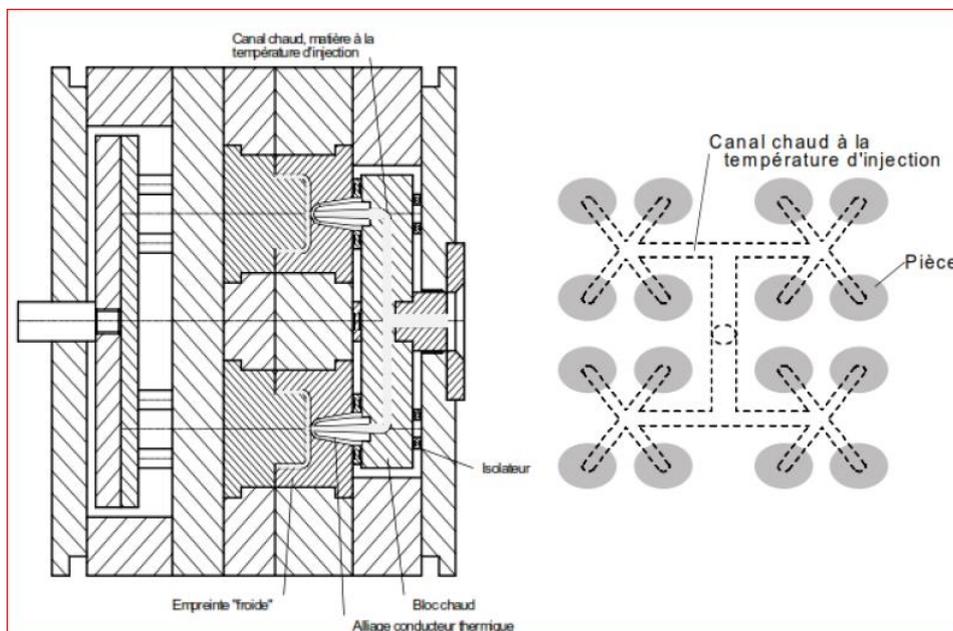


Figure I.7 : moule à canaux chauds

I.5. Moule d'injection

I.5.1. Définition : D'une façon générale, un moule est un outil de transformation comportant une cavité destinée à recevoir un matériau liquide plus au moins fluide et à le mettre en forme en vue d'obtenir un objet dans la forme a été déterminée à l'avance.

I.5.2 Composants d'un moule d'injection plastique : Un moule est composé principalement : [07]

- De deux empreintes l'une fixe et l'autre mobile ayant la forme de la pièce.
- Des colonnes permettant un bon guidage des deux parties.
- Des tiges cylindriques permettant d'éjecter les pièces moulées (Ejecteurs).

De plus, il est constitué d'autres composants secondaires permettant de minimiser les frottements, de faciliter l'usinage, de permettre la maintenance ...etc. Sur la figure suivante sont représentés quelques composants les plus usuels.

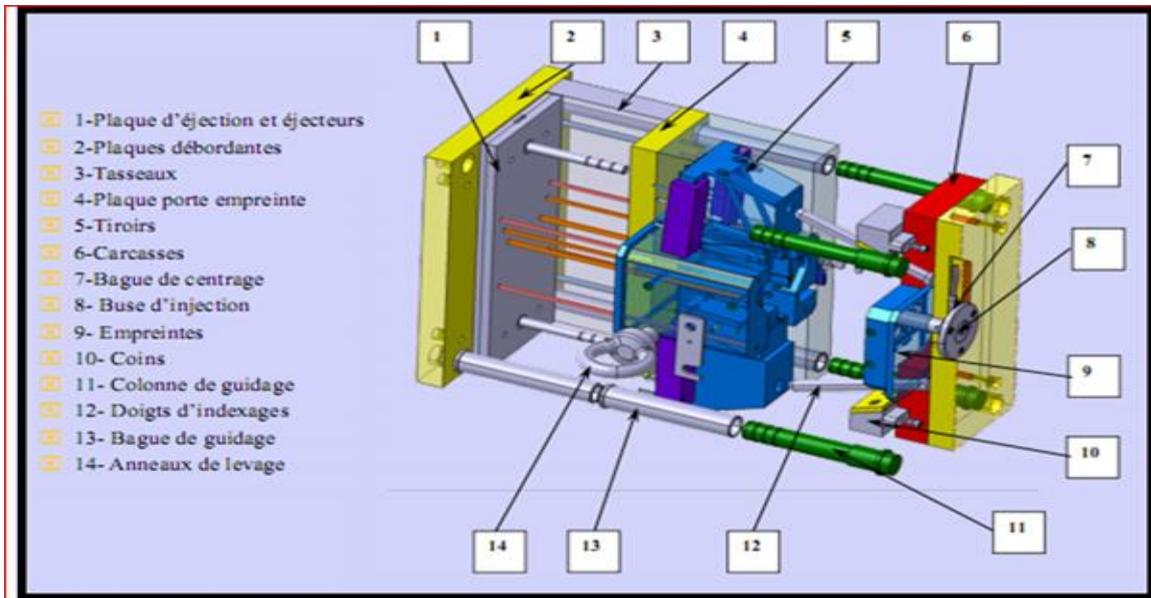


Figure I.8: constituants d'un moule d'injection

I.5.3. Canaux d'alimentations [08]

La fonction alimentation a pour but de transférer la matière plastique du fourreau de la presse, vers l'empreinte du moule. Au cours de ce cheminement, la matière plastique passe en général par :

- Une carotte ;
- Un canal principal ;
- Des canaux secondaires ;
- Seuils d'injection.

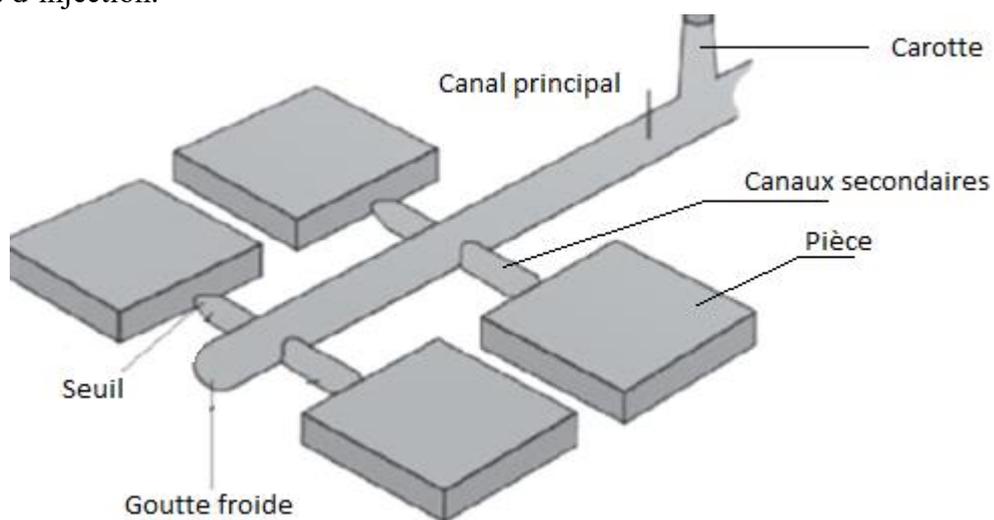


Figure I.9 : les différents composants de canaux d'alimentations

Il existe plusieurs formes des canaux d'alimentation dont les plus répandus sont :

- Canal cylindrique ;
- Canal cylindrique dépouillé sur le plan de joint ;
- Canal trapézoïdal ;
- Canal demi-cylindrique ;
- Canal rectangulaire ;

La figure suivante représente les types des canaux d'alimentation :

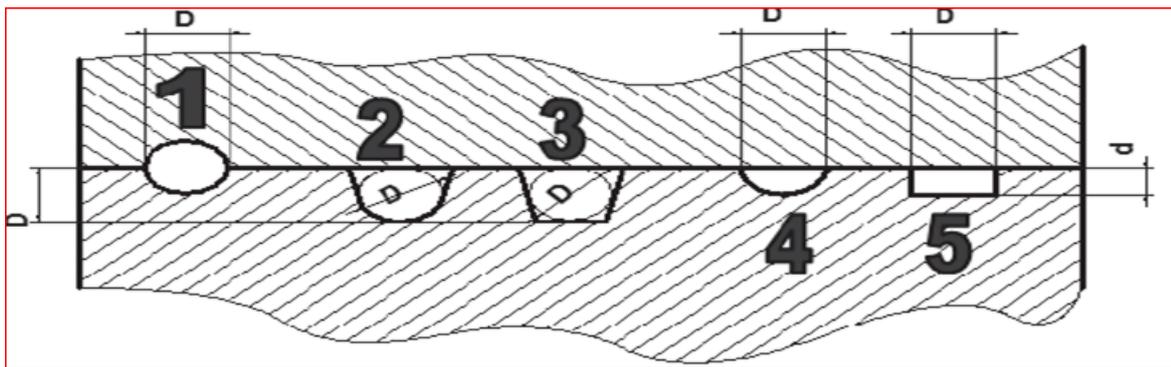


Figure I.10: les différents types de canaux d'alimentations

I.6.Procédé d'injection [08]

Lors d'une opération de moulage par injection, la fabrication de chaque pièce passe par quatre phases principales du cycle d'injection :

I.6.1. Phase de plastification

La phase de plastification a pour objectif de faire passer le polymère de l'état solide (sous forme de granulé) à l'état fondu. Cette transformation est réalisée par l'ensemble vis fourreau dont la fonction est de broyer et de chauffer le granulé pour l'amener peu à peu à l'état fondu. Pour cela, la vis de l'unité possède un mouvement de rotation pour permettre l'auto échauffement de la matière par malaxage, et de translation pour stocker à l'avant du fourreau la quantité de matière à injecter dans la cavité du moule.

I.6.2. Phase de remplissage

Une fois la matière accumulée en tête de fourreau, celle-ci est injectée dans l'empreinte de l'outillage par une avancée de la vis. Cette phase du cycle de transformation est appelée phase dynamique du remplissage. L'avancée de la vis est régulée en débit ou en pression pour maîtriser la vitesse d'injection du thermoplastique dans l'empreinte. Ce remplissage a une durée très courte, par rapport à celle de la phase de refroidissement est appelée phase dynamique du remplissage. L'avancée de la vis est régulée en débit ou en pression pour maîtriser la vitesse d'injection du thermoplastique dans l'empreinte. Ce remplissage a une durée très courte, par rapport à celle de la phase de refroidissement.

I.6.3. Phase de compactage

Le compactage est l'instant clé du procédé d'injection. Il s'agit de l'instant de transition entre la phase liquide et solide. A cet instant, le pilotage de l'injection passe d'une régulation en vitesse à une régulation en pression. Cette phase a pour objectif de maintenir la matière dans la cavité pour compenser les phénomènes de retrait volumique dus au refroidissement de la matière.

I.6.4. Phase d'éjection

Une fois la matière injectée est suffisamment rigide, la vis de plastification recule pour un nouveau dosage de matière et le moule s'ouvre pour permettre l'éjection des pièces moulées.

I.7. Circuit de refroidissement

Afin d'augmenter les performances économiques d'un moule, on réalise un circuit de refroidissement permettant d'accélérer le processus de refroidissement. Ces circuits sont généralement des perçages circulaires, simple à usiner, réalisés directement dans les empreintes du moule pour assurer la circulation du fluide caloporteur (eau en général). [09]

On refroidit les moules par rapport à la température d'injection du polymère. Bien souvent la température des moules est comprise entre 40°C et 100°C. Les diamètres couramment utilisés pour ces circuits vont de Ø6, Ø8, Ø10, Ø12 mm au-delà les diamètres créent un flux laminaire néfaste à l'absorption des calories. [10]

I.7.1. Différentes formes des circuits de refroidissement

Le circuit de refroidissement d'un moule est un cas particulier d'un échangeur de chaleur où le transfert thermique s'effectue par un contact direct ou indirect. [10]

Les figures suivantes représentent quelques formes de circuits de refroidissement :

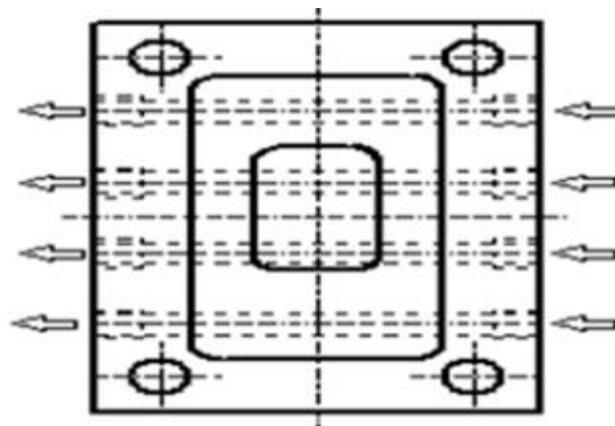


Figure I.11.a : Circuits de refroidissement avec plusieurs entrées/sorties

Chapitre II :

Présentation

du

moule

Chapitre II

Présentation du moule

II.1. Introduction

Un moule d'injection plastique est composé de plusieurs pièces, qui ont pour but d'assurer son bon fonctionnement et augmenter sa longévité.

Le moule considéré dans cette étude, est un moule opérationnel existant à l'entreprise ENIEM, permettant d'obtenir des couvercles de boîtier utilisés pour la protection des bulbes thermostat.

Dans ce chapitre nous présenterons les différentes pièces du moule ainsi que leurs matériaux afin de comprendre son fonctionnement et mieux visualiser la forme et la trajectoire des circuits de refroidissement. Cette présentation sera effectuée à l'aide du logiciel SolidWorks.

II.2. Présentation du logiciel SolidWorks

SolidWorks est un logiciel de CFAO permettant de simplifier la construction mécanique. Il permet ainsi de dessiner, modéliser en 3D et simuler le fonctionnement et le calcul des mécanismes. Il est organisé en trois ateliers : pièce, assemblage, et mise en plan. Ainsi toute modification sur un de ces trois fichiers sera répercutée sur les deux autres.

II.3. Etapes principales de modélisation du moule

Ordre des pièces modélisées est comme suit :

- Couvercle de boîtier ;
- Grappe ;
- Empreintes ;
- Portes empreintes ;
- Colonnes de guidages ;
- Douilles de guidages ;
- Tasseaux ;
- Batterie d'éjection ;
- Semelles ;
- Buse ;
- Bague de centrage.

Pour la modélisation de ces pièces, nous avons utilisé les commandes usuelles du logiciel SolidWorks tel que : Esquisses, fonctions, assemblage Telles qu'elles sont représentées dans la figure suivante :

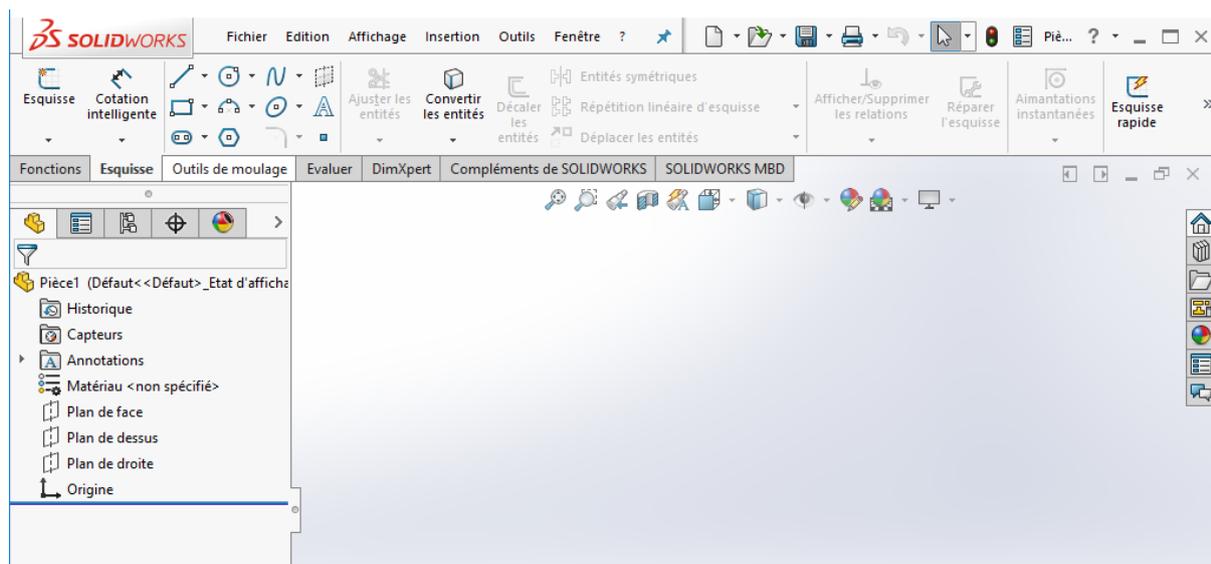


Figure II.1 : Fenêtre principale de SolidWorks

II.4. Présentation des composants du moule

Un moule est composé de deux parties bien distinctes : une partie fixe et une autre mobile, ces appellations sont faites en fonction de leurs utilisations sur une presse à injection.

Dans ce qui suit nous présenterons les différentes pièces constituant le moule permettant la fabrication d'un couvercle en plastique. Notons que ce moule est opérationnel, et ses dimensions ont été récupérées directement dans l'atelier en utilisant les instruments de mesure tels que le pied à coulisse...

II.4.1. Couvercle boîtier

C'est une pièce en plastique (PSB), de forme rectangulaire et d'épaisseur 1,6mm. Une vue 3D est présentée dans la figure (II.2).

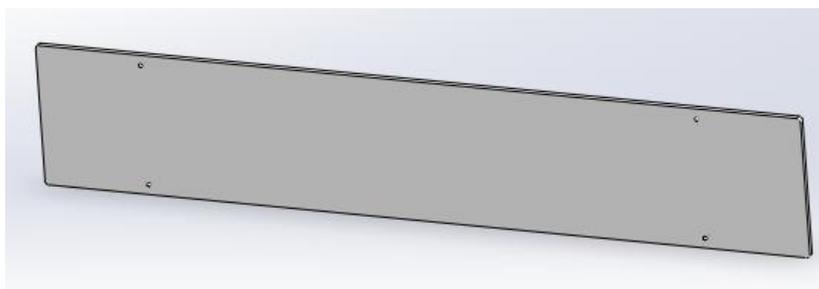


Figure II.2 : Couvercle boîtier (pièce moulée)

Chaque cycle d'injection produit une grappe composée de deux pièces et une carotte, l'ensemble est représenté sur la figure suivante.

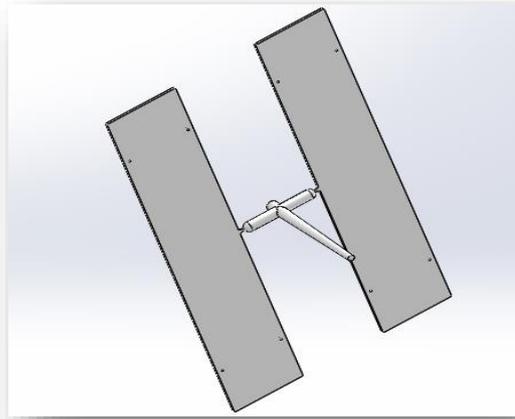


Figure II.3 : la grappe moulée

II.4.2 Empreintes

Pour pouvoir éjecter la pièce moulée, le moule est constitué de deux empreintes l'une fixe et l'autre mobile.

Les deux empreintes fixe (femelle) et mobile (male) sont des plaque rectangulaires représentant les surfaces moulantes de la pièce. Généralement, pour les moules destinés à la fabrication des grandes séries, les critères de longévité sont pris en compte en priorité avant ceux des coûts de la matière pour cela les moulistes ont tendance à choisir des matériaux nobles pour les empreintes comme le '36 Ni Cr Mo 16'. Ce matériau présente les qualités suivantes :[11]

- Une bonne résistance à la corrosion (inoxydable) ;
- Une précision et une stabilité dimensionnelle lors de la variation de température ;
- Une bonne usinabilité ;
- Une bonne conductivité thermique.

