REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA

Faculté de **T**echnologie

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : Génie mécanique

Spécialité : Ingénierie des matériaux et des surfaces

Thème

Nouvelles perspectives d'utilisation de l'impression 3D pour la réalisation de l'outillage (modèle et ponte à noyau du polymère à profil de la fonderie)

Présenté par :

BELAISSA M'hamed

MEKMECHE Brahim

Dirigé par :

Mr : HABIRECHE Mohamed

Promotion septembre 2020

Remerciements

Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué au succès de mon stage et qui m'ont aidée lors de la rédaction de ce mémoire.

Je voudrais dans un premier temps remercier, mon directeur de mémoire M.HBIRECH MOHAMED pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter ma réflexion.

Je remercie également toute l'équipe pédagogique de l'université de DR.YAHIA FARES DE MÉDÉA et les intervenants professionnels responsables de ma formation, pour avoir assuré la partie théorique de celle-ci.

Mes parents, pour leur soutien constant et leurs encouragements

Dédicace

A mes parents pour tout l'amour qu'ils m'ont donné.

A mes frères et mes sœurs pour leur soutien.

A tous ceux qui m'ont chaleureusement encouragée à finir ce mémoire du master.

Je dédie ce travail.

Table des matières

Liste de figures

Liste de tableau

Introduction……1

I-Moulage ……..……...3

I.1- Généralité……..……3

I.1.1- Types de moulage……3

I.1.1.1- Moule non permanent……..3

I.1.1.2- Moule permanent……..…3

I.2 –Plan de joint……..…4

I.2.2- définition……4

I.2.3- choix du plan de joint……..……4

I.2.4- création fichier CAD 3D ……4

I.2.5- vision du service moulage ……..……4

I.2.6- emplacement du plan de joint ……..4

I.2.7- tenir compte du plan de joint ……..……5

I.3-Sueepaisseuer d'usinage ……5

I.3.1- Définition ……5

I.3.2- ce surplus ……..5

I.3.3- valeur des surépaisseurs ……5

I.3.4- ordre de grandeur ……5

I.4- Le retrait ……5

I.4.1- variation retrait ……..6

I.4.2- effet température ……..6

I.4.3- valeurs moyens de retrait ……6

I.4.4- unité de mesure et longueur ……...6

I.4.5- calcul retrait ……...7

I.5- La dépouille ……..7

I.5.1- rôle de l'inclinaison ……..7

I.5.2- sens du démoulage ……7

1.5.3- ordre de grandeur des angles ……..……7

1.5.4- conséquence ……..8

I.6- Noyau et boite a noyau ……8

I.6.1- utilité positionnement ……8

I.6.2- confection de noyau ……..……8

I.6.3- enlèvement et séchage ……..……8

I.6.4- incorporation de résine au sable ……..8

I.6.5- dimension du noyau ……..……9

I.7-Masselottes……..……9

I.7.1- Définition ……..9

I.7.2- Types de masselottes ……9

I.7.3- Utilisation masselotte ……..9

I.7.4- Détermination volume masselotte ……..10

I.8- Les principaux procédés de moulage……10

I.8.1- moulage en sable ……10

I.8.2- moulage en coquille par gravité ……..10

I.8.3- moulage en coquille sous pression ……11

I.8.4- moulage en carapace ……11

I.8.5- moulage a la cire perdue ……11

I.8.6- moulage a modèle perdu ……11

I.9- Dure de vie des moules ……12

I.9.1- couts ……12

I.9.2- durée de vie empreinte ……12

I.9.3- utilisation d'empreinte ……12

I.10- Coulée de métal……12

I.10.1- Utilisation……12

I.10.2- poche de coulée ……13

I.10.3- chargement de châssis ……13

I.10.4- composition du système de coulée ……13

I.10.5- conception du système de coulée ……13

I.10.6- paramètre de coulée ……14

I.10.7- temps de solidification ……14

I.10.8- Alimentation ……14

I.10.9- destination remplissage et alimentation ……14

I.11-Sable de fonderie……14

I.11.1- Composition ……14

I.12- Châssis……15

I.13- Modèle……16

I.13.1- caractéristique du modèle ……16

I.13.2- confection modèle ……..16

I.13.3- différents alliages ……..16

I.13.4- formes modèles ……17

I.13.5- réalisation modèle ……..17

I.13.6- modelage ……17

Chapitre II imprimante 3D……..18

INTRODUCTION……..19

II.1-LA Fabrication additive ou l'impression 3D ……20

II.1.1- Définition ……...20

II.1.2- Fonctionnement de l'impression 3D ……20

I.1.3- technologie et matériaux de l'impression ……..21

II.1.4- Les avantage de l'impression 3D ……..24

II.1.4.1- La rapidité……24

II.1.4.2- La maîtrise des coûts……24

II.1.4.3- La personnalisation……..24

II.1.4.4- La précision avec la qualité de la haute résolution……25

II.1.4.5- La Gestion du stock……...25

II.1.4.6- La relocalisation……..25

II.1.5- Normalisation ……..26

II.1.6- Les champs d'application de l'impression 3D……27

II.1.6.1- L'aéronautique et l'aérospatiale ……28

II.1.6.2- L'automobile……...29

II.1.6.3- LE Médicale……29

II.1.6.4- L'Architecture……30

II.1.6.5- Les Accessoire……. ……31
II.1.7- Impression 3D / Procédés traditionnel ……..31
II.2- Impact de l'impression 3D sur la chaine de production ……33
II.3- Analyse SWOT ……..……..……..35
II.4- Le marché mondial pour l'impression 3D ……..……35
II.4.1- Situation de marché ……..……35
II.4.2- Répartition géographique……..……..……37
II.4.3- Les secteur utilisateur……..40
II.4.4- Les tendances de la fabrication additive ……..…41
Chapitre III……44
III- Simulation ……...45
III.1- Logiciel SOLIDWORKS……..45
III.2- Pièce choisis……..……..45
III.2.1- La forme de pièce générale……...45
III.3- Conception de la pièce sur SolidWorks……....46
III.3.1- Extrude pièce l'usine……...47
III .3.2- Corrige remoulage de pièce l'usine……50
III.4- Pièce brute……51
III.4.1- Pièce brute sons dépouille……51
III.5- Modèle……..52
III.5.1- Conception le modèle……..52
III.5.2- chassai ou modèle ……53
III.5.3- La forme de modèle……56
III.6- Forme à noyau……57
III.6.1- Conception à noyau……57
III.6.1.1- Boite à noyau……57
III.6.1.2- Boite à noyau……59
III.6.1.3- Noyau en position……61
III.7- le Moule ……..62
III.7.1- Limitation……..62
III.7.1.2- Choix du type de moulage……62
III.7.1.3- Conception le moule……63
IV- Conclusion ……64

Liste de figures

Figure 1 : Les matériaux utilisés pour l'impression 3D ……..……24

Figure 2 : les principales raisons d'utilisation de l'impression 3D……...…31

Figure 3 : Evolution du marché mondial ……..…...35

Figure 4 : Part de marché des fabricants de systèmes……...….36

Figure 5 : Part de marché des fournisseurs de services……..36

Figure 6 : Répartition des recettes du marché de l'impression 3D par région……....37

Figure 7 : Evolution de ventes mondiales des imprimantes 3D……..39

Figure 8 : Répartition de ventes des imprimantes 3D par les grandes régions (moyenne entre 2012-2015)…….....39

Figure 9 : Secteurs d'application (part en % de l'ensemble du marché à destination des professionnels)…….40

Figure 10 : Les matériaux imprimés en 3D que les interrogés veulent voir dans l'avenir……..…….42

Figure 11 : forme de pièce……..…..45

Figure 12 : extrude plane de pièce……...……...…..46

Figure 13 : conception à pièce l'usine……..……...…....47

Figure 14 : corps l'usiné (plane de face)……..…….……49

Figure 15 : corps l'usine mis en plane ……....……..……..…….50

Figure 16 : corps brute sons dépouille…….……...51

Figure17 : la forme générale de pièce brute……..……52

Figure 18 : chassai ou modèle……..……..……...…….52

Figure 19 : chassai ou modèle avec congé……..…….53

Figure 20 : chassai base avec congé et dépouille…….……53

Figure 21 : extrude modèle…….……...54

Figure 22 : chassai Haut……..……..55

Figure 23 : modèle avec congé et dépouille…….……..55

Figure 24 : la forme de modèle…….……...56

Figure 25 : extrude la forme à noyau……..….57
Figure 26:la forme à noyau……58
Figure 27 : extrude boîte à noyau……59
Figure 28 : mise en plane à boite de noyau…….…..60
Figure 29 : partie A + noyau……..61
Figure 30 : partie B + noyau……..61
Figure 31 : Type de moulage……62
Figure 32 : la forme de moule……..…….63

Liste de tableau

Tableau 1 : Comparaison des Technologies d'Impression 3D……22
Tableau 2 : Liste des normes publiées en matière d'impression 3D……..27
Tableau 3 : Comparatif entre l'impression 3D et techniques de fabrication traditionnelle…….....32

INTRODUCTION :

Les pièces et machines et appareil proviennent de diverses sources de fabrication telles que le forgeage, l'usinage, l'estampage, la fonderie … ect.

La technique de fonderie (moulage) est la plus souvent utilisée car elle est économique et permet encore de produire de pièces de formes complexes difficilement réalisables par usinage ou par d'autre procèdes.

Le moulage avec permet de redise des pièces brutes par coulée du métal au fusion dans un moule de sable ou un moule en métal qui représente l'empreinte de la pièce à obtenir.

la fabrication d'une coquille par le logiciel SOLIDWORKS, et enfin l'optimisation d'un système de coulée et d'alimentation pour la coulée d'un corps en aluminium par simulation numérique, et ce pour éviter surtout les défauts internes tel que : les retassures.
l'objet de ce travail portera sur la maitrise de la qualité métallurgique et technologique des pièces obtenues par fonderie gravitaire par une étude de faisabilité lancée à partir des logiciels de dessin et de simulation, avant de passer à l'élaboration et la coulée des pièces de qualité inconnus.

Chapitre 1

I-MOULAGE :

I.1- Généralité :

La fonderie est l'un des procèdes de formage des métaux qui consiste à couler un métal ou vers alliage liquide dans un moule pour reproduire après refroidissement une pièce donnée (forme extérieure et intérieur) en limitant autant que possible les travaux ultérieures de finition.

I.1.1- Types de moulage :

On distingue deux grands types principalement utilise :

a) Les moules non permanents ou moules perdus généralement au sable.
b) Les moules permanents au métal qu'on appelle aussi coquilles.

I.1.1.1- Moule non permanent :

C'est un moule réalisé au sable qui ne sert qu'une seule fois pour réaliser une pièce.

Ce moule est détruit par extraire la pièce brute.

I.1.1.2- Moule permanent :

Ces moules sont métalliques (en fonte ou aciers) ils permettent de couler un grand nombre de pièces, ou distingue les procèdes suivant :

- Le moulage en coquille par gravite.
- Le moulage sous pression.
- Le moulage par centrifugation.
- La moulage en coulée continue.

Le moule permanent peut servir en grand nombres de fois, il est réalisé en plusieurs parties et ce pour faciliter l'extraction de la pièce.

En générale il est utilisé lorsque la quantité de pièces à couler est importante.

I.2 -PLAN DE JOINT :

I.2.1- Généralité :

Avant le moulage il est impératif de lieu déterminer les plans joints des différentes pièces pour qu'elles se démoulent sans se casser ou endommager le modelé.

I.2.2- définition :

Le plan de joint est le plan de coupe qui délimite les différentes partie d'un moule au tenant compte des retentions.

I.2.3- choix du plan de joint :

Un plan de joint bien étudier peut améliorer l'aspect et les fonctionnalités d'une pièce.

I.2.4- création fichier CAD 3D :

La création d'un fichier CAD 3D pour le moulage par injection, on ne massacre pas beaucoup de temps à l'emplacement du plan de joint car sur certaines pièces l'emplacement du plan de joint se traversa au milieu, mais pour d'autre pièces plus complexes la solution est fonction de la géométrie de la pièce (c'est-à-dire l'emplacement à coté à l'intérieur ne le langue)

I.2.5- vision du service moulage :

Le service moulage déterminera l'endroit où le plan de joint doit se trouver.

