

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR**  
**ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

**UNIVERSITÉ ABDERRAHMANE MIRA BEJAIA**  
**FACULTE DE TECHNOLOGIE**  
**DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE**

MEMOIRE

PRESENTE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME DE

MASTER

FILIERE : GENIE MECANIQUE

SPECIALITE : FABRICATION MECANIQUE ET PRODUCTIQUE

PAR :

BOUMEDJ SALYM

BEKOUR MEDGHIS

## Thème

---

**Etude de conception et analyse de fabrication d'un moule  
en utilisant la fabrication additive**

---

Soutenu le 06/07/2021 devant le jury composé de :

M. BELAMRI Abdelatif	Président
M. METHIA Mounir	Rapporteur
M. IDIR Abdelhak	Examineur

ANNEE UNIVERSITAIRE 2021-2022

## Remerciements

*« Au nom du Dieu le clément et le miséricordieux »*

*On tient en tout premier lieu à présenter l'expression de notre profonde gratitude et nos remerciements les plus sincères à notre promoteur Dr METHIA Mounir, pour la qualité d'encadrement dont on a bénéficié. Merci énormément Monsieur pour votre dévouement, tous les conseils et les encouragements dont vous nous avez fait part, et la confiance que vous avez placée en nous.*

*On tient à exprimer également nos plus chaleureux remerciements à Mr METHIA Nadir, pour votre aide et votre engagement si précieux, ont profondément contribué à notre formation et évolution. Un grand Merci Monsieur pour tout ce que vous avez fait pour nous et pour votre implication dans l'aboutissement de ce projet de fin d'étude.*

*On souhaite également remercier l'ensemble des membres du jury. Nos sincères remerciements à tous les enseignants de l'Université de Bejaia qui ont contribué à notre formation durant ces deux cycles universitaires.*

*Un grand merci.*

## Dédicaces

*Je tiens à dédier ce travail à :*

*Mes parents les deux personnes les plus chères à mes yeux, Ceux qui sont à l'origine même de cette réussite, Ceux qui ont cru en moi, soutenu avec amour, patience et énormément de sacrifices ; que je qualifie d'indénombrables. Au-delà de toute reconnaissance, la vôtre est la plus importante.*

*Mon frère (Nabil) et à ma petite sœur (Imen), les liens qui nous unissent sont inégalable.*

*Mon grand-père et ma défunte Grande mère vous êtes les personnes qui m'ont le plus marqué, en particulier cette influence que vous avez eu sur l'homme que je suis devenu aujourd'hui.*

*A toute ma famille, mes tantes et leurs maris, mes oncles et leurs femmes, grand et petit et à ma grande mère, je tiens à vous dédier ce travaille pour le soutien que vous m'avez apporté de loin ou de près.*

*A Medghis qui été persévérant durant tout le long de notre cursus ainsi pour la réalisation de ce travail.*

*A tous mes amis, à tous frères du C111 merci pour vos soutiens moraux m'ont beaucoup aidé.*

*Salym*

## Dédicaces

*Je dédie ce mémoire à :*

*A mes chers parents Ahmed et Noria pour leurs accompagnements, leurs soutiens,  
et leurs patientes tout au long de mes études.*

*A mes deux chers frères Arab et Idir, et à mes chers sœurs Lamia, Merieme et  
Manal ainsi qu'à mes nièces et neveux*

*Et à toute ma famille.*

*A mes chers amis Abdelhak, Massi, Ali, Salym, Kenza et à tous ce que je n'ai  
pas citer.*

*A tous ce qui ont contribué de prêt ou de loin à la réalisation de ce travail.*

*Medghis*

# Table de matière :

Remerciements .....	2
Dédicaces .....	3
Dédicaces .....	4
Table de matière .....	5
Liste des figures.....	7
Introduction générale.....	9
<b>Chapitre I Généralités sur la fonderie et la fabrication additive.....</b>	<b>11</b>
I.1. Introduction.....	12
I.1.1. La fonderie .....	12
I.1.1.1. Quelques notions de base.....	12
I.1.1.2. Champs d’application .....	13
I.1.2. Le moulage en coquille par gravité .....	14
I.1.2.1. Définition.....	14
I.1.2.2. Origines des règles de tracé .....	15
I.1.2.3. Règles de conception d’une pièce moulée pour assurer sa géométrie finale .....	15
(1) Dilatation thermique .....	15
(2) Déformations .....	15
I.1.2.4. Règles de conception d’une pièce moulée pour assurer son démoulage ...	16
I.1.2.5. Règles de conception d’une pièce moulée pour faciliter le remplissage et améliorer sa durée de vie .....	17
I.1.2.6. Règles de conception d’une pièce moulée pour réduire les coûts et faciliter la mise en œuvre .....	18
I.1.2.7. Règles de conception de l’outillage pour le placement du système de remplissage .....	19
(1) Stratégies de remplissage.....	19
(2) Dimensionnement des canaux .....	20
I.1.3. Le moulage en sable .....	20
I.1.3.1. Généralité.....	20
I.1.3.2. Moulage en sable manuel .....	22
I.1.3.3. Le modèle .....	23
I.1.3.4. Sable utilisé.....	24
I.1.4. La fabrication additive (impression 3D) .....	24
I.1.4.1. Définition.....	24
I.1.4.2. Processus d’impression 3D.....	25
I.1.4.3. Les principaux matériaux utilisés en impression 3D.....	26
I.1.4.4. Les sept familles de procédés de fabrication additive .....	28
I.1.4.5. Les avantages et limites de l’imprimante 3D.....	28
I.1.4.6. Les champs d’application de l’impression 3D.....	29
<b>Chapitre II Étude et conception du moule pour le modèle presse ail.....</b>	<b>33</b>

---

II.1. Introduction .....	34
II.2. Modélisation des pièces .....	34
II.2.1. Cahier des charges .....	35
II.2.2. Modélisation 3D des pièces moulées .....	35
II.2.2.1. Résistance de la pièce a la rupture.....	37
II.3. Modélisation des moules .....	37
II.3.1. Analyse des dépouilles et contre dépouille .....	37
II.3.1.1. Analyse des dépouilles .....	38
II.3.1.2. Analyse de contre dépouille .....	39
II.3.2. Choix du plan de joint.....	40
II.3.2.1. Ligne de joint.....	40
II.3.2.2. Surface d'arrêt .....	41
II.3.2.3. Plan de joint.....	41
II.3.2.4. Conception noyau/empreinte.....	42
II.3.2.5. Noyaux .....	43
II.3.3. Dimensionnement du moule .....	44
<b>Chapitre III Processus de fabrication d'un moule prototype .....</b>	<b>47</b>
III.1. Introduction .....	48
III.2. Présentation de l'imprimante.....	48
III.2.1. Position d'impression .....	49
III.2.2. Matériau d'impression utilisé .....	49
III.3. Paramètre d'impression .....	50
III.3.1. Épaisseurs des couches .....	51
III.3.2. Qualité d'impression.....	52
III.3.2.1. Les vitesses .....	52
III.3.2.2. Remplissage .....	52
III.3.2.3. Périmètre .....	53
III.3.2.4. Les températures .....	53
III.4. Résultat.....	54
III.5. Moulage en sable.....	55
III.5.1. Fabrication du moule en sable .....	55
III.5.1.1. Étapes du moulage en sable .....	55
(1) Élaboration d'un demi-moule .....	55
(2) Réalisation des événements et du trou de coulée .....	57
(3) Assemblage du moule.....	57
(4) Coulée .....	58
(5) Obtention de la pièce .....	58
III.6. Surfaçage des pièces.....	59
III.7. Essaie du moule.....	60
Conclusion générale et perspectives.....	62
Annexe A.....	63
Annexe B.....	65
Références bibliographiques .....	66

---

## Liste des figures

<b>Fig.0-1</b> : Processus de fabrication d'un moule en utilisant l'impression 3D.....	9
<b>Fig. I-1</b> : Exemple du secteur automobile.....	12
<b>Fig. I-2</b> : Petite et grande pièces.....	13
<b>Fig. I-3</b> : Exemple de coquille en deux parties et un noyau.....	14
<b>Fig. I-4</b> : Epaisseurs uniformes et non uniformes.....	16
<b>Fig. I-5</b> : Changement de section progressive.....	16
<b>Fig. I-6</b> : Accumulation de matière et solution.....	16
<b>Fig. I-7</b> : Ajout des dépouilles.....	17
<b>Fig. I-8</b> : Eviter les contre dépouilles.....	17
<b>Fig. I-9</b> : Eviter les croisements.....	17
<b>Fig. I-10</b> : Eviter les angles vifs.....	18
<b>Fig. I-11</b> : Placer les difficultés vers l'extérieur de la pièce.....	18
<b>Fig. I-12</b> : Illustrations de coulées en chute.....	19
<b>Fig. I-13</b> : La coulée en source à tous les points bas.....	20
<b>Fig. I-14</b> : Réduction progressive de la section des canaux.....	20
<b>Fig. I-15</b> : Ensemble d'opérations de moulage en sable.....	21
<b>Fig. I-16</b> : Parties essentiel d'un moule en sable.....	22
<b>Fig. I-17</b> : Matériel nécessaire pour le moulage en sable.....	23
<b>Fig. I-18</b> : Exemple d'une imprimante 3D.....	25
<b>Fig. I-19</b> : Processus d'impression 3D.....	26
<b>Fig. I-20</b> : Procèdes d'impression3D.....	28
<b>Fig. I-21</b> : L'aéronautique et l'aérospatial.....	30
<b>Fig. I-22</b> : Maquette d'un moteur.....	30
<b>Fig. I-23</b> : Secteur médicale exemple de prothèse.....	31
<b>Fig. I-24</b> : Réalisation d'une maquette.....	32
<b>Fig. I-25</b> : Exemple d'accessoires.....	32
<b>Fig. II-1</b> : Presse a ail cassé.....	34
<b>Fig. II-2</b> : Modélisation pièce 01.....	35
<b>Fig. II-3</b> : Modélisation pièce 02.....	36
<b>Fig. II-4</b> : Modélisation pièce 03.....	36
<b>Fig. II-5</b> : Assemblage et rendu final.....	36
<b>Fig. II-6</b> : Simulation à la rupture de l'assemblage.....	37
<b>Fig. II-7</b> : Analyse des dépouilles.....	38
<b>Fig. II-8</b> : Analyse de la dépouille pièce 01.....	38
<b>Fig. II-9</b> : Analyse de la dépouille pièce 02.....	39
<b>Fig. II-10</b> : Pièce 01 et pièce 02 après dépouille.....	39
<b>Fig. II-11</b> : Analyse de la contre dépouille des pièces 01 et 02.....	40
<b>Fig. II-12</b> : Ligne de joint des trois pièces.....	40
<b>Fig. II-13</b> : Surfaces d'arrêt de la pièce 02.....	41
<b>Fig. II-14</b> : Plan de joint pièce 01.....	41
<b>Fig. II-15</b> : Insertion noyau et empreinte de la pièce 03.....	42
<b>Fig. II-16</b> : Insertion noyau/empreinte des pièces 01 et 02.....	43

---

<b>Fig. II-17</b> : Moule pièce 01 avec noyau.....	43
<b>Fig. II-18</b> : Moule pièce 02 avec deux noyaux .....	44
<b>Fig. II-19</b> : Application des températures du moule pièce 03 .....	45
<b>Fig. II-20</b> : Résultats de la simulation du moule de la pièce 03 .....	46
<b>Fig. III-1</b> : Presse ail imprimé .....	48
<b>Fig. III-2</b> : Imprimante 3D creality ender 3.....	49
<b>Fig. III-3</b> : Bobines de filament PLA différente couleurs. ....	50
<b>Fig. III-4</b> : Model importé .....	50
<b>Fig. III-5</b> : Choisir l'épaisseur de couche .....	51
<b>Fig. III-6</b> : Emplacement des couches variable. ....	51
<b>Fig. III-7</b> : Choix nombre de couche .....	52
<b>Fig. III-8</b> : Choix des vitesses.....	52
<b>Fig. III-9</b> : Choix de la densité et le motif de remplissage .....	53
<b>Fig. III-10</b> : Choix des températures. ....	54
<b>Fig. III-11</b> : Estimation du temps d'impression. ....	54
<b>Fig. III-12</b> : Résultat de l'impression du modèle .....	55
<b>Fig. III-13</b> : Matériel utilisé pour le moulage en sable.....	55
<b>Fig. III-14</b> : Châssis posé sur le marbre .....	56
<b>Fig. III-15</b> : Châssis remplie de sable condensé.....	56
<b>Fig. III-16</b> : Châssis retourné.....	56
<b>Fig. III-17</b> : Extraction du modèle et apparition de l'empreinte sur le sable. ....	57
<b>Fig. III-18</b> : (a) Assemblage des deux châssis avec mandrin de coulée (b) Façonnage du canal d'alimentation et d'évent.....	57
<b>Fig. III-19</b> : Positionnement des deux châssis.....	58
<b>Fig. III-20</b> : (a) Four utilisé (b) Coulé de l'aluminium.....	58
<b>Fig. III-21</b> : (a) Séparation des deux châssis (b) Pièce finale.....	59
<b>Fig. III-22</b> : Apparition de la cavité.....	59
<b>Fig. III-23</b> : Surfaçage des pièces.....	60
<b>Fig. III-24</b> : Pièces après surfaçage .....	60
<b>Fig. III-25</b> : Assemblage avec sert joint .....	61
<b>Fig. III-26</b> : Coulée de la sire .....	61
<b>Fig. III-27</b> : Pièce obtenue.....	61

## Introduction générale

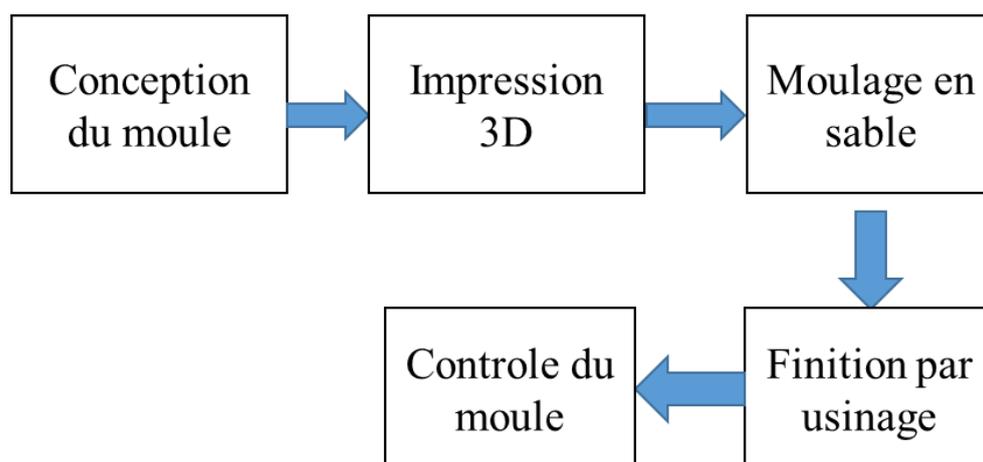
Ce mémoire a été réalisé à l'université de Bejaia en collaboration avec l'entreprise « Fonderie METHIA », qui est situé à Bejaia, commune de Seddouk, village de Takaatz. Cette entreprise est fondée en 1985, et elle est spécialisée dans la fabrication des produits ménagers en aluminium, comme les cuillères, les louches, plats de cuisson et autre ustensiles.

### Problématique

Le développement de la technologie est terriblement rapide dans plusieurs domaines y compris l'industrie du moulage, pour réduire le temps, le coût et possibilité de changer le cas échéant en utilisant le logiciel SolidWorks pour concevoir les moules avec les spécifications requises.

L'objectif du mémoire est de concevoir un ustensile (presse ail) qui répond aux critères des usagers et la conception de son moule à l'aide du logiciel de CAO SolidWorks. Cet outil nous permet de développer des moules plus précis et aussi de visualiser notre produit avant de lancer la fabrication, ce qui améliorent la rentabilité.

Pour la partie fabrication nous avons combiné deux procédés, le premier est l'utilisation de l'impression 3D pour la fabrication de la pièce modèle. Cette technologie est présentée comme la nouvelle révolution industrielle, grâce à sa démocratisation au grand public. Le second est l'utilisation du moulage en sable pour la fabrication du moule en aluminium, afin d'illustré le processus proposé dans cette étude comme le montre la **Fig.0-1**.