Les deux empreintes sont représentées sur la figure (II.4).

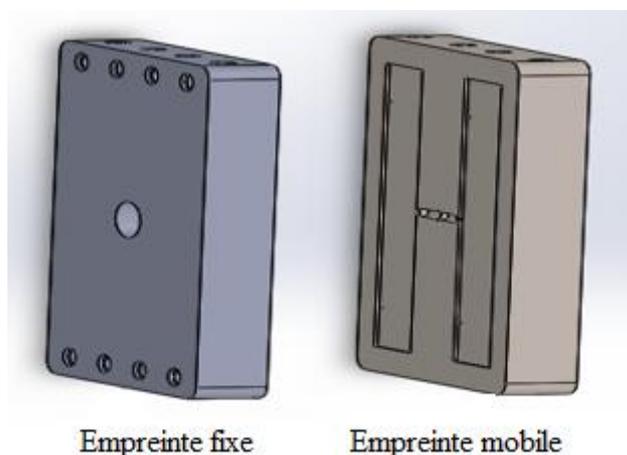


Figure II.4 : Empreintes du moule

II.4.3. Portes empreintes

Le matériau utilisé pour les empreintes présente un inconvénient majeur qui est sa faible résistance aux sollicitations mécaniques. Afin de les protéger, on utilise des portes empreintes. En général, le choix du matériau de ces portes empreintes est porté sur l'acier ordinaire C45.

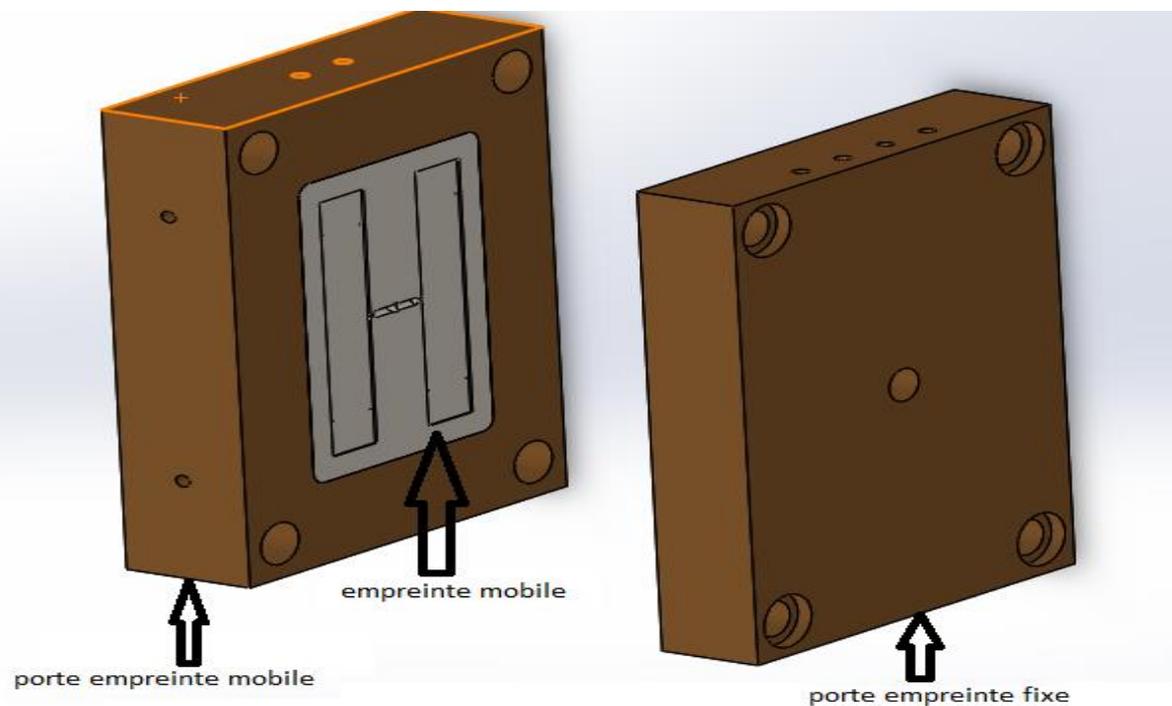


Figure II.5. Vue d'ensemble des portes empreintes

II.4.4. Semelles

Les semelles sont utilisées pour la fixation du moule sur les plateaux de la presse. Le matériau choisi pour ces pièces est l'acier C45.

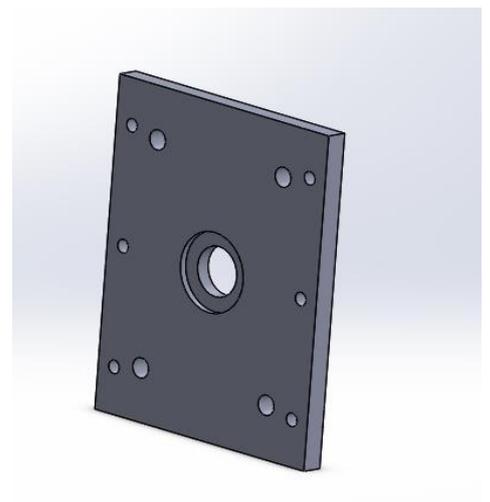


Figure II.6: Semelle fixe

II.4.5. Buse d'injection [12]

La buse du moule permet le passage de la matière du fourreau vers les canaux ou l'empreinte. Elle assure aussi le contact étanche entre le moule et le fourreau. Le matériau choisi est l'alliage '35 Ni Cr 15'. Cette pièce présente un perçage de forme conique.

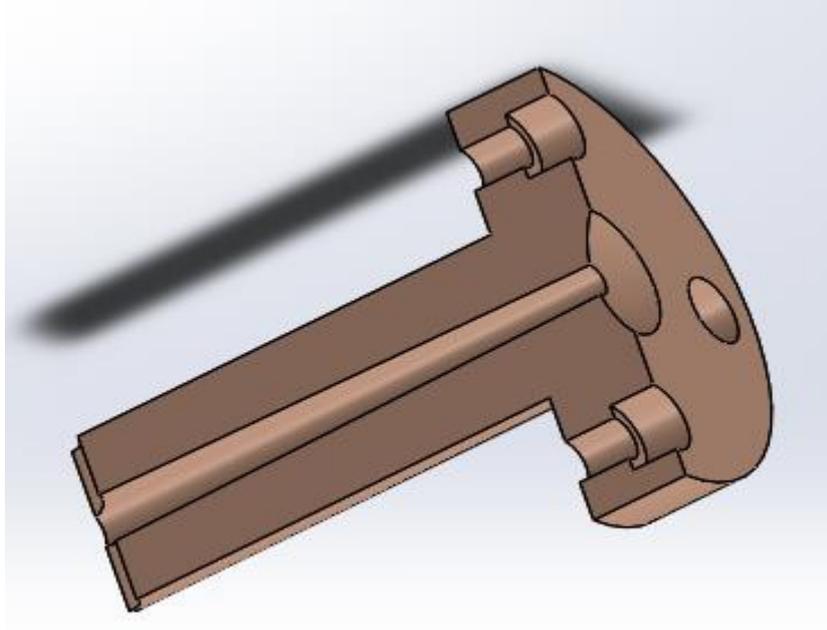


Figure II.7. Vue en coupe d'une buse d'injection

II.4.6. Bague de centrage

Permet le centrage du moule sur les plateaux de la machine (Presse).

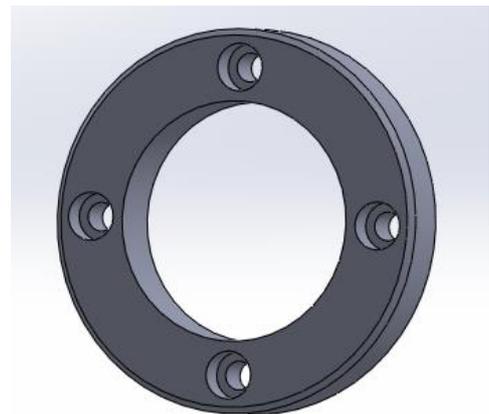


Figure II.8. Bague de centrage

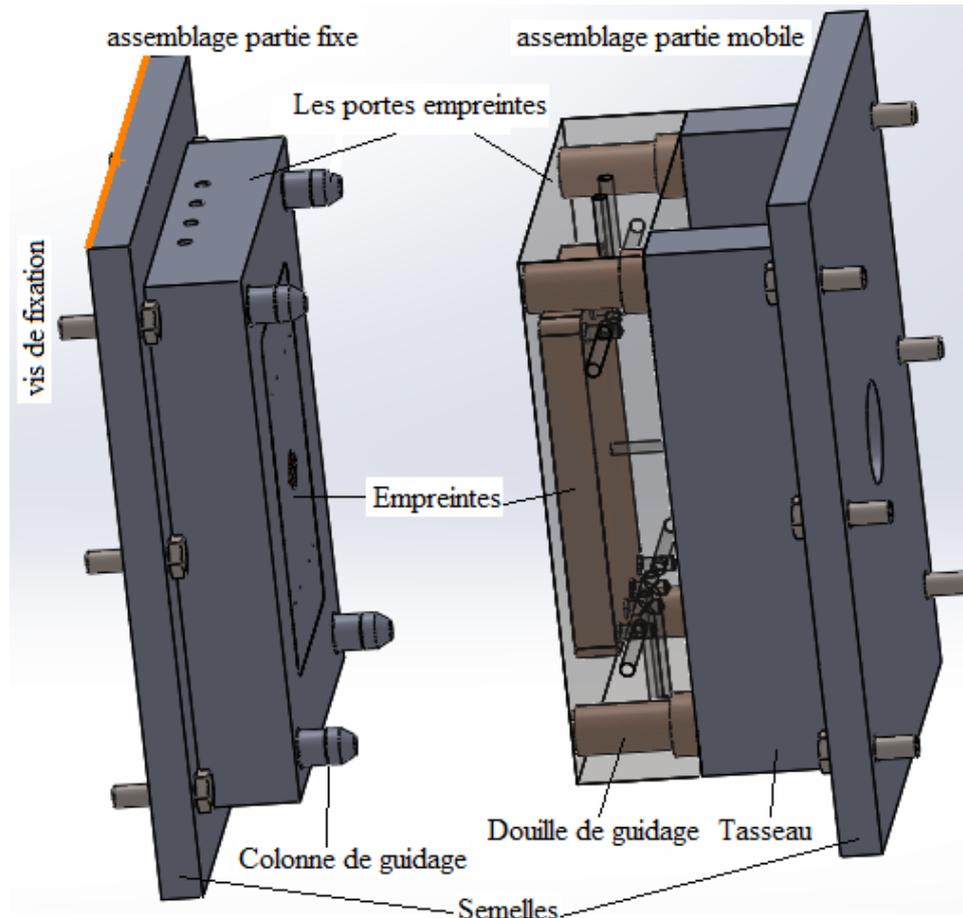
II.4.7. Eléments standards d'un moule d'injection [13]

1. **Colonne de guidage** : Permet de guider la partie mobile par rapport à la partie fixe pour aligner parfaitement l'empreinte, le choix de matériau pour ces éléments est l'acier allié, cémenté, trempé tel que le '16 Cr Ni 4'.
2. **Douille de guidage** : Représente la partie femelle de la colonne, le choix de la matière est le même que les colonnes.

3. **Ejecteurs** : permettent d'éjecter les pièces après l'ouverture du moule.
4. **Vis de fixations** : permet de fixer les différents composants.
5. **Entretoise (Tasseaux d'éjection)** : permet d'obtenir une course optimale de la batterie d'éjection.

II.5. Vue d'ensemble du moule

L'atelier assemblage du logiciel SolidWorks permet d'assembler les deux parties de moules et tous leurs composants en utilisant les contraintes adéquates. La figure suivante présente une vue de l'ensemble du moule :

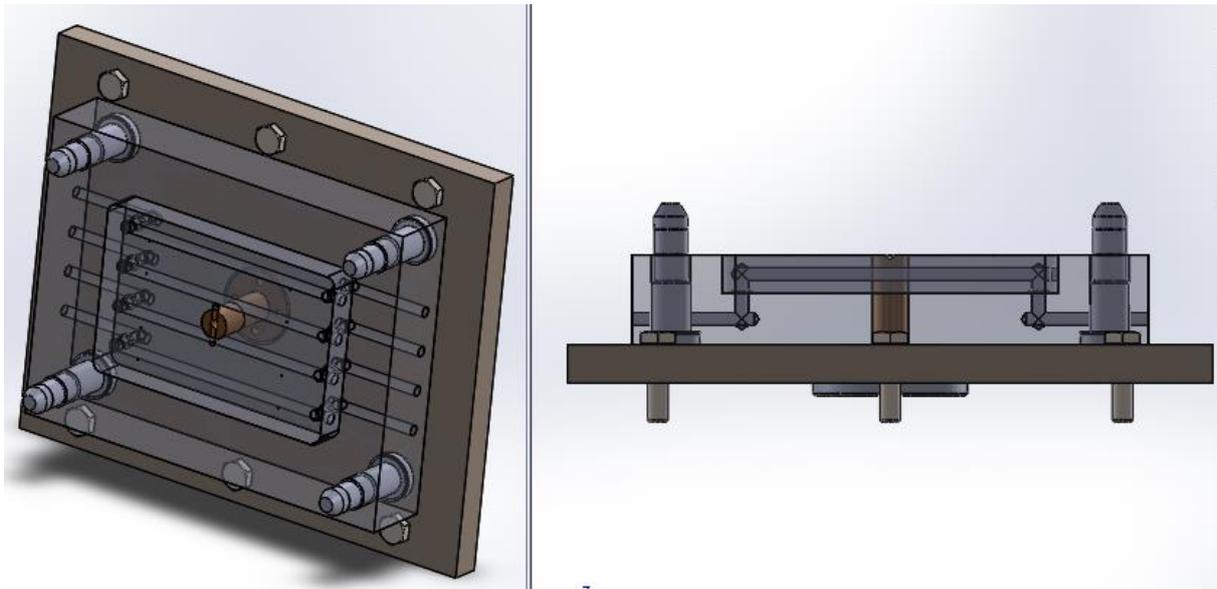


II.9. Assemblage d'un moule d'injection plastique

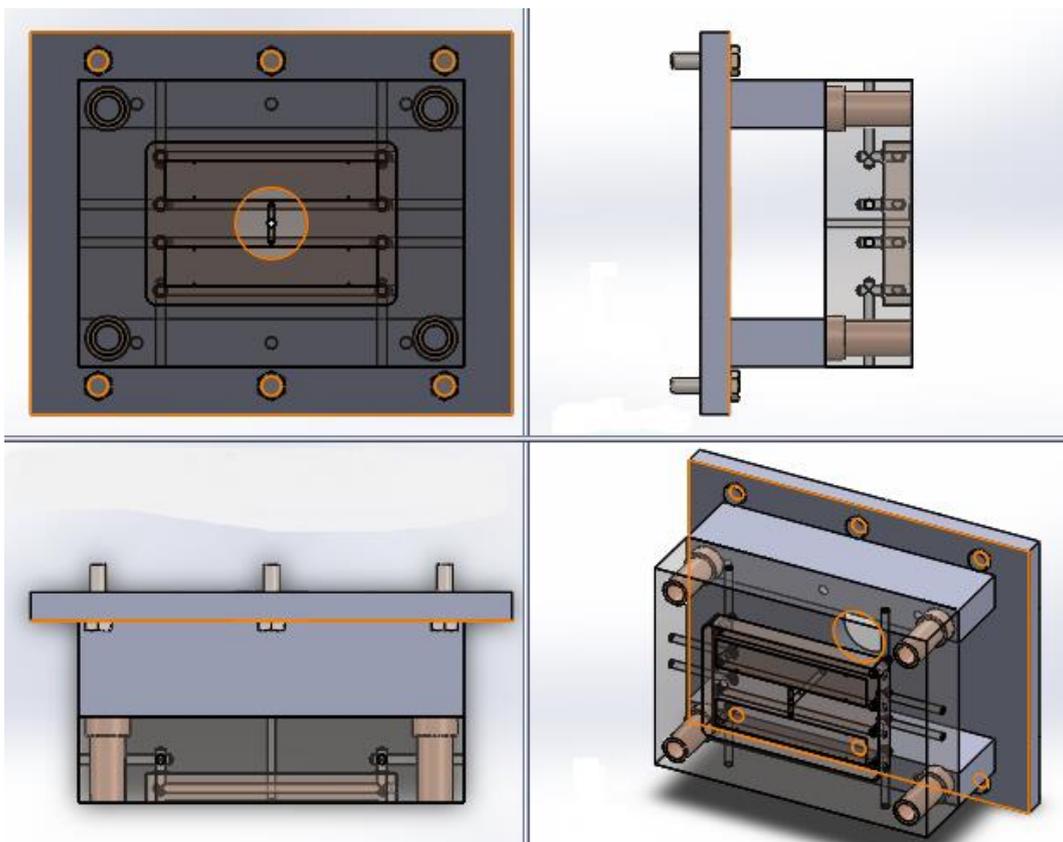
II.6. Circuits de refroidissement

Dans la plupart des cas, la régulation thermique des moules d'injection est assurée par circulation d'un fluide caloporteur dans des canaux percés dans le moule. Un circuit complet peut être réalisé par le perçage de canaux circulaires (à l'aide de forêts) et l'utilisation de bouchons pour assurer l'étanchéité du circuit. Ce système est très efficace pour le refroidissement des plaques planes et rectangulaires puisque les canaux peuvent être repartis régulièrement à une distance constante de la pièce.

Les figures suivantes représentent les formes des circuits de refroidissement des deux parties du moule :



II.10. Forme et trajectoire du circuit de refroidissement partie fixe



II.11. Forme et trajectoire du circuit de refroidissement partie mobile

Remarque :

La position des canaux de refroidissement est conditionnée par les problèmes d'encombres (la géométrie du moule, plan de joint, positions des éjecteurs et tous les éléments mobile de moule) et les difficultés d'assurer une bonne étanchéité.

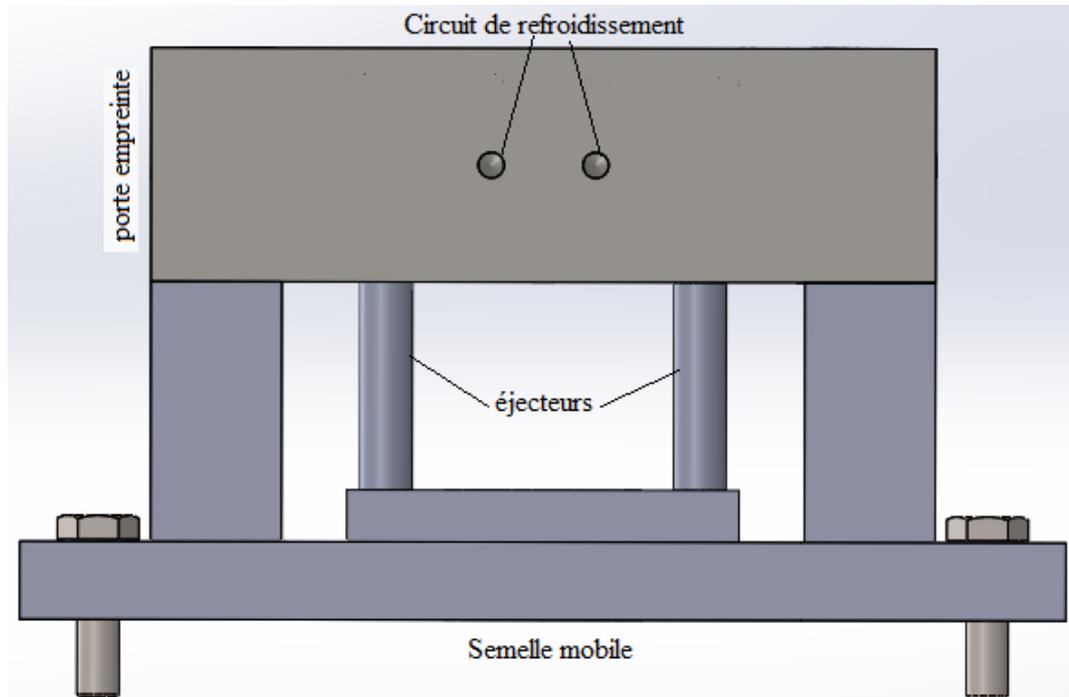


Figure II.12. Position des canaux de refroidissement conditionné par celle des éjecteurs

II.7. Conclusion

Ce chapitre nous a permis de concrétiser le moule considéré dans le but comprendre la forme et la trajectoire des circuits de refroidissement afin de pouvoir les dimensionner dans le chapitre suivant. Les dessins techniques de chacune des pièces constituant le moule seront représentés dans l'annexe I.