I.2.6- emplacement du plan de joint :

L'emplacement du plan de joint a pour rôle de :

- Détermine le sens d'ouverture du moule et par conséquent la direction de la dépouille à appliquer à la pièce pour faciliter sur éjection.
- Il créera une trace plus ou moins visible ou les surfaces des deux moitiés se rejoignent.
- Avoir des conséquences sur le cout de fabrication du moule et sur le type et le cout des opérations secondaires nécessaires à la finition de la pièce.

I.2.7- tenir compte du plan de joint :

Il existe plusieurs solutions pour résoudre les problèmes de plan de joint pour toutes les pièces moulées par injection du fait que :

1) Avoir conscience de l'importance du plan de joint est déjà un bon début.
2) Pour les pièces plus complexes ou peut utiliser les outils fournir avec certains logicielles de CAD pour localiser et évaluer les plan de joint, ou télécharger un modèle CAD 3D en ligne car ce logiciel indiquera la possibilité ou non de la fabrication de la pièce.

I.3-SUR EPAISSEURS D'USINAGE :

I.3.1- Définition :

Il s'agit simplement de réserves de matières nécessaires à l'usinage ; car les surfaces fonctionnelles sont usinées et nécessitent une très grande précision pour satisfaire cette condition il est nécessaire de prévoir de la machine en sur plus par rapport à la cote finie.

I.3.2- ce surplus :

Ce surplus de matière est appelé sur repasseur d'usinage.

I.3.3- valeur des surépaisseurs :

Sa valeur de ces surépaisseurs d'usinage ne peut être fixée d'une manière absolue. Elle est fonction de l'état de la surface que l'un peut obtenir par moulage ; de la grandeur de la pièce et de l'état de surface à obtenir à la finition.

I.3.4- ordre de grandeur :

L'ordre de grandeur suivant est adopte :

a) Trois(3) a douze(12) mm pour les surfaces en fonte et en acier.
b) Un(1) a six(6) mm pour les moulages en aluminium, cuivre et leurs alliages.

I.4- LE RETRAIT :

L'alliage chauffé se dilate, il est ovulé dans le moule, lors de son refroidissement il se contracte et ce après le retrait apparait.

Les cotes du moule doivent dans tenir compte du retrait mesure si en pratique sur les pièces de formes compliquées le retrait n'est pas uniforme.

I.4.1- variation retrait :

Selon les matériaux le retrait varie de :

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

Le retrait est la valeur de cette contraction et ce lors du refroidissement.

C'est un phénomène physique de contraction du métal ou alliage lors de la solidification.

I.4.2- effet température :

Vaque très les matériaux métalliques s'allongent sous l'effet de la température et se rétrécissent sous la diminution de cette dernière.

A cet effet et après une série d'essais effectués par des technologues spéciales en fonderie.

Ils ont remarqué que les dimensions des pièces moulées sont inférieures à celle du modèle et ce selon la variation de retrait citée plus haut.

Ajoutent à cela ils ont constatés que le retrait se manifeste dans toutes les directions et varie avec la nature du métal et du volume de la pièce.

I.4.3- valeurs moyens de retrait :

Lors de l'expérimentation les valeurs moyennes de retrait observées sont les suivantes :

- Dix(10) millimètres par mètre soit 1% pour les fontes
- Douze(12) millimètres par mètre soit 1,2% pour les aluminiums et les alliages.
- Quinze(15) millimètres par mètre soit 1,5% pour le cuivre.
- Vingt(20) millimètres par mètre soit 2% pour les aciers.

I.4.4- unité de mesure et longueur :

Pour pallier a ce problème les spécialistes de fonderie ont mis a la disposition des modèles des instruments de mesure tel que mètre a retrait au lieu du mètre ordinaire.

Pour la fonte le mètre a retrait à une longueur de 1000+10mm divisé en 1000 parties égales c'est-à-dire chaque division sont réellement 1,01 mm.

Pour les bronzes un réglet a retrait de 500MM a une longueur de 500+7,5 =507,5mm devisée en 500 parties égales c'est-à-dire chaque division égale sont 1,015mm.

I.4.5- calcul retrait :

Pour calculer le retrait total d'une pièce moulée on additionne le retrait de de transformation et retrait postérieur au moulage.

Le retrait de la pièce en cour de refroidissement commence dans le moule d'injection, le processus continu également après moulage.

I.5- LA DEPOUILLE :

Elle correspond a l'inclinaison des parois permettant d'assurer le démontage de la pièce dans le cas d'un moule permanent ou de démontage du modèle dans le cas d'un moule non permanent.

Cette inclinaison des parois verticales du modèle ou boite a noyau par rapport au sens du démontage.

I.5.1- rôle de l'inclinaison :

Elle permet de faciliter l'extraction du modèle de moulage sable ou de la pièce en moulage.

I.5.2- sens du démoulage :

Il est défini par le plan de joint.

1.5.3- ordre de grandeur des angles :

L'ordre de grandeur des angles de dépouille dépend du type de moulage :

- trois pour cent (3%) pour le moulage en coquille.
- Cinq pour cent (5%) pour le moulage en sable.
- Zéro pour cent (0%) pour le moulage en cire.

1.5.4- conséquence :

C’est une légère pente attribuée aux modèles afin de pouvoir les extraire sans abimer le moule.

I.6- NOYAU ET BOITE A NOYAU :

I.6.1- utilité positionnement :

Le noyau permet d’obtenir les formes creuses ou courtés il est positionne dans l’empreinte du moule après avoir été forme dans une boite à noyau.

Le moulage avec noyau s’impose lorsque les pièces présentent des évidements qu’il serait difficile ou même impossible de les obtenir par montage naturel.

I.6.2- confection de noyau :

Le noyau est confectionne au sable ante siccatif dans un moule appelle boite a noyau, la boite étant en bois ou métalliques, elle se compose de deux parties assemblées par des groupe se repérage.

Dans l’empreinte du moule ils sont positionnes sur des portées de noyau de forme généralement coniques qui devient être prévus au moment de la formation de l’empreinte.

I.6.3- enlèvement et séchage :

Lorsque le sable est ce dernier prend la forme du moule ensuite le noyau est enlevé Serrus détériorer la boite, ensuite il est séché à l’étuve pour lui donner une solidité lui permettant de résister à l’érosion du métal et aux efforts de compression qu’il subit lors du refroidissement de la pièce.

I.6.4- incorporation de résine au sable :

L’incorporation de certaine résine au sable du noyau permet soit :

- Un moulage du noyau dans une boite métallique chauffée modéra ment et dans laquelle le sable est injecté le durcissement dure une minute .

- Un dispositif pneumatique porté par la machine assure l'ouverture et la fermeture de la boite.
- Le moulage a la main à un durcissement à froid moins rapide mais qui dispose de l'étuvage habituel (séchage thermique et durcissement chimique).

I.6.5- dimension du noyau :

Les dimensions du noyau sont établis comme celles du modèles en tenant compte des surépaisseur d'usinage.

Pour la fabrication des pièces en petites série on utilisé les noyaux perdus, ces noyaux sont détruits lors de l'extraction de la pièce coulée.

I.7-MASSELOTTES :

I.7.1- Définition :

C'est une réserve d'alliage liquide qui ne fait pas partie de la pièce finale. Sa mission elle alimenté la pièce pour compenser le contraction lors du refroidissement, elle sert à compenser le retrait volumique que subit le métal. Au cours de la coulée le flux du métal remplit l'empreinte et remonte dans la forme prévue pour la masselotte. Les masselotte se solidifiant après les pièce, elle sont places près des parties massives. Le raccordement des masselottes avec le volume de la pièce doit permettre un bon approvisionnement en métal liquide.
Une attaque de masselotte trop et vite ou trop longue se refroidit rapidement, elle ce remplit plus sur orifice efficacement.

I.7.2- Types de masselottes :

On distingue les masselottes débouchâtes (n'ornées encore exothermique borgne et borgne latérales).

I.7.3- Utilisation masselotte :

On emploie les masselottes borgnes lorsque les attaques sont éloignées de la partie supérieure du moule afin de déterminer le masselottage optimal il faut diviser la pièce en volume simple et évaluer chronologiquement le solidification de ces valeurs.

I.7.4- Détermination volume masselotte :

Pour déterminer le volume de la masselotte un afin de combler le déficit volumique de la pièce alimentée par la masselotte (de volume VP) on doit se servir de l'expression.

$$nVm = rVp$$

n : est le rendement de la masselotte, il est du 1/6 pour une masselotte débouchant et de 1 :2 pour une masselotte borgne.

r : étant le retrait donné par le tableau suivant :

- Alliages d'aluminium ; la valeur prise en compte pour réaliser les systèmes d'alimentation en alliage liquide est de 6% pour le cuivre et magnésium 7à 8% pour le zinc 8% ..etc.
- Alliage en bronze et de 4,5% de laitin 6,5%.
- Alliage ferreux fonte de 0,5 à 3%.
- Alliage de magnésium 4%.

I.8- LES PRINCIPAUX PROCEDES DE MOULAGE :

I.8.1- moulage en sable :

Il est réalisé avec un moule non permanent et selon les phases principales.

a) Mise en place du système d'alimentation et du mandrin pour l'empreinte du trou de coulée.
b) Serrage au fouloir de la partie du dessus du moule noté.
c) Retournement de la partie du mole après extraction du mandrin.
d) Mise en place à l'aide de broche du châssis noté et serrage du sable.
e) Démoulage guidé par les broches et extraction du modèle.
f) Finition du moule avec entonnoir de coulée.
g) Retournement et fermeture de moule par coulée et décochage de la pièce.

I.8.2- moulage en coquille par gravité :

Il est réalisé avec un moule permanent métallique appelé coquille. Ce moule est constitué

d’éléments assemblables dans lesquels une cavité ayant la forme extérieure de la pièce à été réalisé.

Il permet de visualiser l’importance du choix de positionnement de la coulé à partie d’un même moule.

I.8.3- moulage en coquille sous pression :

Le moulage en coquille est dédié aux alliages non ferreux, ces alliages sont injectés en grande vitesse 40à50m/s et sous pression 70à100m/s jusqu’à solidification.

Il peut se faire aussi à l’aide de machine chambre froide.

I.8.4- moulage en carapace :

Il est réalisé avec un moule de deux demi-carapaces dans lesquelles une fin assemblées est encule l’alliage.

I.8.5- moulage a la cire perdue :

C’est un modèle non permanent c’est une technique très ancienne, elle est utilisée pour la réalisation de pièces de formes complexes avec une précision dimensionnelle.

I.8.6- moulage a modèle perdu :

Pour les pièces de formes complexes avec précision dimensionnelle.

A) Règles de trace :

Ses pièces issues du moulage suivent les mêmes règles de trace quel que soit le procède employé.

Les points essentiels du trace d’une pièce moulée sont abordés dans la ressource le moulage en coquille.

B) Conseils pour ces procèdes à titre indicatif :

- Donner au fondeur toutes les indications concernant l’usinage.
- Rechercher des joints plans et réduire le nombre de joint.
- Faciliter le moulage en évitant les centres dépouilles.

- Pas de brassage.
- Larges ouvertures vers l'intérieur.

I.9- DURE DE VIE DES MOULES :

I.9.1- couts :

Ses moules en fonderie sous pressions peuvent entre complexes et couter entre 30000^{E} et 500000^{E} et représentent 10 a 15% du prix final des pièces réalisées.

I.9.2- durée de vie empreinte :

Les empreintes ont une durée de vie de :

- 150000 injection pour les alliages aluminium.
- 500000 injection a 1million pour les alliages zinc.
- 20000 à 40000 pour les alliages en cuivre.

I.9.3- utilisation d'empreinte :

Les empreintes meurent par fissuration progressives résultant des choses thermiques, chauffage brutal lors de l'injection de l'alliage et refroidissement creuse par le pote gage (intérieur des moules métalliques est révèle d'enduits qui forment un départ protecteur, il permet un meilleur contrôle de la chaleur de mieux diriger la solidification de la pièce.

Le système de circulation d'eau place dans le moule permet de règle la température, celle opération sella refroidir le moule a le protéger et enfin à démouler correctement la pièce.

I.10- COULEE DE METAL :

I.10.1- Utilisation :

On peut utiliser le moule tel qu'il vient d'être réalise ; dans ce cas le moulage est dit moulage vert en raison de l'humidité du sable, des surfaces externes des pièces surtout pour la fonte.