**Fig.0-1** : Processus de fabrication d'un moule en utilisant l'impression 3D.

## Structure du manuscrit

Le présent manuscrit s'articule de la manière suivante :

- Dans le premier chapitre nous abordons les généralités de la fonderie et ces domaines d'application, le principe du moulage en coquille par gravité et du moulage en sable, ainsi que la théorie qui les entoure. Ensuite, on abordera quelques définitions à propos de la fabrication additive et les domaines d'utilisation de l'impression 3D.
- Le second chapitre est consacré à l'étude de conception des différentes pièces composants l'assemblage à mouler et de leurs moules.
- Le dernier chapitre englobe les différentes étapes de fabrication des moules, grâce à l'impression 3D et du moulage en sable.

---

# Chapitre I Généralités sur la fonderie et la fabrication additive

---

## I.1. Introduction

Ce premier chapitre est dédié aux différentes généralités et notions de base autour des procédés utilisés dans la fabrication des pièces on présente les généralités sur la fonderie, le moulage en sable et la fabrication additive.

### I.1.1. La fonderie

Procédé de formage des métaux, la fonderie consiste à couler un métal ou un alliage liquide dans un moule afin de reproduire une pièce dans ses formes intérieures et extérieures, en limitant les travaux de finition après refroidissement. Utilisées dans des secteurs variés (aéronautique, automobile, robinetterie, appareils ménagers, ...) les techniques dépendent du matériau, des dimensions et des caractéristiques géométriques de la pièce à obtenir, mais également, des quantités à produire. [1]



**Fig. I-1** : Exemple du secteur automobile.

#### I.1.1.1. Quelques notions de base

Le principe de la fonderie est de couler un alliage dans un moule. La température de coulée dépend du type d'alliage utilisé ; à titre d'exemple, les alliages de zinc sont chauffés à 400°C, les alliages d'aluminium à 700°C, les alliages cuivreux à 1250°C et les alliages ferreux à 1550°C.

Le refroidissement génère la solidification et l'obtention de la pièce brute ou finie. Dans un procédé de fonderie, trois classes de problèmes se posent :

- Fabriquer le moule.
- Couler la pièce.
- Extraire la pièce.

Un procédé de fonderie correspond à la résolution de ces trois problèmes. [2]

### I.1.1.2. Champs d'application

La fonderie permet d'obtenir des pièces creuses, des pièces complexes avec des cavités (figure 1). La précision des côtes permet de supprimer les reprises de finition, réduisant ainsi les coûts d'usinage comme de matières.

Ce procédé permet également de réaliser des pièces avec des matériaux difficiles à usiner, qui ne se prêtent pas au laminage, forgeage ou matriçage comme des pièces à haute teneur en silicium ou en fonte. [10]

Les pièces obtenues font de quelques grammes à plusieurs centaines de tonnes (**Fig. I-2**) de l'unitaire à la grande série et à destination de bien des domaines :

- Appareils ménagers.
- Machines de travaux publics, machines-outils.
- Serrurerie, quincaillerie, robinetterie, raccords, pompes.
- Constructions mécaniques divers.
- Automobile, cycles, moto, machines agricoles.
- Chemin de fer, construction navale, construction aérospatiale, construction électrique.



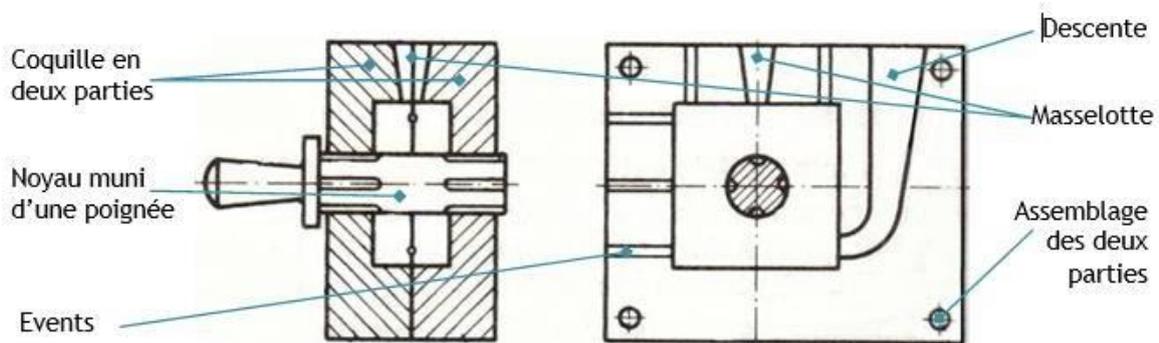
**Fig. I-2** : Petite et grande pièces.

## I.1.2. Le moulage en coquille par gravité

### I.1.2.1. Définition

Le moulage en coquille consiste à obtenir une pièce à partir d'un moule métallique constitué de plusieurs parties, dans lequel est coulé un alliage en fusion. Les formes intérieures de la coquille déterminent les formes extérieures de la pièce, éventuellement complétées de noyaux et broches. Le remplissage de la coquille se fait sous la seule action du poids de l'alliage, soit par gravité ou coulée directe, soit en source, de bas en haut suivant le principe des vases communicants.

Le moulage en coquille par gravité offre plusieurs avantages, comme une production rapide et constante dans le temps, la possibilité de grandes séries à de grandes cadences, et une mise en forme de pièces aux formes complexes, au plus près de la pièce finie. En respectant des règles de tracé, le procédé de moulage en coquille permet une précision et une constance dans les dimensions des pièces, la simplification et la réduction de l'usinage, la réalisation de pièces aux formes internes complexes. [3]



**Fig. I-3 :** Exemple de coquille en deux parties et un noyau.

### **I.1.2.2. Origines des règles de tracé**

L'ensemble des règles qui sont exposées ont toujours un objectif triple :

- Permettre le remplissage complet de l'empreinte.
- Garantir la qualité géométrique de la pièce après démoulage.
- Garantir la santé du matériau et l'absence de défauts.

### **I.1.2.3. Règles de conception d'une pièce moulée pour assurer sa géométrie finale**

Lors de la conception du brut de fonderie, un certain nombre d'éléments sont à prendre en compte afin de s'assurer l'obtention d'une pièce aux côtes :

- Le bon remplissage de l'empreinte.
- La dilatation thermique du matériau.
- Les déformations possibles après ouverture du moule.

#### **(1) Dilatation thermique**

Comme le métal est conformé à haute température, il est important sous peine d'avoir des écarts géométriques de prendre en compte la dilatation thermique de la pièce lors de la conception du brut. Il faut ainsi augmenter toutes les dimensions du brut par une valeur dépendant du matériau et de la température de coulée :

- 3 à 6% pour les fontes.
- 5 à 7% pour les aciers.
- 4 à 7% pour les alliages légers.
- 5 à 6% pour les bronzes.

#### **(2) Déformations**

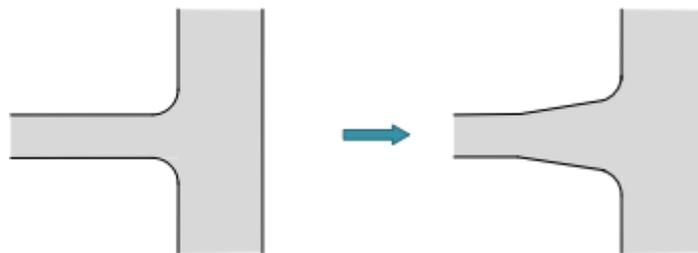
La solidification différentielle entre les parties de la pièce ainsi que la dilatation après ouverture du moule peuvent causer des déformations de la pièce lors du retour à température ambiante. Ainsi, il est important de respecter certains tracés. [4]

Conserver des épaisseurs uniformes : exemple (**Fig. I-4**).



**Fig. I-4 :** Epaisseurs uniformes et non uniformes.

Si la destination de la pièce exige des variations d'épaisseurs, il faut prévoir des changements de sections progressives : exemple (**Fig. I-5**).



**Fig. I-5 :** Changement de section progressive.

Eviter les accumulations de matière : exemple (**Fig. I-6**).



**Fig. I-6 :** Accumulation de matière et solution.

#### **I.1.2.4. Règles de conception d'une pièce moulée pour assurer son démoulage**

La technologie du moulage par coquille impose la présence d'un plan de joint et d'une cinématique d'ouverture du moule par rapport à ce dernier. Afin de permettre le démoulage de la pièce, il est primordial d'ajouter des dépouilles à toutes les surfaces perpendiculaires au plan de joint, c'est-à-dire d'ajouter de la matière afin d'assurer un angle minimal de 3° entre la surface et la normale au plan de joint **Fig. I-7**.



**Fig. I-7 :** Ajout des dépouilles.

En effet toutes ces surfaces sont non-seulement sources de frottements entre le moule et la pièce, mais les effets de dilatation peuvent venir exercer des efforts sur ces surfaces (la matière vient se contracter autour d'une excroissance de la coquille par exemple).

De même, il est très important de laisser le moins possible de contre-dépouille (**Fig. I-8**). C'est à dire d'angle négatif (rentrant) avec le plan de joint. En effet cela bloque la cinématique d'ouverture du moule, et impose d'ajouter des noyaux ou tiroirs augmentant le coût de réalisation de la pièce. [5]



**Fig. I-8 :** Eviter les contre dépouilles.

#### I.1.2.5. Règles de conception d'une pièce moulée pour faciliter le remplissage et améliorer sa durée de vie

La santé de la pièce (inclusions d'oxydes, présences de bulles, de micro-retassures) est très dépendante de l'écoulement de la matière lors du remplissage de l'empreinte ainsi que de son refroidissement une fois l'empreinte remplie.

Afin d'éviter les micro-retassures, la meilleure stratégie est d'uniformiser le temps de solidification sur toute la pièce. Ainsi nous cherchons au maximum à éviter les croisements (**Fig. I-9**) ou autres bossages.[6]



**Fig. I-9 :** Eviter les croisements.

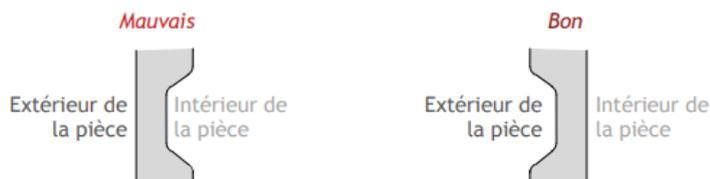
Un des moyens de lutter contre les bulles d'air et les inclusions d'oxydes dans la pièce et d'assurer un écoulement laminaire dans l'empreinte et pour cela il est conseillé d'éviter au maximum les angles vifs. Par ces angles auront tendance, en plus de générer un écoulement turbulent, à détériorer la santé de la pièce en générant des criques lors du refroidissement **Fig. I-10**.



**Fig. I-10** : Eviter les angles vifs.

#### I.1.2.6. Règles de conception d'une pièce moulée pour réduire les coûts et faciliter la mise en œuvre

Lors de la réalisation d'une pièce par moulage en coquille, il est très intéressant d'orienter les difficultés (écart de géométries, formes complexes) vers l'extérieur de la pièce (**Fig. I-11**). Cela impliquera un usinage de la coquille plutôt qu'un assemblage de noyau; en effet les noyaux subissent des contraintes lors du refroidissement de la pièce. Logiquement la durée de vie de l'outillage augmente avec la diminution des contraintes subites.[7]



**Fig. I-11** : Placer les difficultés vers l'extérieur de la pièce.

Comme évoqué précédemment, le premier point à déterminer est le(s) plan(s) de joint de la coquille. Celui-ci n'est pas nécessairement unique au même plan, mais sa simplification aura des effets très positifs sur le coût, la manutention et la productivité de fabrication.

Le plan de joint est normalement choisi comme :

- Un plan de symétrie de la pièce s'il y en a un.
- Le plan contenant les plus grandes dimensions de la pièce, cela permet de réduire la profondeur et donc la taille des coquilles.

- Préférer un plan brisé plutôt que plusieurs plans ou l'ajout de noyaux (lorsque cela est possible).

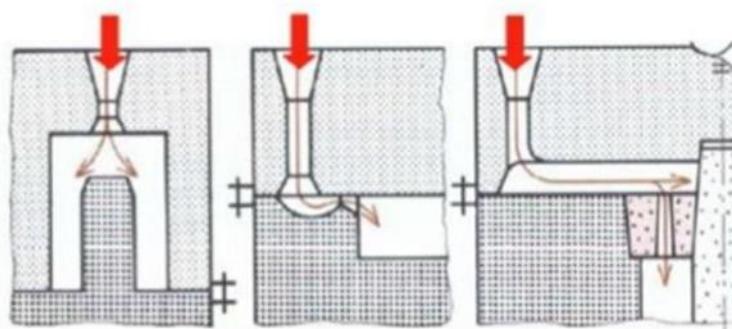
### I.1.2.7. Règles de conception de l'outillage pour le placement du système de remplissage

Le système de remplissage a pour mission d'apporter la matière jusqu'aux empreintes pour assurer le remplissage de ces dernières. Il est habituellement constitué d'un trou de coulée et d'une série de canaux.

Dans un premier temps, sont vus les différentes stratégies de remplissage, le dimensionnement des canaux et des attaques, et par la suite, les différents éléments pour améliorer la coulée sont abordés. [8]

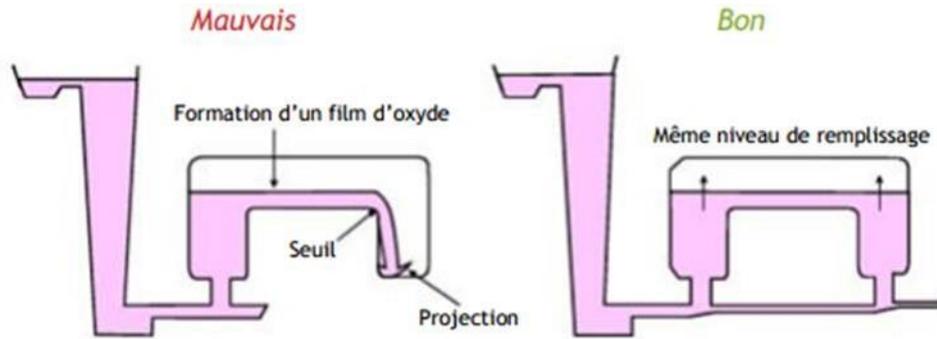
#### (1) Stratégies de remplissage

Il existe deux principales stratégies de remplissage : en chute ou en source. La coulée en chute (**Fig. I-12**) a l'avantage de réduire la mise au mille (volume hors pièce) mais créer de fortes turbulences.



**Fig. I-12** : Illustrations de coulées en chute.

La coulée en source (**Fig. I-13**) permet un approvisionnement doux mais augmente la mise au mille (plus de canaux). Il convient cependant d'assurer la source à tous les points bas pour éviter les chutes dans l'empreinte. C'est la stratégie la plus couramment adoptée.



**Fig. I-13 :** La coulée en source à tous les points bas.

## (2) Dimensionnement des canaux

Afin d'éviter au maximum d'amener de l'air dans l'empreinte, les canaux ont souvent une structure convergente, c'est-à-dire que la section cumulée diminue au fur et à mesure de l'avancée vers les empreintes (**Fig. I-14**). Classiquement la surface des canaux est égale à la moitié de la surface de la descente.

Il est possible, lorsque la vitesse du fluide est trop importante, d'utiliser une structure divergente, mais on a alors un risque de décollement de la veine fluide. [9]



**Fig. I-14 :** Réduction progressive de la section des canaux.

Le point dimensionnant l'ensemble des canaux est le calcul de la surface de descente, c'est-à-dire la surface horizontale du trou de coulée. Pour le calculer, on doit tout d'abord estimer le temps de remplissage  $T_r$ . Celui-ci est limité d'une part par le risque de mal venue s'il est trop grand, ou le risque de turbulence s'il est trop petit.