Chapitre III :

Bilan thermique du moule

Chapitre III

Bilan thermique du moule

III.1. Introduction

L'objectif de ce chapitre est l'analyse thermique d'un moule d'injection plastique dans le but d'évaluer le temps de refroidissement qui joue un rôle très important dans la cadence de production des pièces moulées.

En effet, lors de la fabrication des pièces par injection, la matière première (polymère) est chauffée jusqu'à plastification puis injectée dans un moule en acier (en général). Après un certain temps, la matière solidifiée est éjectée pour entamer un nouveau cycle.

Afin d'améliorer les performances économiques du moule, des circuits de refroidissement sont réalisés. Ainsi, le refroidissement de la matière plastique via le moule s'effectue par plusieurs modes d'échange thermique dont principalement :

- Conduction entre la matière plastique et le matériau du moule (acier) ;
- Conduction entre le moule et la presse d'injection ;
- Une convection entre le moule et le fluide caloporteur.

Dans ce qui suit, nous présenterons les formulations mathématiques des différents modes de transferts de chaleur suivies d'un bilan énergétique de l'ensemble du moule afin de dimensionner ces circuits de refroidissement.

III.2. Formulation d'un problème de transfert de chaleur

La thermodynamique permet de prévoir la quantité totale d'énergie qu'un système doit échanger avec l'extérieur pour passer d'un état d'équilibre à un autre. En effet, la chaleur s'écoule sous l'influence d'un gradient de température des hautes vers les basses températures. On appelle flux de chaleur, la quantité de chaleur transmise par une unité de temps. [14]

III.2.1. Bilan d'énergie [15]

Il faut tout d'abord définir un système (S) par ses limites dans l'espace et il faut ensuite établir l'inventaire des différents flux de chaleur qui influent sur l'état du système, et qui peuvent être :

- Flux de chaleur stocké ϕ_{st}
- Flux de chaleur généré ϕ_g
- Flux de chaleur entrant ϕ_e
- Flux de chaleur sortant ϕ_s

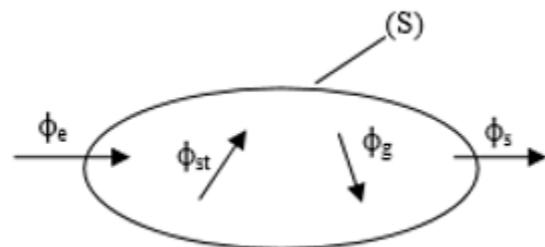


Figure III.1 : Système et bilan énergétique

III.2.2. Expression des différents flux d'énergie

a. Conduction [15] [16]

C'est le transfert de chaleur au sein d'un milieu solide, sans déplacement de matière, sous l'influence d'une différence de température. La propagation de la chaleur par conduction à l'intérieur d'un corps s'effectue selon deux mécanismes distincts : une transmission par les vibrations des atomes ou molécules et une transmission par les électrons libres.

La théorie de la conduction repose sur l'hypothèse de Fourier où la densité de flux est proportionnelle au gradient de température :

$$\vec{\phi}_{cd} = -\lambda A \overrightarrow{grad} T \dots \dots \dots (III. 1)$$

Ou sous forme algébrique dans le cas unidirectionnel :

$$\phi_{cd} = -\lambda A \frac{\partial T}{\partial x} \dots \dots \dots (III. 2)$$

Avec :

ϕ_{cd} : Flux de chaleur transmis par conduction (W)

λ : Conductivité thermique du milieu (W/ m k)

x : Variable d'espace dans la direction du flux (m)

A : Aire de la section de passage du flux de chaleur (m^2)

b. Convection [15] [17]

C'est le transfert de chaleur entre un solide et un fluide, l'énergie étant transmise par déplacement du fluide. Selon la nature du mécanisme qui provoque le mouvement du fluide on distingue deux types de convection :

- **La convection libre ou naturelle** : le fluide est mis en mouvement sous le seul effet des différences de masse volumique résultant des différences de températures sur les frontières et d'un champ de forces extérieures (la pesanteur).

- **La convection forcée** : le mouvement du fluide est induit par une cause indépendante des différences de température (pompe, ventilateur,...).

L'étude du transfert de chaleur par convection permet de déterminer les échanges de chaleur se produisant entre un fluide et une paroi. Quelle que soit le type de convection (libre ou forcée) et quelle que soit le régime d'écoulement du fluide, le flux de chaleur ϕ_{cv} est régi par la loi de Newton:

$$\phi_{cv} = h A (T_p - T_\infty) \dots \dots \dots (III. 3)$$

Avec :

Φ_{cv} : Flux de chaleur transmis par convection (W)

h : Coefficient de transfert de chaleur par convection (W/m K)

T_p : Température de surface du solide (K)

T_∞ : Température du fluide loin de la surface du solide (K)

A : Aire de la surface de contact solide/fluide (m^2)

c. Rayonnement [15]

C'est un transfert d'énergie électromagnétique entre deux surfaces (même dans le vide). Dans les problèmes de conduction, on prend en compte le rayonnement entre un solide et le milieu environnant et dans ce cas nous avons la relation suivante:

$$\Phi_R = \sigma \varepsilon_p A (T_p^4 - T_\infty^4) \dots \dots \dots \text{(III. 4)}$$

Avec :

Φ_R : Flux de chaleur transmis par rayonnement (W) ;

σ : Constante de Stefan ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$) ;

ε_p : Facteur d'émission de la surface ;

T_p : Température de la surface (K);

T_∞ : Température du milieu environnant la surface (K) ;

A : Aire de la surface (m^2).

d. Flux de chaleur lié à un débit massique [15]

Lorsqu'un débit massique \dot{m} de matière rentre dans un système à la température T_1 et en ressort à la température T_2 , le flux de chaleur entrant est donné par l'expression suivante :

$$\Phi_e = \dot{m} C_p (T_1 - T_2) \dots \dots \dots \text{(III. 5)}$$

Avec :

Φ_e : Flux de chaleur entrant dans le système (W) ;

\dot{m} : Débit massique (kg/s) ;

C_p : Chaleur spécifique (J/kg K) ;

T_1, T_2 : Températures d'entrée et de sortie (K).

e. Energie stockée [15]

Le stockage d'énergie dans un corps correspond à une augmentation de son énergie interne au cours du temps d'où (à pression constante et en absence de changement d'état) :

$$\Phi_{st} = \rho v C_p \frac{\partial T}{\partial t} \dots \dots \dots \text{(III. 6)}$$

Avec :

Φ_{st} : Flux de chaleur stocké (W) ;

ρ : Masse volumique (kg/m^3) ;

v : Volume (m^3) ;

C_p : Chaleur spécifique ($\text{J}/\text{kg K}$)

T : Température ($^{\circ}\text{C}$)

t : Temps (s)

f. Energie générée [15]

Elle intervient lorsqu'une autre forme d'énergie (chimique, électrique, mécanique, nucléaire) est convertie en énergie thermique. On peut l'écrire sous la forme :

$$\Phi_g = \dot{q} V \dots \dots \dots \text{(III. 7)}$$

Avec :

Φ_g : Flux d'énergie thermique générée (W) ;

\dot{q} : Densité volumique d'énergie générée (W/m^3) ;

V : Volume (m^3).

III.3. Bilan thermique du moule [10]

Le moule doit extraire rapidement et uniformément autant de chaleur que possible du mélange injecté dans la cavité pour que celui-ci soit suffisamment rigide pour être démoulé. Pendant le procédé, la chaleur circule de la pièce moulée à travers les parois de la cavité vers le fluide caloporteur et l'environnement.

III.3.1. Temps de refroidissement

On considère le cas d'une plaque d'épaisseur « e » et de dimensions latérales suffisamment grandes pour que l'on puisse dire que le transfert de chaleur est unidirectionnel. L'étude de ce cas, permettra d'illustrer l'une des méthodes utilisées pour résoudre l'équation de la chaleur monodimensionnelle en régime variable (transitoire). En effet, la résolution de cette équation permet d'évaluer la température de la matière en fonction du temps en imposant la température d'injection et la température du moule. Nous pouvons enfin déduire le temps de refroidissement en imposant la température d'éjection de la matière. [15]

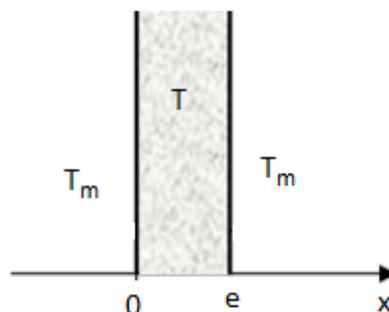


Figure (III.2) : Schéma d'une plaque avec température imposée en surface

L'équation de la chaleur conductrice s'écrit : [16]

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} \dots \dots \dots (\text{III. 8})$$

Avec :

$$a = \frac{\lambda}{\rho c_p} \quad : \text{ est la diffusivité thermique (m}^2/\text{s) ;}$$

Les conditions aux limites suivantes :

$$\begin{cases} T(x = 0, t) = T_m \\ T(x = e, t) = T_m \end{cases}$$

Et la condition initiale :

$$T(x, t = 0) = T_i$$

En considérant le changement de variable suivant, dans l'équation (III.8) : $\theta = T - T_m$

On obtient la nouvelle expression de la température:

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} = \frac{1}{a} \frac{\partial \theta}{\partial t} \dots \dots (\text{III. 9})$$

Avec :

$$\text{Les conditions aux limites : } \begin{cases} \theta(x = 0, t) = 0 \\ \theta(x = e, t) = 0 \end{cases}$$

Et la condition initiale : $\theta(x, t = 0) = T_i - T_m = \theta_i$

En effectuant une décomposition de la température en un produit de fonctions sous la forme :

$$\theta(x, t) = X(x) * \tau(t) \dots \dots (\text{III. 10})$$

Où

X(x) : Fonction de forme

$\tau(t)$: Fonction temporelle

On tenant compte de l'équation (III.10) dans l'équation (III.9), on obtient :

$$\frac{X''}{X} = \frac{1}{a} \frac{\dot{\tau}}{\tau} \dots \dots \dots (\text{III. 11})$$

Comme ces variables sont indépendantes, cette équation peut prendre la forme suivante :

$$\frac{X''}{X} = \frac{1}{a} \frac{\dot{t}}{\tau} = -\mu^2 \dots \dots \dots (\text{III. 12})$$

Où μ^2 est une constante indépendante de x et de t .

En séparant cette équation, nous aurons :

$$\begin{cases} \frac{X''}{X} = -\mu^2 \\ \frac{1}{a} \frac{\dot{t}}{\tau} = -\mu^2 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} X'' + \mu^2 X = 0 \dots (a) \\ \frac{\dot{t}}{\tau} = -a\mu^2 \dots (b) \end{cases}$$

La solution de (a) est sous la forme suivante : $X(x) = A \sin \mu x + B \cos \mu x$

La solution de (b) est : $\ln(\tau) = -a \mu^2 t + c \Rightarrow \tau(t) = C e^{-a\mu^2 t}$

On obtient donc :

$$\theta(x, t) = C e^{-a\mu^2 t} [A \sin \mu x + B \cos \mu x] \dots \dots \dots (\text{III. 13})$$

Avec les conditions aux limites :

$$\theta(x = 0, t) = 0 \Rightarrow B = 0$$

$$\theta(x = e, t) = 0 \Rightarrow A \sin \mu x = 0 \Rightarrow \sin \mu e = 0 \Rightarrow \mu = \frac{n \pi}{e}$$

L'équation (III.13) devient :

$$\theta(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} D_n e^{-\mu_n^2 a t} \sin \mu_n x \dots \dots \dots (\text{III. 14})$$

En considérant la condition initiale dans cette équation, on obtient :

$$\theta_i = \sum_{n=1}^{\infty} D_n \sin \mu_n x \dots \dots \dots (\text{III. 15})$$

Cette équation est une série de fourrier sa solution est sous la forme suivante :

$$\begin{aligned} D_n &= \frac{2}{e} \int_0^e \theta_e \sin \mu_n x dx = \frac{2}{e} \theta_i \int_0^e \sin \frac{n\pi}{e} x dx = \frac{2}{e} \theta_i \left[-\frac{e}{n\pi} \cos \left(\frac{n\pi}{e} x \right) \right]_0^e \\ &= \frac{2\theta_i}{n\pi} [-\cos(n\pi) + 1] \end{aligned}$$

Si le nombre n est un nombre pair, la constante D_n s'annule ce qui n'est pas tolérable. Ainsi, on prend $n=2n+1$ ce qui donne :

$$D_n = \frac{2\theta_i}{(2n+1)\pi} [-(-1)^{2n+1} + 1] = \frac{4\theta_i}{(2n+1)\pi} \dots \dots \dots \text{(III. 16)}$$

En remplaçant l'expression D_n dans l'équation (III.14), on obtient :

$$\theta(x, t) = \frac{4(T_i - T_m)}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{2n+1} \sin \frac{\pi x (2n+1)}{e} e^{-\frac{a\pi^2(2n+1)^2}{e^2}t} \dots \dots \dots \text{(III. 17)}$$

Pour déterminer le temps de refroidissement, on considère, dans l'équation (III.17), la température au milieu de la pièce injectée ($x = \frac{e}{2}$) lors du démoulage, cette température est atteinte pour $t=t_R$, on obtient ainsi une expression du temps de refroidissement : [10] [18]

$$t_R = \frac{e^2}{a\pi^2} \ln \left[\frac{4}{\pi} \frac{T_i - T_m}{T_e - T_m} \right] \dots \dots \dots \text{(III. 18)}$$

Cette équation présente quelques inconvénients car elle n'est valable que lorsque la température au centre de la pièce a déjà atteint la température de démoulage. Cependant, cette condition n'est pas justifiée pour les pièces à forte épaisseur. Il est donc plus judicieux de définir la température de démoulage comme la température moyenne de la section lors du démoulage. [10] Ainsi :

$$\int_0^e \theta(x, t_R) dx = \frac{1}{e} \int_0^e \left(\frac{4(T_i - T_m)}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{2n+1} \sin \frac{\pi x (2n+1)}{e} e^{-\frac{a\pi^2(2n+1)^2}{e^2}t_R} \right) dx$$

Si on considère seulement le premier terme de la série ($n=0$), on obtient:

$$\hat{T} - T_m = \frac{4(T_i - T_m)}{\pi e} \left[-\frac{e}{\pi} \cos \frac{\pi x}{e} \right]_0^e e^{-\frac{a\pi^2}{e^2}t_R} = -\frac{4(T_i - T_m)}{\pi^2} [-1 - 1] e^{-\frac{a\pi^2}{e^2}t_R}$$

$$\hat{T} - T_m = \frac{8(T_i - T_m)}{\pi^2} e^{-\frac{a\pi^2}{e^2}t_R} \Rightarrow \frac{\pi^2}{8} \frac{\hat{T} - T_m}{T_i - T_m} = e^{-\frac{a\pi^2}{e^2}t_R}$$

$$\ln \left[\frac{8}{\pi^2} \frac{T_i - T_m}{\hat{T} - T_m} \right] = \frac{a\pi^2}{e^2} t_R$$

$$t_R = \frac{e^2}{a\pi^2} \ln \left[\frac{8}{\pi^2} \frac{T_i - T_m}{\hat{T} - T_m} \right] \dots \dots \dots \text{(III. 19)}$$

Avec :

e : Epaisseur de la pièce (m) ;

T_i : Température de la matière à l'injection (k) ;

T_e : Température au milieu de la pièce injectée lors du démoulage (k) ;

\hat{T} : Température moyenne de la section lors du démoulage (k) ;

T_m : Température de moule (k) ;

a : Diffusivité thermique du plastique (m^2/s).

III.3.2 Temps de cycle [05]

Un cycle complet peut se décomposer de la manière suivante :

- Le temps de fermeture t_f (estimé à environ 5s)
- Le temps d'injection t_i (3s)
- Le temps de refroidissement t_R
- Le temps d'ouverture t_o (5s)
- Le temps d'éjection t_e (5s)

III.3.3. Les échanges de chaleur dans un moule

Tel que mentionner précédemment, le refroidissement du moule s'effectue par les trois modes d'échange. L'application du premier principe de la thermodynamique permet d'évaluer la quantité totale d'énergie que doit échanger la pièce avec le milieu extérieur. La figure suivante représente les différents échanges de chaleur dans un moule :

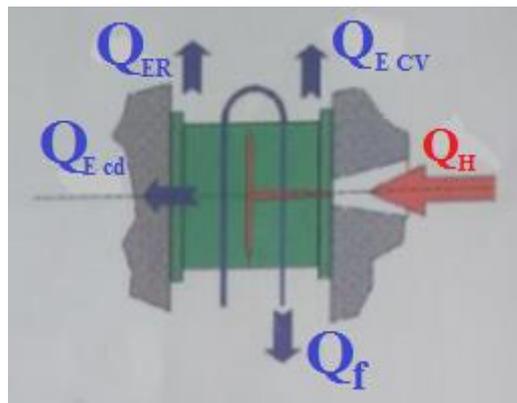


Figure III.3. Échanges de chaleur dans un moule d'injection [10]

En conditions stationnaires, le flux de chaleur apporté au moule par le plastique injecté (compté positif) est compensé par le flux de chaleur extrait du moule (compté négatif). Ainsi, on a la relation suivante : [10]

$$Q_h - Q_E - Q_f = 0 \dots \dots \dots \text{(III. 20)}$$

Avec :

Q_h : Flux dégagé par la matière plastique ;

Q_E : Flux échangé avec l'environnement ;

Q_f : Flux échangé par convection avec le fluide de refroidissement.

a) Flux dégagé par la matière plastique [10] [18]

La quantité de chaleur à évacuer liée à l'injection de la matière plastique notée Q_h se calcule de la manière suivante :

$$Q_h = \Delta h \frac{m_M}{t_R} \dots \dots \dots \text{(III. 21)}$$

Avec :

Δh : Différence d'enthalpie de la matière plastique entre la température d'injection et celle de l'éjection (J/kg).

m_M : Masse de la grappe moulée (kg) ;

t_R : Temps de refroidissement (sec). Il convient de préciser, que dans le cas d'une installation réelle, le temps de refroidissement est égale au temps de cycle ($t_R = t_C$).

b) Flux échangé avec l'environnement [10]

Les échanges avec l'environnement se divisent en trois flux différents :

➤ **Un flux convectif** : il est calculé par la formule suivante

$$Q_{Ec_v} = A_{ext} h (T_m - T_E) \dots \dots \dots \text{(III. 22)}$$

A_{ext} : Surface extérieure du moule (m^2) ;

h : Coefficient de transfert de chaleur dans l'air ($=8 \text{ W/m}^2\text{k}$) ;

T_m : Température du moule (K) ;

T_E : Température de l'environnement (atelier) (K).

➤ **Un flux radiatif** :

$$Q_{ER} = A_{ext} \varepsilon C_{rad} \left[\left(\frac{T_m}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_E}{100} \right)^4 \right] \dots \dots \dots \text{(III. 23)}$$

Avec :

ε : Émissivité de la matière du moule ;

C_{rad} : Constante de radiation ($5.67 \text{ W/m}^2\text{K}^{-4}$).