Le métal liquide destiné à remplir l'empreinte du moule est obtenue après fusion dans le cubilot ou dans des fours à fusion.

I.10.2- poche de coulée :

El est recueille dans une poche de coulée représentant leur récipient en tôle d'acier garnie intérieurement d'un revêtement réfractaire probablement chauffé.

La poche de coulée est transporté et manœuvrée à la main ou mécaniquement, afin d'éviter les fuites du métal qui se produisent dans le plan de joint du moule a cause de la poussé verticale du métal arrivant à l'empreinte.

I.10.3- chargement de châssis :

On charge le châssis avec des poids(fonte) ou on relié les deux châssis par goujons , ensuite le métal liquide est verse dans un trou de coulée jusqu'à remplissage complet (en cas ou la pièce représente des partis hautes on ajoute des masselotte et ce pour ouvrir l'empreinte).

I.10.4- composition du système de coulée :

Le système de coulée se compose de :

a) **Entonnoir de coulée :** reçoit et coulé le métal liquide provenant de la poche.
b) **Canal de descente** : il est destiné a conduire le métal liquide vers les autres éléments de système de coulée.
c) **Canal transversal** : c'est un canal horizontal, en plus du rôle de la conduite du métal il a un autre rôle qui est la récence des particules de la scorie.
d) **Canal d'arrivée** : il conduit le métal liquide dévidement dans l'empreinte du moule.
e) **Empreinte**.

I.10.5- conception du système de coulée :

Elle est obtenir si on respecte les principes fondamentaux suivants :

- Le refroidissement du moule doit être oriente de haut en bas.
- Le remplissage doit être non turbulent et ce pour éviter la formation d'oxydes et d'inclusion de gaz.
- Le remplissage doit se faire le plus rapidement possible pour obtenir une bonne revue de la pièce.

I.10.6- paramètre de coulée :

- Le diamètre du col de la buse d'injection.
- Les pressions d'injection.
- Les vitesses d'injection.

I.10.7- temps de solidification :

Le temps de solidification d'une pièce peut être calcule en utilisant la loi de CHRORONOV ;

Temps de solidification = $B(volume/surface)^r$.

B : est une constante qui dépend du matériau du moule des propriétés du métal et de la température du moule et du métal lors de la coulée.

Le paramètre r est composé entre 1,5 et 2.

I.10.8- Alimentation :

Le terme coulée est parfois synonyme de remplissage mais son sens est souvent restrictif on l'emploiera cependant dans les expressions massacrées par l'usage comme coulée en chute, coulée en source.

I.10.9- destination remplissage et alimentation :

On distingue le remplissage de l'alimentation cette opération ayant pour but la compensation des variations du volume de la pièce au cours de son refroidissement à l'état liquide et pendant la solidification car dans certains cas une alimentation se produit par le système d'attaque tout en restant partielle de son rôle essentiel qui se solidifie dans son ensemble généralement plus acte que la pièce.

I.11-SABLE DE FONDERIE :

I.11.1- Composition :

Le sable utilisé en fonderie contient suffisamment d'argile.

Les qualités exigées d'un sont :

a) **Infusibilité** :

doit avoir une résistance aux température élevées, obtention une grande de silice 75 à 90%.

b) **Plasticité** :

C'est l'aptitude à épouser les formes du modèle, l'utilisation de la résine a faible proportion lui donne cette condition.

c) **Cohésion** :

C'est l'aptitude d'une conservation des formes, elle s'obtient en incorporant au sable 5a 15% d'argile et environ 8% d'eau.

d) **Perméabilité** :

afin de permettre aux gaz formes durant la coulée d'être évacue sans difficultés. Le sable formant le moule doit être perméable cette perméabilité dépend de la grosseur des grains et de l'intensité avec laquelle le sable a été comprime ou pressé.

N.B : pour améliorer la perméabilité on ajoute de la houille ^^charbon^^ en pondre pulvérisée dans le sable. Les petites particules bruleront lors de la coulée du métal liquide.

I.12- CHASSIS

C'est un cadre rigide fabriqué en fonte, en acier ou en aluminium et parfois en bois.

Un châssis comprend au moins deux parties :

a) Partie supérieure on châssis de dessus.
b) Partie inferieure on châssis de dessous.

Les châssis sont nervurés intérieurement et dans le cas échéant, quand les conditions de moulage l'exigent, on ajoute une partie intermédiaire appelée chape (partie du moule intercalée entre le dessous et le dessus). Les châssis portent des oreilles percées permettant un repérage précis à l'aide de broches ou de goujons. On trouve également sur les cadres, des poignées de manœuvres et de pattes de crampons servant à placer des serre-joints ou des étriers destinés à empêcher la partie du moule de s'écraser sous la pression du métal liquide lors de la coulée.

I.13- MODELE :

Le modèle est une représentation sous forme d'une pièce ou ensemble de pièces de l'objet à fabriquer et permettant la confection de l'empreinte du moule en sable.

Il est réalisé dans une plaque modèle en bois en raison de la facilite de travail de cette matière on encore une plaque modèle métallique pour les grandes séries.

I.13.1- caractéristique du modèle :

Un modèle doit procéder :

a) Une bonne résistance contre les contraintes mécaniques.
b) Une bonne résistance contre les contraintes chimiques (humidité, liant de sable, gaz…..etc)
c) Une bonne résistance entre les contraintes thermiques(échauffement modèles)
d) Une précision de la forme et des dimensions.
e) Un bas prise de revient.

I.13.2- confection modèle :

Les bois étant depuis longtemps la matière essentielle pour la confection des modèles.

Pour chaque type de bois on trouve des propriétés différentes d'ou on utilise :

- Les bois traites sans fissures et secs c'est-à-dire moins de 10% pour prévenir la déformation au cours du stockage.
- La surface de travail doit être lisse et résistante à l'usure.

Pour exécuter des pièces au grande série, les modèles sont métalliques, ils sont piolés et montes sur plaques modèles métalliques.

I.13.3- différents alliages :

Ils sont conçus à partir de différents alliages tels que :

- Alliage d'aluminium.
- Alliage magnésium.
- Alliage zinc.
- Alliage cuivre.

- Alliage fonte et acier.

I.13.4- formes modèles :

Les modèles peuvent être creux on pleins les modèles de petites dimensions sont massifs par contre et ce pour la dimension du prix de revient.

Les modèles sont le métier du modeleur et ce ne la précision, l'assemblage des parties du modèle entre les plaques supérieurs et inferieurs et le tout dépend de la qualité de la pièce obtenue.

I.13.5- réalisation modèle :

Sors de la réalisation du modèle il faut tenir compte :

a) **A l'usinage :** dans ce cas la pièce brute doit comporter des surépaisseurs qui seront enlevée durant l'opération d'usinage.
   Donc les dimensions du modèle doivent être augmentées de 2a3 mm, généralement la grandeur de la surépaisseur d'usinage et choisie selon un tableau spatial.
b) **Grandeur de la surépaisseur :** cette grandeur dépend essentiellement de la nature du métal à couler, des dimensions de la pièce et de la position de ses surfaces pendant la coulée.

I.13.6- modelage :

La confection du modèle qui servira a réalisé le moule d'où sortira la pièce coulée (fondue) est appelée modelage.

Le modèle est fabriqué à partir du dessin de définition de la pièce à exécuter avec des dimensions légèrement accrues afin de compenser le phénomène de retrait du métal au refroidissement et doit être solide, précis et conserve cette précision d'origine malgré manipulation répétées.

Les modèles peuvent être monoblocs on être en deux ou plusieurs parties, dans ce cas chaque partie doit être pourvue de cheville et d'un trou qui se correspondent pour assurer un alignement précis lors de l'assemblage.

Chapitre 2

INTRODUCTION :

La technologie de l'impression en 3D ou la fabrication additive remonte à l'année 1988. Perçue dans ses débuts comme une innovation visionnaire, cette technologie s'est imposée depuis l'année 2010 comme un outil de production avec des avantages indéniables dans les processus de fabrication de pièces très variées : comme les objets d'art, les prototypes ou les pièces pour des secteurs aussi pointus tels que l'automobile ou l'aéronautique. Elle est apparue, au moins dans la perspective dominante, pour être plus une nouveauté qu'un outil pratique pour faire progresser la fabrication

En effet, des avancées technologiques réalisées en 2010 ont permis de réduire les coûts et de rendre cette innovation plus accessible pour les utilisateurs. A présent, l'impression 3D a atteint un point d'inflexion de sorte qu'elle peut intégrer désormais toute la chaine de valeur manufacturière.

Cette nouvelle technologie est une forme de production sans équivalent : - Les pièces à fabriquer sont conçues sans avoir besoin d'outillages et reviennent donc moins chères. - L'impression tridimensionnelle est économe en énergie et génère peu de résidus donc elle est respectueuse de l'environnement. - Les pièces fabriquées sont plus légères et d'une durée de vie plus longue.

Actuellement, la petite imprimante tridimensionnelle peut être obtenue à moins de 500 $. La plupart des pays industrialisés ont mis en place des stratégies pour développer cette technologie qui sera l'assise de l'industrie de futur. La présente note propose dans une première partie une revue documentaire sur l'impression 3D : ses définitions, ses matériaux, ses techniques, ses normes,…, etc. En deuxième parties, elle analyse l'impact de cette technologie sur la chaine de valeur industrielle en détaillant les avantages et les inconvénients. En outre, cette note donnera un aperçu sur la situation du marché mondial de l'impression 3D ainsi que les stratégies adoptées pour propulser les technologies numériques et particulièrement la fabrication additive dans des pays comme les Etats unis, le Royaume uni, l'Allemagne et la France. En conclusion, cette note présente un aperçu sur la technologie d'impression 3D en Tunisie et formule des recommandations à l'image de ce qui se fait dans les pays industrialisés en vue de promouvoir la fabrication additive sur le plan national et propose trois fiches projets dans ce secteur porteur.

II.1-LA FABRICATION ADDITIVE OU L'IMPRESSION 3D :

II.1.1- Définition :

L'impression 3D ou la fabrication additive est un processus de fabrication d'objets solides tridimensionnels à partir d'un fichier numérique. L'objet imprimé en 3D est créé en superposant des couches de matériaux. Chacune de ces couches peut être considérée comme une coupe transversale horizontale mince de l'objet temporaire. Ce procédé s'appelle aussi processus additif. L'impression 3D est l'opposé de la fabrication soustractive qui coupe ou creuse un morceau de métal ou de plastique avec des machines conventionnelles. Elle permet de créer des formes complexes (fonctionnelles) en utilisant moins de matériaux que les procédés de fabrication traditionnelles.

II.1.2- Fonctionnement de l'impression 3D :

En premier lieu, il convient de dessiner la forme souhaitée sur un logiciel de CAO (Conception Assistée par Ordinateur). Il existe un nombre important de logiciels sur le marché qui permettent de créer ses modèles 3D (certains sont gratuits et/ ou open source d'autres sont propriétaires). Les plans sont ensuite transmis à l'imprimante. En deuxième étape, l'imprimante traite cette modélisation 3D conformément à la logique de fabrication additive : c'est-à-dire découper la modélisation 3D en couches 2D grâce à un logiciel approprié. Autour de ces deux grandes fonctions, d'autres logiciels sont intégrés notamment pour assurer la communication entre l'imprimante et les ordinateurs. L'imprimante 3D reçoit donc une série d'instructions qu'elle va restituer en objets 3D. Plusieurs technologies existent pour passer de couches 2D à un objet 3D. Deux grands types de procédés sont en fait utilisés pour former les objets : - Soit la matière travaillée peut entrer en fusion et en quel cas, elle peut être fondue peu à peu pour obtenir la forme souhaitée. (Exemple : Plastique) - Soit la matière peut être solidifiée sous l'action de la chaleur ou de la lumière (laser). (Exemples : Résine ou alliage de titane)

Mais dans les deux cas, l'imprimante 3D « pense » couche par couche pour obtenir la forme 3D. Chacun des méthodes implique des qualités propres qui jouent sur la durée nécessaire à l'obtention de l'objet mais aussi la taille limite des objets. Après une étape de fabrication additive, le produit n'est ni terminé ni prêt à l'emploi. Il nécessite : - Un nettoyage, un enlèvement des supports, un polissage, un sablage, un grenaillage; - Un usinage ; - Un traitement thermique ; - Etc. Ces opérations de finition et parachèvement concernent surtout les pièces métalliques.