## I.1.3. Le moulage en sable

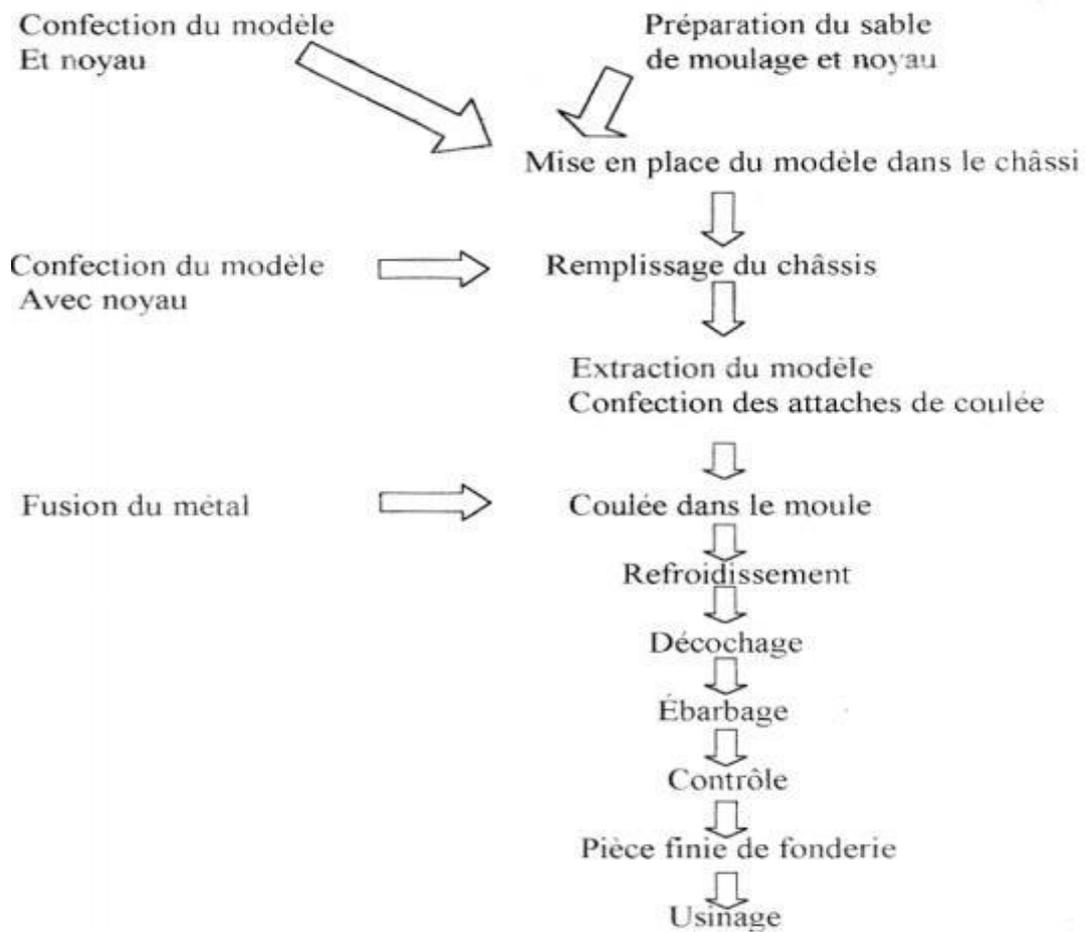
### I.1.3.1. Généralité

Le moulage en sable consiste à couler le métal en fusion dans l'empreinte du moule en sable, réalisée d'après un modèle ayant la forme de la pièce à obtenir. Le moulage en sable est le

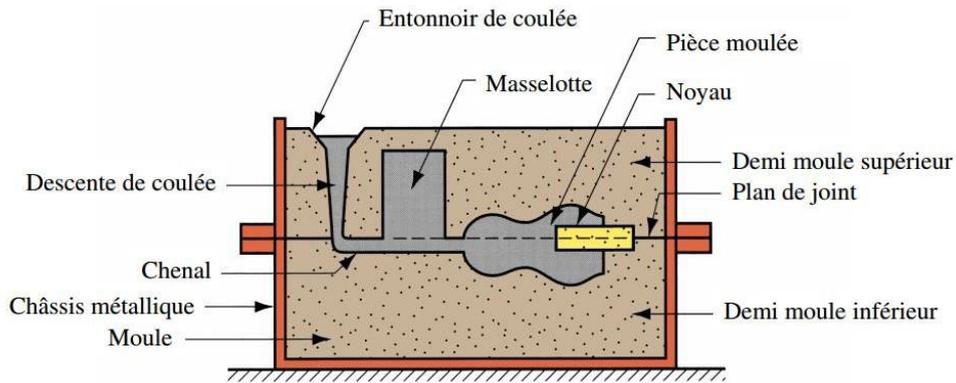
procédé le plus ancien et convient presque pour tous les métaux et alliages de moulage. Il s'adapte bien aux petites séries de production et surtout pour les pièces de grandes dimensions.

Un moule simple est constitué de deux parties : la partie supérieure et la partie inférieure. La **Fig. I-16** représente un moule en sable avec les différentes parties essentielles. Le métal en fusion est coulé à travers le trou du système de coulée, en traversant les canaux jusqu'au remplissage de l'empreinte. Après refroidissement et solidification, la pièce est sortie pour subir les différentes opérations de finition.

L'ensemble des opérations de moulage en sable est donné par le schéma ci-dessous :



**Fig. I-15** : Ensemble d'opérations de moulage en sable.



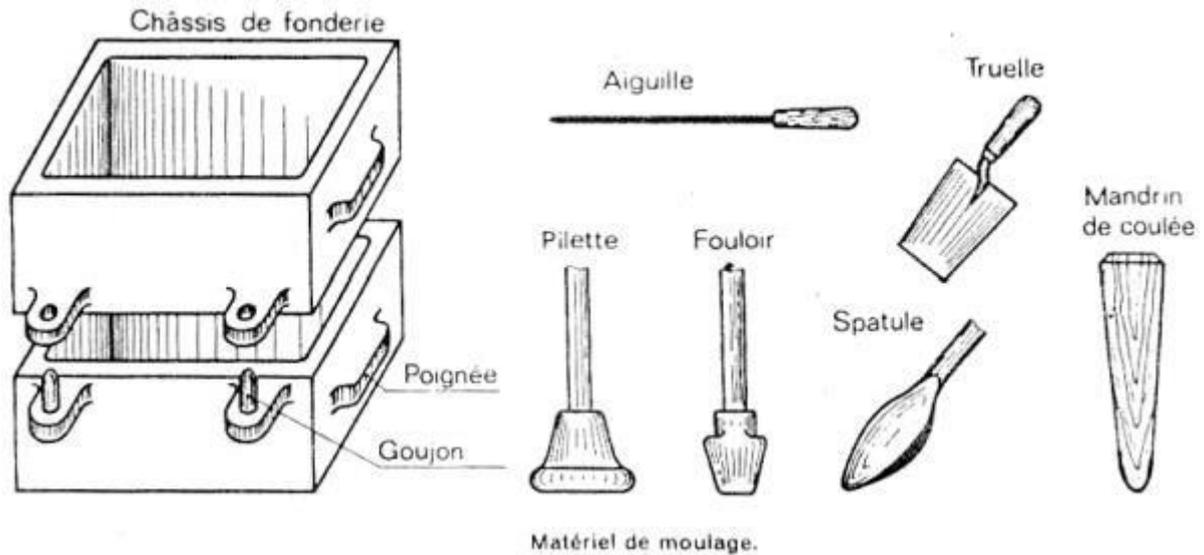
**Fig. I-16** : Parties essentiel d'un moule en sable.

### I.1.3.2. Moulage en sable manuel

Le moulage en sable manuel est utilisé surtout pour la fabrication des pièces unitaires et des pièces de grandes dimensions, qui ne peuvent pas être réalisées dans des machines de moulage.

La **Fig. I-17** représente le matériel nécessaire pour le moulage en sable manuel :

- Modèle et noyau.
- Châssis.
- Sable de moulage.
- Métal liquide.
- Aiguille (pour la confection de trous d'air).
- Truelle (pour rendre lisse la face de joint du moule).
- Pilette et fouloir (pour le compactage du sable).
- Spatule (pour rendre lisse les différentes surfaces du moule après démoulage).
- Mandrin de coulée (pour la confection du trou de coulée).
- Marbre (sur lequel s'effectue la préparation du moule).



**Fig. I-17 :** Matériel nécessaire pour le moulage en sable.

### I.1.3.3. Le modèle

Le moulage en sable à la main exige la confection préalable d'un modèle, représentant la pièce à obtenir mais dont les dimensions tiennent compte:

- Du retrait : Quel que soit le métal, on constate une diminution de volume de la pièce appelée retrait au cours de passage de l'état liquide à l'état solide ou bien pendant le refroidissement. Cette contraction ou variation de volume (donc de dimensions) oblige le modelleur à prévoir sur le modèle des dimensions supérieures à celles de la pièce.
- Des surépaisseurs d'usinages : s'il y a lieu. Dans ce cas, la pièce brute doit comporter des surépaisseurs qui seront enlevés durant l'opération d'usinage. Donc les dimensions du modèle doivent être augmentées de 2 à 3 mm. Généralement la grandeur de la surépaisseur d'usinage est choisie suivant un tableau spécial. Elle dépend essentiellement de la nature du métal à couler, des dimensions de la pièce et de la position de ses surfaces pendant la coulée.
- Une dépouille : Les formes du modèle doivent permettre son extraction du sable sans dégradation du moule. Dans ce but, on donne une certaine inclinaison aux parois du modèle, prises dans la position du moulage et suivant le sens du démoulage (cette inclinaison prend le nom de dépouille). Les surfaces et formes qui empêchent le démoulage et l'extraction sont dites en contre dépouille.
- Des congés: Arrondis de rayon variables qui permettent d'éviter les tensions internes et de faciliter le démoulage.

- Des portées de noyau: Parties rapportées au positif sur les modèles avec noyau pour maintenir, soutenir et positionner ces derniers.

#### **I.1.3.4. Sable utilisé**

Le sable de fonderie est transformé en une pâte malléable constituée de grains très fins de silice humidifiés. Il répond aux impératifs suivants:

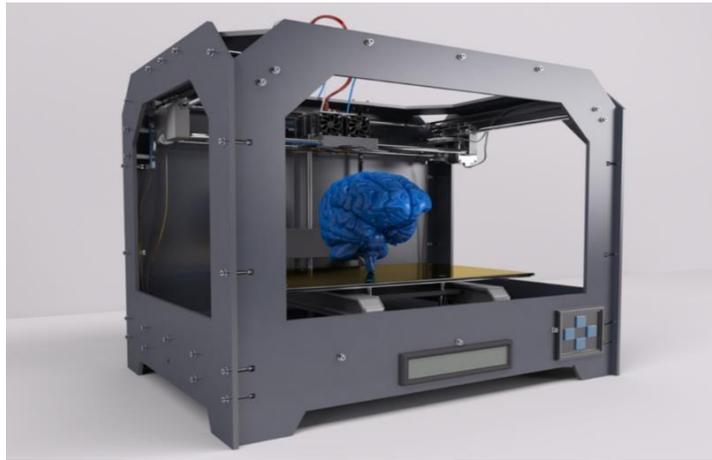
- Avoir une surface aussi fine que possible
- Reproduire fidèlement la pièce modèle
- Résister à la température de coulée élevée du métal (présenter une température de ramollissement supérieure à la température de fusion de l'alliage),
- Résister à l'érosion du métal liquide,
- Ne pas s'opposer au passage des gaz produits au moment de la coulée,
- Récupérable: une économie de matériaux est assurée par recyclage des sables, après régénération et contrôle de ses caractéristiques.

### **I.1.4. La fabrication additive (impression 3D)**

#### **I.1.4.1. Définition**

Les organismes de normalisation l'*International Standard Organization (ISO)* et l'*American Society of the International Association for Testing and Materials (ASTM)* définissent la FA comme suit : «... terme général utilisé pour les technologies qui, sur la base d'une représentation géométrique, créent des objets physiques par ajout successif de matériau...» (ISO/ASTM, 2015).

La fabrication additive ou impression 3D est souvent présentée comme la nouvelle révolution industrielle, elle était à l'origine réservée au prototypage et donc à la partie pré-production du cycle de vie d'un produit. Ce processus allie rapidité d'exécution, économie de matériaux et complexité du model. L'impression d'un objet réel en 3D se fait à partir d'un fichier CAO en superposant des couches de matériaux. Chacune de ces couches peut être considéré comme une coupe transversale horizontale mince de l'objet temporaire. L'objectif fondamental d'une imprimante 3D est de transformer rapidement une idée en objet réel. Cette idée est d'abord consignée sous un modèle informatique 3D créé par des logiciels en CAO (Conception Assistée par Ordinateur) 3D tels que SolidWorks. [11]



**Fig. I-18** : Exemple d'une imprimante 3D.

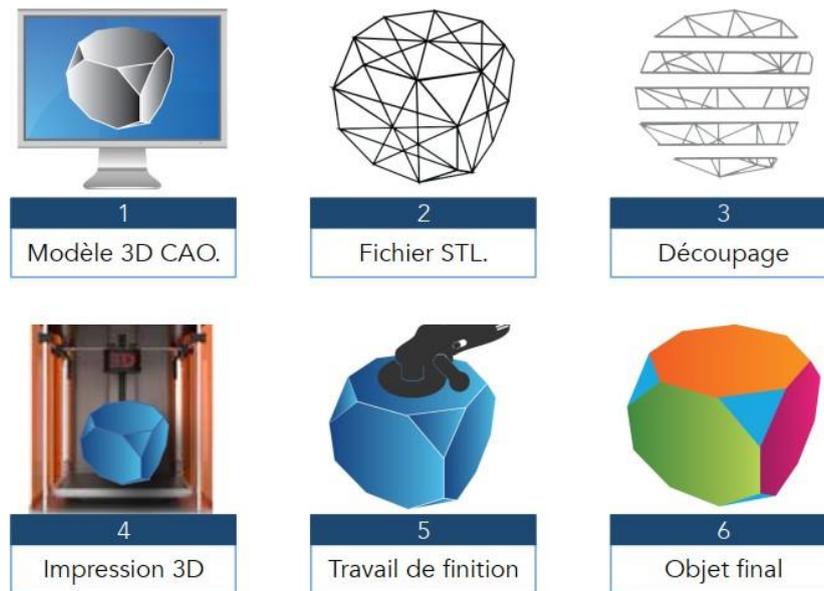
#### **I.1.4.2. Processus d'impression 3D**

L'objectif fondamental d'une imprimante 3D est de transformer rapidement une idée en objet réel.

Cette idée est d'abord consignée sous un modèle numérique tridimensionnel créé par des logiciels de conception par ordinateur (CAO). Puis le modèle est exporté généralement en un fichier STL. Ce processus permet la conversion des données géométriques continues du fichier CAO en une série de triangles finis orientés dans l'espace, lesquels déterminent un volume en 3D dont chacun doit partager deux arêtes avec les triangles adjacents. D'autres types de fichiers existent outre le format STL comme : WRL (VRML), PLY, 3DS et ZPR [13].

L'étape qui précède l'impression est le découpage du fichier STL grâce à un logiciel dédié tel que ZPrint™, le model numérique est découpé en une série de couches individuelles et transmet à la machine toutes les instructions nécessaires afin de réaliser l'impression : positionnement de la pièce, épaisseur de couche, quantité de matières, vitesse de déplacement, etc. [12].

Puis vient la dernière étape qui est l'impression, la machine imprime séquentiellement chaque couche l'une au-dessus de l'autre, construisant l'objet [13]. Après un court séchage, différentes opérations de finition peuvent être requises tel que : le ponçage, le durcissement, la peinture, usinage, etc. Ceci dépend du matériau utilisé et de la complexité du produit.



**Fig. I-19** : Processus d'impression 3D.

### I.1.4.3. Les principaux matériaux utilisés en impression 3D

On distingue principalement deux grandes familles de matériaux qui sont utilisées pour la fabrication additive : les plastiques et les métaux. Ensuite vient les céramiques et les matières organiques en plus faible quantité.

#### ➤ LES PLASTIQUES

- **Le PLA (acide Polyactique)**

Il s'agit d'un matériau très répandu dans l'impression 3D à dépôt de filament fondu. Il est sensible à l'eau et à la chaleur.

- **L'ABS (acrylonitrile butadiène styrène)**

Un autre matériau préféré des utilisateurs de machines de type FDM. L'exemple donné le plus souvent est celui des briques de Lego, composées d'ABS. Ces propriétés sont plus intéressantes que le PLA en termes de résistance à l'eau et à la chaleur.

- **Le PET (polytéréphtalate d'éthylène)**

Obtenu à partir du pétrole, il est plus solide que l'ABS. Il est utilisé pour les pièces qui demandent à la fois de la robustesse et de la flexibilité.

- **Les polyamides (PA)**

Utilisés dans la technique du frittage laser (SLS), ils se présentent généralement sous forme de poudre, blanche et granuleuse. Dans le cadre d'une utilisation avec un procédé de dépôt de filament, on retrouve par exemple le nylon sous forme de bobines.