➤ Un flux de conduction entre le moule et les plateaux de la presse :

$$Q_{Ecd} = A_{contact} k (T_m - T_E) \dots \dots \dots (III. 24)$$

Avec :

$A_{contact}$: Surface de contact entre le moule et les plateaux de presse (m^2) ;

k : Coefficient de transfert de chaleur ($W/m^2.K$).

Le flux thermique avec l'environnement vaut:

$$Q_E = Q_{ECv} + Q_{ER} + Q_{Ecd} \dots \dots \dots (III. 25)$$

c) Flux échangé par convection avec le fluide de refroidissement

Le flux thermique à évacuer par le fluide de refroidissement est alors aisément déduit à partir des équations :

$$Q_f = Q_h - Q_E \dots \dots \dots (III. 26)$$

III.4 Calcul de la température de sortie d'eau

Nous avons d'après l'équation (III.5) :

$$\dot{m} = \frac{Q_f}{C_f (T_s - T_e)} \dots \dots \dots (III. 27)$$

D'où

$$T_s = \frac{Q_f}{C_f \cdot \dot{m}} + T_e \dots \dots \dots (III. 28)$$

Avec

Q_f : Flux échangé avec le fluide de refroidissement ;

T_s : Température de sortie d'eau ;

T_e : Température d'entrée d'eau ;

\dot{m} : Débit massique d'eau ;

C_f : Chaleur spécifique d'eau.

A partir de cette équation, nous remarquons que si le débit du fluide est moins faible la température de sortie sera plus importante.

III.5. Surface nécessaire des canaux

On peut exprimer la transmission de chaleur entre le moule et le fluide de refroidissement de la manière suivante :

$$\dot{Q}_f = h A_c (T_m - T_c) \dots \dots \dots \text{(III. 29)}$$

D'où

$$A_c = \frac{\dot{Q}_f}{h(T_m - T_c)} \dots \dots \dots \text{(III. 30)}$$

Avec :

A_c : Surface active des canaux ;

h : Coefficient de transmission thermique ;

T_m : Température du moule ;

T_c : Température de la paroi des canaux.

Le coefficient de transmission thermique « h » dépend de régime d'écoulement de fluide. Pour déterminer la nature de ce dernier, il faut calculer le nombre de Reynolds. [17]

$$R_e = \frac{v_f d_c}{\vartheta} \dots \dots \dots \text{(III. 31)}$$

Où

v_f : vitesse de fluide de refroidissement (m/s) ;

d_c : Diamètre des canaux (m) ;

ϑ : La viscosité cinématique du fluide (m^2/s).

Si :

- $R_e < 2300$ le régime est dit laminaire
- $2300 < R_e < 10000$: le régime dit transitoire
- $R_e > 10000$: le régime est turbulent

Remarque : [17]

Le coefficient de transmission thermique influe considérablement sur l'efficacité du système caloporteur. Il est absolument nécessaire que le fluide de refroidissement s'écoule de façon turbulente ce qui augmente l'efficacité de ce système de trois à cinq fois.

En écoulement turbulent le coefficient de transmission thermique s'exprime par : [10]

$$h = 0.04 (R_e P_r)^{0.75} * \frac{\lambda_f}{d_c} \dots \dots \dots \text{(III. 32)}$$

Avec :

λ_f : Conductivité thermique du fluide ;

$P_r = \frac{\rho c_p}{\alpha}$: (Nombre de Prandtl).

III.6. Longueur des canaux de refroidissement

Dans le cas où les circuits de refroidissement sont des perçages de forme cylindrique, la longueur des canaux se calcule comme suit :

$$L_c = \frac{A_c}{\pi d_c} \dots \dots \dots \text{(III. 33)}$$

III.7. Calcul de la distance canal-surface moulante [10] [18] [19]

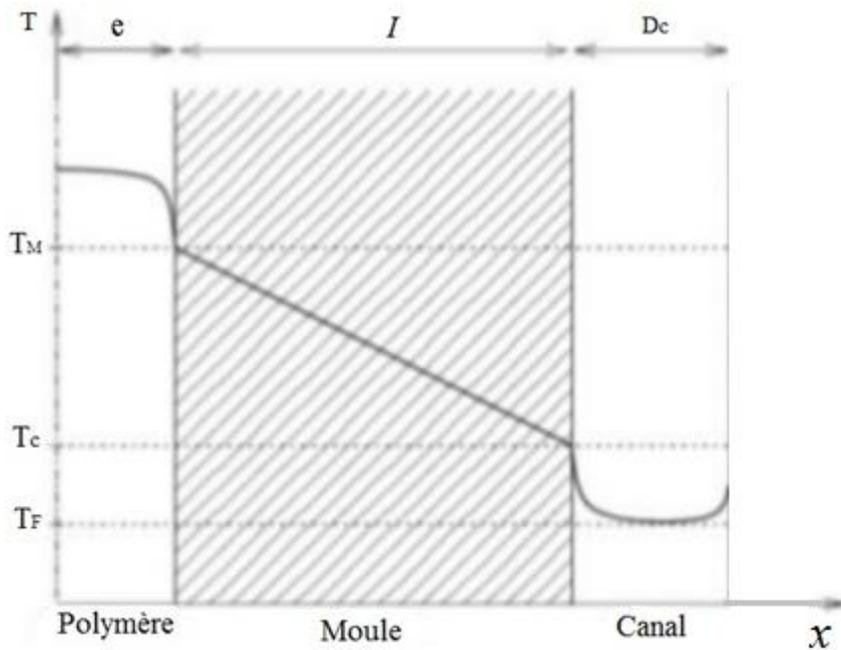


Figure III.4. Schéma explicatif de la distribution de températures dans l'empreinte du moule [19]

La différence de température entre la surface de la cavité moulante et la surface des canaux de refroidissement est due à la conductivité limitée du matériau du moule. La distance entre le canal et la surface moulante est donc déterminée directement à partir de la quantité de chaleur évacuée par conduction :

$$I = \frac{\lambda_m}{Q_f} A_m (T_m - T_c) + \frac{d_c}{2} \dots \dots \dots \text{(III. 34)}$$

Avec : λ_m : conductibilité thermique du moule

A_m : Superficie de la surface moulante

T_c : Température de la paroi des canaux de refroidissement

III.8. Entraxe [10] [19]

L'entraxe « E » est la distance entre deux canaux voisins. C'est un critère d'homogénéité qui permet d'évaluer l'entraxe. Généralement, une valeur voisine de la distance des canaux à l'empreinte permet d'obtenir une bonne uniformité de la température sur la surface moulante.

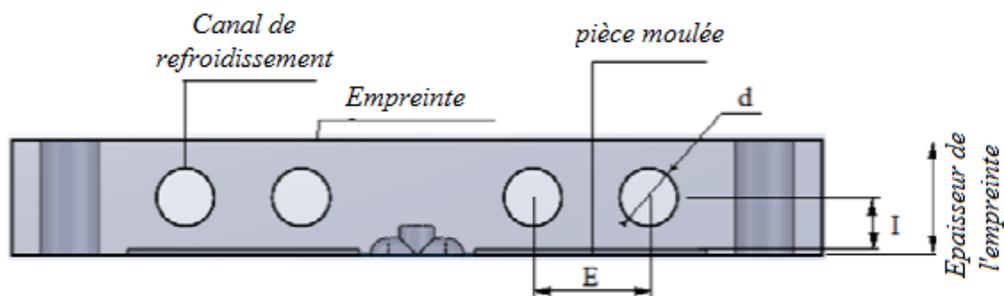


Figure III.5. Schéma explicatif de position d'entraxe dans une empreinte

III.9. Conclusion

Ce chapitre nous a permis de développer les formules nécessaires pour le dimensionnement d'un moule d'injection plastique tout en considérant les différents modes de transfert de chaleur. L'application numérique de ces formules, relative au moule présenté au chapitre précédent, sera traitée dans le chapitre subséquent.

Chapitre IV :

Calcul de vérification

Chapitre IV

Calcul de vérification

IV.1. Introduction

L'objectif de ce chapitre est le calcul de vérification et l'interprétation des résultats dans les deux cas sans circuit de refroidissement et avec circuit.

IV.2. Dimensionnement des circuits de refroidissement

IV.2.1 Calcul du temps de refroidissement

$$t_R = \frac{e^2}{a\pi^2} \ln \left[\frac{8}{\pi^2} \frac{T_i - T_m}{\hat{T} - T_m} \right] \dots \dots (IV.1)$$

e : Epaisseur de la pièce ($1,6 \cdot 10^{-3}m$) ;

T_i : Température de la matière à l'injection (493,15k) ;

\hat{T} : Température moyenne de la section lors du démoulage (313,15k) ;

T_m : Température de moule (303,15k) ;

a : Diffusivité thermique du plastique ($9,62 \cdot 10^{-8}m^2/s$).

$$t_R = \frac{(1,6 \cdot 10^{-3})^2}{9,62 \cdot 10^{-8}\pi^2} \ln \left[\frac{8}{\pi^2} \frac{493,15 - 303,15}{313,15 - 303,15} \right]$$

$$t_R = 7,37s$$

IV.2.2. Calcul du temps de cycle

Le temps de cycle (t_C) d'une presse d'injection ne se résume pas uniquement au temps de refroidissement de la pièce moulée, mais il est composé de :

$$t_C = t_f + t_i + t_R + t_o + t_é \dots \dots \dots (IV.2)$$

Où :

t_f : Temps de fermeture (estimé à environ 5s) ;

t_i : Temps d'injection (3s) ;

t_R : Temps de refroidissement (7,37s) ;

t_o : Temps d'ouverture (5s) ;

$t_é$: Temps d'éjection (5s).

AN :

$$t_c = 5s + 3s + 7,37s + 5s + 5s = 25,37s$$

IV.2.3. Echanges de chaleur dans un moule

Pendant le cycle d'injection, le moule échange de la chaleur avec :

- La matière plastique ;
- Les plateaux de la presse ;
- L'environnement.

A) Flux dégagé par la matière plastique : il est calculé par la formule suivante

$$Q_h = \Delta h \frac{m_M}{t_R} \dots \dots \dots (IV.3)$$

$\Delta h = 328,57 \text{ J/g}$: Différence d'enthalpies où $\Delta h = H_i - H_e$ (voir l'annexe 3)

$t_R = 7,37s$: Temps de refroidissement ;

$m_M = 34,77g$: Masse de la grappe (voir annexe 2)

AN :

$$Q_h = 328,57 \frac{34,77}{7,37} = 1550,12 \text{ W}$$

B) Flux échangé avec l'environnement

Les échanges avec l'environnement se divisent en trois flux différents :

➤ **Un flux convectif :** il est calculé par la formule suivante

$$Q_{Ec_v} = A_{ext} h (T_m - T_E) \dots \dots (IV.5)$$

A_{ext} : Surface extérieure du moule ($0,78 \text{ m}^2$) ;

h : Coefficient de transfert de chaleur dans l'air ($=8 \text{ W/m}^2\text{k}$) ;

T_m : Température du moule ($303,15\text{K}$) ;

T_E : Température de l'environnement (atelier) ($297,15 \text{ K}$).

AN :

$$Q_{Ec_v} = 0,78.8 (303,15 - 297,15) = 37,44\text{W}$$

➤ **Un flux radiatif :**

$$Q_{ER} = A_{ext} \varepsilon C_{rad} \left[\left(\frac{T_m}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_E}{100} \right)^4 \right] \dots \dots (IV.6)$$

Avec :

ε : Émissivité de la matière du moule (0,7) ;

C_{rad} : Constante de radiation ($5.67 \text{ W/m}^2 \text{ K}^{-4}$).

AN :

$$Q_{ER} = 0,78 \cdot 0,7 \cdot 5,67 \left[\left(\frac{303,15}{100} \right)^4 - \left(\frac{297,15}{100} \right)^4 \right] = 20,45 \text{ W}$$

► **Un flux de conduction entre le moule et les plateaux de la presse :**

$$Q_{Ecd} = A_{contact} k (T_m - T_E) \dots \dots (IV.7)$$

Avec :

$A_{contact}$: Surface de contact entre le moule et les plateaux de presse ($0,38 \text{ m}^2$) ;

k : Coefficient de transfert de chaleur ($\text{W/m}^2 \text{ K}$), il est calculé par la formule suivante :

$$k = \frac{\lambda}{e} \dots \dots (IV.8)$$

Avec

e : Epaisseur du moule (m) ;

λ : Conductivité thermique de l'acier (14 W/mK).

AN :

$$K = \frac{14}{0,32} = 43,75 \text{ W/m}^2 \text{ k}$$

AN :

$$Q_{Ecd} = 0,38 \cdot 43,75 (303,15 - 297,15) = 99,45 \text{ W}$$

Le flux thermique avec l'environnement vaut en total:

$$Q_E = Q_{Ecv} + Q_{ER} + Q_{Ecd} \dots \dots (IV.9)$$

AN :

$$Q_E = 37,44 + 20,45 + 99,45 = 157,64 \text{ W}$$

C) Flux échangé par convection avec le fluide de refroidissement

Le flux thermique à évacuer par le fluide de refroidissement est alors aisément déduit à partir des équations :

$$Q_f = Q_h - Q_E \dots \dots (IV.10)$$

AN :

$$Q_f = 1550,12 - 157,64 = 1392,48$$

IV.2.4. Calcul de la température de sortie d'eau

Nous avons d'après l'équation (III.5) :

$$\dot{m} = \frac{Q_f}{C_f (T_s - T_e)} \dots \dots (IV. 11)$$

D'où

$$T_s = \frac{Q_f}{C_f \dot{m}} + T_e \dots \dots (IV. 12)$$

Avec

Q_f : Flux échangé avec le fluide de refroidissement (1392,48W) ;

T_s : Température de sortie d'eau (K) ;

T_e : Température d'entrée d'eau (278,15 K) ;

\dot{m} : Débit massique d'eau (1,001 kg /s) ;

C_f : Chaleur spécifique d'eau (4192 J/Kg K).

AN :

$$T_s = \frac{1392,48}{4192 \cdot 1,001} + 278,15 = 278,48K$$

IV.2.5. Surface nécessaire des canaux

On peut exprimer la transmission de chaleur entre le moule et le fluide de refroidissement de la manière suivante :

$$\dot{Q}_f = h A_c (T_s - T_e) \dots \dots (IV. 13)$$

D'où :

$$A_c = \frac{\dot{Q}_f}{h(T_s - T_e)} \dots \dots (IV. 14)$$

Avec :

A_c : Surface active des canaux (m²) ;

h : Coefficient de transmission thermique (W/m² K) ;

T_s : Température de sortie d'eau (278,48 K) ;

T_e : Température d'entrée d'eau (278,15 K).

Le coefficient de transmission thermique « h » dépend de régime d'écoulement de fluide. Pour déterminer la nature de ce dernier, il faut calculer le nombre de Reynolds.

$$R_e = \frac{v_f d_c}{\vartheta} \dots \dots (IV. 15)$$

Où

v_f : vitesse de fluide de refroidissement (12,7m/s) ;
 d_c : Diamètre des canaux (10^{-2} m) ;
 ϑ : La viscosité cinématique du fluide ($0,13 \cdot 10^{-5} m^2/s$).

AN :

$$R_e = \frac{12,7 \cdot 10^{-2}}{0,13 \cdot 10^{-5}} = 97692,3$$

$R_e > 10000$: Le régime d'écoulement est turbulent, donc le coefficient de transmission thermique s'exprime par la formule suivante :

$$h = 0.04 (R_e P_r)^{0.75} * \frac{\lambda_f}{d_c} \dots \dots (IV. 16)$$

Avec :

λ_f : Conductivité thermique du fluide de refroidissement (0,586W /m K);

$P_r = \frac{\vartheta}{a} = 9.63$: Nombre de Prandtl.

Les valeurs de P_r et λ_f dépendent de la température du fluide. (Voir l'annexe 4)

AN :

$$h = 0.04 (97692,3 \cdot 9,63)^{0.75} * \frac{0,586}{10^{-2}} = 70806,4W/ K m^2$$

$$A_c = \frac{1392,48}{70806,4(278,48 - 278,15)} = 0,06 m^2$$

IV.2.6. Longueur des canaux de refroidissement

Comme les canaux sont de forme cylindrique, leur longueur peut être déterminée en considérant leur surface active :

$$L_c = \frac{A_c}{\pi d_c} \dots \dots (IV. 14)$$

AN :

$$L_c = \frac{0,06}{\pi \cdot 10^{-2}} = 1,91m$$

IV.2.7. Calcul de la distance canal-surface moulante

$$I = \frac{\lambda_m}{Q_f} A_m (T_m - T_c) + \frac{d_c}{2} \dots \dots (IV. 15)$$

Avec :

λ_m : Conductivité thermique du moule (14 W/m K) ;

A_m : Superficie de la surface moulante (0,018 m²) ;

T_c : Température de la paroi des canaux de refroidissement (278 ,15 K).

AN :

$$I = \frac{14}{1392,48} 0,018 (303,15 - 278,15) + \frac{10^{-2}}{2} = 9,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

IV.2.8. Entraxe

La distance entre canaux est égale généralement à la distance canal-surface moulante c-à d : $E = I = 9.5 \text{ mm}$.

IV.3. Comparaison des résultats

Les résultats obtenus dans la section précédente seront comparés avec ceux existant dans le moule afin d'évaluer leur fiabilité. Notons que le moule, est opérationnel et présente une bonne qualité des pièces moulées.

| Paramètre considéré | Résultats théoriques | Résultats expérimentales | Erreur relative % |
|--------------------------|----------------------|--------------------------|-------------------|
| Temps de refroidissement | 7,37 sec | 8 sec | 7.87 |
| Temps de cycle | 25,37 sec | 26 sec | 2.42 |
| Longueur des circuits | 1,91 m | 1,76 m | 22 |
| Distance canal-surface | 9.5 mm | 10mm | 5 |
| Entraxe | 9.5 mm | 30mm | 68 |

Tableau IV.1: comparaison des résultats

Globalement, nous remarquons que la méthode proposée est très efficace pour le dimensionnement des circuits de refroidissement puisque les résultats obtenus sont très satisfaisant. Cependant, nous constatons que la valeur de l'entraxe n'est pas respectée dans la pratique à cause du problème d'encombrement c'est-à-dire qu'il est difficile de respecter la valeur théorique de l'entraxe à cause de la position des éjecteurs. Néanmoins, le refroidissement de la pièce n'est pas affecté expérimentalement vue que, dans ce cas, les dimensions de la pièce moulée sont très petites. La figure suivante représente l'influence des éjecteurs sur l'entraxe dans notre cas :

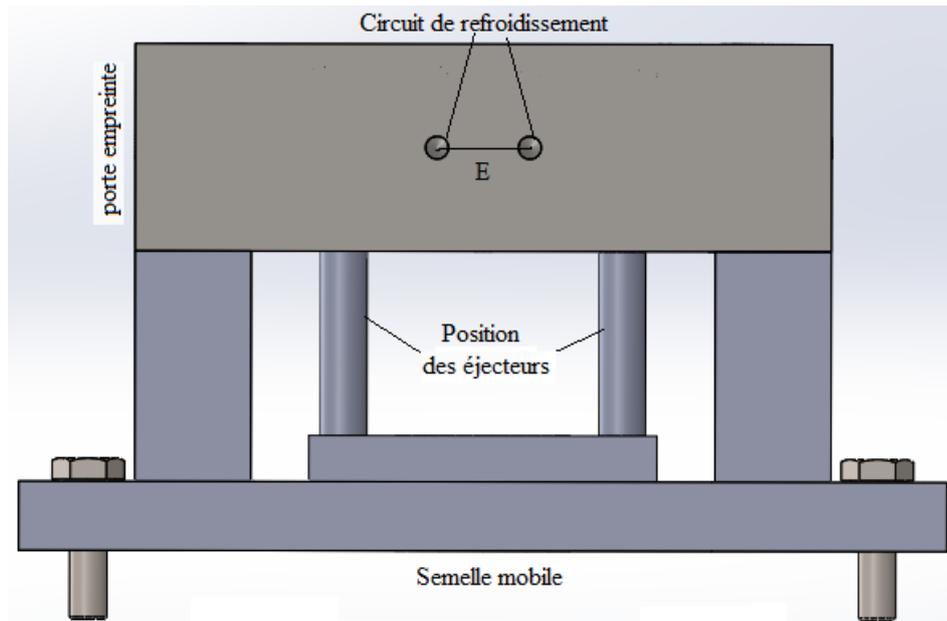


Figure IV.1. L'influence des éjecteurs sur l'entrase

IV.4. Analyse expérimentale du moule sans circuit de refroidissement

Expérimentalement, nous avons effectué des essais au niveau de l'entreprise ENIEM afin de mettre en évidence l'intérêt du circuit de refroidissement. En effet, nous avons fixé le temps de cycle à 38 secondes et nous avons recensé la température des empreintes et du portes-empreintes sans la circulation du fluide de refroidissement. Les résultats obtenus sont récapitulés dans la figure suivante :

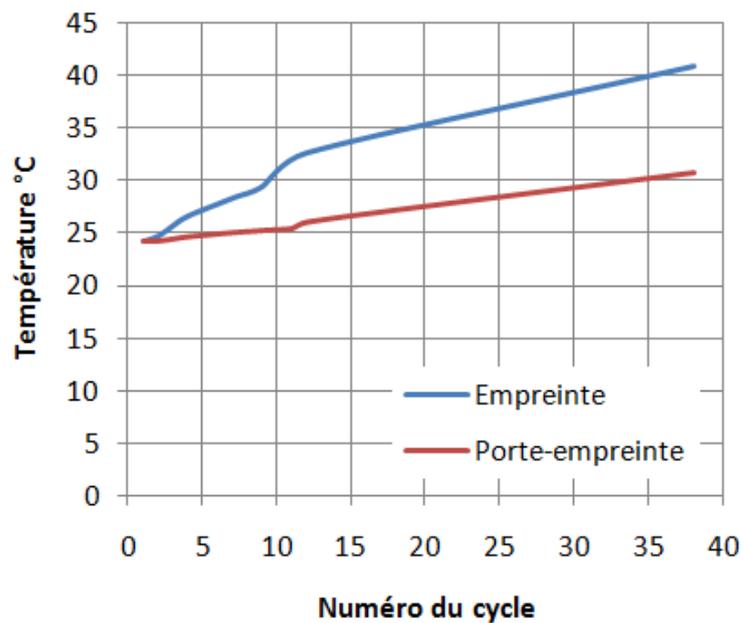


Fig. IV.2 : Evolution de la température de l'empreinte et du porte-empreinte en fonction du nombre de cycle

Sur cette figure, nous remarquons une augmentation de la température en fonction du nombre de cycle où nous enregistrons un écart de 16.6°C après seulement 38 cycles (l'équivalent de 24 minutes). Ainsi, après un certain nombre de cycles, la température de l'empreinte va atteindre celle de l'injection et le temps de cycle va tendre vers l'infini.