I.1.3- technologie et matériaux de l'impression :

De nombreuses technologies d'impression 3D sont déjà disponibles sur le marché, et un certain nombre sont en cours de développement. Chacune de ces technologies requiert un type de matériau d'impression 3D différent: filaments plastique en bobines (PLA, ABS…), résines liquides photosensibles, poudres (métal, plastiques…) etc. Chaque technologie d'impression 3D présente des avantages spécifiques et est adaptée pour des applications particulières. Il existe trois grandes catégories de technologies d'impression 3D : •Dépôt de fil ou extrusion (FFF et FDM) : un filament plastique est fondu par la tête d'impression de l'imprimante 3D et déposé sur la plateforme d'impression de l'imprimante 3D pour créer l'objet voulu, couche par couche. •Résine (SLA et DLP) : une résine liquide photosensible est polymérisée (solidifiée) de manière très précise par un laser ou un projecteur, formant ainsi l'objet voulu directement dans le bac de l'imprimante 3D contenant la résine. La technologie la plus courante utilisant la photo polymérisation (solidification de la résine photosensible par la lumière) est l'impression 3D par stéréo lithographie (SLA). •Poudre (SLS, SLM, DMLS…) : un matériau sous forme de poudre est disposé dans le bac de l'imprimante 3D. Une source d'énergie, en général un laser, est utilisée pour fusionner les grains de poudre et forme une structure solide. On parle principalement d'impression 3D par frittage laser ou frittage de poudre (SLS pour Selective Laser Sintering), même si des variantes de cette technologie existent (SLM pour Selective Laser Melting notamment).

Le tableau ci-après, présente une comparaison exhaustive des technologies d'impression 3D.

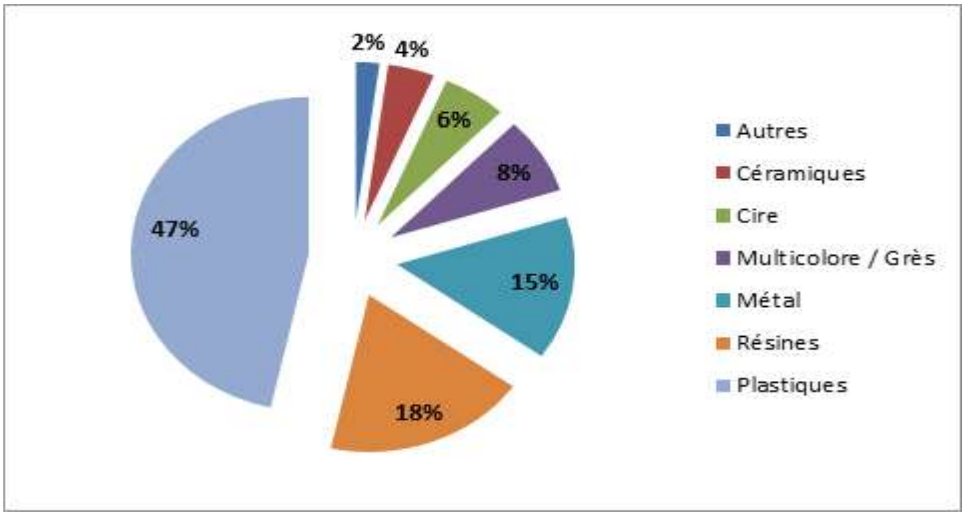
Tableau 1 : Comparaison des Technologies d'Impression 3D

Technologie	Procédé de fabrication	Avantages	Inconvénients	Matériaux
Modelage par dépôt de fil	Extrusion de matériau	Pièces solides.	Mauvaise qualité de finition et lent.	Plastique et Alumide
		Facile à imprimer	Requiert du support	
Frittage par Laser Sélectif	Poudre.	Aucun support requis	Précision limitée à la finesse de la poudre	Plastique et Alumide
	Lit de Fusion	Haute résistance Thermique et Chimique -Très rapide	Surface finie rugueuse	
Fusion Laser Directe de Métal	Poudre	Composants denses	Etape de finition obligatoire	Métal ou cuivre
	Lit de Fusion	Géométries complexes		
Fusion par faisceau d'Electrons	Poudre	rapidité d'impression	Etape de finition obligatoire	Métal ou cuivre
	Lit de Fusion	Meilleure précision	Utilisation de rayons X	
Stereolithographie	Photo-polymérisation	Géométries complexes	Etape de finition obligatoire	Résine
		Bonne précision	Nécessite du support	
continuons Liquide Interface Production	Photo-polymérisation	Impression simultanée de plusieurs objets	Limite d'épaisseur	Résine
		Formes et tailles complexes	Choix élargi de résines simulant différentes propriétés	
		Haute précision		
Traitement par lumière numérique	Photo-polymérisation	Impression simultanée de plusieurs objets	Limite d'épaisseur	Résine
		Formes et tailles complexes	Gamme limitée de matériaux	

		Haute précision		
Multi jet et Poly jet	Projection de matériau	Haute précision	Procédé de fabrication lent	Résine / Multicolore
		Bon aspect final		
		Nombreux matériaux et couleurs possibles		
Projection de Liant	Projection	Prix réduit	Matériaux limités	Multicolore
		une impression en couleurs	Objets fragiles	
		Rapide		
Laminage par dépôt sélectif	Laminage de feuilles	Prix faible	Manque de précision	Multicolore
		Pas de matériaux toxiques	Pièces non homogènes	
		Fabrication rapide de grandes pièces		

Selon l'enquête réalisée par Scuplteo au premier semestre de l'année 2017 auprès des utilisateurs de l'impression 3D, la technologie par dépôt de filament fondu (FDM) est la première méthode pratiquée dans le monde avec 36%. Suivies des technologies Stereolithography (SLA) et Sélective Laser Sintering (SLS) avec 34% et 25% respectivement. Cela dénote en effet, à un développement significatif de l'impression 3D du métal aux cours de ces dernières années en raison de ses excellentes caractéristiques mécaniques. Toutefois, le plastique demeure encore la première matière utilisée par les utilisateurs de la fabrication additive avec 47%. La résine arrive en deuxième position avec 18% et la part de métal est de 15%.

Figure 1 : Les matériaux utilisés pour l'impression 3D



Source : Enquête Sculpteo 2017

II.1.4- Les avantage de l'impression 3D :

En plus de l'avantage de cette technologie dans le prototypage 3D, elle est de plus en plus utilisée pour créer des produits finis. Les raisons d'utilisations sont multiples, à savoir :

II.1.4.1- La rapidité :

L'impression 3D permet d'éviter la création de moules d'injection de plastiques ou de moules pour pièces en métal, particulièrement couteuse et longue (4 à 6 semaines), il est évidemment plus facile et rapide de produire un fichier 3D qu'un moule.

II.1.4.2- La maîtrise des coûts :

Avec l'impression 3D la perte des matériaux est beaucoup moins importante que dans les techniques traditionnelles dites soustractives. A titre d'exemple, la perte de matière dans la fonderie métallique est de l'ordre de 50% alors qu'elle est nulle via les techniques d'impression 3D d'un métal par fusion laser.

II.1.4.3- La personnalisation :

Il est aisé de personnaliser un produit en modifiant le fichier 3D, alors qu'avec un moule toute personnalisation du produit est impossible à moins de produire un nouveau moule. La notion de Mass customisation (ou customisation de masse) est au cœur de la réflexion des projets de l'impression 3D.

II.1.4.4- La précision avec la qualité de la haute résolution :

Une impression 3D haute résolution est désormais possible grâce aux techniques de laser. La précision est de l'ordre du micro dans l'impression 3D par fusion laser. Ces performances permettent de produire des objets à haute valeur ajoutée et avec une grande résolution.

II.1.4.5- La Gestion du stock :

Dans les industries de pointe initiatrices de l'impression 3D, la notion de « Spare part on demand », ou pièces détachées à la demande, est d'une importance capitale. Plusieurs raisons à cela : limiter la dépendance à son fournisseur ; donner vie à des pièces qui ne sont plus sourçables ; éviter les rayonnages de pièces, encombrants et couteux. L'impression 3D est là aussi une réponse adaptée pour obtenir des pièces imprimées pas chères et rapidement.

II.1.4.6- La relocalisation :

L'impression 3D permet aujourd'hui de produire des milliers de pièces avec une nationalité économique à la demande. Cela n'était pas le cas il y encore quelques années.

C'est clairement une opportunité pour les entreprises des pays industrialisés pour rapatrier des projets qui ont parti auparavant vers les ateliers du monde comme la Chine ou l'Inde. En outre, les pays émergents comme le nôtre peuvent en bénéficier pour produire les pièces de rechange des machines industrielles.

II.1.5- Normalisation :

Malgré l'évolution remarquable enregistrée par la fabrication additive depuis 2008, la normalisation en la matière n'a pas suivi le même rythme de développement, ce qui représente un frein pour une intégration plus forte de cette technologie dans la chaine de valeur industrielle. En effet, les normes sont importantes car elles fournissent des exigences, des spécifications et des lignes directrices ou des caractéristiques pour que les matériaux, les produits, les procédés de transformations et les services soient adaptées aux besoins. De plus, les normes contribuent à éliminer les obstacles techniques au commerce, permettent l'accès à de nouveaux marchés et à la croissance économique. Elles facilitent également le transfert de technologie.

A cet effet, les organismes de réglementation actifs dans le domaine ASTM, ISO et CEN CENELEC ont constitué des comités techniques pour consolidation et appropriation des réglementations de la fabrication additive. En 2016, les trois organismes de normalisation ont signé un accord de collaboration pour l'élaboration de normes communes basées sur 3 plans :

•Des normes générales (concepts généraux et exigences communes)

•Des normes de catégories (exigences spécifiques propres aux différentes catégories de processus ou matériaux)

•Des normes spécialisées (exigences relatives à un matériau, à un procédé ou à une application spécifique) qui contribuent à assurer la sécurité des produits

Jusqu'à présent, les comités techniques constitués sont parvenu à publier 7 normes portant sur les principes généraux de la fabrication additive. Ces comités œuvrent, actuellement, sur 12 projets de normes concernant notamment les matières premières, les processus du contrôle non destructif et les directives de conception.

Ci-dessous la liste des normes publiées :

Tableau 2 : Liste des normes publiées en matière d'impression 3D

Technologie	Procédé de fabrication
ISO 17296-2:2015	Fabrication additive -- Principes généraux -- Partie 2: Vue d'ensemble des catégories de procédés et des matières premières
ISO 17296-3:2014	Fabrication additive -- Principes généraux -- Partie 3: Principales caractéristiques et méthodes d'essai correspondantes
ISO 17296-4:2014	Fabrication additive -- Principes généraux -- Partie 4: Vue d'ensemble des échanges de données
ISO/ASTM 52900:2015	Fabrication additive -- Principes généraux -- Terminologie
ISO/ASTM 52901:2017	Fabrication additive -- Principes généraux -- Exigences pour l'achat de pièces
ISO/ASTM 52915:2016	Spécification normalisée pour le format de fichier pour la fabrication additive (AMF) Version 1.2
ISO/ASTM 52921:2013	Terminologie normalisée pour la fabrication additive -- Systèmes de coordonnées et méthodes d'essai

II.1.6- Les champs d'application de l'impression 3D:

Les applications de la fabrication additive couvrent à présent de nombreux secteurs d'activité allant de la formation jusqu'à la production industrielle, et embrassent toute la chaîne de

valeur du prototypage jusqu'au service après-vente. On cite, dans ce qui suit, les principaux domaines d'application de la fabrication additive dans

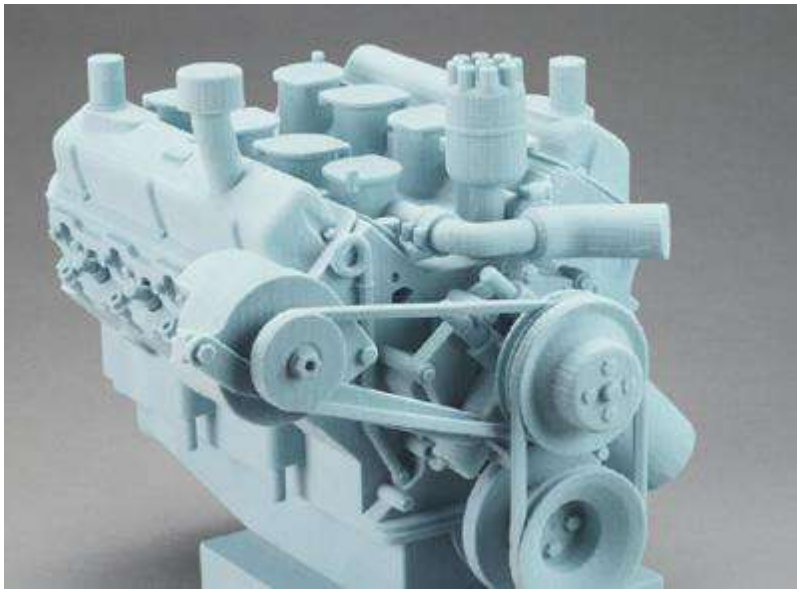
II.1.6.1- L'AÉRONAUTIQUE ET L'AÉROSPATIALE



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.