- **Les résines**

C'est une autre grande famille des plastiques utilisée dans l'impression 3D. Utilisées dans les procédés SLA et Poly Jet, les résines offrent différentes propriétés physiques propres à chaque type de résine. Elles permettent des impressions très détaillées et solides, sur des formes complexes. Son rendu très lisse demande un post-traitement assez simple.

➤ **LES METAUX**

Après les plastiques, les métaux sont les matériaux les plus utilisés dans l'impression 3D. Les derniers se présentent sous forme de poudre et sont principalement utilisés avec des processus de fusion. Voici la liste non complète de ces métaux :

- **Aluminium**

On retrouve l'aluminium dans des alliages comme l'AlSi10Mg, dans lequel il est combiné à du silicium et du magnésium. C'est un alliage à la fois résistant et léger, utilisé notamment dans l'industrie aérospatiale ou les moteurs.

- **L'acier**

Répondant également au doux nom d'inox, l'acier inoxydable est l'un des matériaux les plus utilisés dans l'industrie, en plus d'être l'un des plus anciens. Il est doté d'excellentes qualités mécaniques et peut être couplé à des métaux précieux comme l'or ou l'argent.

- **Le cobalt-chrome**

Si jusqu'à présent on utilisait principalement cet alliage avec des techniques de moulage, le procédé EBM offre la possibilité de l'exploiter en fabrication additive. Solide et très résistant à l'usure, on le retrouve dans la création de prothèses médicales et l'industrie dentaire. Certaines variantes du cobalt-chrome résistent à des températures de plusieurs centaines de degrés, idéales pour la fabrication de moules. Il est aussi utilisé pour la réalisation de prothèses médicales, comme un genou ou une hanche.

- **Le titane**

Très apprécié par les industriels pour son rapport solidité/poids excellent, et résistant à la corrosion.

L'impression 3D est la meilleure technologie actuelle pour travailler ce métal. En effet, elle offre un rendu de meilleure qualité qu'avec les techniques traditionnelles notamment avec l'absence de soudure. [12]

#### I.1.4.4. Les sept familles de procédés de fabrication additive



Fig. I-20 : Procédés d'impression 3D.

#### I.1.4.5. Les avantages et limites de l'imprimante 3D

##### ➤ Les avantages de l'imprimante 3D

- **Fabriquer des objets de toutes sortes**

Le principe même de l'imprimante 3D grand public est de permettre aux particuliers de créer leurs propres objets en plastique. Ainsi, il est par exemple possible de fabriquer de la vaisselle en plastique, donc incassable, mais aussi des jouets pour les enfants. La précision offerte par l'imprimante 3D grand public est suffisante pour développer des objets relativement techniques. L'imprimante 3D est donc un excellent outil pour développer la créativité.

- **Réparer ses objets cassés**

Bien souvent, lorsqu'un appareil électroménager vient à casser, le premier réflexe est de se rendre au magasin ou sur internet pour racheter un modèle de même gamme, les pièces détachées étant souvent introuvables, même auprès du constructeur. Avec l'imprimante 3D, chaque utilisateur a la possibilité de modéliser sur son ordinateur la pièce qui lui manque, puis de la créer en relief. L'imprimante 3D est alors perçue comme un outil anticonsumériste permettant de vaincre l'obsolescence.

- **L'amélioration des conditions de vie**

Grâce à l'imprimante 3D, des progrès considérables pourraient être apportés aux conditions de vie de chacun, notamment des personnes présentant un handicap. Le plastique étant un matériau plus léger que le métal, il peut effectivement être utilisé pour des enfants : la fabrication d'un exosquelette pour une petite fille de 4 ans a d'ores et déjà été mise en place. L'imprimante 3D grand public pourrait alors permettre à chacun de trouver une solution adaptée à son problème et de la fabriquer sur mesure et à moindre coût, puisque le prix d'une cartouche en plastique est généralement inférieur à 60 euros. [13]

#### **I.1.4.6. Les champs d'application de l'impression 3D**

- **L'aéronautique et l'aérospatiale**

Ce sont surtout les industries de pointe qui tirent parti pour le moment du potentiel des imprimantes 3D.

L'impression en 3D peut répondre à plusieurs besoins de l'industrie aérospatiale, en particulier la production de moules et de noyaux de sable imprimés pour les prototypes et la production des pièces moulées et des composants métalliques imprimés utilisant les superalliages à base de nickel.

De plus, l'impression 3D permet un gain de poids pour les pièces en plastique et offre une meilleure isolation électrique. L'utilisation des thermoplastiques représente une solution idéale pour la fabrication de composants des avions, en raison de leur légèreté et résistance à la chaleur.

L'imprimante 3D permet en outre de créer des pièces résistantes à la chaleur, aux substances chimiques et aux rayons ultra-violets et n'absorbant pas l'humidité. Actuellement, les grands groupes industriels tels qu'Airbus, Boeing, GE, et bien d'autres ont déjà utilisé cette technologie d'impression 3D pour améliorer leur productivité et baisser leurs coûts de revient.



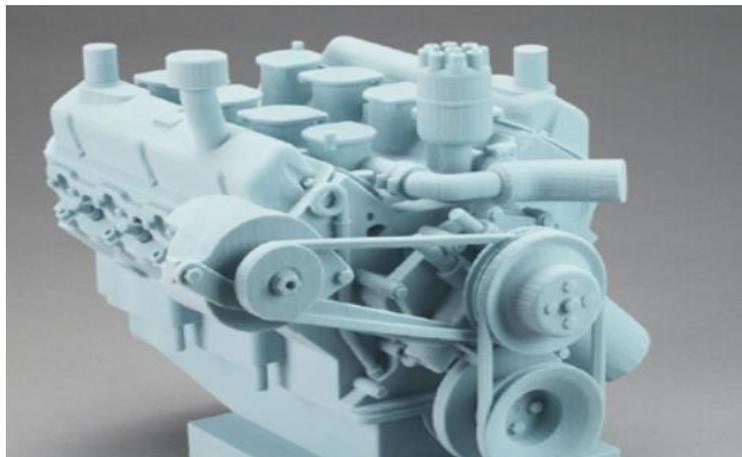
**Fig. I-21** : L'aéronautique et l'aérospatial.

➤ **L'automobile**

L'industrie automobile a été l'un des premiers secteurs à adopter la fabrication d'additifs, intégrant les systèmes d'impression 3D dans le prototypage rapide des moteurs et des composants de moteurs, des boîtiers de transmission et plus encore.

En effet, la chaîne de production représente l'un des grands freins aux concepteurs dans l'industrie automobile : la fabrication des pièces est standardisée et tout changement implique évidemment d'importants investissements. Pour cette raison, les concepteurs en ce secteur ont fait recours à l'impression 3D pour prototyper et fabriquer plus rapidement.

Les applications comprennent des culasses, des collecteurs d'admission et des blocs de moteur. L'impression 3D est également utilisée dans le cycle de développement des moteurs pour les voitures particulières et les moteurs de course.

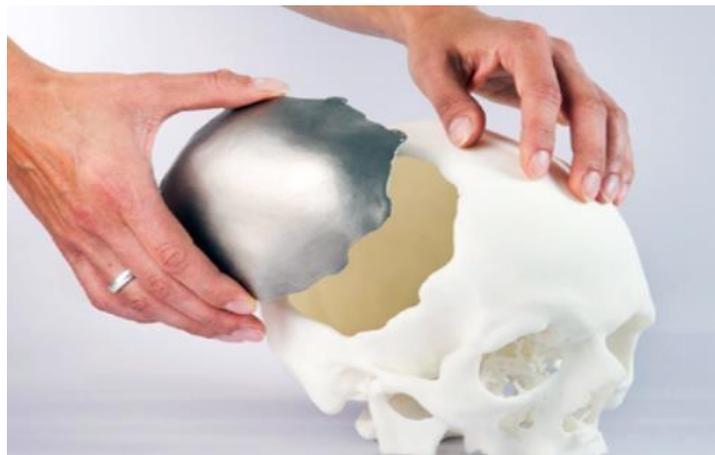


**Fig. I-22** : Maquette d'un moteur.

### ➤ Le médical

On considère le secteur médical comme l'un des adeptes phares de l'impression 3D, qui offre à cette technologie un énorme potentiel de croissance en raison des options de personnalisation et de l'amélioration de la vie des gens au fur et à mesure que ces procédés sont actualisés et que les matériaux sont développés. Les technologies d'impression 3D sont utilisées pour diverses applications. A part la création de prototypes dans le secteur médical et dentaire, ces technologies sont utilisées pour créer des moules de couronnes dentaires et des outils pour réaliser des bagues orthodontiques ; et pour fabriquer d'appareils médicaux sur mesure tels que les prothèses auditives, les semelles orthopédiques, les prothèses personnalisées et les implants uniques.

Les guides chirurgicaux imprimés en 3D pour des opérations. Les développements de cette technologie ont permis également l'impression 3D de la peau, des os, du tissu, des médicaments et même des organes humains. Néanmoins, ces technologies sont encore largement éloignées de la commercialisation.



**Fig. I-23 :** Secteur médicale exemple de prothèse.

### ➤ L'architecture

L'imprimante 3D permet aux cabinets d'architecture, aux bureaux d'études ou studios de design d'avancer rapidement en créant des modèles résistants et complexes à partir de données CAO issues d'un logiciel d'architecture ou de design.

Les modèles d'impression 3D sont lisses et donnent des maquettes détaillées dans une large gamme de matériaux dont les photopolymères, y compris ceux rigides prêts pour la peinture.

L'application de la fabrication additive dans ce domaine permet de réduire considérablement le temps et les dépenses de production des maquettes. Elles nécessitent souvent des détails très précis imprimées en 3D et sont également plus résistantes que les modèles traditionnels.



**Fig. I-24 :** Réalisation d'une maquette.

➤ **Les accessoires**

Outre ses applications dans le domaine industriel, l'impression 3D s'adresse plus directement aux consommateurs via la fabrication d'accessoires personnalisés. Les impressions les plus courantes concernent généralement des objets décoratifs comme des vases mais aussi des accessoires tels que des presse-agrumes, des coquetiers, des porte-crayons, des porte-clefs... etc. [14]



**Fig. I-25 :** Exemple d'accessoires.

---

# Chapitre II Étude et conception du moule pour le modèle presse ail

---

## II.1. Introduction

Dans ce chapitre on trouve la modélisation du produit qui est un presse ail qui se décompose en trois pièces, ainsi que la conception de son moule. La pièce a été choisie car il n'y a aucune production à l'échelle nationale. Les différents produits disponibles dans les commerces viennent de l'importation, et résultent d'un produit de moyenne qualité qui se casse facilement, comme le montre la **Fig. II-1**.



**Fig. II-1** : Presse a ail cassé.

En s'inspirant de différents modèles existants et disponibles dans le commerce, On propose un produit avec un design moderne, avec l'amélioration de sa solidité pour son utilisation dans la vie quotidienne.

## II.2. Conception des pièces

Pour gagner du temps et améliorer la rentabilité, la conception s'est faite avec le logiciel de CAO SOLIDWORKS pour faciliter le dessin et la définition de la géométrie des moules. Cette large gamme d'outils de conception de moule automatisé et son outil de simulation permettent la visualisation 3D des parties du moule ainsi que leur comportement aux charges réelles.

## II.2.1. Cahier des charges

### ➤ Contexte et définition du problème

L'importation de ce produit qui est assez simple, la taxe d'importation et du transport un produit fragile qui se casse pour un prix de vente supérieur à la qualité proposer.

### ➤ Objectif du projet

Offrir un produit de qualité en termes de résistance de design au même prix (ou inférieur), et la relocalisation de la production au niveau local.

### ➤ Périmètre

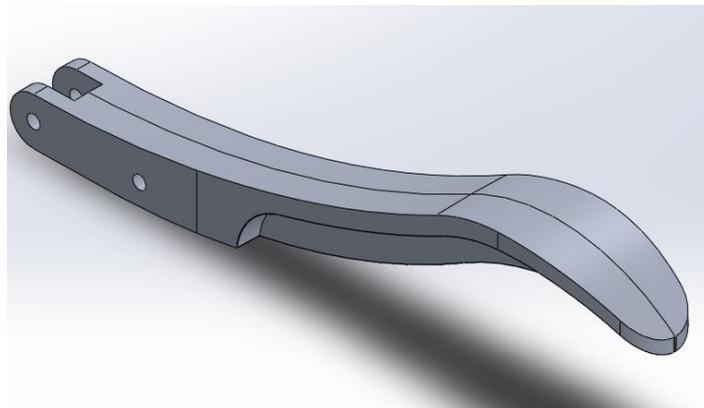
- Ne pas dépasser le plan de travail max (200x200x250 mm).
- Epaisseur du manche min 3mm.

### ➤ Description fonctionnelle des besoins

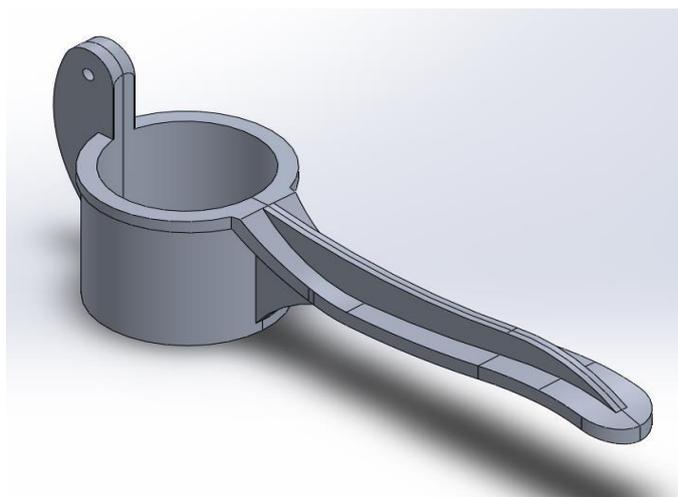
- Utilisation simple et fluide du moule.
- Résistance a une force appliquée (5à 7 kg).

## II.2.2. Conception 3D des pièces moulées

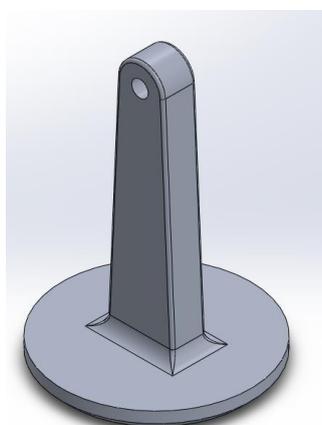
Après l'étude du marché des différents modèles existant que ça soit en terme de design, matériaux utiliser, dimension et prix de ventes. L'inspiration acquise à mener au choix d'un design courbé des manches qui épouse la forme de la poignée qui facilite grandement la prise en main pour garantir non seulement un confort à l'usage quotidien, mais aussi pour résister à l'effort subie par les nombreuses utilisations. On a procédé au dessin des différentes pièces composant l'assemblage.



**Fig. II-2 :** Conception pièce 01.



**Fig. II-3 :** Conception pièce 02.



**Fig. II-4 :** Conception pièce 03.

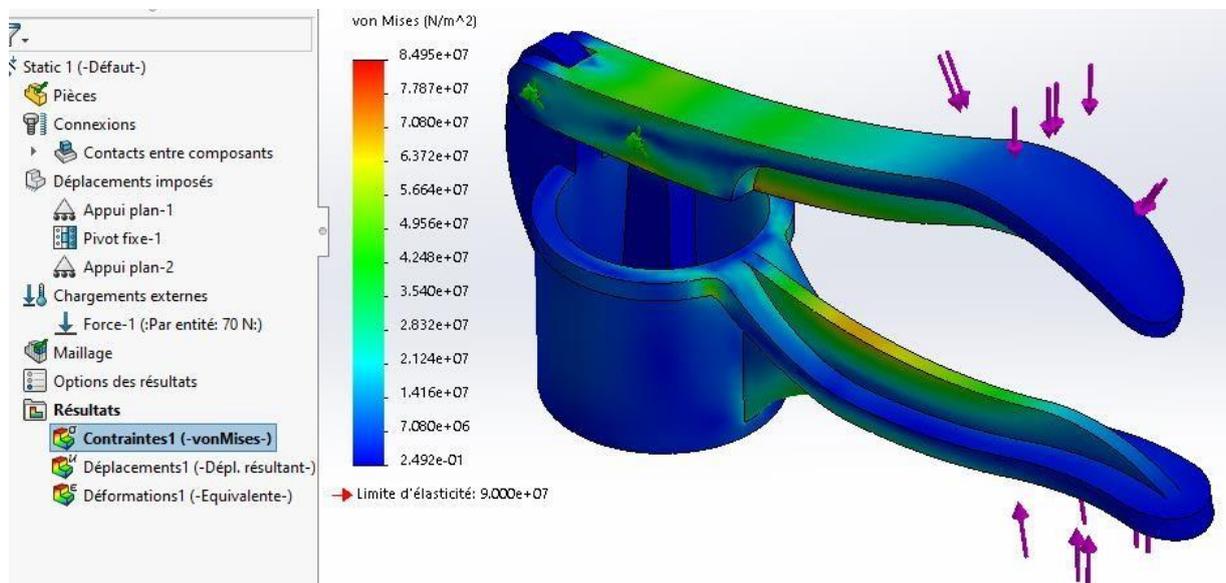


**Fig. II-5 :** Assemblage et rendu final.

### II.2.2.1. Résistance de la pièce a la rupture

Pour s'assurer que la pièce résiste à l'usage quotidien, une étude de résistance à la rupture des parties inférieure et supérieure de l'assemblage a été réalisée grâce à la fonction simulation du logiciel SOLIDWORKS, qui a de nombreux outils d'analyse structurelle. L'avantage de ce logiciel, c'est sa rapidité de prise en main. Ce logiciel fait appel à l'analyse par éléments finis pour prédire le comportement physique réel d'un produit, en testant virtuellement des modèles de CAO.