Nous constatons également une augmentation de la température du porte-empreinte en fonction du nombre de cycle mais avec une légère différence avec celle de l'empreinte due au phénomène de conduction puisque le porte empreinte n'est pas en contact direct avec la pièce moulée.

Sur la figure suivante, nous présentons l'évolution de la température de l'empreinte en fonction du nombre de cycle en présence du fluide de refroidissement. Cette courbe présente une allure décroissante puisqu'elle a été dressée juste après le cycle précédent (sans la circulation du fluide). Nous constatons après un certain nombre de cycle une stabilité de la température à 30°C ce qui montre l'intérêt du circuit de refroidissement.

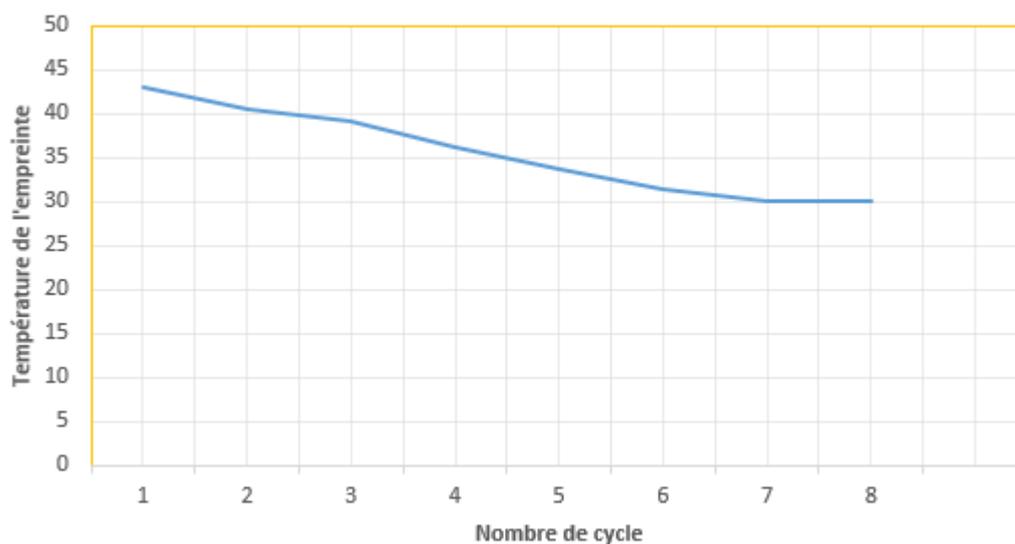


Fig. IV.3 : Evolution de la température de l'empreinte en fonction du nombre de cycle

IV.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous remarquons l'avantage du procédé du moulage par injection sur la cadence de production où nous avons enregistré un temps de cycle très réduit (26 sec) pour la fabrication de deux couvercles en PSB.

Nous constatons une bonne concordance des résultats entre la partie théorique et expérimentale ce qui montre l'efficacité de l'approche proposée.

Nous avons également mis en évidence l'intérêt du circuit de refroidissement à travers une analyse expérimentale où nous remarquons une augmentation croissante de la température du moule en fonction du temps ce qui est néfaste pour le cycle de fabrication.

Enfin, ce chapitre nous a permis de dimensionner les circuits de refroidissement ce qui constitue l'objectif principal de ce travail.

CONCLUSION GENERALE

Dans ce travail, nous nous sommes intéressés à développer le bilan thermique de l'ensemble du moule pour mettre en place une procédure de dimensionnement des circuits de refroidissement. La méthode ainsi développée permet de déterminer les dimensions géométriques des circuits en tenant compte de la température du réfrigérant.

Cette analyse a été établie en utilisant les équations de transfert thermique stationnaire et transitoire. Le modèle stationnaire nous a permis de déterminer les caractéristiques géométriques du circuit et le modèle transitoire nous a permis d'évaluer le temps de refroidissement du polymère dans la cavité moulante.

Une comparaison des résultats obtenus aux mesures expérimentales montre une concordance assez parfaite des résultats ce qui montre l'efficacité de l'approche proposée qui permet, en plus, un traitement très facile et rapide, ce qui répond avec succès à un objectif tant recherché sur le plan théorique et pratique.

Nous avons également, à travers une analyse expérimentale, omis le fluide caloporteur pour mettre en évidence l'intérêt du circuit de refroidissement où nous constatons, une augmentation croissante de la température du moule en fonction du temps ce qui rend le cycle de fabrication de plus en plus long.

Toutefois, cette étude nous a permis:

- ✓ d'élargir nos connaissances dans le domaine de la plasturgie et du moulage;
- ✓ de comprendre la raison pour laquelle les matières plastiques sont de plus en plus utilisées ;
- ✓ de nous familiariser avec un logiciel très utilisé en conception mécanique.

Références

[01] : Site internet (www.plasticseurop.org).20/03/2019

[02] : Site internet (www.inrs.fr/plastiques).20/03/2019

[03] : «Conception des pièces plastiques injectées», ingénieur conseil en plasturgie. JEAN LUC CHARVOLIN, Lavoisier, 2013.

[04] : « Etude et conception à l'aide de l'outil CAO d'un moule d'injection plastique », Mémoire Magister, HEDDAR DJAMEL Eddine- Université Mohammed Khider Biskra.

[05] : «fiche technique», ENIEM.

[06] : «Techniques des fabrications mécaniques». Usinage sans copeaux. J- HISOUT.

[07] : «Couplage thermomécanique appliqué au procédé d'injection Prise en compte de la cristallisation», Thèse de doctorat, Mikael GUEGUEN, Université de Bretagne sud, 2005.

[08] : « CONCEPTION DES MOULES D'INJECTION DES MATIERES PLASTIQUE chapitre 4», Enseignants : HAMMAMIT et LOUATLH, licence génie mécanique.

[09] : « Etude de la qualité des pièces fabriquées en moulage par injection», mémoire master, Gassou Mostafa et Rahmani Ahmed, UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA 2012 /2013.

[10] : « les moules de plasturgie en aluminium ». Centre technique des industries mécaniques 2003.

[11] : site internet (www.ConcepTec.net).06/2019

[12] : «Etude et conception d'un moule a injection pour roue dentée (pignon) », mémoire fin de cycle, Benkhoya ALI, Université Bejaia année universitaire 2013/2014.

[13] : « MEMOTECH Matières plastiques », Matériaux et outillages de mise en forme, Deuxième édition, Claude CORBET.

[14] : «Transferts thermiques, Introduction aux transferts d'énergie », Jean Taine, Franck Enguehard, Estelle lacona, 5^e édition.

[15] : « Transferts thermiques», Yves Jannot, Ecole des Mines Nancy ,2012.

[16] : «La méthode modale en thermique », Gilles LEFEBVRE, Professeur des Universités, Université Paris XII-Val de Marie.

[17] : « Conception et technologie des systèmes thermiques», Leleu, Rene, Paris, Hermès Science Publications, 2002.

[18] : « How to Make Injection Molds», Georg Menges, Walter Michaeli, Paul Mohren, Third Edition.

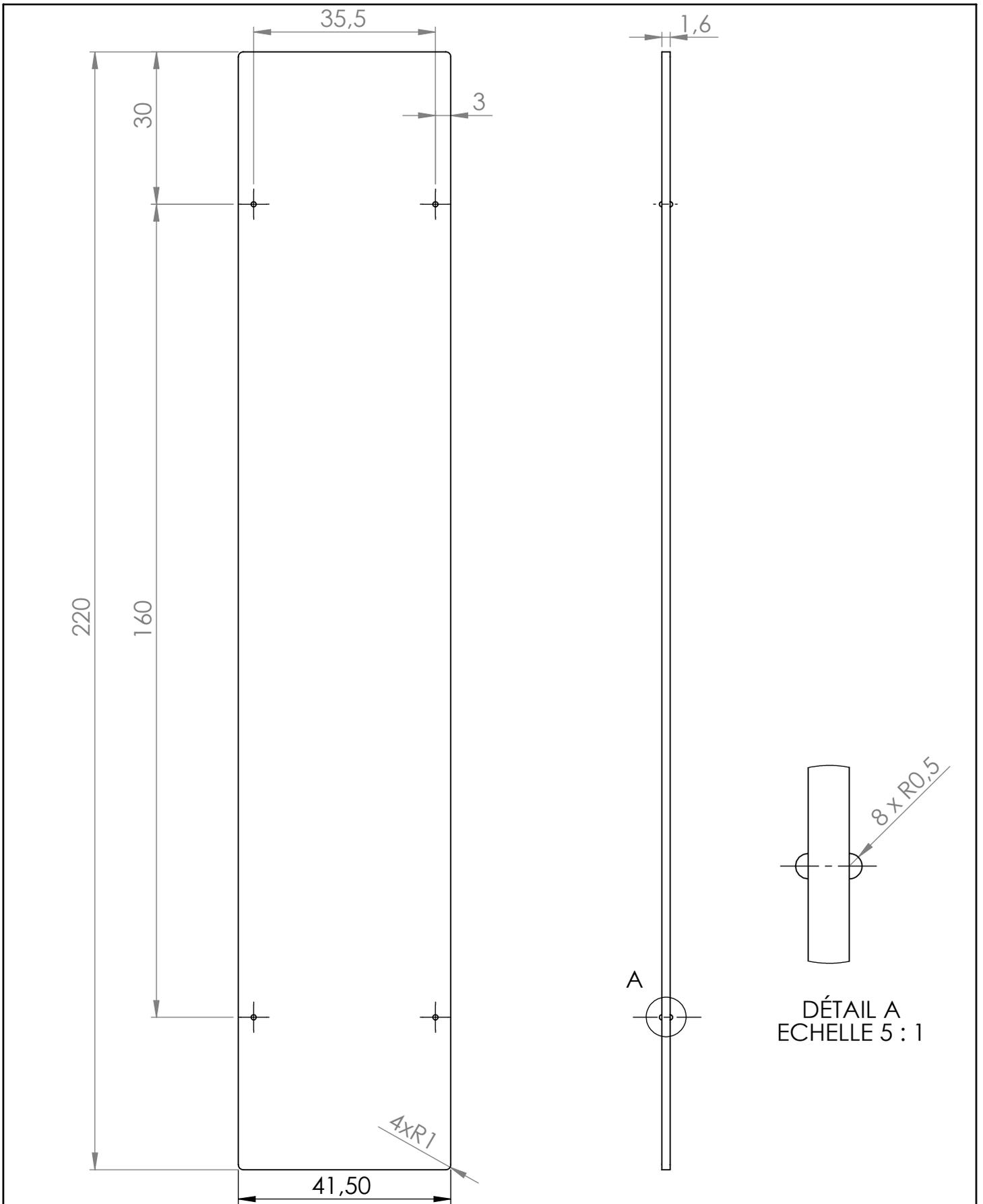
[19] : «Conception du moule d'injection d'une pièce d'automobile », El MCHACHTY MED AMINE, EL FELLAH MOHAMED, Projet de fin d'année, Ecole National Supérieure d'électricité et Mécanique, Département Mécanique, Université Hassan II-Ain Chock-Casablanca, Année universitaire 2014/2015.

[20] : « Etude, conception et fabrication sur ordinateur d'un moule d'injection plastique de deux enjoliveurs d'un réfrigérateur ENIEM », Mémoire d'ingénieur, Mr HAMMA Soufiane, Université Mouloud Mammeri Tizi Ouzou, promotion 2010.

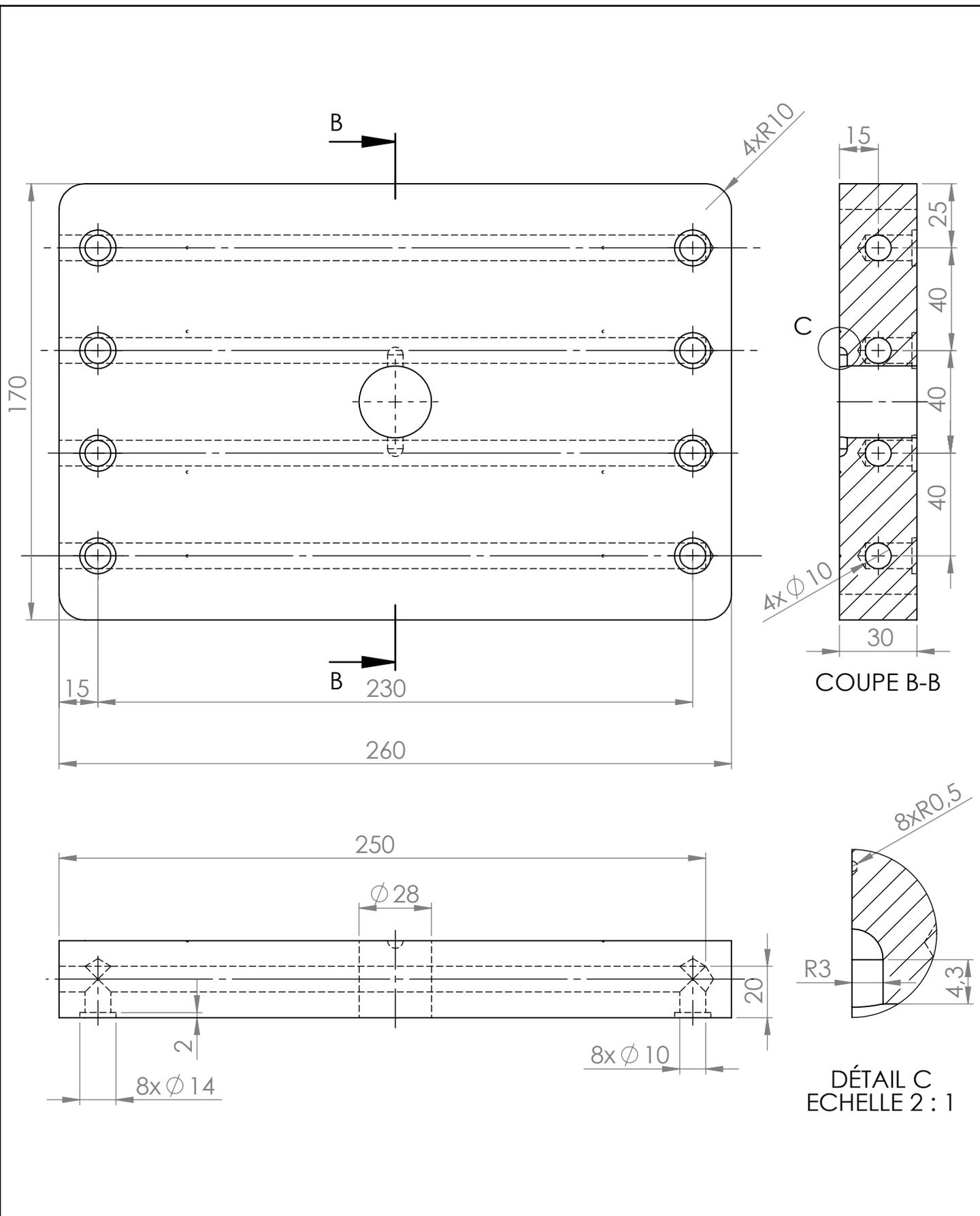
[21] : « Logiciel SolidWorks».