II.1.6.2- 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 chaine 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.

II.1.6.3- LE MÉDICAL

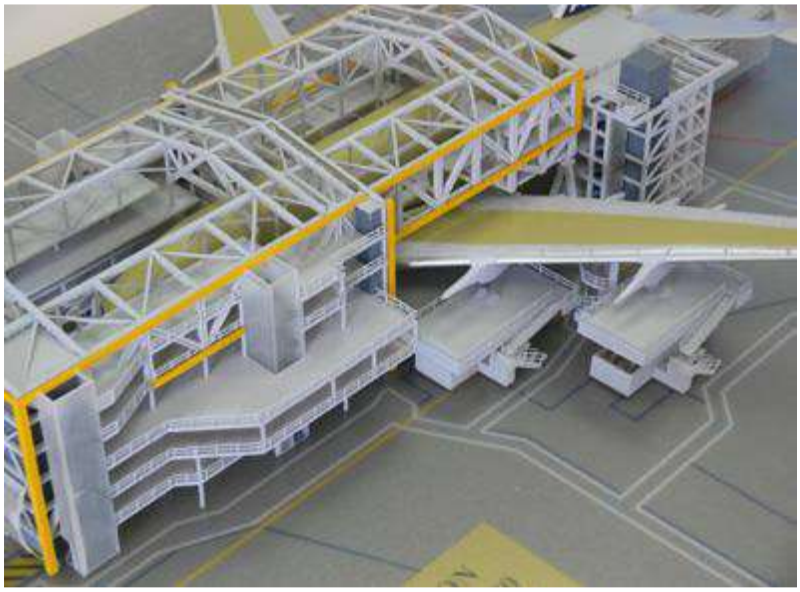


On considère le secteur médical comme l'un des adeptes phares de l'impression 3D, qui offre à cette technologie un énorme potentiel de croissance en raison des options de personnalisation et de l'amélioration de la vie des gens au fur et à mesure que ces procédés sont actualisés et que les matériaux 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.

II.1.6.4- 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 nécessitant souvent des détails très précis imprimées en 3D et sont également plus résistantes que les modèles traditionnels.

II.1.6.5- LES ACCESSOIRES

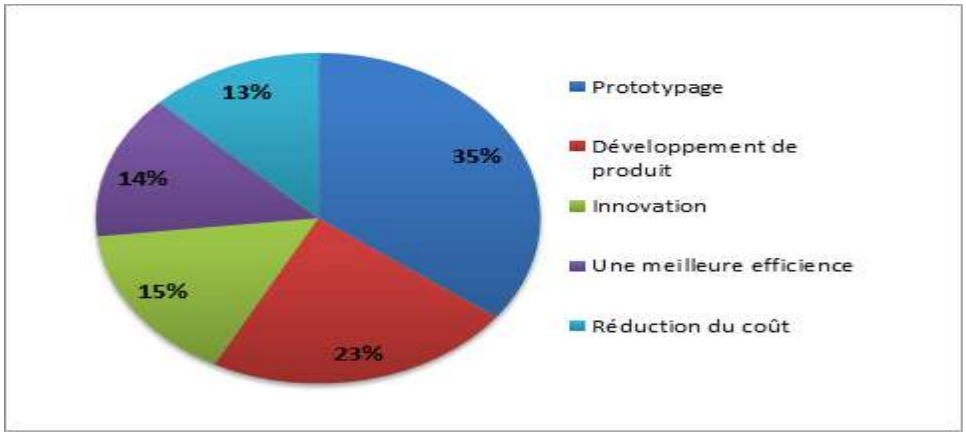


Outre ses applications dans le domaine industriel, l'impression 3D s'adresse plus directement aux consommateurs via la fabrication d'accessoires personnalisés. Les impressions les plus courantes concernent généralement des objets décoratifs comme des vases mais aussi des accessoires tels que des presse-agrumes,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

II.1.7- Impression 3D / Procédés traditionnel :

Le prototypage (35%), le développement de produit (23%) et l'innovation (15%) sont les trois raisons les plus courantes pour lesquelles les entreprises poursuivent l'impression en 3D.
En fait, pour la grande série et les applications standards, les procédés traditionnels sont incontournables.

Figure 2 : les principales raisons d'utilisation de l'impression 3D



L'impression 3D peut accélérer le développement et la livraison des produits personnalisés et apporter une flexibilité accrue grâce à une meilleure gestion des stocks et à une fabrication en temps réel des produits ayant une demande variable.
D'autres avantages sont offerts par l'impression 3D, à savoir : les avantages liés à la fabrication de petits lots, et les avantages de coûts basés sur l'efficacité de certaines applications et une flexibilité sans précédent dans de nouveaux marchés.
L'impression 3D peut également améliorer la qualité grâce à des pièces plus légères, une meilleure ergonomie et plus de liberté dans la phase de conception. Toutefois, l'instabilité du processus peut affecter négativement la qualité ainsi que la faible reproductibilité peut ainsi altérer la durabilité du produit.
Elle a remplacé quelques techniques de fabrication traditionnelles, telles que l'extrusion de métal et les techniques de modélisation manuelle pour la fabrication de prototypes. Néanmoins, cette technologie demeure un nouveau moyen de production, supplémentaire et complémentaire, qui ne remplacera pas totalement les centres d'usinage à commande numérique et les retouches de finition aux interfaces restant toujours nécessaires. De ce fait, il est primordial de déterminer les besoins et les priorités afin de prendre la décision entre l'impression 3D et les procédés de fabrication traditionnelle.
Le tableau ci-dessous présente une comparaison entre l'impression 3D et les techniques de fabrication traditionnelles (usinage, moulage, etc.) :

Tableau 3 : Comparatif entre l'impression 3D et techniques de fabrication traditionnelles

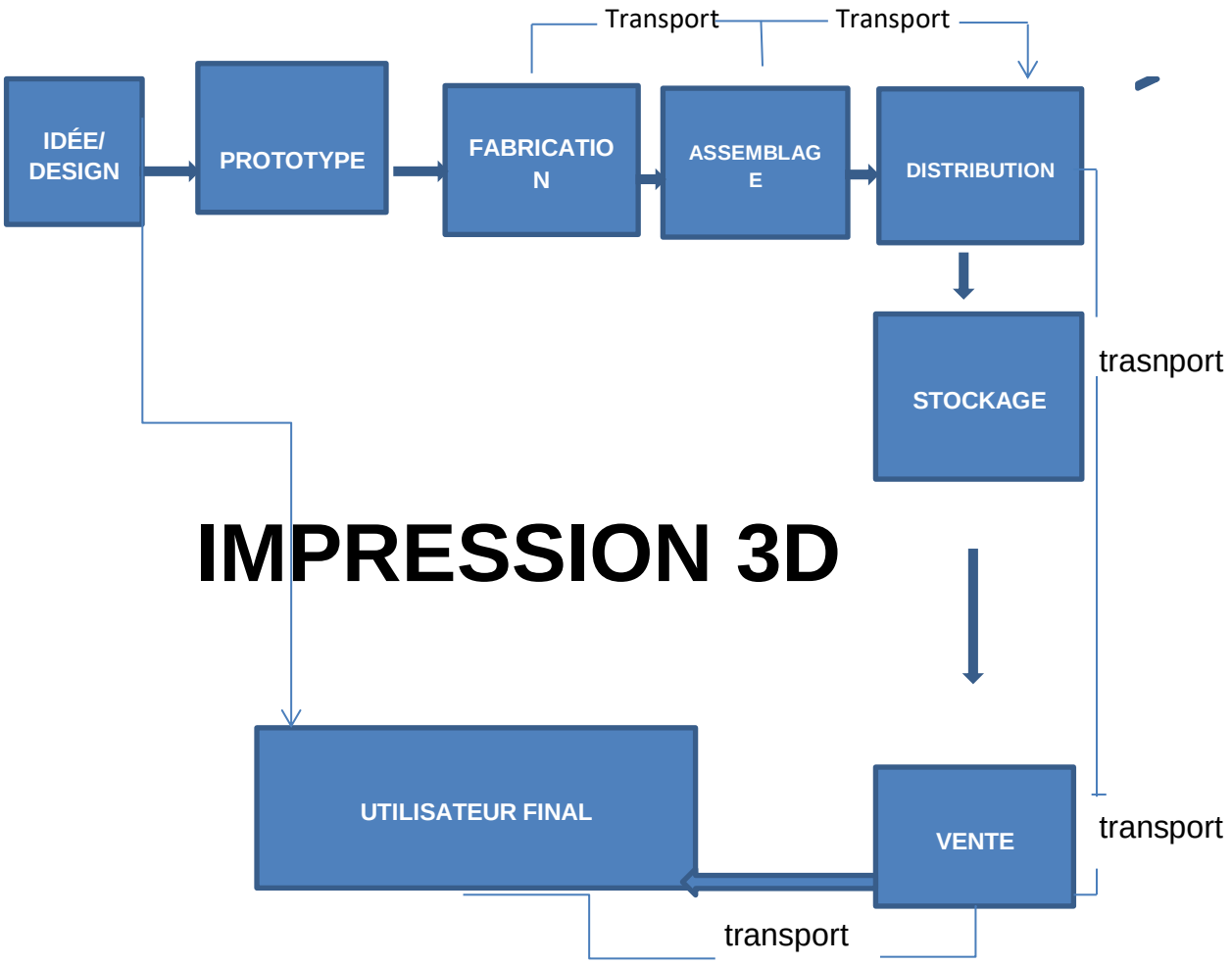
Procédé	**Volume**	**Coût par unité**	**Délai de livraison**	**Coût de la complexité**
Fabrication additive	Petite série, Hautement personnalisée	Coût variable très élevé, Pas de coût fixe	Très court (<= 1 jour)	Pas plus élevé que les pièces simples
Fabrication traditionnelle	Grande série, Standard (non personnalisée	Coût variable bas, Coût fixe très élevé	Très lent à modérément lent	Plus élevé que les pièces simples

II.2- IMPACT DE L'IMPRESSION 3D SUR LA CHAINE DE PRODUCTION :



La fabrication additive a un impact positif sur les chaînes d'approvisionnement d'une organisation. En effet, elle permet de réduire les délais ainsi que les coûts de fabrication des pièces et d'inventaire.

Par exemple, dans des situations où de longs délais sont pénalisants pour les entreprises, l'impression 3D permet de répondre à la demande en temps réel. Cela leur permet également de limiter les investissements relatifs au transport, au stockage et aux inventaires, puisqu'en fabriquant à la demande, on évite de produire en grande quantité et de stocker



A noter que ces machines offrent l'avantage d'être multi-usagers, capables de réaliser des pièces de moteur comme des prothèses médicales. Ainsi, par leur polyvalence, elles permettent de réduire considérablement les coûts d'investissements liés à la fabrication, contrairement aux chaines de production actuelles, où chaque machine a un rôle précis et chaque changement suppose l'acquisition de nouveaux équipements très couteux.

De plus, l'impression 3D permet de diminuer le coût du matériel de montage étant donné que les objets fabriqués nécessitent moins d'assemblage.

Pour autant, l'impression 3D n'est pas encore en phase de remplacer l'ensemble du parc industriel. La technologie en est à ses débuts et, pour le moment, elle s'adapte mal au passage à l'échelle.