Dans cette étude numérique nous avons opté pour l'aluminium 1060-H14, généralement utilisé pour la fabrication des ustensiles. Une charge est appliquée une force de 70 N (équivalent à 7 Kg) à l'extrémité des pièces avec un maillage raffiné, comme le montre la **Fig. II-6**.



**Fig. II-6 :** Simulation à la rupture de l'assemblage.

Les résultats de la simulation, montrent clairement que notre modèle résiste à la charge de 70N, autrement, la contrainte de Von Mises ne dépasse pas la limite d'élasticité.

## II.3. Conception des moules

### II.3.1. Analyse des dépouilles et contre dépouille

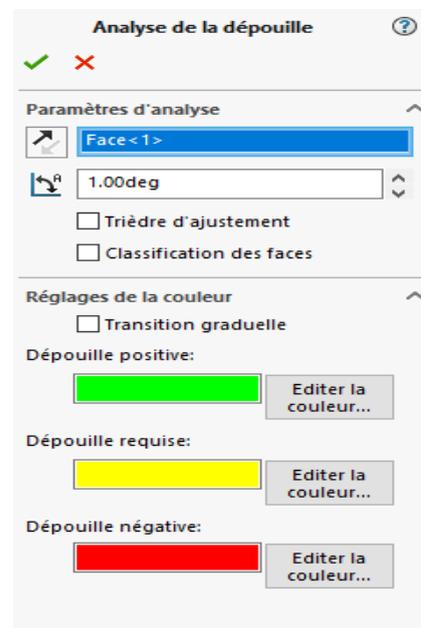
La première étape dans la conception du moule est l'analyse des dépouilles et des contre dépouilles. Pour ce faire, le logiciel SOLIDWORKS met à disposition les outils nécessaires dans l'onglet outils de moulage, ou il permet de prendre d'une manière automatique l'angle de dépouille.

### II.3.1.1. Analyse des dépouilles

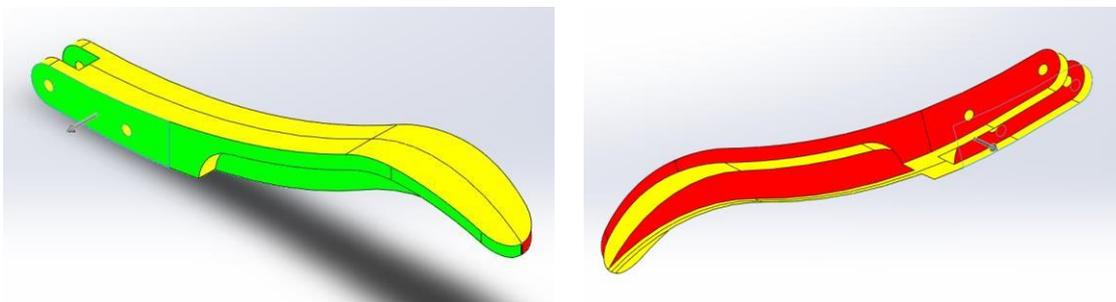
Pour développer une pièce à mouler l'application d'une dépouille (angle) joue un rôle crucial dans l'amélioration de la mouillabilité. Les formes des modèles doivent permettre leurs extractions sans endommager les moules. Dans ce but on donne une certaines inclinaisons aux parois des modèles selon le sens d'ouverture des moules. [20]

On utilise l'outil " analyse de la dépouille " qui définit l'analyse et les réglages des couleurs pour identifier et visualiser les zones qui présentent une dépouille insuffisante sur les pièces moulée (**Fig. II-7**).Après le choix de la direction d'ouverture du moule et un angle d'inclinaison, l'outil indique grâce à un jeu de couleurs les trois différentes dépouilles :

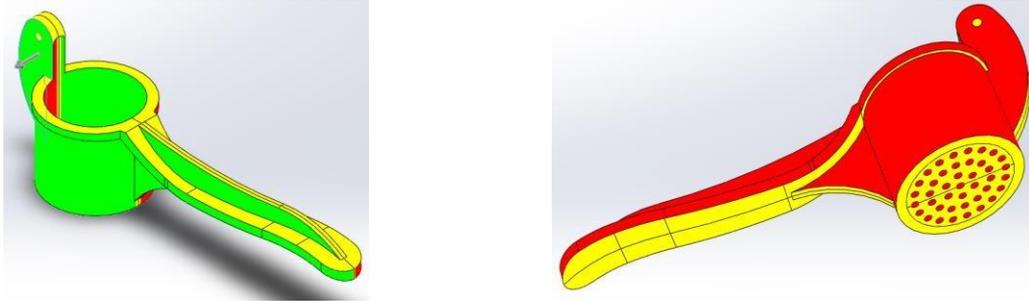
- **Dépouille positive (vert)** : Affiche les faces pour lesquelles l'angle de la face par rapport à la direction de l'ouverture est supérieur à l'angle de référence.
- **Dépouille requise (jaune)** : Affiche les faces pour lesquelles l'angle de la face est inférieur à l'angle de référence positif ou supérieur à l'angle de référence négatif.
- **Dépouille négative (rouge)** : Affiche les faces pour lesquelles l'angle de la face par rapport à la direction de l'ouverture est inférieur à l'angle de référence négatif.



**Fig. II-7:** Analyse des dépouilles.

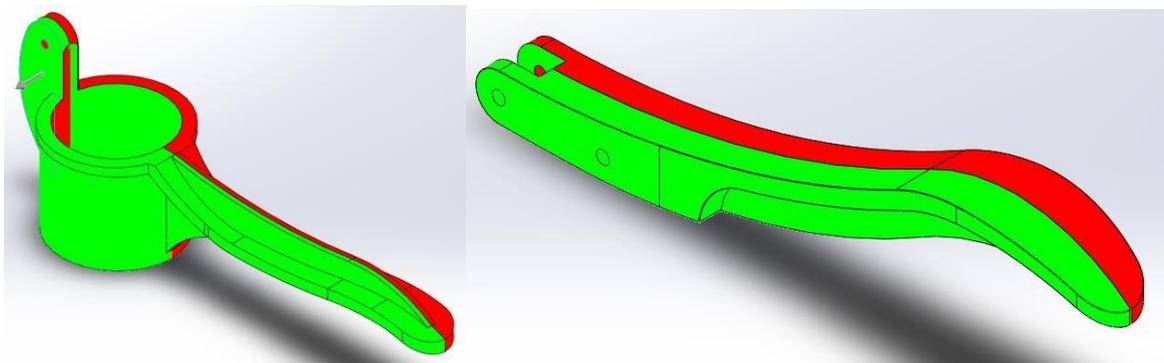


**Fig. II-8 :** Analyse de la dépouille pièce 01.



**Fig. II-9** : Analyse de la dépouille pièce 02.

Après l'analyse de la dépouille, on utilise la fonction dépouille en sélectionnant les faces du modèle qui requièrent une dépouille pour les incliner selon un angle spécifié (**Fig. II-10**).



**Fig. II-10** : Pièce 01 et pièce 02 après dépouille.

### II.3.1.2. Analyse de contre dépouille

Cette fonction permet d'identifier dans un modèle les zones qui nécessitent un noyau latéral. En effet, lorsque le noyau principal et l'empreinte sont séparés, le noyau latéral glisse perpendiculairement au mouvement du noyau principal et de l'empreinte. Cette méthode permet d'éjecter la pièce.

En utilisant l'outil de moulage " analyses de contre dépouille", comme la fonction précédent analyse le model et montre dans la zone graphique grâce au jeu de couleurs pour l'identification des surfaces qui poseront problème lors de l'éjection du moule qui sont en rouge (**Fig. II-11**).

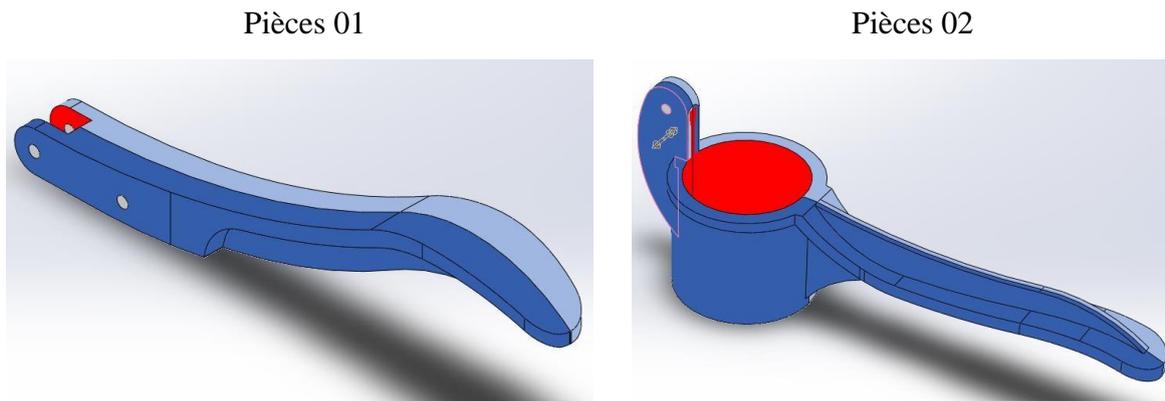


Fig. II-11 : Analyse de la contre dépouille des pièces 01 et 02.

## II.3.2. Choix du plan de joint

### II.3.2.1. Ligne de joint

Les lignes de joint sont la trace laissée la pièce après le démoulage. Elle se trouve le long de l'arête de la pièce moulée, entre les surfaces du noyau et de l'empreinte. Elles sont utilisées pour créer les plans de joint et pour séparer les surfaces (Fig. II-12).

On peut générer la ligne de joint automatiquement ou manuellement grâce à l'outil ligne de joint, qui a deux fonctions : la première pour le contrôle de la dépouille, et l'autre pour la création de plan de joint.

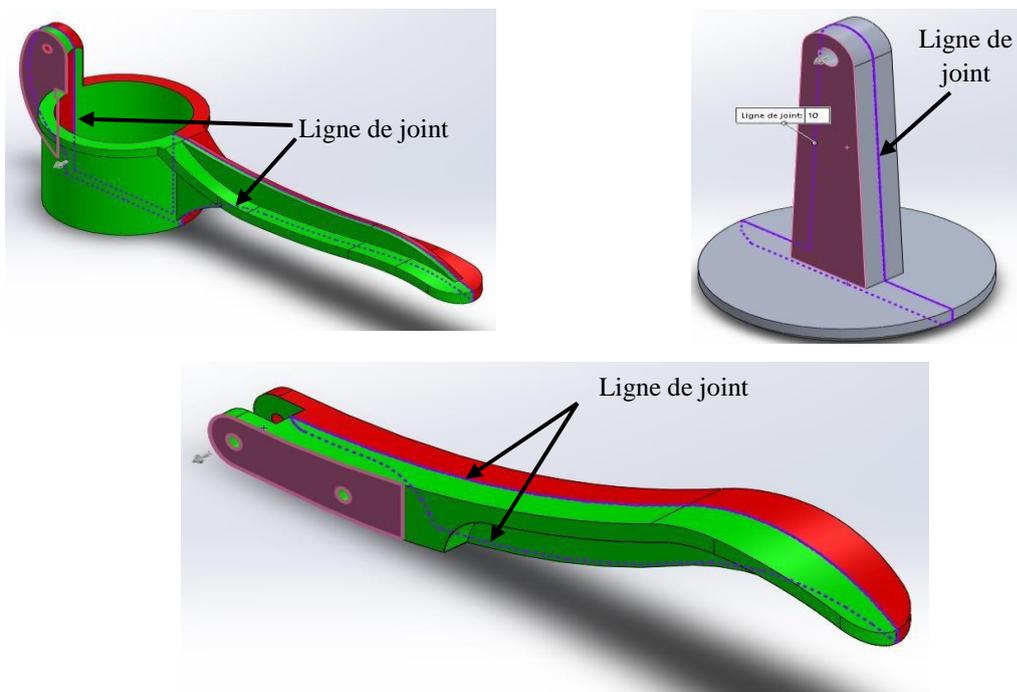
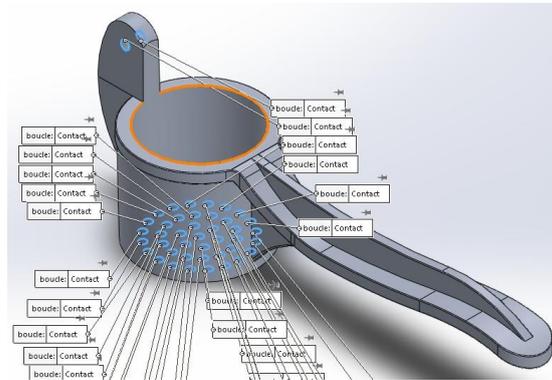


Fig. II-12 : Ligne de joint des trois pièces.