Annexe 1

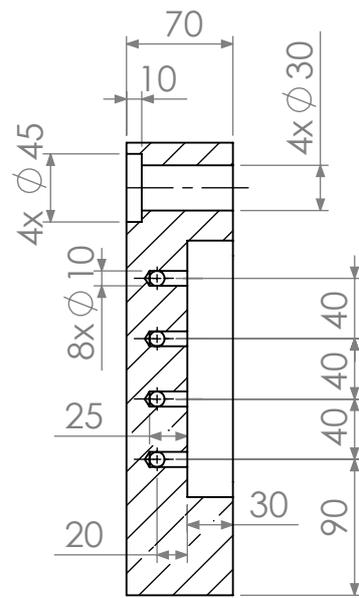
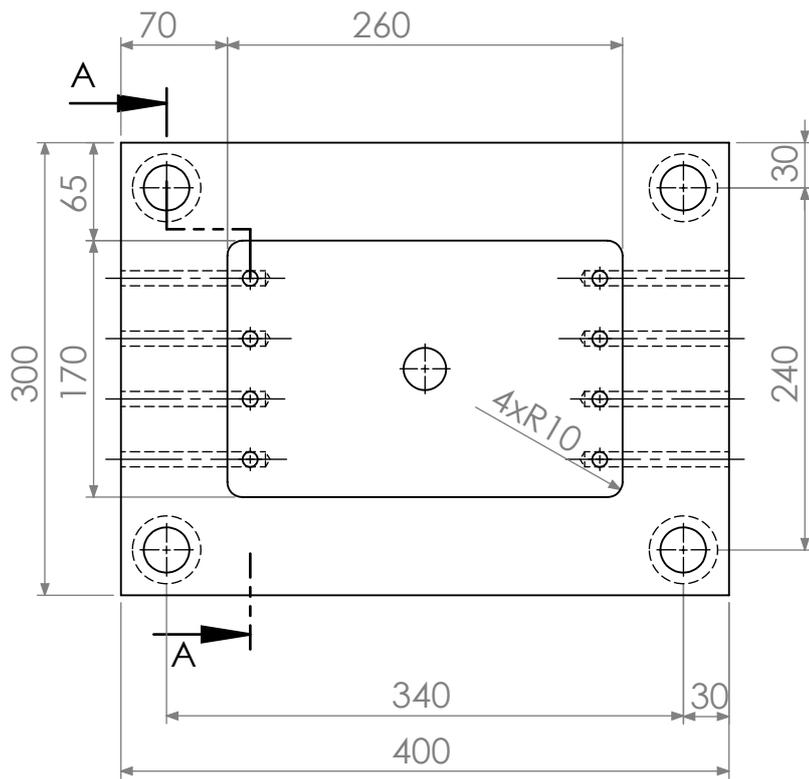
Mises en plan des composants du moule



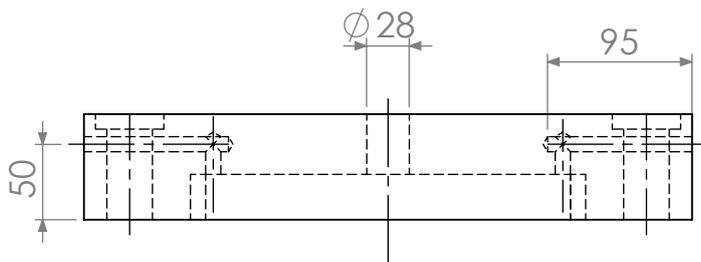
| 01 | 02 | Couvercle Boitier | PSB | Angle de dépouille <math>< 2^\circ</math> |
|-------------|-----|--|---------|---|
| Rep | Nbr | Désignation | Matière | Observation |
| Echelle 1:1 | | MOULE D'INJECTION PLASTIQUE COUVERCLE BOITIER | | Melle BOUGUENNA Melle KHABER |
| A4 | | | | |
| | | Université Akli Mohand Oulhadj - Bouira | | 17/06/2019 |



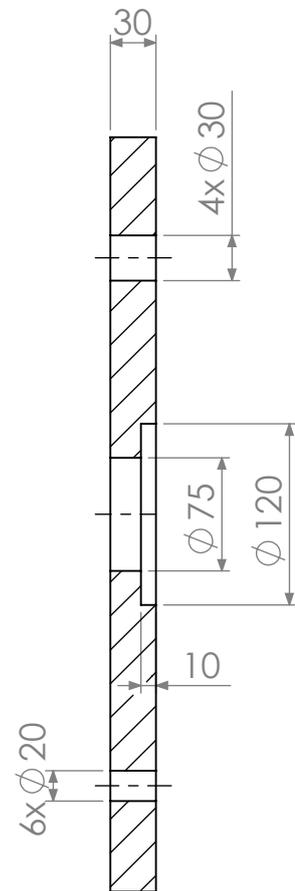
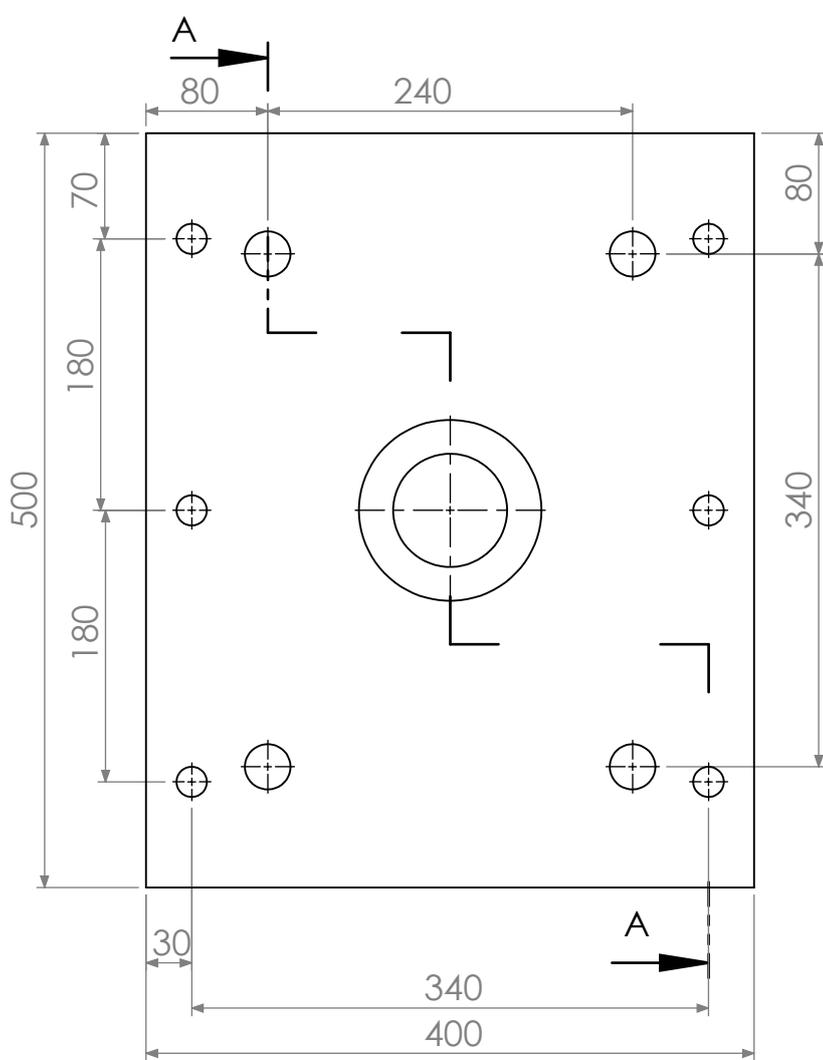
| 02 | 01 | Empreinte fixe | 36 Ni Cr Mo 16 | |
|-------------|-----|--|---|---------------------------------|
| Rep | Nbr | Désignation | Matière | Observation |
| Echelle 1:2 | | MOULE D'INJECTION PLASTIQUE COUVERCLE BOITIER | Université Akli Mohand Oulhadj - Bouira | Melle BOUGUENNA Melle KHABER |
| A4 | | | | |
| | | | | 17/06/2019 |



COUPE A-A

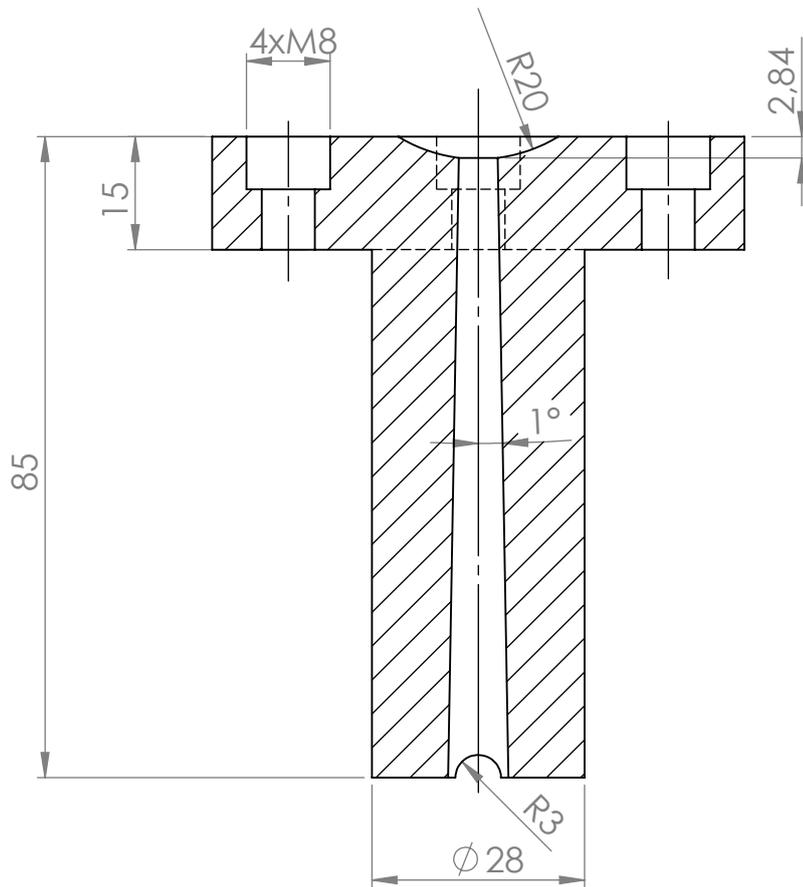
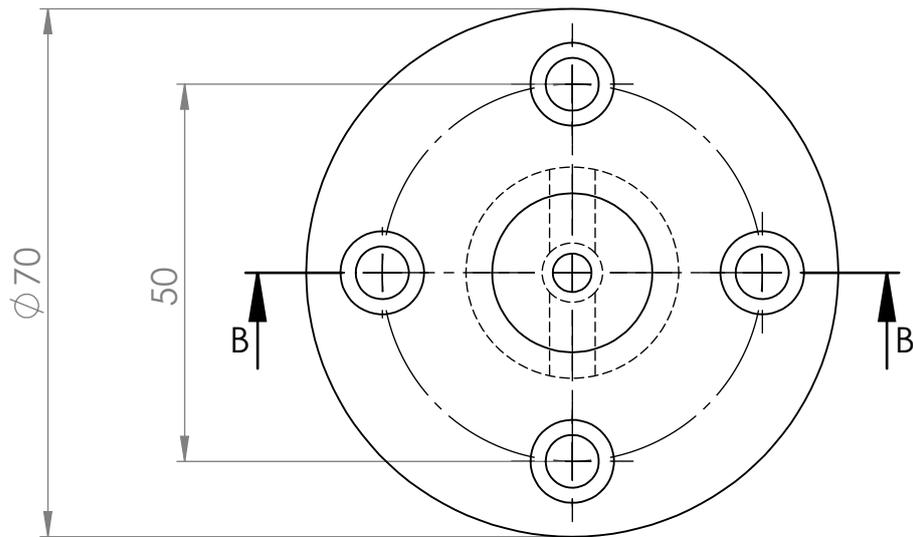


| 03 | 01 | porte empreinte fixe | C 45 | |
|-------------|-----|--|---|---------------------------------|
| Rep | Nbr | Désignation | Matière | Observation |
| Echelle 1:5 | | MOULE D'INJECTION PLASTIQUE COUVERCLE BOITIER | Université Akli Mohand Oulhadj - Bouira | Melle BOUGUENNA Melle KHABER |
| A4 | | | | |
| | | | | 16/06/2019 |



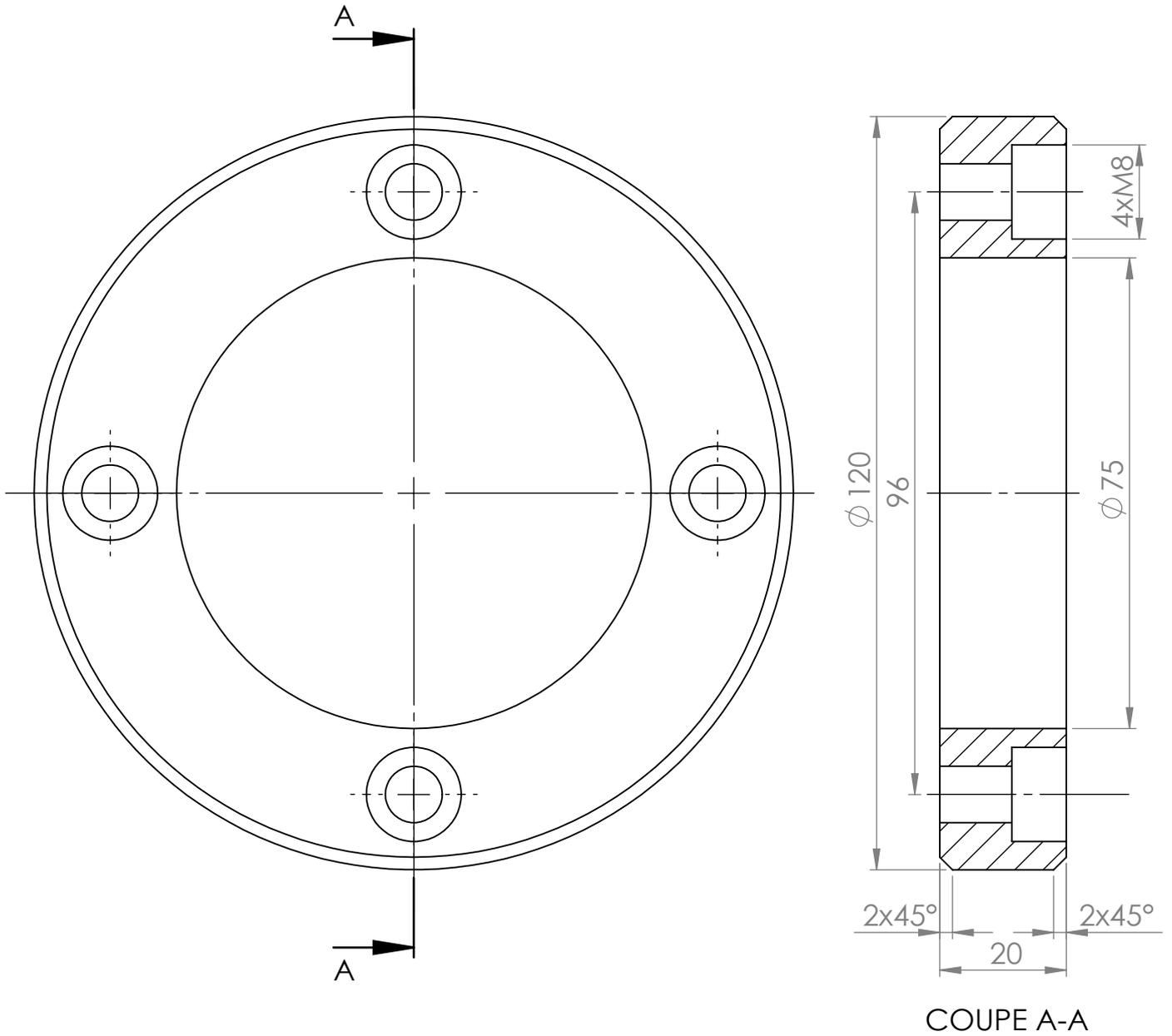
COUPE A-A

| 05 | 01 | Semelle fixe | C 45 | |
|-------------|-----|--|---|---------------------------------|
| Rep | Nbr | Désignation | Matière | Observation |
| Echelle 1:5 | | MOULE D'INJECTION PLASTIQUE COUVERCLE BOITIER | Université Akli Mohand Oulhadj - Bouira | Melle BOUGUENNA Melle KHABER |
| A4 | | | | |
| | | | | 16/06/2019 |

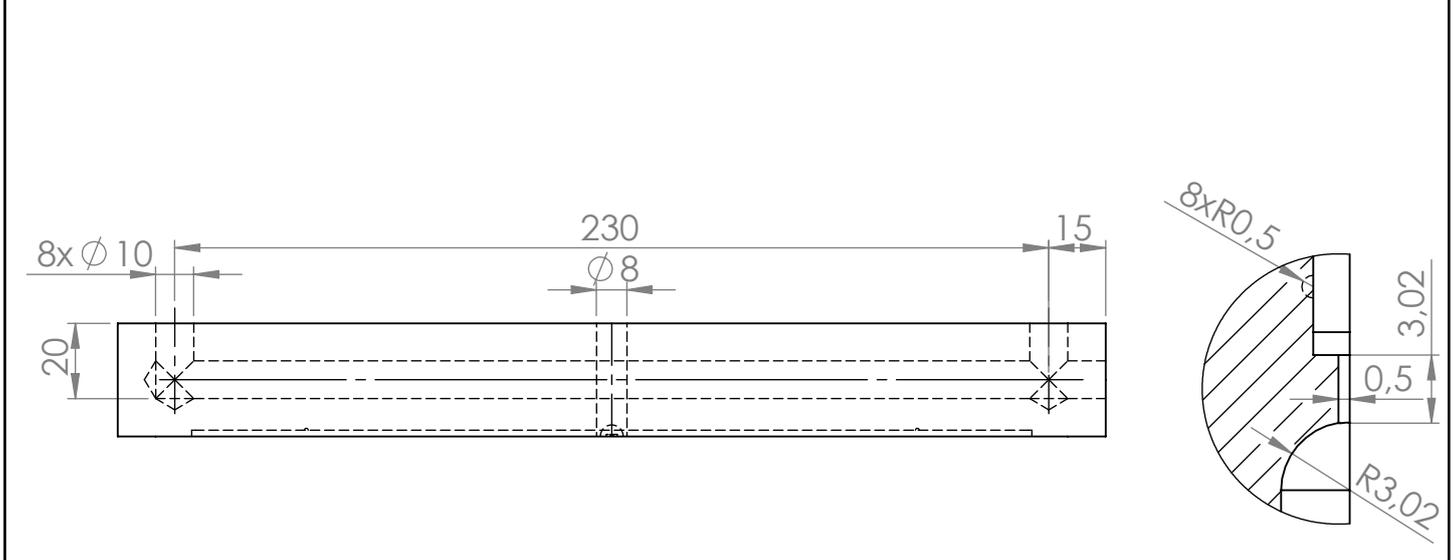
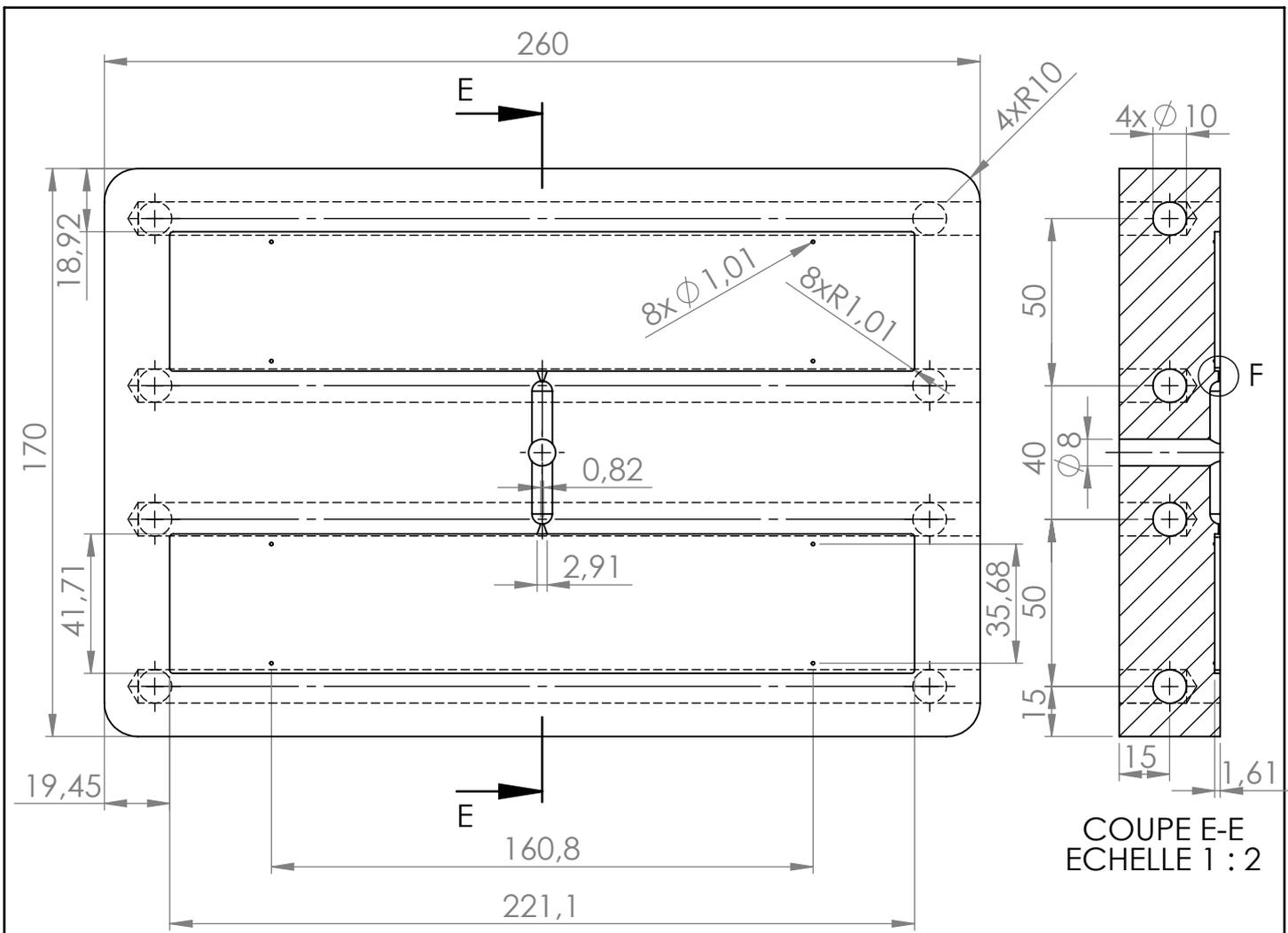