II.3- Analyse SWOT :

La fabrication additive se distingue par sa rapidité, la possibilité de fabriquer plus aisément des pièces comportant des canaux internes, le recours à des structures attiques permettant l'allègement des pièces ou une fabrication multi-matériaux. Elle permet également de diminuer les assemblages et de faciliter la personnalisation. Cependant, il existe quelques obstacles qui freinent le déploiement de cette technologie, notamment dans la production en masse. Ci-dessous une analyse SWOT exposant les forces et faiblesses de cette technologie mais aussi les opportunités et menaces y afférente.

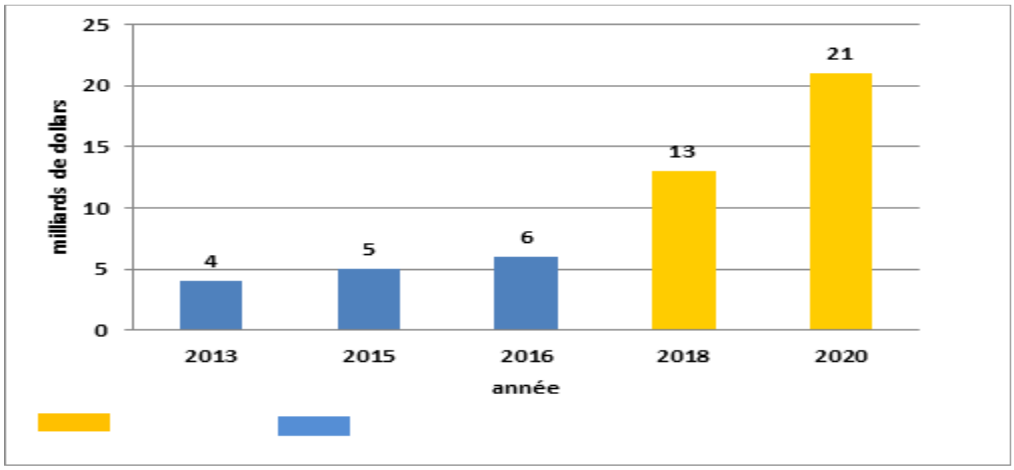
II.4- Le marché mondial pour l'impression 3D :

II.4.1- Situation de marché :

Le marché mondial de l'impression 3D est en pleine croissance depuis quelques années. En effet, le marché global de cette technologie est passé de 4 milliards de dollars en 2013 à 6 milliards de dollars en 2016, soit un taux de croissance annuel moyen de 14%.

Les prévisions estiment que l'industrie mondiale de l'impression 3D atteindra les 13 milliards de dollars en 2018 et dépassera les 21 milliards de dollars d'ici 2020. Cette croissance est due essentiellement à l'évolution du marché primaire à savoir les systèmes d'impression 3D, les matériaux, les fournitures et les services. Celui–ci a augmenté d'au moins 30% par an de 2012 à 2014.

Figure 3 : Evolution du marché mondial

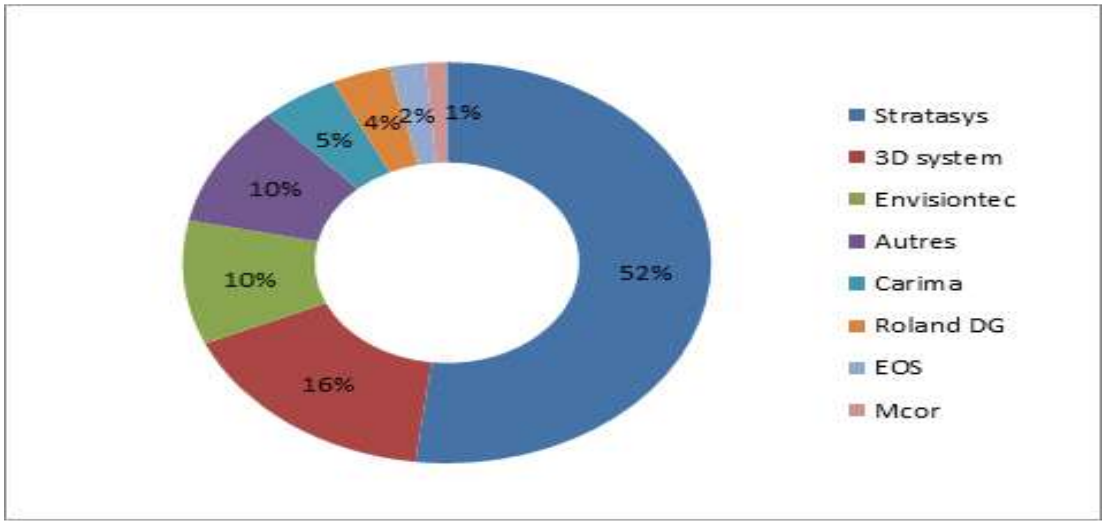


Source : rapport de Wohlers (2017)

Bien que le nombre des acteurs de l'impression 3D soient nombreux, seules quelques entreprises détiennent la grande partie du marché. Selon l'enquête menée par le cabinet E&Y, les entreprises Statasses, 3D Systèmes et EOS représentaient environ 70% des parts de marché de fabrication en 2015. De même, le marché des fournisseurs de services est dominé par les deux acteurs suivants: Matérialise et Proto L'abs avec 68%.

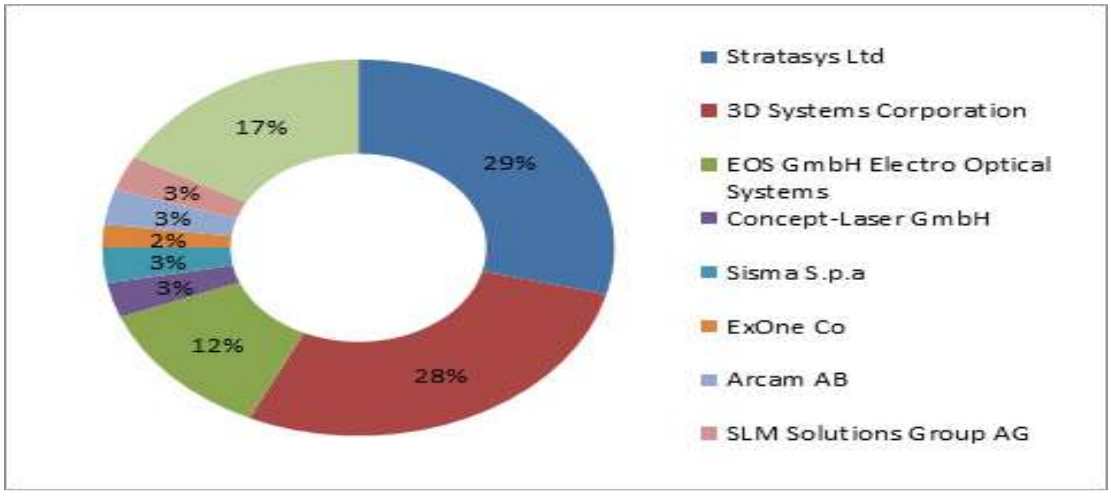
La même étude a montré également que les fabricants des systèmes représentaient environ 55% du marché total de la fabrication additive, alors que les fournisseurs de services représentaient environ 25%.

Figure 4 : Part de marché des fabricants de systèmes



Source : Ernst & Young (2016)

Figure 5 : Part de marché des fournisseurs de services



Source : Ernst & Young (2016)

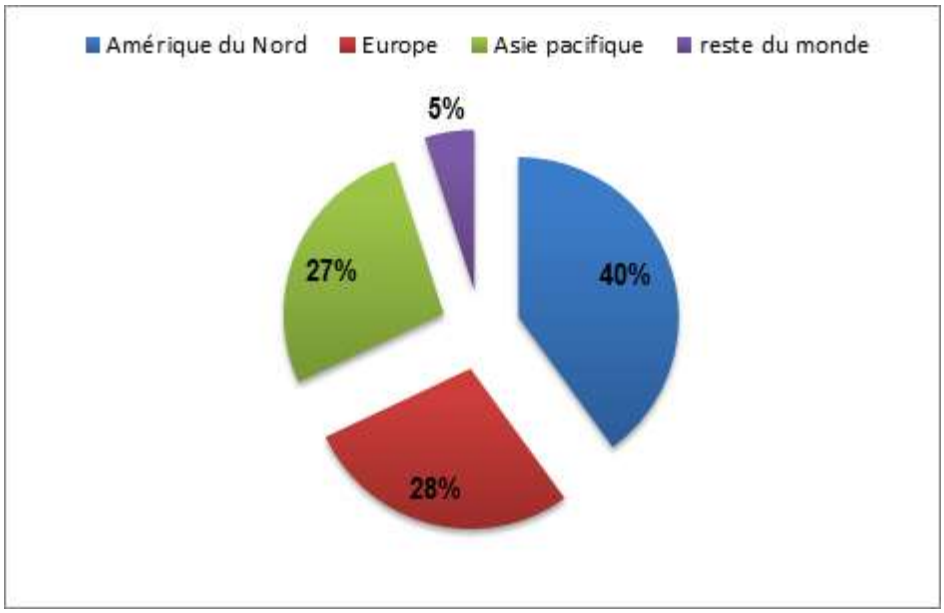
De plus en plus, les entreprises misent sur cette technologie, qui ne cesse de progresser. A titre d'exemple, General Electric a investi 50 millions de dollars en 2012 dans un centre d'impression 3D dédié à la fabrication d'injecteurs de carburant pour les moteurs Leap, développés par CFM International. Cet investissement est justifié car ces pièces sont complexes et leur réalisation par les techniques conventionnelles est couteuse.

Une autre filière du groupe Safran, Turbomeca, a également annoncé en 2013 avoir équipé son usine située à Bordes (Pyrénées-Atlantiques) d'une imprimante 3D. Pour le moment, les pièces fabriquées dans cette unité ne sont pas les plus critiques du moteur. Elles font partie des éléments fixes de celui-ci. L'avantage tiré de ces machines pour le moment est de réaliser des pièces en petite série et d'accélérer le passage du prototypage rapide à l'industrialisation du produit.

II.4.2- Répartition géographique:

L'Amérique du Nord et l'Europe représentent plus de deux tiers, soit 68% du Chiffre d'affaires mondial du marché de l'impression 3D, suivi par l'Asie pacifique avec 27%.

Figure 6 : Répartition des recettes du marché de l'impression 3D par région



Source : rapport de Wohlers (2017)

Le plus grand marché est représenté par les Etats-Unis, car les leaders historiques du secteur des imprimantes 3D y sont implantés, à l'instar de 3D Systèmes et Stratasys. Le pays a surtout misé sur les équipements permettant de travailler les thermoplastiques à l'inverse de l'Europe et spécifiquement l'Allemagne, où l'intérêt est porté surtout sur l'impression 3D métal.

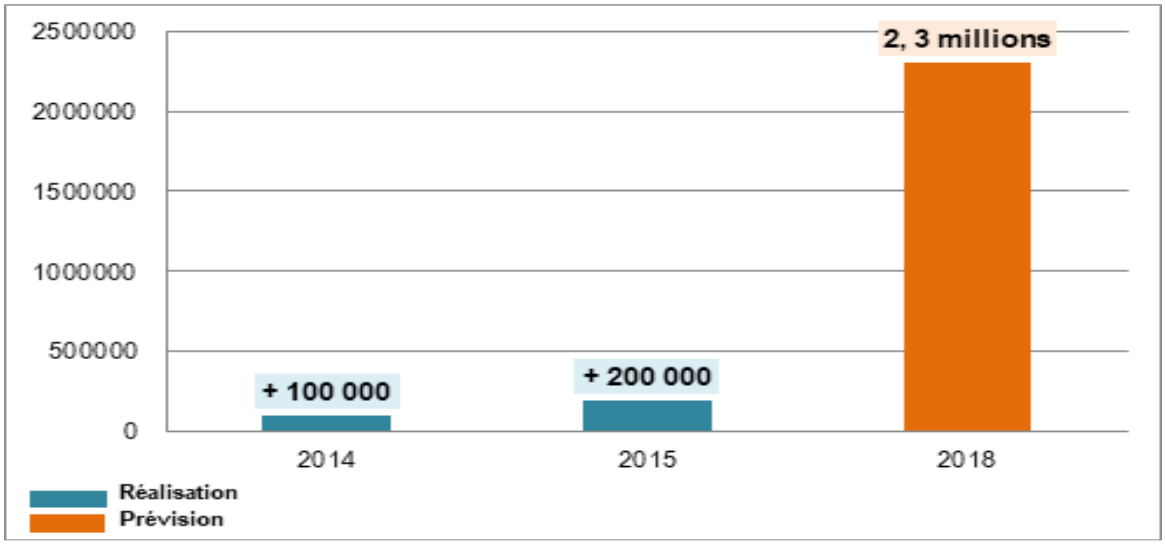
L'Allemagne vient en tête des pays européens et se positionne pour l'impression métallique grâce à la présence dans le pays de cinq des plus gros fabricants d'imprimantes métal (EOS, SLM, Concept Laser, Realizer et Trumpf). Par ailleurs, l'Allemagne a des grandes capacités à fabriquer des machines-outils de pointe pour l'impression 3D, à destination de secteurs importants comme l'automobile. Le pays n'a jamais caché ses ambitions de constructeur dans la fabrication additive et exporte déjà ses technologies à l'étranger.