### II.3.2.2. Surface d'arrêt

Les surfaces d'arrêt servent à reboucher les trous qui sont sur les pièces en créant un raccord surfacique délimité par une ligne de joint ou des arêtes formant une boucle continue (

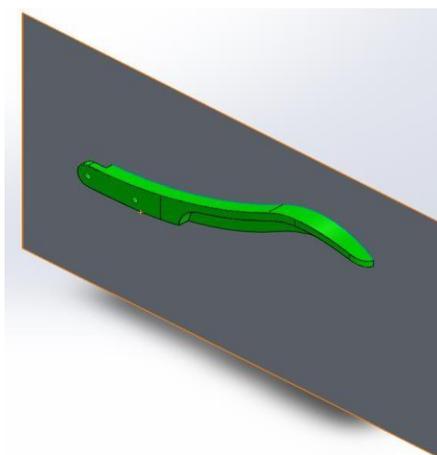
**Fig. II-13).**



**Fig. II-13 :** Surfaces d'arrêt de la pièce 02.

### II.3.2.3. Plan de joint

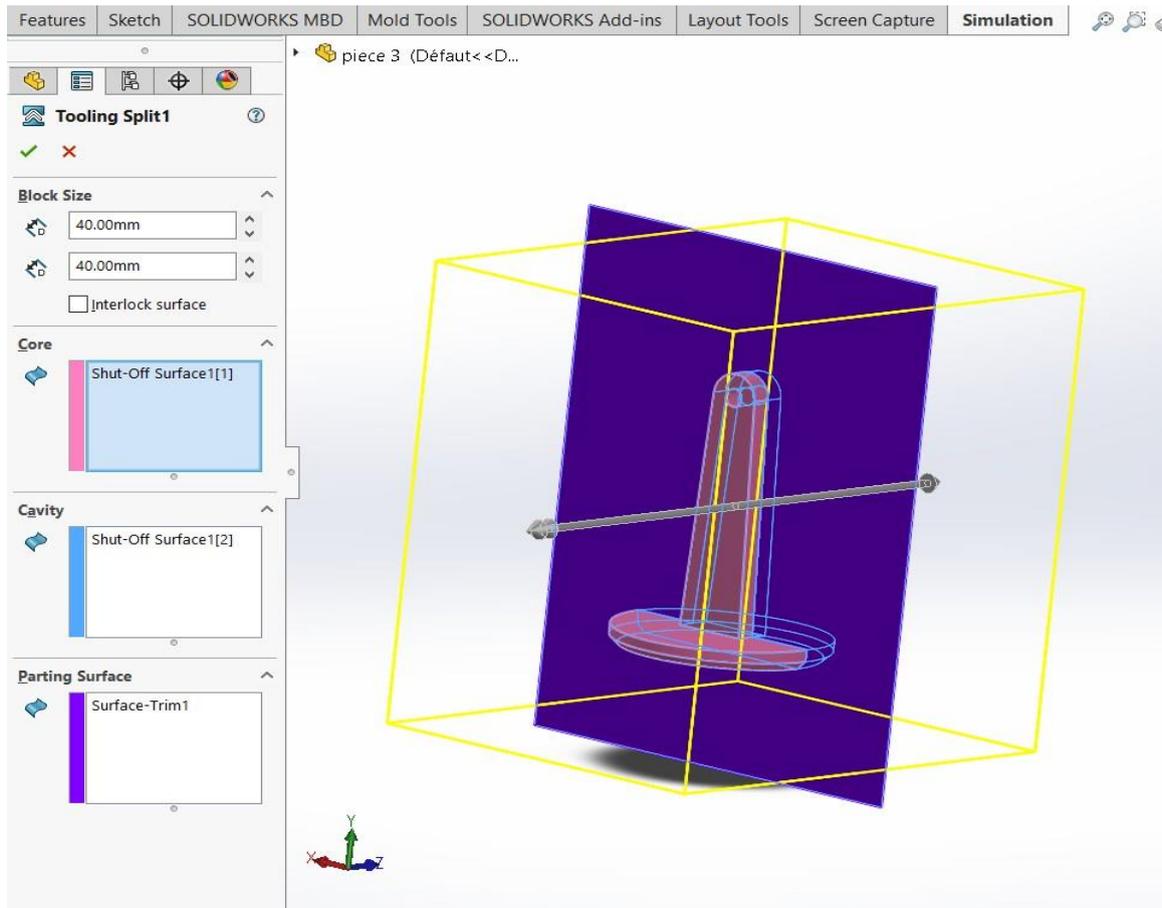
Le choix des plans de joint est d'une grande importance. En effet, leurs positionnements, détermine les sens d'ouverture des moules. Par conséquent la direction de la dépouille a appliqué à la pièce, afin d'obtenir les meilleures pièces possibles et privilégier les meilleures manières de la démouler. D'autre part, l'emplacement du plan de joint peut avoir des conséquences sur le cout de fabrication du moule, en d'autre terme, il induit le nombre de pièce constituant le moule. Ils sont utilisés pour séparer les empreintes du moule ainsi que le(s) noyau(s), et ils sont extrudés à partir des lignes de joint.



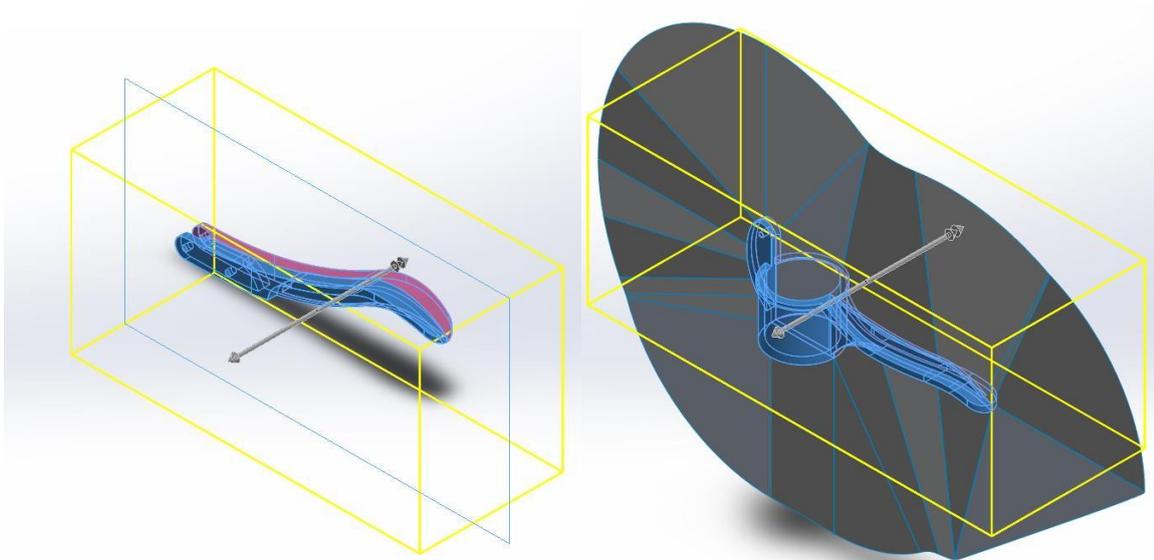
**Fig. II-14 :** Plan de joint pièce 01.

### II.3.2.4. Conception noyau/empreinte

Grace à la fonction noyaux/empreinte sur SolidWorks. On génère le volume des deux parties principales du moule simultanément, en donnant les formes extérieures des pièces en sélectionnant le noyau de l'empreinte et du plan de joint. Enfin, dimensionner les deux bloques constituant le moule, en leur donnant une épaisseur approximatif dans un premier lieu (**Fig. II-15**).



**Fig. II-15** : Insertion noyau et empreinte de la pièce 03.

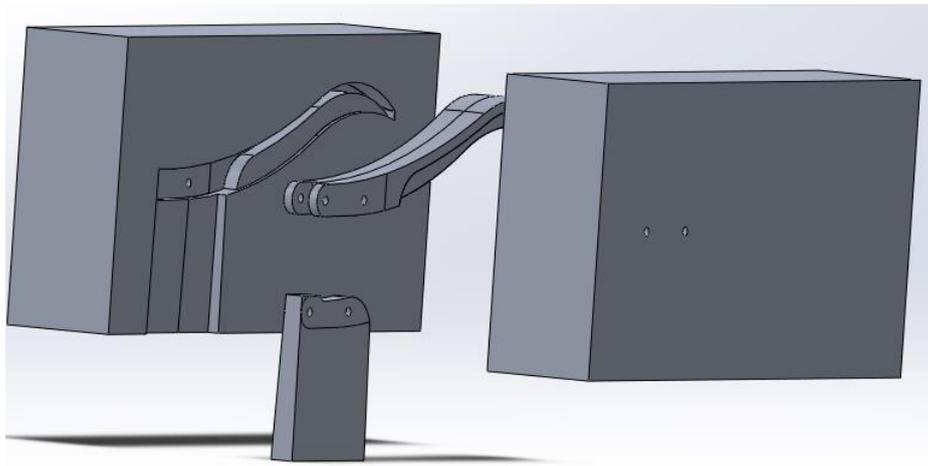


**Fig. II-16 :** Insertion noyau/empreinte des pièces 01 et 02.

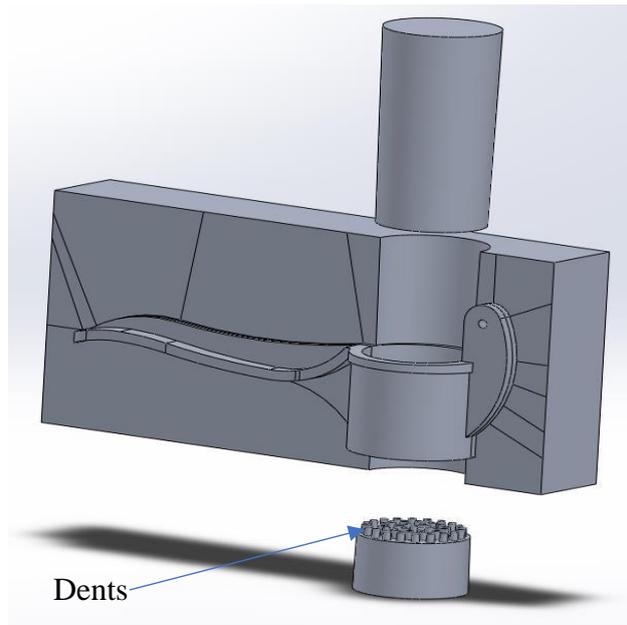
### II.3.2.5. Noyaux

Le noyau ou broche est un composant du moule généralement de faible section et de longueur importante permettant de réaliser les évidements intérieurs de la pièce ou des zones en contre-dépouille.

Dans notre cas, les pièces 1 et 2 nécessitent des noyaux formellement à la direction d'ouverture du moule et à l'analyse des contre-dépouille (**Fig. II-11**). Pour faciliter l'extraction et la création des cavités de la pièce 02. Un autre noyau couplé à était ajouté dans la partie inférieure, cet ajout permet de changer uniquement le noyau supplémentaire en cas de déformation des dents constituant les cavités de la partie inférieure de la pièce 02 (**Fig. II-18**).



**Fig. II-17 :** Moule pièce 01 avec noyau.

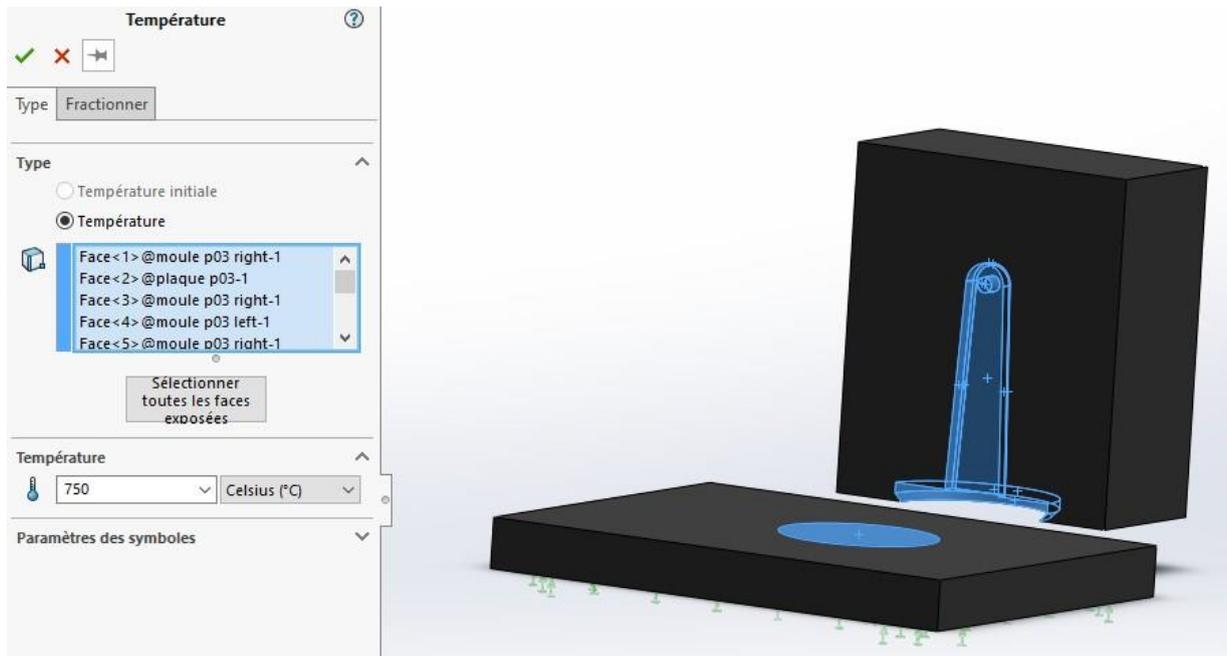


**Fig. II-18 :** Moule pièce 02 avec deux noyaux.

### II.3.3. Dimensionnement du moule

Pour dimensionner les différents moules conçus, une étude a été menée pour voir son comportement à une charge thermique simulant la température de la coulée qui est de l'aluminium en fusion. Pour ce faire, l'outil de simulation de SOLIDWORKS donne accès à toutes les fonctions nécessaires pour mener cette étude.

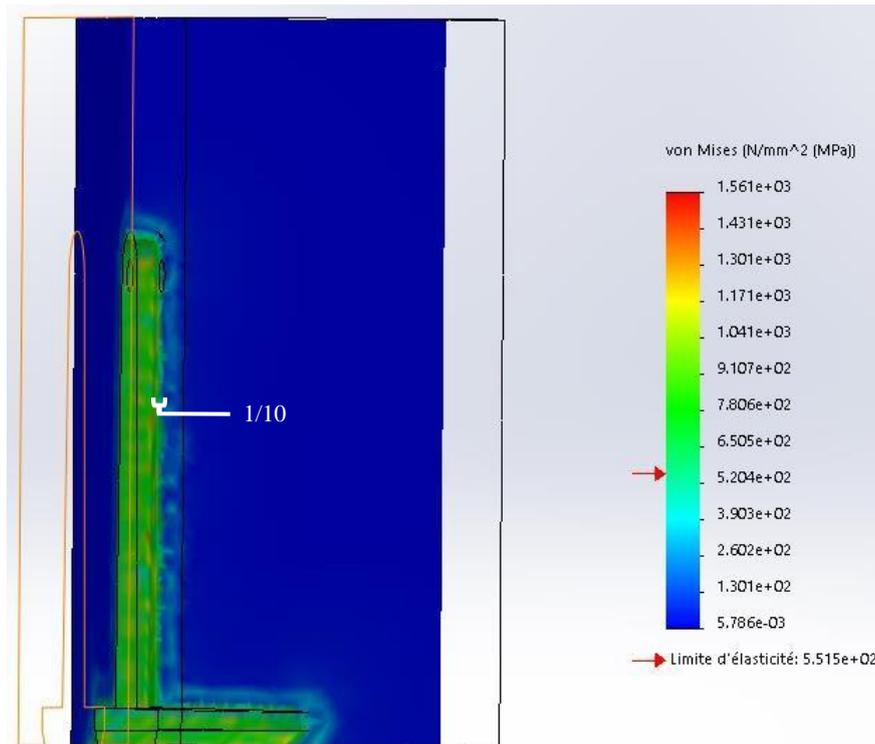
L'objectif étant de dimensionner les moules pour qu'ils résistent au phénomène de coulée, tout en étant assez légers pour faciliter sa manipulation par l'opérateur, et réaliser un gain en terme d'économie de matière. Dans le cas du moule de la pièce 3 l'ajout de plaques d'usure a été jugé préférable pour faciliter l'éjection de la pièce de l'empreinte du moule **Fig. II-19**.



**Fig. II-19** : Application des températures du moule pièce 03.

Les moules étant symétriques, il est préférable de prendre une partie et l'exclure de l'analyse pour gagner du temps dans l'exécution de la simulation. Le matériau utilisé dans cette étude est la fonte, ce choix est motivé par sa disponibilité sur le marché national, sa résistance aux températures élevées ( $770^{\circ}\text{C}$ ), ainsi que son faible coût. Après la fixation de la plaque, sélection des faces qui seront sollicité par la charge thermique de  $750^{\circ}\text{C}$  avec un maillage raffiner à l'optimale (**Fig. II-19**). L'exécution de la simulation donne des résultats de contrainte de Von Mises, comme le montre la **Fig. II-20**.

Sachant que la limite d'élasticité ( $R_e$ ) de la fonte utiliser est de  $551.485\text{ N/mm}^2$ , les données indiquent des concentrations de contraintes allant jusqu'à  $1.561^{\circ}+03\text{ N/mm}^2\text{ Mpa}$ . Cependant après mesure de la section solliciter, on constate les zones qui dépasse la zone élastique et qui rentrent dans le domaine plastique, ne dépasse pas  $1/10$  de l'épaisseur du moule, comme le montre la **Fig. II-20**.



**Fig. II-20** : Résultats de la simulation du moule de la pièce 03.

Ces données permettent de démontrer que les déformations subies par les moules sont très minimes. De ce fait, le dimensionnement choisi pourra résister aux sollicitations générées par la coulée du métal en fusion.

---

# Chapitre III

## Processus de fabrication d'un moule prototype

---

### III.1. Introduction

Ce troisième chapitre est dédié à la fabrication d'un prototype des pièces (1,2 et 3) ainsi que d'une partie du moule de la pièce 03 avec l'impression 3D. On présente les différents outils utilisés (imprimante, matériaux, logiciel ...) ainsi que les paramètres d'impression utilisés pour l'obtention d'une pièce solide résistante en réduisant le facteur temps à son maximum. Par la suite, nous procédons à la fabrication du moule de la pièce 03, en utilisant le moulage en sable. Cette partie est réalisée avec les moyens disponibles au niveau du hall de technologie.