COUPE B-B

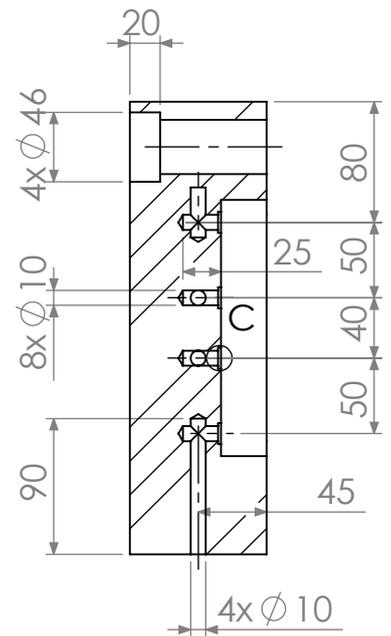
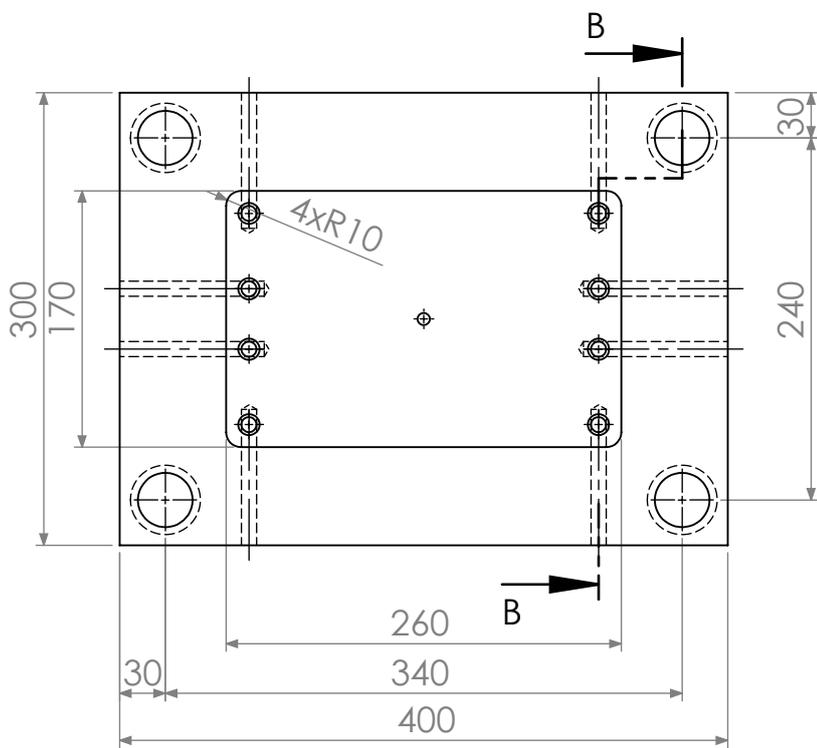
| 06 | 01 | Buse d'injection | 35 Ni Cr 15 | |
|-------------|-----|--|---------------------------------|-------------|
| Rep | Nbr | Désignation | Matière | Observation |
| Echelle 1:1 | | MOULE D'INJECTION PLASTIQUE COUVERCLE BOITIER | Melle BOUGUENNA Melle KHABER | |
| A4 | | | | |
| | | Université Akli Mohand Oulhadj - Bouira | 16/06/2019 | |



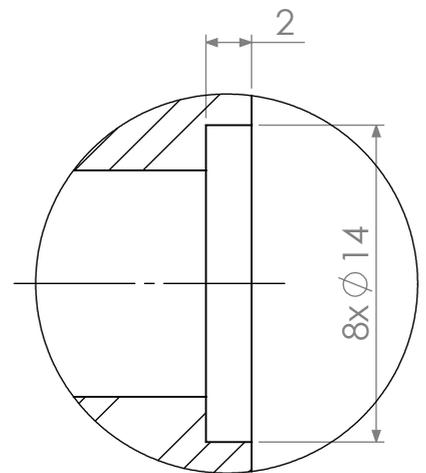
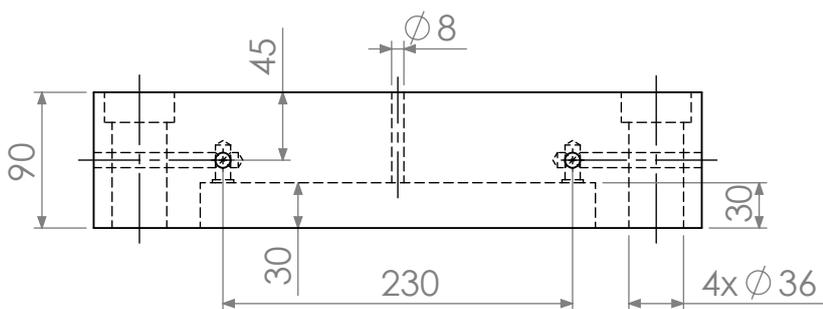
| 07 | 01 | Bague de centrage | acier | |
|-------------|-----|--|---------|---------------------------------|
| Rep | Nbr | Désignation | Matière | Observation |
| Echelle 1:1 | | MOULE D'INJECTION PLASTIQUE COUVERCLE BOITIER | | Melle BOUGUENNA Melle KHABER |
| A4 | | | | |
| | | Université Akli Mohand Oulhadj - Bouira | | 16/06/2019 |



| 08 | 01 | Empreinte mobile | 36 Ni Cr Mo 16 | |
|-------------|-----|--|----------------|---------------------------------|
| Rep | Nbr | Désignation | Matière | Observation |
| Echelle 1:2 | | MOULE D'INJECTION PLASTIQUE COUVERCLE BOITIER | | Melle BOUGUENNA Melle KHABER |
| A4 | | | | |
| | | Université Akli Mohand Oulhadj - Bouira | | 17/06/2019 |

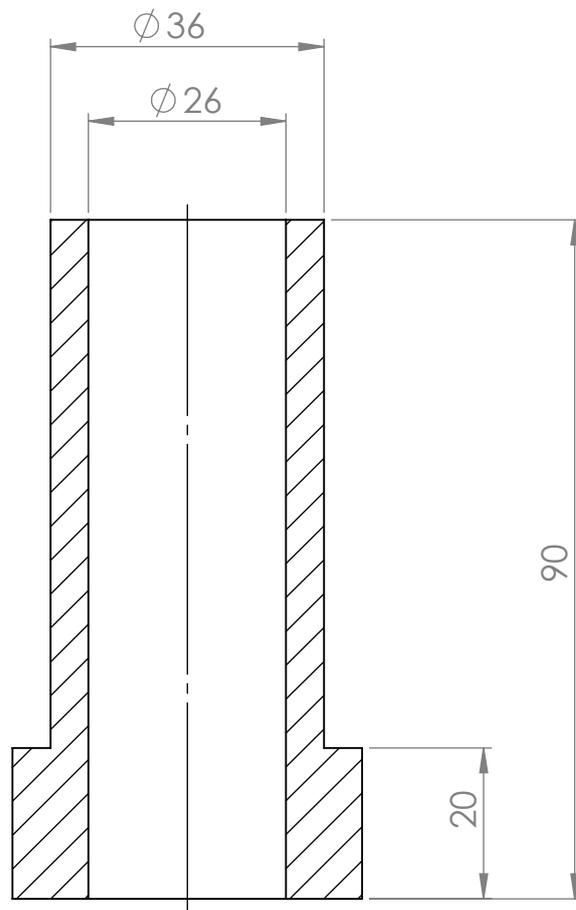
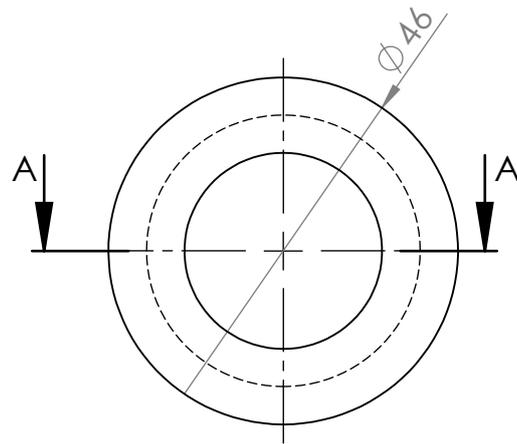


COUPE B-B



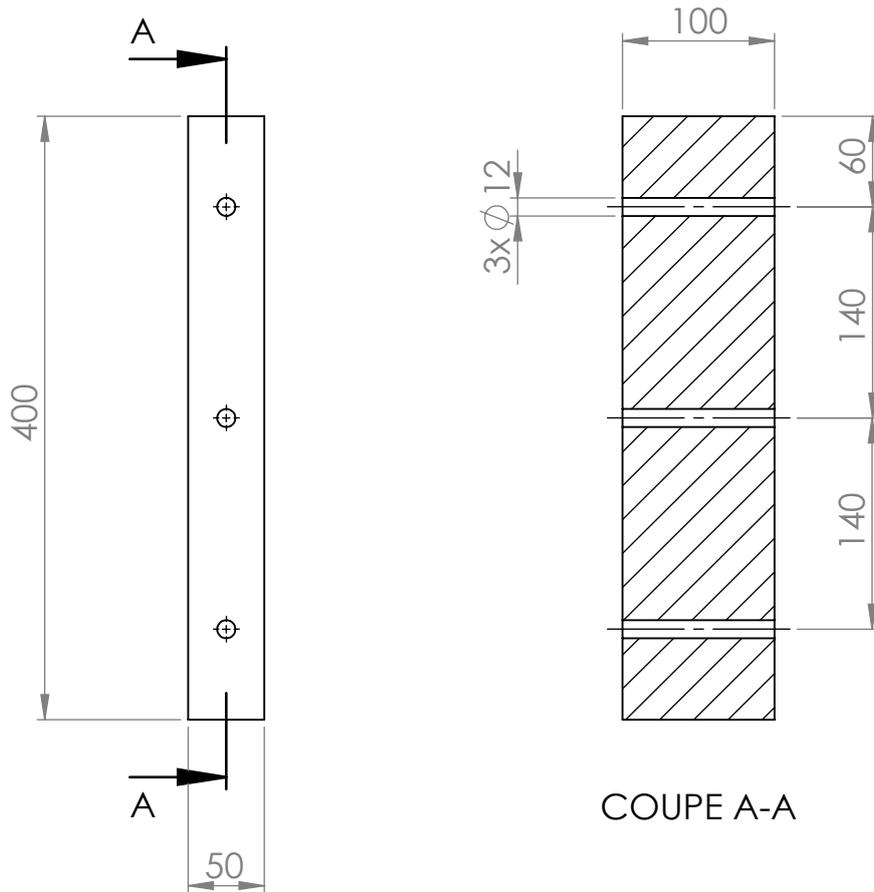
DÉTAIL C
ECHELLE 3 : 1

| 09 | 01 | Porte empreinte mobile | C 45 | |
|-------------|-----|--|---|---------------------------------|
| Rep | Nbr | Désignation | Matière | Observation |
| Echelle 1:5 | | MOULE D'INJECTION PLASTIQUE COUVERCLE BOITIER | Université Akli Mohand Oulhadj - Bouira | Melle BOUGUENNA Melle KHABER |
| A4 | | | | |
| | | | | 17/06/2019 |

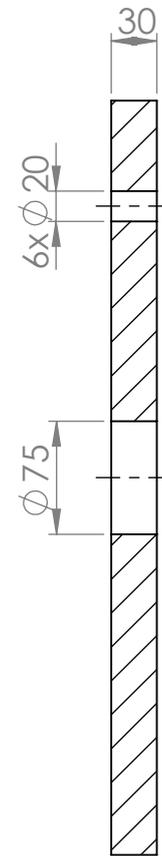
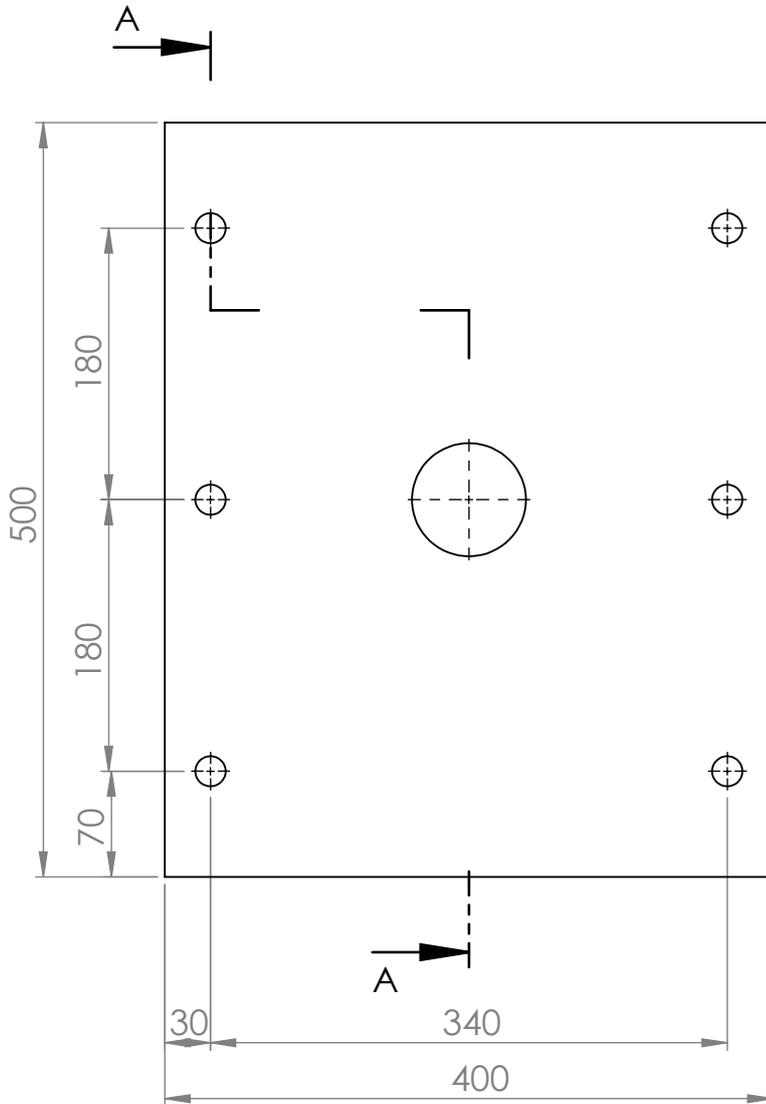


COUPE A-A

| 10 | 04 | Douille de guidage | 35 Ni Cr 15 | |
|-------------|-----|--|---|---------------------------------|
| Rep | Nbr | Désignation | Matière | Observation |
| Echelle 1:1 | | MOULE D'INJECTION PLASTIQUE COUVERCLE BOITIER | Université Akli Mohand Oulhadj - Bouira | Melle BOUGUENNA Melle KHABER |
| A4 | | | | |
| | | | | 16/06/2019 |

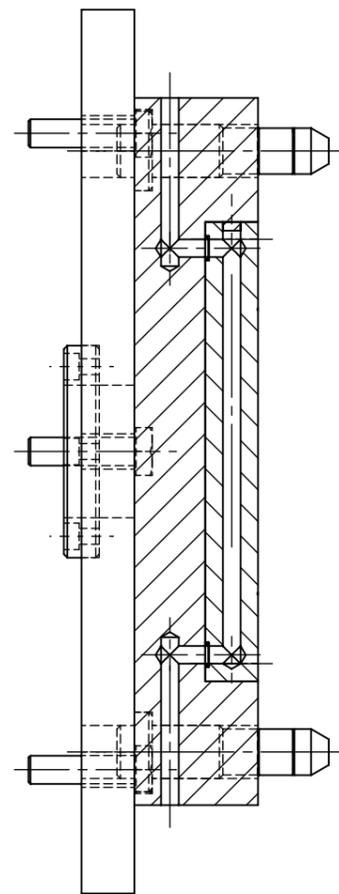
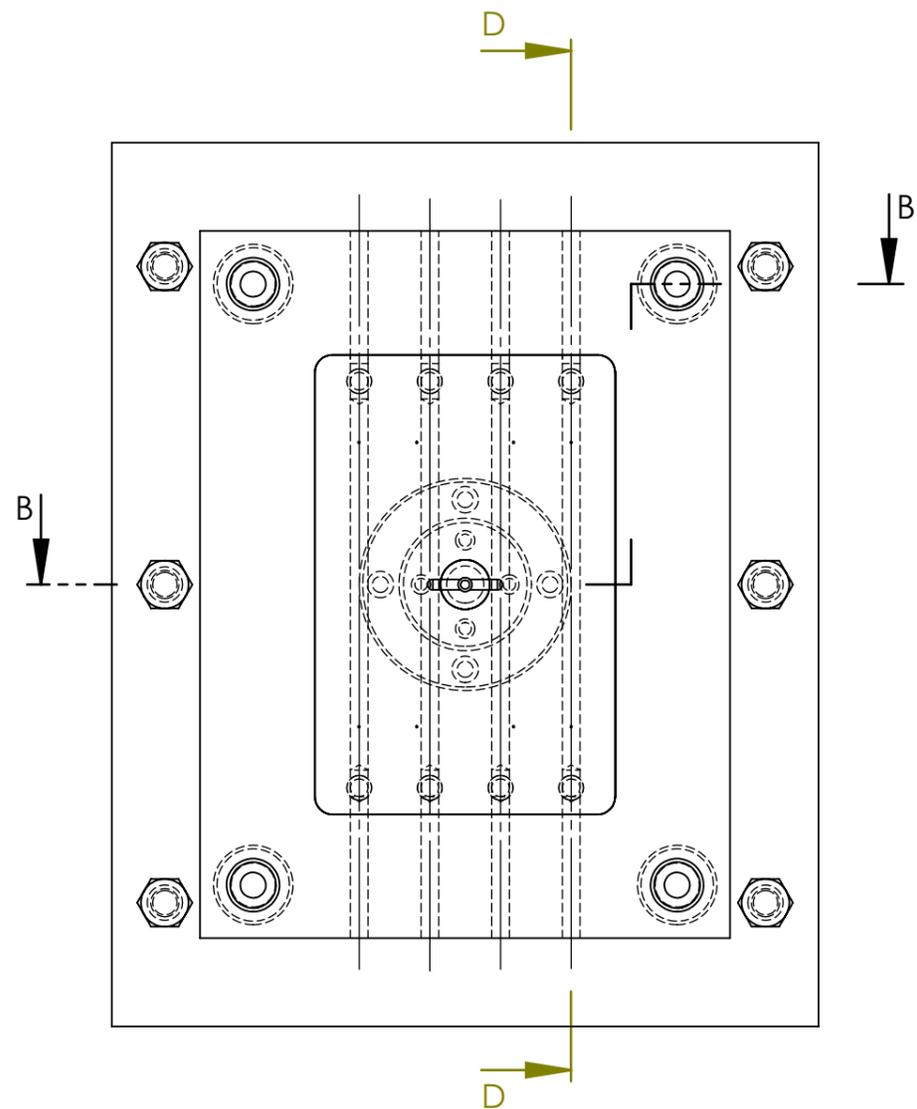


| 11 | 02 | Tasseau | XC 38 | |
|-------------|-----|--|---|---------------------------------|
| Rep | Nbr | Désignation | Matière | Observation |
| Echelle 1:5 | | MOULE D'INJECTION PLASTIQUE COUVERCLE BOITIER | Université Akli Mohand Oulhadj - Bouira | Melle BOUGUENNA Melle KHABER |
| A4 | | | | |
| | | | | 17/06/2019 |