Quant à la France, elle est en retard dans le secteur de l'impression 3D et les investissements dans cette technologie sont moindres. Mais l'approche a été différente et s'est effectuée de façon horizontale : Les imprimantes 3D viennent, généralement, en complément des machines traditionnelles dans les ateliers de production. On n'y rencontre pas ou peu d'usines dédiées exclusivement à l'impression 3D comme aux USA

En général, les pays qui utilisent au plus cette technologie sont ceux qui ont une forte culture industrielle et qui trouvent dans la fabrication additive un nouveau moyen de production rapide et à des coûts moins élevés. Ceci est incarné par la prédominance des pays de l'Amérique du nord et les pays de l'Europe de l'Ouest avec plus de 60% sur le marché mondial des imprimantes 3D.

En 2015, les ventes des imprimantes 3D ont dépassé les 200 000 unités et les estimations prévoient que celles-ci atteindront les 2,3 millions en 2018. Il est à noter que la technologie à dépôt de filament est la moins chère (cout inf. à 500 dollars) et la plus répandue. Elle représente 80 % des ventes.

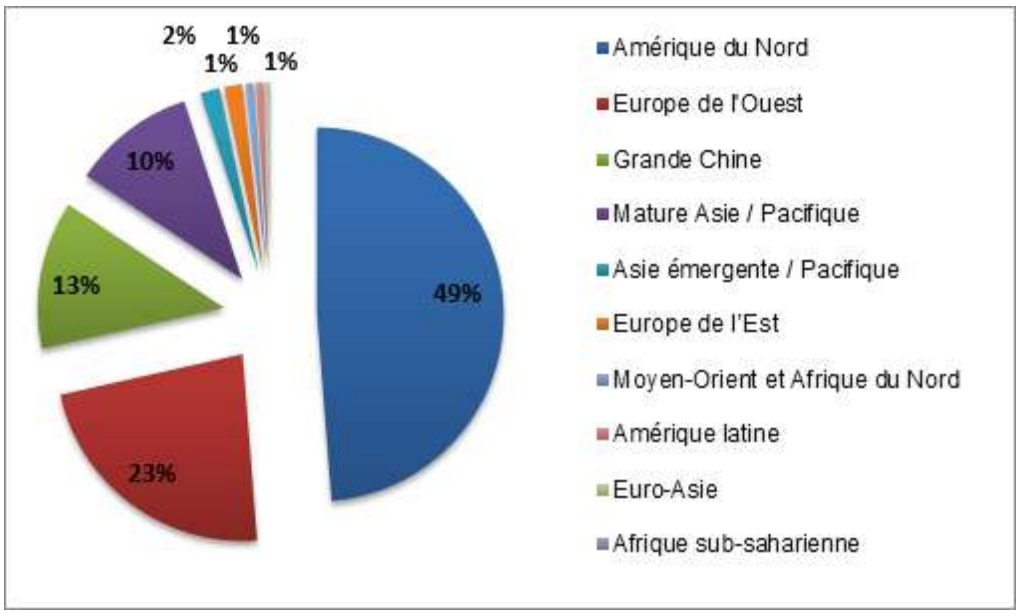
Figure 7 : Evolution de ventes mondiales des imprimantes 3D



Source : rapport de Wohlers (2015)

Le graphique ci-dessous montre que les pays de l'Amérique du nord et de l'Europe de l'Ouest accaparent la part du lion en termes de ventes d'imprimantes 3D avec plus de 65%. Suivis par la Chine et les pays de l'Asie pacifique avec 15% et 13% respectivement.

Figure 8 : Répartition de ventes des imprimantes 3D par les grandes régions (moyenne entre 2012-2015)



Source : rapport de Wohlers (2015)

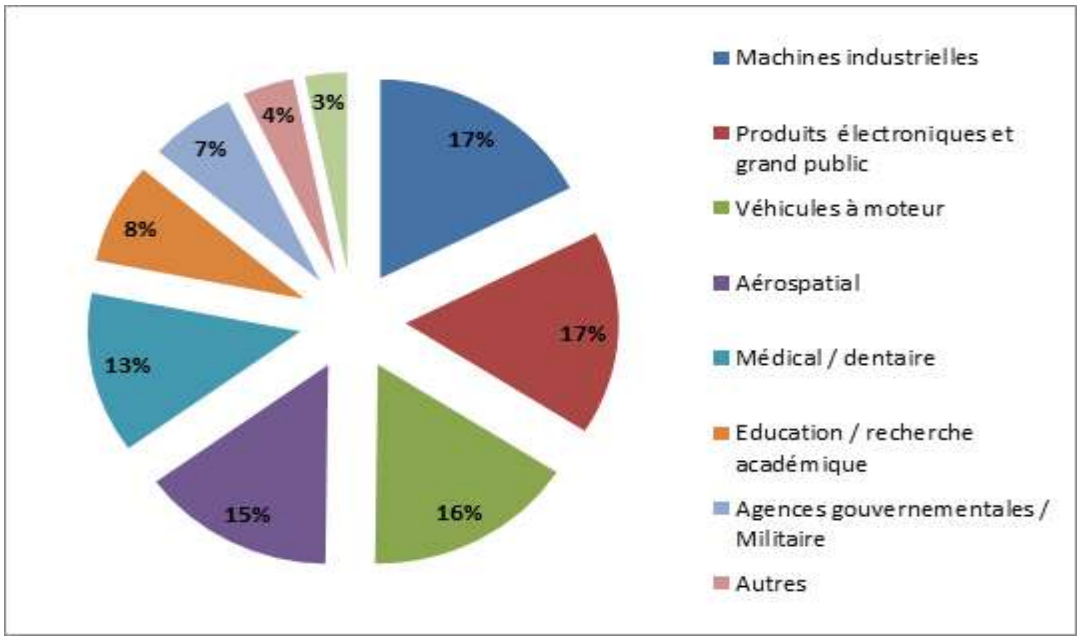
II.4.3- Les secteur utilisateur :

Malgré la croissance significative, il existe encore un potentiel inexploité dans l'impression 3D. En fait, l'impression 3D ne représente que 0,04% du marché industriel mondial dont le prototypage demeure le principal usage. Les experts estiment que cette technologie va éventuellement s'emparer de 5% de la capacité du marché de la fabrication. La plus grande opportunité réside dans la production de pièces. Celle-ci a connu une forte progression, passant d'une valeur presque nulle en 2003 à 43% des recettes du marché global en 2014.

Comme on l'a signalé précédemment, la fabrication additive couvre actuellement la plupart des secteurs d'activité, notamment l'industrie de l'automobile, l'aéronautique, la médecine, l'architecture et d'autres accessoires.

En 2015, les machines industrielles et le secteur électronique grand public sont devenus les premiers débouchés des technologies de fabrication additive avec 17%. La troisième plus grande demande concerne le marché de l'automobile (16%) où les techniques de la fabrication additive ont été principalement utilisées pour la modélisation des véhicules et des pièces. Quant à l'industrie des appareils médicaux, elle occupe la quatrième place avec 13% du marché.

Figure 9 : Secteurs d'application (part en % de l'ensemble du marché à destination des professionnels)



Source : rapport de Wohlers (2017)

La croissance notable enregistrée par le marché des machines industrielles est le résultat d'une demande accrue pour la réalisation des prototypes des pièces, d'outillages, la fabrication des pièces de rechange et des moules. Il est à noter que la part de ce secteur en termes d'installation des imprimantes 3D s'est améliorée de 4% entre 2013 et 2016 pour se stabiliser à 17%.

De même l'industrie électronique grand public a généré un résultat positif grâce à la conception de nouveaux produits et le prototypage des pièces. En effet, plusieurs entreprises opérantes dans ce secteur sont parvenues grâce à l'impression 3D à réduire le temps de validation de la conception, qui est passé d'une semaine à un seul jour et va améliorer de façon significative l'ajustement et la finition. D'autres entreprises qui fabriquent les accessoires informatiques ont vu un retour sur leur investissement initial en impression 3D en seulement huit mois. La prochaine grande opportunité d'impression 3D dans l'industrie de l'électronique réside dans la fabrication de Smartphone, principal produit vendu, avec environ 35% des ventes totales du secteur.

L'industrie d'automobile a investi tôt dans l'impression 3D. Aujourd'hui, les fabricants des pièces d'automobiles appliquent l'impression 3D principalement pour le prototypage rapide. Ceci est dû, évidement, aux volumes de production, généralement trop élevés pour qu'ils soient réalisés par l'impression 3D. Rendre les pièces moins chères et plus légères dans un délai optimal est souvent le principal objectif de l'industrie automobile.

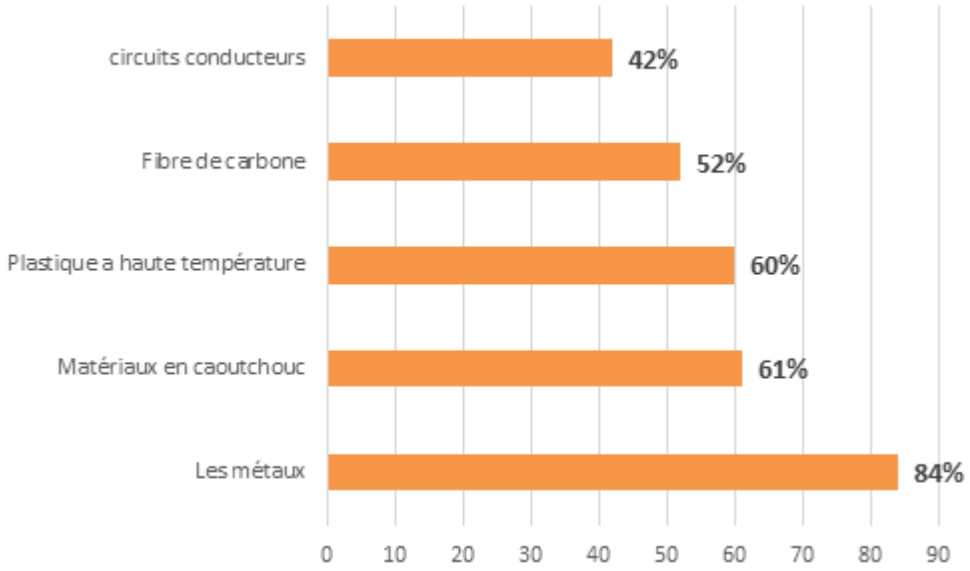
Quant à l'industrie médicale, l'impression 3D est appliquée pour des produits finis personnalisés, tels que les prothèses auditives et les implants. Notons que 98% des prothèses auditives dans le monde sont actuellement fabriquées par l'impression 3D.

II.4.4- Les tendances de la fabrication additive :

L'avenir apparait radieux pour la fabrication additive. Les prévisions estiment que la vitesse moyenne de production de l'imprimante 3D va augmenter de 88% d'ici 2023. À mesure que la vitesse de l'imprimante augmente, les capacités de volume sont susceptibles d'évoluer.