**Fig. III-1** : Presse ail imprimé.

### III.2. Présentation de l'imprimante

Sortie en 2018, L'Ender 3 de Creality 3D par « dépôt de matière fondue » (FDM) a largement contribué à la démocratisation des imprimantes 3D dans le grand public. Son faible coût tout en conservant une bonne qualité d'impression, en a fait une référence dans le monde de l'impression 3D. Grâce à son plateau chauffant, elle propose une compatibilité avec les filaments PLA, ABS, TPU. Elle bénéficie d'une excellente conception, et dotée d'un écran de contrôle, d'un port USB, d'un lecteur de carte SD, d'un plateau en plexiglass chauffant. Pour fabriquer des objets l'imprimante fait passer le filament à travers la buse d'impression. Le matériau est alors projeté sous la forme d'une fine chaîne de matière fondue. Le mouvement de la buse d'impression est coordonné par la plaque d'impression qui s'abaisse progressivement à mesure que chaque couche se dépose, de sorte à ce qu'une nouvelle couche recouvre la précédente jusqu'à la fin de l'impression. Logiciels de préparation des fichiers G-code compatibles : Cura, Prusa Slicer, etc.[17]



**Fig. III-2 :** Imprimante 3D creality ender 3.

### **III.2.1. Position d'impression**

La pièce doit être posée sur le plateau chauffant qui doit être réglé préalablement de sorte qu'il soit bien de niveau. Le choix de l'orientation de l'impression peut fortement influencer l'aspect final de l'objet imprimé en 3D. En choisissant l'orientation appropriée, on peut facilement éliminer la plupart des défauts qui peuvent apparaître sur notre objet imprimé et, par conséquent, on obtient une surface beaucoup plus lisse.

### **III.2.2. Matériau d'impression utilisé**

Le filament PLA assure une impression 3D sans accroc grâce à sa fiabilité et à sa bonne qualité de surface. Il est fabriqué à partir de sources bio et renouvelables. C'est un matériau sûr, facile à utiliser et convenant aux applications les plus variées grâce à sa facilité de mise en œuvre et à sa vitesse d'impression élevée, avec une utilisation extérieure à long terme et applications dans lesquelles la partie imprimée est exposée à des températures supérieures à 50 °C. Un vaste choix de couleurs est disponible (**Fig. III-3**). Dans ce cas on utilise le PLA blanc.

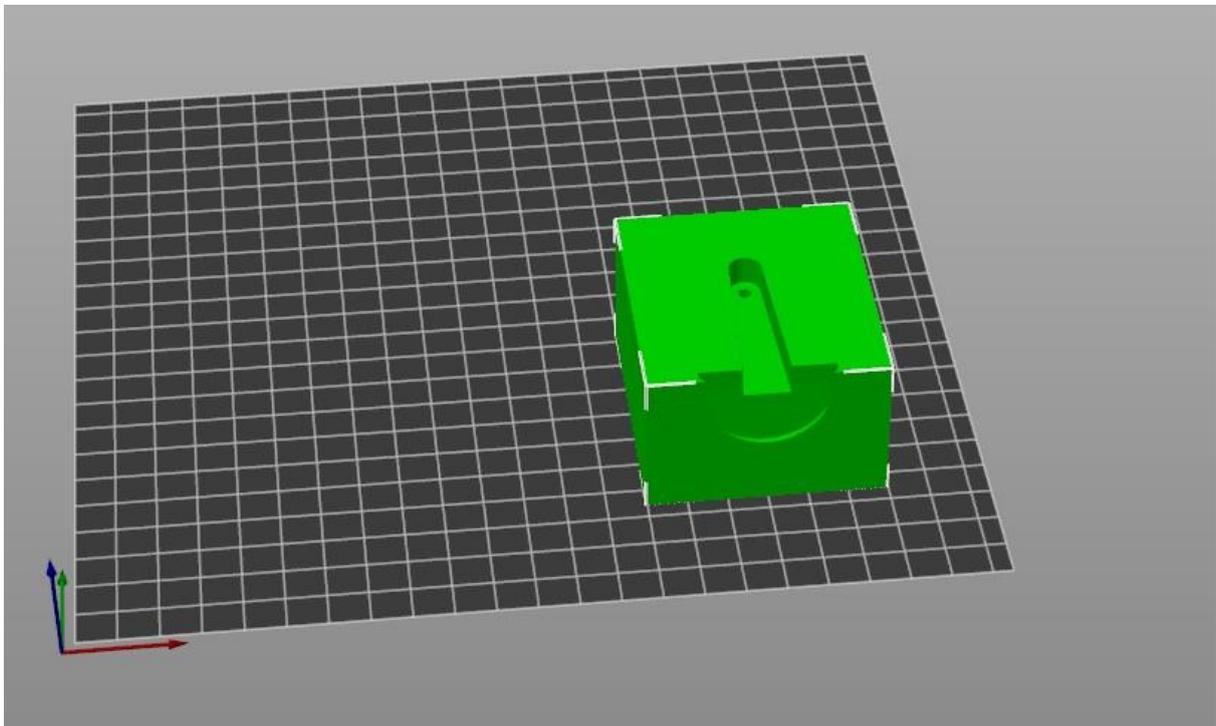


**Fig. III-3 :** Bobines de filament PLA différentes couleurs.

### III.3. Paramètre d'impression

Après avoir terminé la conception de la pièce sur le logiciel SOLIDWORKS, l'importation du fichier vers le logiciel d'impression 3D doit se faire sous le format STL.

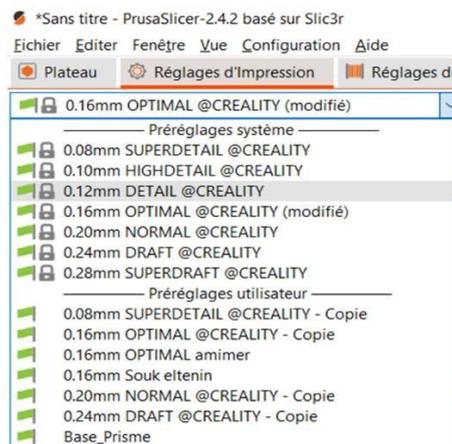
Grace au logiciel d'impression 3D PRUSASLICER on importe le fichier STL. Vérifiant que tous les réglages de base de l'imprimante, puis aux réglages de l'impression à adapter pour la fabrication de la pièce.



**Fig. III-4 :** Model importé.

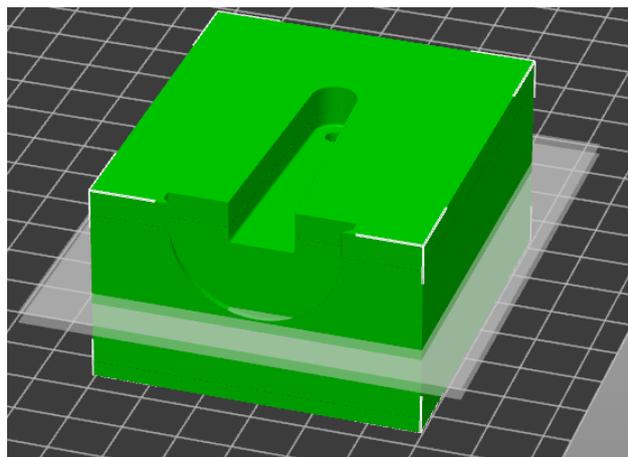
### III.3.1. Épaisseurs des couches

C'est l'épaisseur de la couche déposée par la tête d'impression sur la table d'impression. Ce paramètre dépend du diamètre de la buse. Cela correspond à la hauteur de chaque couche déposée selon l'axe Z, on parle souvent de précision d'impression (ou encore de résolution). Celles-ci sont données en millimètres. Le choix a été porté vers une hauteur de couche de 0.12mm étant le paramètre le plus adapté en terme de qualité de surface et de temps d'impression.



**Fig. III-5 :** Choisir l'épaisseur de couche.

On remarque que sur une partie de la pièce (arrondis) un problème de planéité apparaît. Afin de remédier à ce problème et éviter un défaut sur la pièce (planéité + escalier) on choisit une hauteur de couche variable entre la couche 80 (12.84mm) et 100 (16mm) ou on est passé d'une hauteur 0.12mm à 0.08mm.



**Fig. III-6 :** Emplacement des couches variable.

Le paramètre coque horizontale permet de générer des couches solides sur la surface supérieure et inférieure.

**Coques horizontales**

<input checked="" type="checkbox"/> Couches solides:	Top: ● ●	<input type="text" value="7"/>		Du bas: ● ●	<input type="text" value="6"/>	
<input checked="" type="checkbox"/> Épaisseur de coque minimale:	Top: ● ●	<input type="text" value="0"/>	mm	Du bas: ● ●	<input type="text" value="0"/>	mm

**Fig. III-7 :** Choix nombre de couche.

### III.3.2. Qualité d'impression

#### III.3.2.1. Les vitesses

La configuration du paramètre vitesses permet de contrôler les déplacements d'impression, une trop faible vitesse peut causer des temps d'impression important, tandis qu'une vitesse trop élevée peut engendrer des défauts d'impression, l'optimisation de ce paramètre est donc importante pour garantir une bonne qualité d'impression dans un délai minimal.

**Vitesse pour les déplacements d'impression**

<input checked="" type="checkbox"/> Périmètres:	<input type="checkbox"/>	40	mm/s
<input checked="" type="checkbox"/> Périmètres courts:	<input type="checkbox"/>	25	mm/s ou %
<input checked="" type="checkbox"/> Périmètres externes:	<input type="checkbox"/>	25	mm/s ou %
<input checked="" type="checkbox"/> Remplissage:	<input type="checkbox"/>	50	mm/s
<input checked="" type="checkbox"/> Remplissage solide:	<input type="checkbox"/>	40	mm/s ou %
<input checked="" type="checkbox"/> Remplissage solide supérieur:	<input type="checkbox"/>	30	mm/s ou %
<input checked="" type="checkbox"/> Supports:	<input type="checkbox"/>	40	mm/s
<input checked="" type="checkbox"/> Interface des supports:	<input type="checkbox"/>	100%	mm/s ou %
<input checked="" type="checkbox"/> Ponts:	<input type="checkbox"/>	25	mm/s
<input checked="" type="checkbox"/> Remplissage des trous:	<input type="checkbox"/>	30	mm/s
<input checked="" type="checkbox"/> Lissage:	<input type="checkbox"/>	15	mm/s

**Vitesse pour les déplacements sans impression**

<input checked="" type="checkbox"/> Déplacement:	<input type="checkbox"/>	150	mm/s
<input checked="" type="checkbox"/> Déplacement Z:	<input type="checkbox"/>	0	mm/s

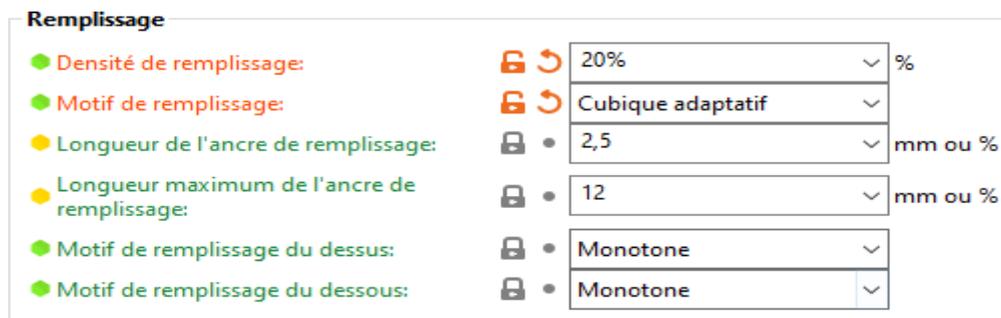
**Fig. III-8 :** Choix des vitesses.

#### III.3.2.2. Remplissage

Les modèles imprimés 3D sont rarement imprimés avec un remplissage de 100% ou complètement creux. Au lieu de cela, nous utilisons une méthode qui remplit l'intérieur d'un objet avec une structure de soutien. Cette méthode aide à solidifier le modèle et empêche la formation d'espaces et de trous à la surface de l'objet.

Le pourcentage de remplissage a été fixé à 20% avec un motif cubique adaptatif (**Fig. III-9 : Choix de la densité et le motif de remplissage Fig. III-9**). Le remplissage a 20 % permet

de réduire le temps d'impression et d'économiser de la matière afin d'avoir une pièce de qualité à moindre cout. Le motif cubique adaptatif s'agit de cubes dont un coin est orienté vers le bas et où les lignes se croisent au sein d'une même couche. L'avantage majeur qu'offre les motifs cubiques adaptatif et qu'il rend le remplissage plus dense en approchant des bords du modèle, laissant de larges cavités au milieu. La consommation de matériau est environ  $\frac{1}{4}$  moins importante que le remplissage rectiligne.



**Fig. III-9 :** Choix de la densité et le motif de remplissage.

### III.3.2.3. Périmètre

Définit le nombre minimal de contours qui forment la paroi d'un modèle. Les profils Original Prusa utilisent toujours un minimum de deux périmètres.

Dans des nombreux cas la buse doit se déplacer entre deux points sans dépôt de matière, cependant la matière coule de la buse à cause de la gravité et peut engendrer des défauts d'impression tel que des dépôts de matière non désirés sur plusieurs couches, pour éviter cela la programmation du paramètre rétraction permet de rétracter le filament d'une valeur donnée pendant les déplacements à vide pour éviter ce genre de phénomène, dans ce cas la rétraction est de 6mm.

### III.3.2.4. Les températures

Il est recommandé pour le PLA d'appliquer une température d'extrusion (buse) variant entre 180 et 220°C. Le plateau pourra être paramétré à une température pouvant atteindre 60°C maximum afin de garantir une bonne accroche de la première couche qui est très importante. Dans ce cas la température est de 215°C pour la première couche et de 200°C pour les autres couches. Le plateau et régler à une température de 60°C. [18]

**Température**

● Buse: Première couche:  °C Autres couches:  °C

● Plateau: Première couche:  °C Autres couches:  °C

**Fig. III-10** : Choix des températures.

### III.4. Résultat

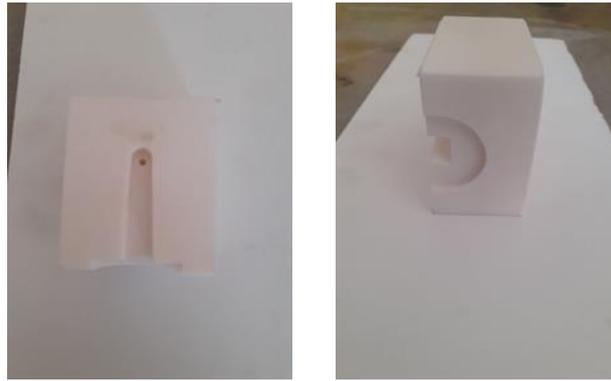
Après le paramétrage on procède à la découpe de la pièce pour avoir une estimation du temps d'impression qui varie selon les paramètres choisis et de la quantité de filament utilisé en longueur et en poids.

On constate que les fonctionnalités périmètre, périmètre externe et le remplissage interne prene la majorité du temps d'impression (environ 6 heures).

Type de fonctionnalité	Durée	Pourcentage	Filament utilisé	
 Périmètre	2h3m	 25,4%	5,67 m	16,92 g
 Périmètre externe	1h10m	 14,4%	1,93 m	5,74 g
 Remplissage interne	3h3m	 37,8%	8,30 m	24,76 g
 Remplissage solide	51m	 10,6%	2,17 m	6,48 g
 Remplissage solide supérieur	6m	 1,2%	0,18 m	0,54 g
 Lissage	43m	 9,0%	0,02 m	0,06 g
 Remplissage du pont	7m	 1,4%	0,36 m	1,06 g
 Remplissage des trous	30s	 0,1%	0,00 m	0,00 g
 Personnalisé	51s	 0,2%	0,02 m	0,06 g
Temps d'impression estimés:				
Première couche: 10m				
Total: 8h5m				

**Fig. III-11** : Estimation du temps d'impression.

A la fin de l'impression on obtient une pièce rigide et légère identique au model CAO.



**Fig. III-12** : Résultat de l'impression du modèle.

## III.5. Moulage en sable

### III.5.1. Fabrication du moule en sable

Dans cette partie nous allons aborder les différentes étapes, pour la fabrication d'un moule en sable, dans le but de valider la fiabilité du processus proposé. Lors de son élaboration de notre moule, nous avons utilisé le matériel existant au niveau du hall de technologie, à savoir tamis, sable (apporté de Sonatrach), fouloir, châssis, aluminium liquide, marbre, pilette, spatule, mandrin, goujon, truelle. Voir la **Fig. III-13**.