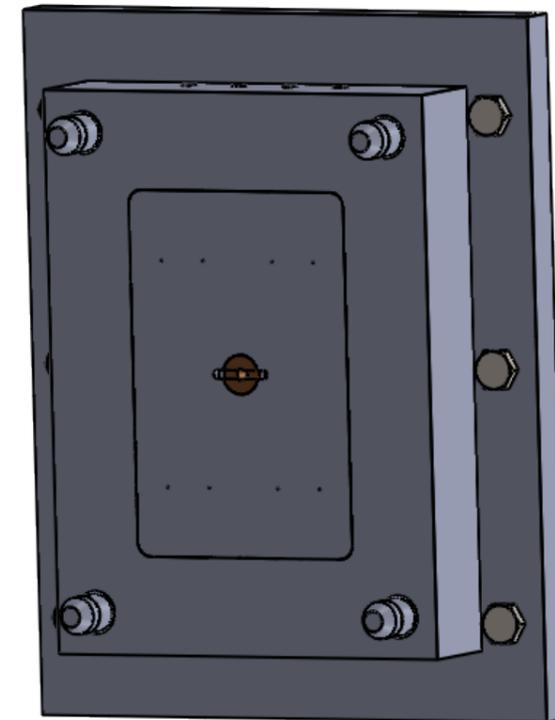


COUPE A-A

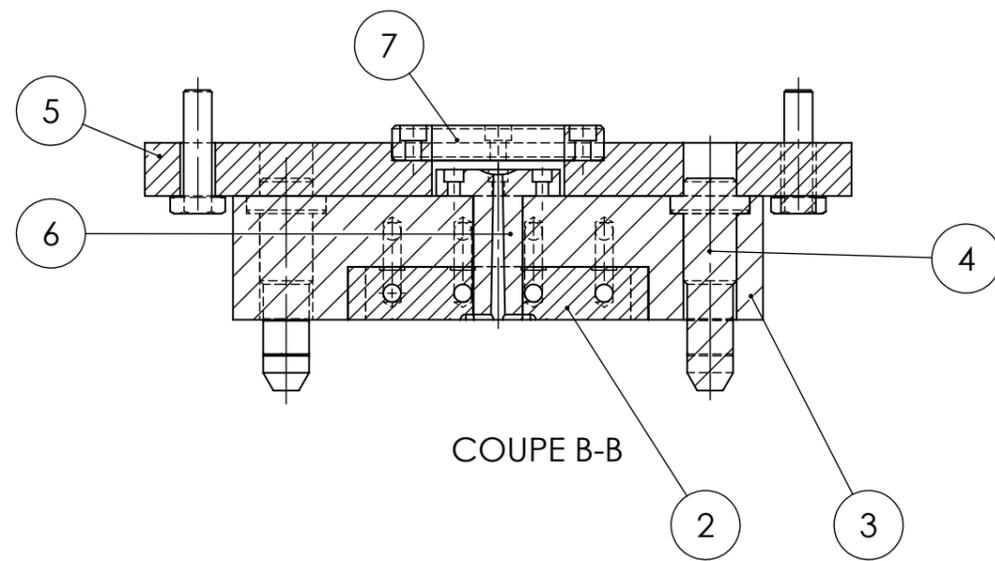
| 12 | 01 | Semelle mobile | C 45 | |
|-------------|-----|--|---|---------------------------------|
| Rep | Nbr | Désignation | Matière | Observation |
| Echelle 1:5 | | MOULE D'INJECTION PLASTIQUE COUVERCLE BOITIER | Université Akli Mohand Oulhadj - Bouira | Melle BOUGUENNA Melle KHABER |
| A4 | | | | |
| | | | | 16/06/2019 |



COUPE D-D

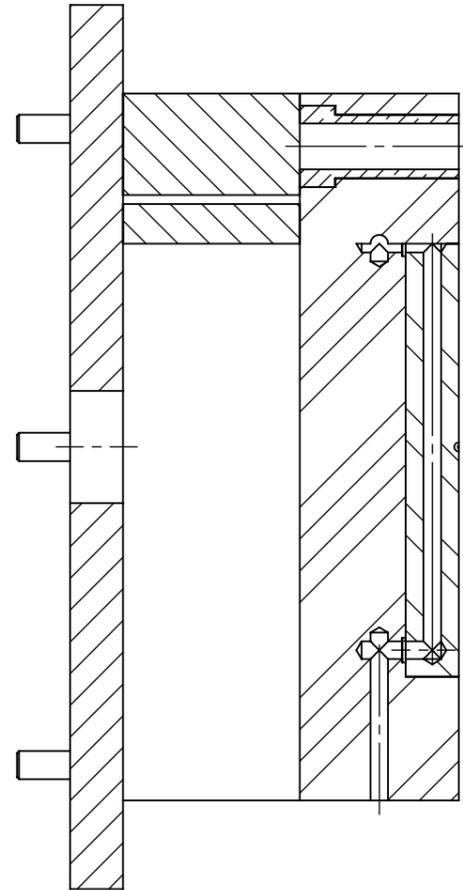
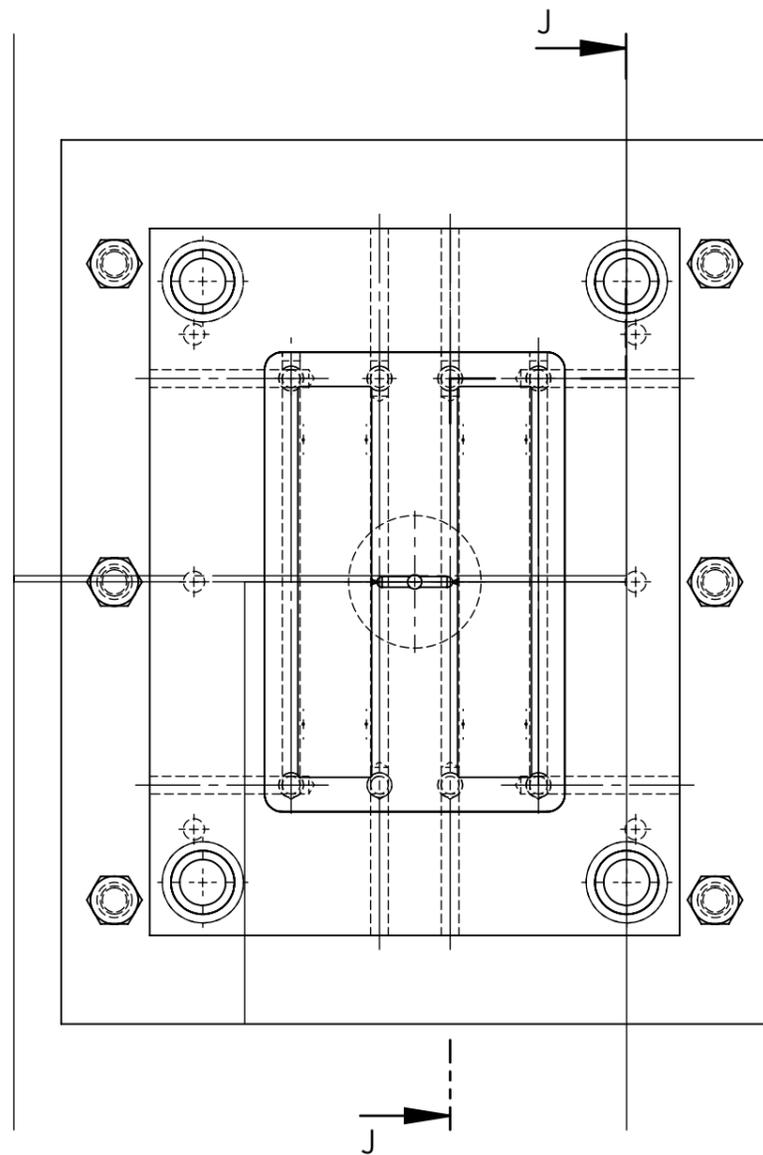


Côtes d'encombrement : 500x400x150 mm
Poids approximatif: 14 276 grammes

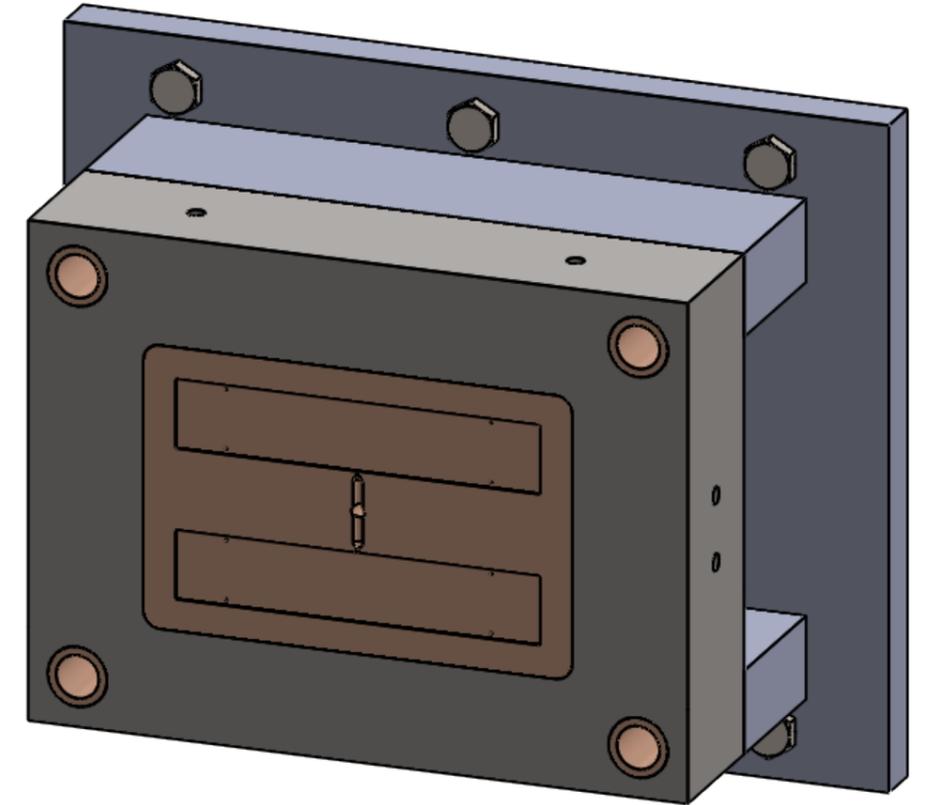


COUPE B-B

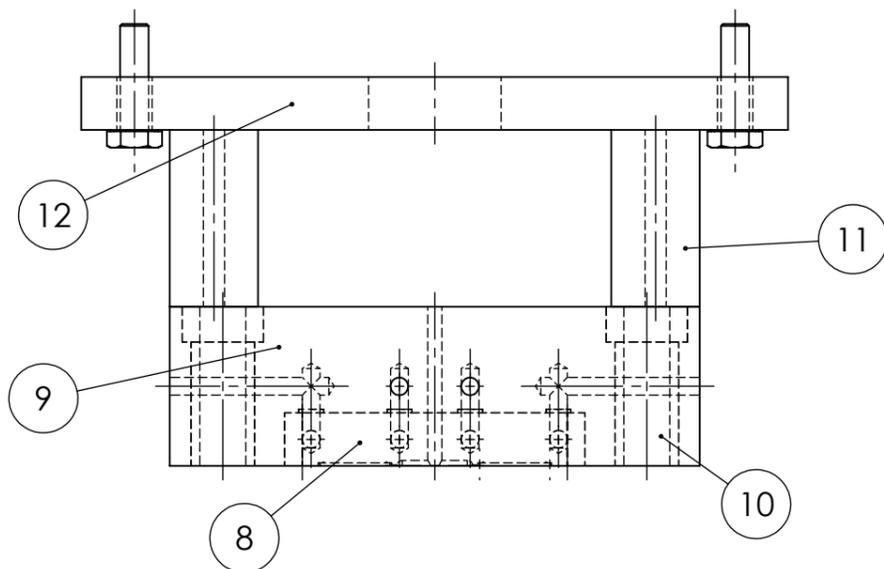
| 07 | 01 | Bague de centrage | C45 | |
|-------------|-----|--|----------------|----------------------------------|
| 06 | 01 | Buse d'injection | 35 Ni Cr 15 | |
| 05 | 01 | Semelle fixe | C 45 | |
| 04 | 04 | Collone de guidage | 16 Cr Ni 4 | Trempé |
| 03 | 01 | Porte empreinte fixe | C 45 | |
| 02 | 01 | Empreinte fixe | 36 Ni Cr Mo 16 | |
| 01 | 02 | Couvercle boitier | PSB | Dépouille <math>< 2^\circ</math> |
| Rep | Nbr | Désignation | Matière | Observation |
| Echelle 1:4 | | MOULE D'INJECTION PLASTIQUE COUVERCLE DE BOITIER PARTIE FIXE | | Melle Bouguenna Melle Khaber |
| A3 | | | | |
| | | Université Akli Mohand Oulhadj - Bouira | | 17/06/2019 |



COUPE J-J
ECHELLE 1 : 4



Côtes d'encombrement : 500x400x220 mm
Poids approximatif: 90761.51 grammes



| 12 | 01 | Semelle mobile | C 45 | |
|-------------|-----|--|----------------|---------------------------------|
| 11 | 02 | Tasseau | XC 38 | |
| 10 | 04 | Douille de centrage | 16 Cr Ni 4 | |
| 09 | 01 | porte empreinte mobile | C 45 | |
| 08 | 01 | Empreinte mobile | 36 Ni Cr Mo 16 | |
| Rep | Nbr | Désignation | Matière | Observation |
| Echelle 1:4 | | MOULE D'INJECTION PLASTIQUE COUVERCLE DE BOITIER PARTIE MOBILE | | Melle Bouguenna Melle Khaber |
| A3 | | | | |
| | | Université Akli Mohand Oulhadj - Bouira | | 24/06/2019 |

ANNEXE 02

MASSE DE LA GRAPPE

La figure ci-dessous montre les propriétés de la grappe (carotte + pièces moulées) : [21]

Propriétés de masse de grappe
Configuration: Défaut
Système de coordonnées: -- par défaut --

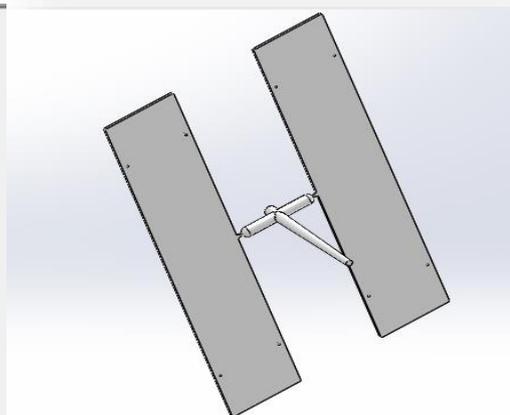
Densité = 0.00 grammes par millimètre cube

Masse = 34.77 grammes

Volume = 32193.89 millimètres cubes

Superficie = 40509.33 millimètres carrés

Centre de gravité: (millimètres)
X = 110.00
Y = -24.25
Z = 2.02



ANNEXE 3

Détermination de l'enthalpie

On ne peut pas calculer la différence d'enthalpie entre l'injection et l'éjection avec la formule connue ($\Delta H = C_p \Delta T$) car dans notre cas on a un changement de phase de matière plastique donc on utilise l'abaque suivante : [13]

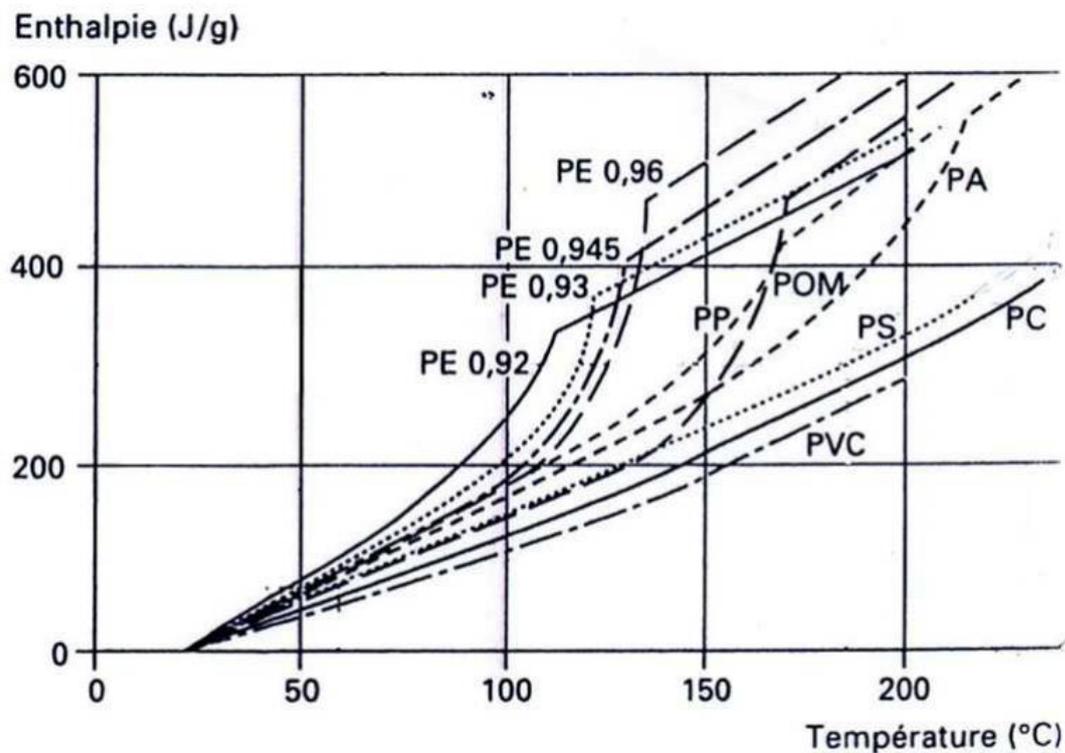


Figure A.2 :Variation d'enthalpie des polymères en fonction de la température .

Remarque : Le PSB à la même caractéristique que PS.

ANNEXE 4

Caractéristiques de l'eau

| Température | ρ | μ | ν | C_p | λ | a | Pr | β |
|-------------|-------------------|------------------------|--------------------------|---------|-----------|------------------------|------|-------------------------|
| °C | Kg/m ³ | Kg/m . s | m ² /s | j/Kg .K | W/m.k | M ² /s | | 1/K |
| 10° | 1001 | 1,3 . 10 ⁻³ | 0,13 .10 ⁻⁵ | 4192 | 0,586 | 13,7 .10 ⁻⁸ | 9,3 | 0,88 . 10 ⁻⁴ |
| 20° | 1001 | 1,0 . 10 ⁻³ | 0,101.10 ⁻⁵ | 4182 | 0,597 | 14,3 .10 ⁻⁸ | 7,02 | 2,06 . 10 ⁻⁴ |
| 40° | 994,6 | 0,651.10 ⁻³ | 0,0658 .10 ⁻⁵ | 4178 | 0,628 | 15,1 .10 ⁻⁸ | 4,34 | 3,72 . 10 ⁻⁴ |

Tableau A.1 : Caractéristiques thermique de l'eau [20]

ANNEXE 5

Caractéristiques de l'Acier [21]

| | |
|-------------------------------------|------------------------|
| Masse volumique | 7800 kg/m ³ |
| Conductivité thermique | 14 W/m k |
| Chaleur spécifique | 440 J/kg k |
| Limite d'élasticité | 750 N/mm ² |
| Module de sciement | 79000N/mm ² |
| Limite de traction | 1000N/mm ² |
| Coefficient de poisson | 0.28SO |
| Coefficient de dilatation thermique | 1.1e ⁻⁵ |

Tableau A.2 : Caractéristiques thermiques de l'Acier