**Fig. III-13** : Matériel utilisé pour le moulage en sable.

#### III.5.1.1. Étapes du moulage en sable

##### (1) Élaboration d'un demi-moule

Le modèle imprimé en 3D (**Fig. III-12**) est posé sur la marbre à mouler. Puis, le châssis est positionné sur le marbre (**Fig. III-14**).



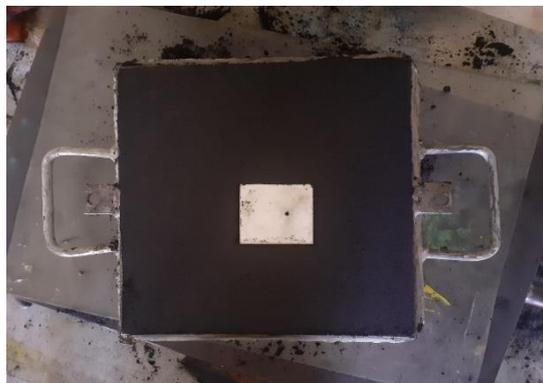
**Fig. III-14 :** Châssis posé sur le marbre.

Le châssis est rempli de sable tamisé pour la partie en contact avec la forme de la pièce. Le sable doit être réparti correctement, particulièrement aux endroits sensibles, il est progressivement tassé à la main, puis à l'aide de fouloirs lorsque la hauteur est suffisante pour ne pas endommager le modèle (**Fig. III-15**) Le sable est arasé à hauteur de châssis afin d'obtenir une surface plane.



**Fig. III-15 :** Châssis remplie de sable condensé.

Enfin le châssis est retourné (**Fig. III-16**), le modèle est libéré verticalement afin de ne pas abîmer l'empreinte déposée dans chaque demi-moule (**Fig. III-17**).



**Fig. III-16 :** Châssis retourné.



**Fig. III-17 :** Extraction du modèle et apparition de l'empreinte sur le sable.

### (2) Réalisation des événements et du trou de coulée

Les trous de l'évent et de la coulée sont réalisés à l'aide de petits cylindres en bois (**Fig. III-18 (a)**). Le châssis est ensuite retourné, puis les trous d'évents et de coulée sont creusés sur le moule ou l'empreinte est façonné (**Fig. III-18(b)**).



**Fig. III-18 :** (a) Assemblage des deux châssis avec mandrin de coulée (b) Façonnage du canal d'alimentation et d'évent.

### (3) Assemblage du moule

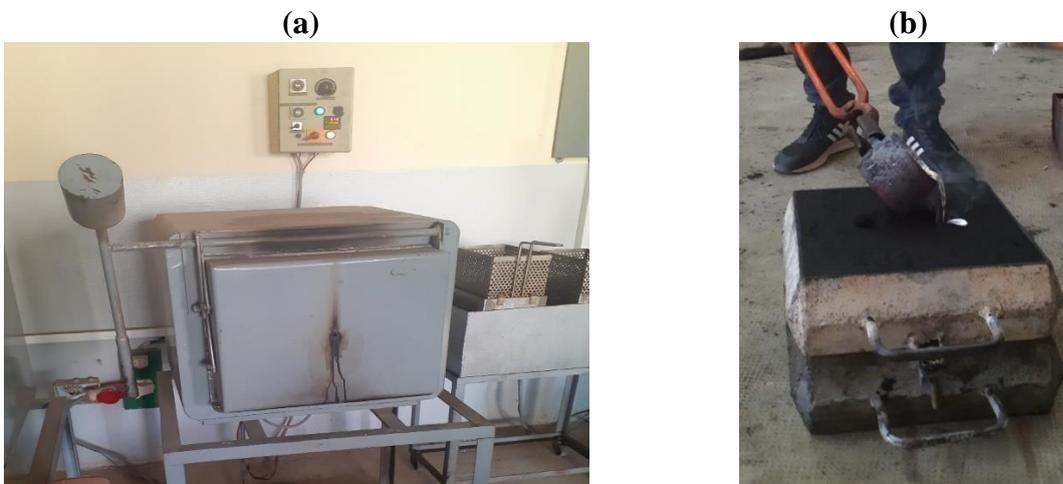
Les deux châssis sont superposés en veillant à leur bonne orientation l'un par rapport à l'autre. Les goujons assurent le bon positionnement et le maintien des deux châssis (**Fig. III-19**).



**Fig. III-19 :** Positionnement des deux châssis.

#### (4) Coulée

Le moule est posé à proximité du four (**Fig. III-20(a)**) contenant l'aluminium liquide chauffé à 700 C°. L'opération nécessite un équipement de protection : casque avec masque, tablier. La coulée doit être faite rapidement en un seul geste, il est nécessaire de prélever la bonne quantité à l'aide de la louche (**Fig. III-20(b)**).



**Fig. III-20 :** (a) Four utilisé (b) Coulée de l'aluminium.

#### (5) Obtention de la pièce

La pièce se solidifie, mais se refroidit que très peu, il est important de réaliser le démoulage avec précaution. La pièce est séparée du châssis supérieur en le soulevant du châssis inférieur.



**Fig. III-21 :** (a) Séparation des deux châssis (b) Pièce finale.

Après refroidissement de la première coulée on remarque l'apparition d'une cavité sur la surface extérieure causer pas une bulle d'air dû au manque de trous d'évents (**Fig. III-22**).



**Fig. III-22 :** Apparition de la cavité.

Cette opération a été effectuée deux fois afin d'obtenir deux empreintes qui constitueront notre moule. On note également, que nous avons fait plusieurs essais afin d'obtenir l'empreinte de la pièce, cela est dû à la qualité du sable utilisé.

### III.6. Surfaçage des pièces

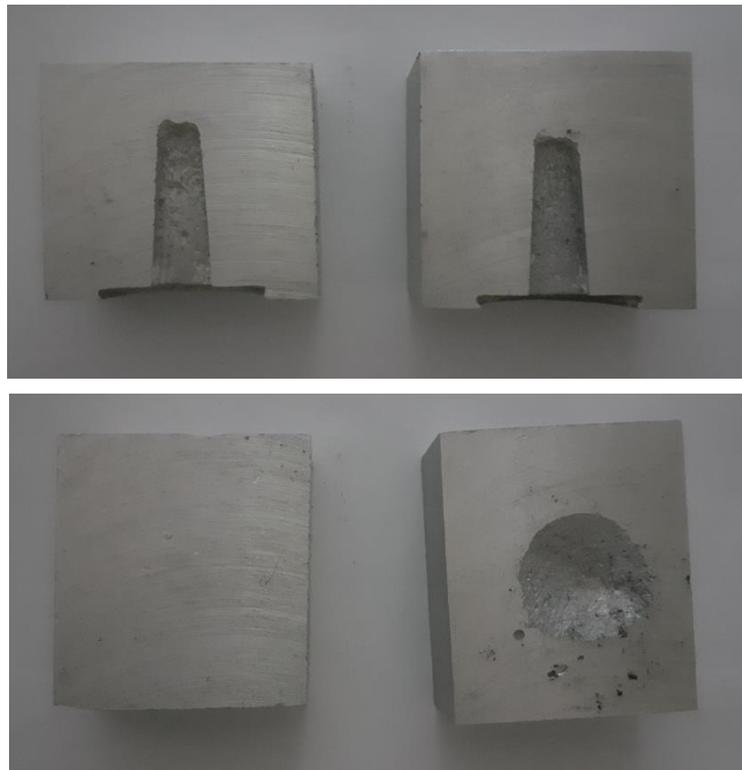
Après démoulage on obtient des pièces à surfaces rugueuses, pour y remédier on passe à l'étape surfaçage, grâce à une fraiseuse (**Fig. III-23**) on fixe la pièce sur l'étau, réglant la machine selon les paramètres suivants (voir annexe A):

- Vitesse de rotation 398.08 tr/min
- Vitesse d'avance 71.65 mm/min



**Fig. III-23** : Surfaçage des pièces.

Après l'étape de l'usinage, on obtient les pièces suivantes :

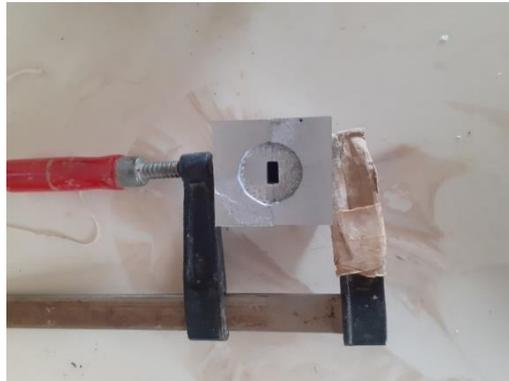


**Fig. III-24** : Pièces après surfaçage.

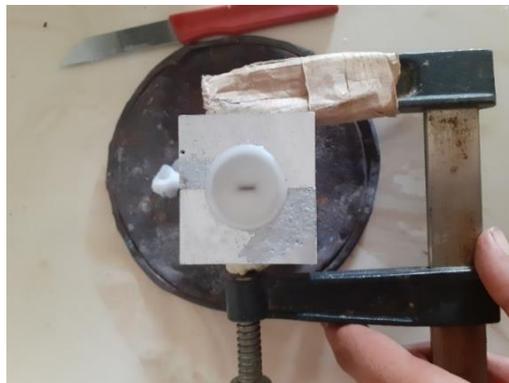
### III.7. Essaie du moule

Après surfaçage des deux empreintes on procède à un essai du moule. On fixe les deux empreintes grâce à un sert joint (**Fig. III-25**), puis on coule de la cire préalablement fondue

(**Fig. III-26**) Après solidification on procède au démoulage et on obtient une pièce avec quelque défaut dû à la qualité du sable utilisé (**Fig. III-27**).



**Fig. III-25** : Assemblage avec sert joint .



**Fig. III-26** : Coulée de la cire.



**Fig. III-27** : Pièce obtenue.

## Conclusion générale et perspectives

Dans ce manuscrit nous avons exposé une introduction avec les informations importantes sur le moulage en coquille par gravité, le moulage en sable et la fabrication additive.

On a vu le principe de conception de pièce en fonderie et nous avons présenté et expliqué les étapes à suivre pour la création des empreintes et noyaux à l'aide de logiciel SolidWorks. De plus, nous avons aussi utilisé la simulation afin d'étudier la résistance du modèle amélioré du presse ail, ainsi que la résistance des moules aux déformations liées aux charges thermiques.

Nous avons également utilisé l'impression 3D pour la fabrication d'une partie du moule de la pièce 03, à l'entreprise Fonderie METHIA. Ce modèle a servi à la réalisation de l'empreinte du moule en sable avec du l'aluminium, au niveau de la fonderie du hall technologie avec les moyens mis à disposition.

Après démoulage, nous avons pris les deux pièces résultantes pour passer à l'étape de finition par usinage sur fraiseuse conventionnelle. Enfin, nous avons effectué une coulée avec de la cire, pour tester le processus de fabrication.

## Annexe A

### Calcul des conditions de coupe

Vitesse rotation de la broche :  $N$  [tr/min]

$$N = (1000 \times V_c) / (\pi \times D)$$

Vitesse d'avance en Fraisage :  $V_f$  [mm/min]

$$V_f = n \times f_z \times Z$$

Vitesse de coupe :  $V_c$  [m/min]

$$V_c = (n \times \pi \times D) / (1000)$$

D'où :

$V_c$  : vitesse de coupe [m/min]

$f_z$  : avance par dent [mm/dent]

$V_f$  : vitesse d'avance [mm/min]

$N$  : fréquence de rotation [tr/min]

$D$  : diamètre de l'outil [mm]

$Z$  : nombre de dents de la fraise.

Dans notre cas on usine de l'aluminium et dans certain document on trouve que la vitesse de coupe ( $V_c$ ) varie entre 100 et 150 [m/min] ainsi que l'avance par dent qui est 0.030 [mm/dent]

### Données

$$V_c = 150 \text{ m/min}$$

$$D = 120 \text{ mm}$$

$$f_z = 0.030 \text{ mm/dent}$$

$$z = 6 \text{ dents}$$

**Application numérique****Calcul de la vitesse de rotation**

$$N = 1000 \times vc / \pi \times d$$

$$N = 1000 \times 150 / \pi \times 120$$

$$N = 398.08 \text{ tr/min}$$

**Calcul de la vitesse d'avance**

$$V_f = N \times f_z \times Z$$

$$V_f = 398.08 \times 0.030 \times 6$$

$$V_f = 71.65 \text{ mm/min}$$

## **Annexe B**

## Références bibliographiques

- [1] <http://www.secodir.fr/>
- [2] <http://www.fonderie-aluminium-sesam.fr/>
- [3] <http://www.fonderie-roux-gallois.com/>
- [4] <http://www.fonderies-de-nangis.com>
- [5] <http://www.ctif.com>
- [6] <http://www.forgefonderie.org>
- [7] [http://www/esff.fr](http://www.esff.fr)
- [8] <https://www.forgefonderie.org/fr/forge-fonderie>
- [9] <http://www.sulka.fr/fcp/>
- [10] <http://www.ferrycapitain.fr/>
- [11] ©Tous droits réservés, Johanne Gauthier, 2017 mémoire présenter a l'école de technologie supérieur en comme exigence partielle a l'obtention de la maitrise avec mémoire, concentration personnalisée M.Sc.A. Montréal, le 21 décembre 2017 école de technologie supérieur université de Québec.
- [12] methia nadir et medjoub oussama, conception d'une imprimante 3d, Mémoire Master 2020, Université Abderrahmane Mira-Bejaia.
- [13] Clément GOSSELIN pdf dans imp 3d (cl3a9ment-gosselin-r8 )
- [14] Fonctionnement de l'impression 3D La Vision, l'Innovation et les Technologies derrière l'Impression jet d'encre 3D
- [15] <https://www.lesnumeriques.com/imprimante-3d/quels-sont-materiaux-utilises-en-impression-3d-a1884.html>
- [16] LUYT ,Berier et Berchon, Mathild. L'impression 3D. Edition Eyrolles, 2014
- [17] <https://manuals.plus/fr/cr%C3%A9al%C3%A9/creality-ender-3-manuel-de-l'imprimante-3d#axzz7WvyNu3kd>
- [18] <https://www.makershop.fr/>
- [19] <https://manuals.plus/fr>
- [20] [https://help.solidworks.com/2018/french/solidworks/sldworks/c\\_Mold\\_Tools\\_Parting\\_Lines.htm#:~:text=Les%20lignes%20de%20joint%20se,application%20d'une%20d%C3%A9pouille%20appropri%C3%A9e.](https://help.solidworks.com/2018/french/solidworks/sldworks/c_Mold_Tools_Parting_Lines.htm#:~:text=Les%20lignes%20de%20joint%20se,application%20d'une%20d%C3%A9pouille%20appropri%C3%A9e.)

## Résumé

Avec l'avancement de la technologie dans le monde de l'industrie, la réalisation des études se fait sur logicielles CAO et la fabrication de pièces de hautes précision se fait sur les machines à commandes numériques. Tels que les moules et leur fabrication avec l'impression 3D combiner au moulage en sable passant par la conception avec CAO. L'association de ces derniers nous permet d'avoir des pièces avec une précision très élevée pour un cout moindre.

**Mots clés :** fonderie, fabrication additive, Conception, simulation, moulage.

---

## Abstract

With the advancement of technology in the world of industry, the realization of studies is done on CAD software and the manufacture of high precision parts is done on numerically controlled machines. such as molds and their manufacture with 3D printing combined with sand casting through design with CAD. The combination of these allows us to have parts with very high precision for a lower cost.

**Keywords** foundry, additive manufacturing, design, simulation, molding.

---

## ملخص

مع تقدم التكنولوجيا في عالم الصناعة ، يتم إجراء الدراسات على برنامج CAD ويتم تصنيع أجزاء عالية الدقة على آلات يتم التحكم فيها رقمياً. مثل القوالب وتصنيعها مع الطباعة ثلاثية الأبعاد جنباً إلى جنب مع صب الرمل من خلال التصميم باستخدام CAD. يتيح لنا الجمع بين هذه الأجزاء الحصول على أجزاء عالية الدقة بتكلفة أقل.

الكلمات الدالة: مسبك ، تصنيع مضاف ، تصميم ، محاكاة ، صب.