De plus, les nouvelles combinaisons de matériaux d'impression 3D, ainsi que les améliorations apportées aux matériaux existants, permettront non seulement des applications d'impression 3D sans précédentes, mais aussi une réduction importante du coût de revient. Les recherches seront axées, prochainement, sur le développement de l'impression 3D métal afin de répondre au besoin exprimé par les acteurs concernés. En fait, selon l'étude réalisée en
2015 par Stratégies, 84% des interrogés ont déclaré qu'ils aimeraient voir un développement de l'impression 3D avec les métaux contre 60% avec le plastique. Les progrès dans les technologies et les capacités d'impression stimuleront également le développement de nouveaux équipements et applications, à l'instar l'électronique imprimée en 3D

Figure 10 : Les matériaux imprimés en 3D que les interrogés veulent voir dans l'avenir



Source : Enquête de Stratasys (2015)

D'autre part, les récents progrès de cette technologie ont permis l'impression 3D de matériaux biocompatibles, de cellules et de composants de support dans des tissus vivants fonctionnels ; on parle ainsi de la bio impression 3D. Celle-ci est appliquée à la médecine régénérative. Pour l'histoire, la bio impression 3D a été une véritable révolution dans le domaine de la santé depuis le développement, en 1988, de tissus synthétiques en 3D par le Docteur Robert J. Klebe de l'Université du Texas en

utilisant une imprimante inkjet classique. A noter que l'année 2002 a annoncé l'émergence du premier organe grâce à la bio-impression, un rein à échelle réduite.
Comparée à l'impression non biologique, la bio impression 3D implique des complexités supplémentaires, telles que le choix des matériaux, les types de cellules, les facteurs de croissance et de différenciation et des défis techniques liés aux sensibilités des cellules vivantes et à la construction des tissus. Pour répondre à ces complexités, la bio impression intègre les technologies des domaines de l'ingénierie, de la biométéorologie, de la biologie cellulaire, de la physique et de la médecine.
Il est à signaler que la bio impression 3D a été utilisée récemment pour la génération et la transplantation de
plusieurs tissus, y compris la peau multicouche, l'os, les greffes vasculaires, les attelles trachéales, le tissu cardiaque et les structures cartilagineuses.
En réalité, la bio impression a connu un grand essor dans les dernières années et demeure encore prometteuse. De ce fait, les recherches se sont orientées à appuyer ce domaine émergent en raison de multitudes solutions qu'il offre à des cas de santé compliqués ayant restés longtemps, des problèmes difficiles à résoudre.
L'année 2017 a marqué la naissance d'une nouvelle technologie dans le domaine de la fabrication additive nommée « impression 4D ». C'est un processus par lequel un objet imprimé en 3D se transforme en un autre par l'influence de l'apport d'énergie externe comme la chaleur, la lumière ou d'autres stimulants environnementaux.
L'avantage le plus évident de l'impression 4D est que les objets de dimensions trop grandes pour les imprimantes 3D, peuvent être imprimés en une seule partie grâce à cette technique l'objet peut rétrécir (on parle alors de forme secondaire de l'objet) pour s'adapter à l'imprimante 3D puis retrouver sa forme réelle.

Chapitre III

III- Simulation :

III.1- Logiciel SOLIDWORKS :

Le logiciel SolidWorks est une application de conception mécanique qui tire parti de l'interface utilisateur graphique de Microsoft Windows. Grâce à ce logiciel, les concepteurs peuvent esquisser rapidement une idée, expérimenter avec des fonctions et des côtes et produire des modèles et des mises en plan précis.

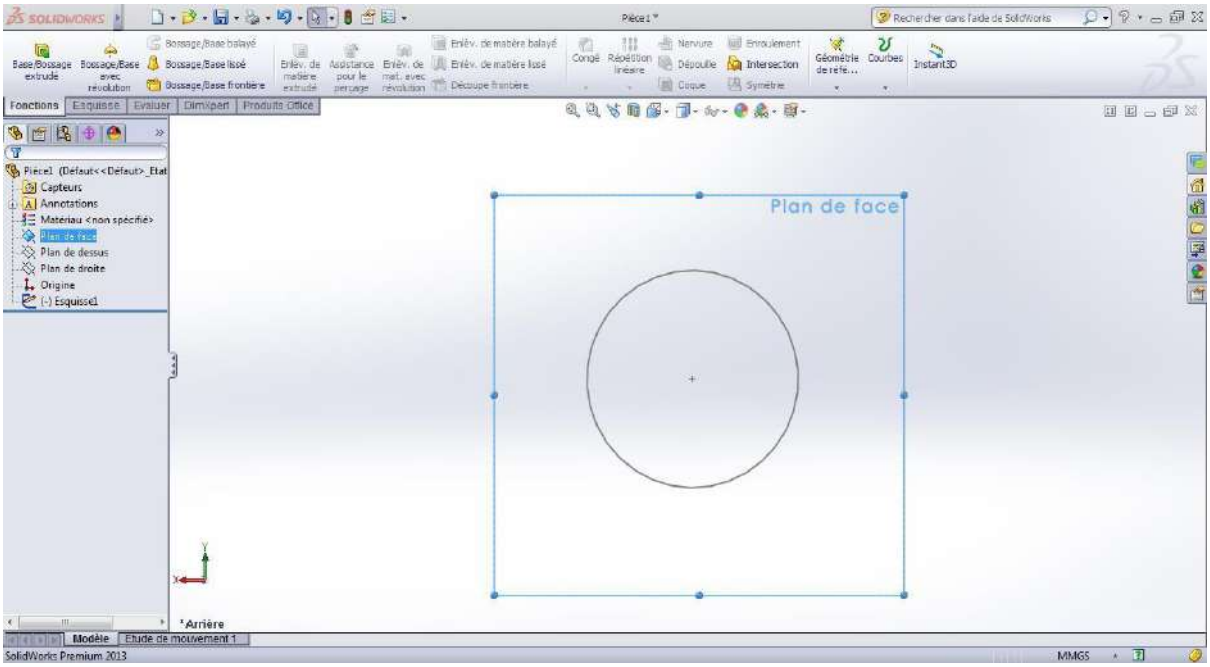
III.2- Pièce choisis :

III.2.1- La forme de pièce générale :



Figure 11 : forme de pièce

III.3- Conception de la pièce sur SolidWorks :



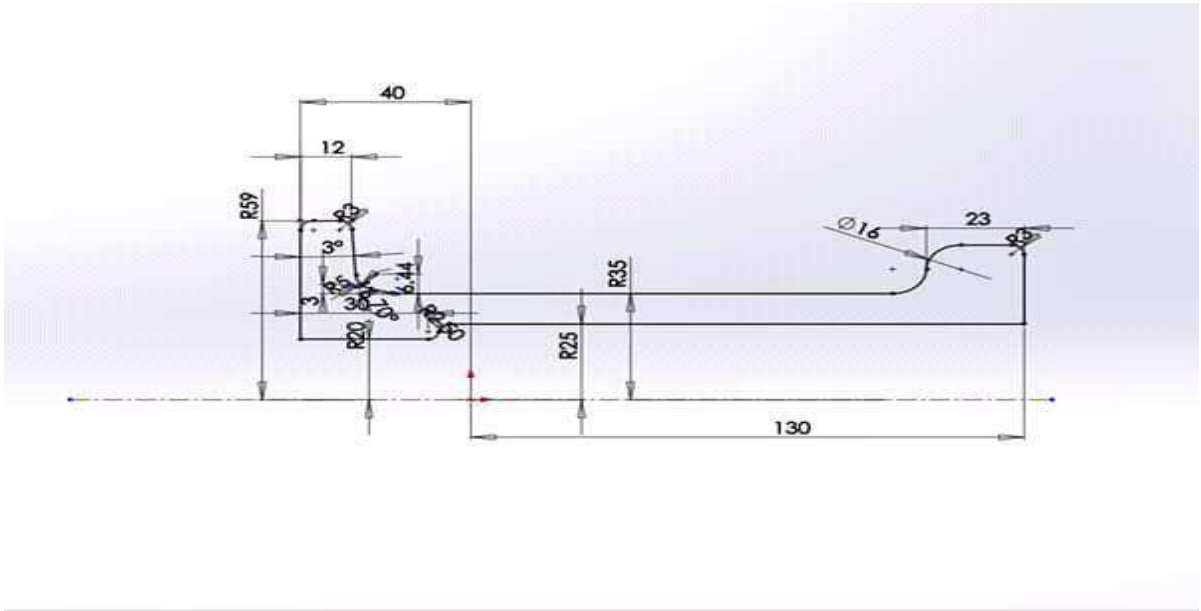


Figure 12 : extrude plane de pièce

III.3.1- Extrude pièce l'usine :

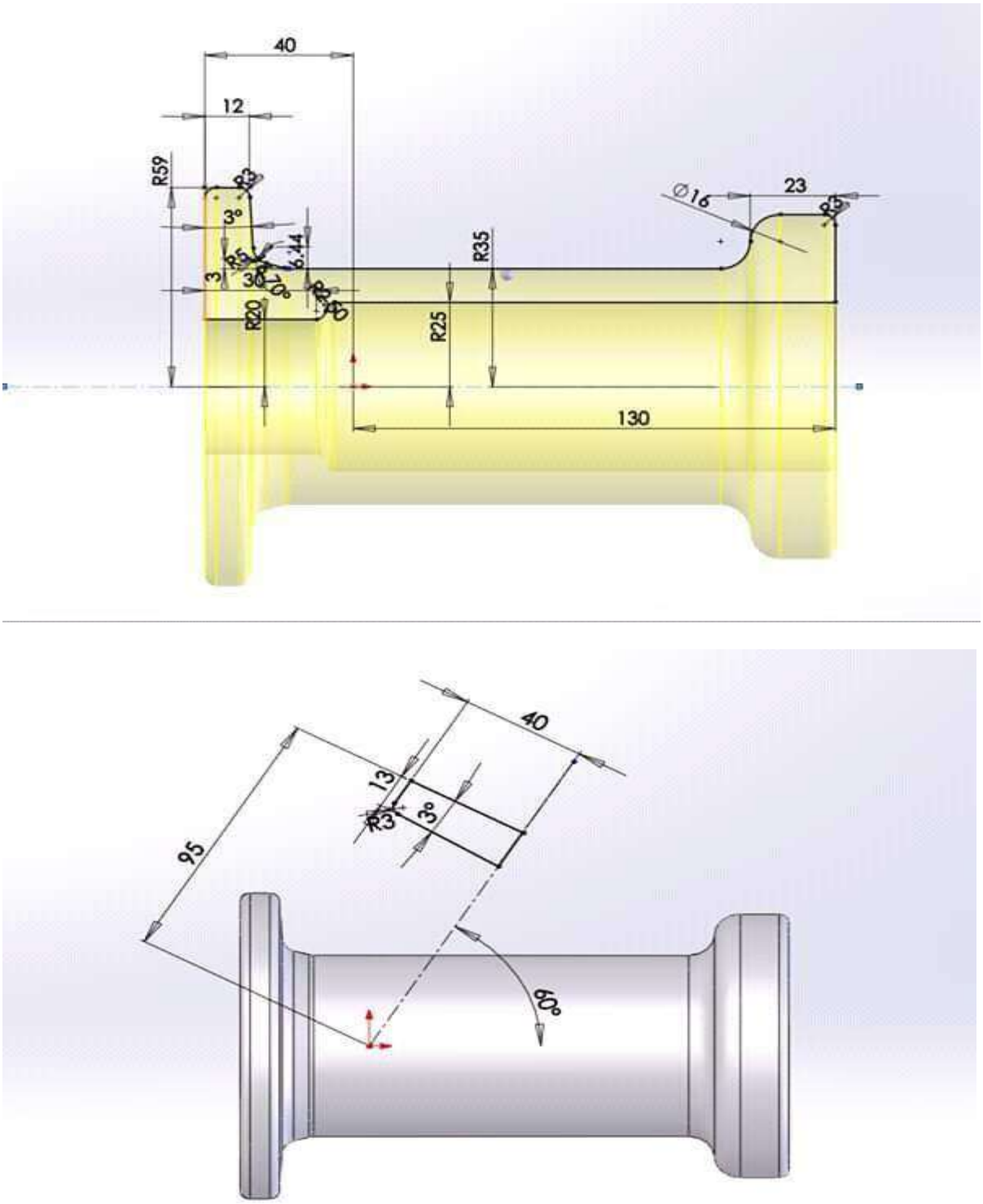
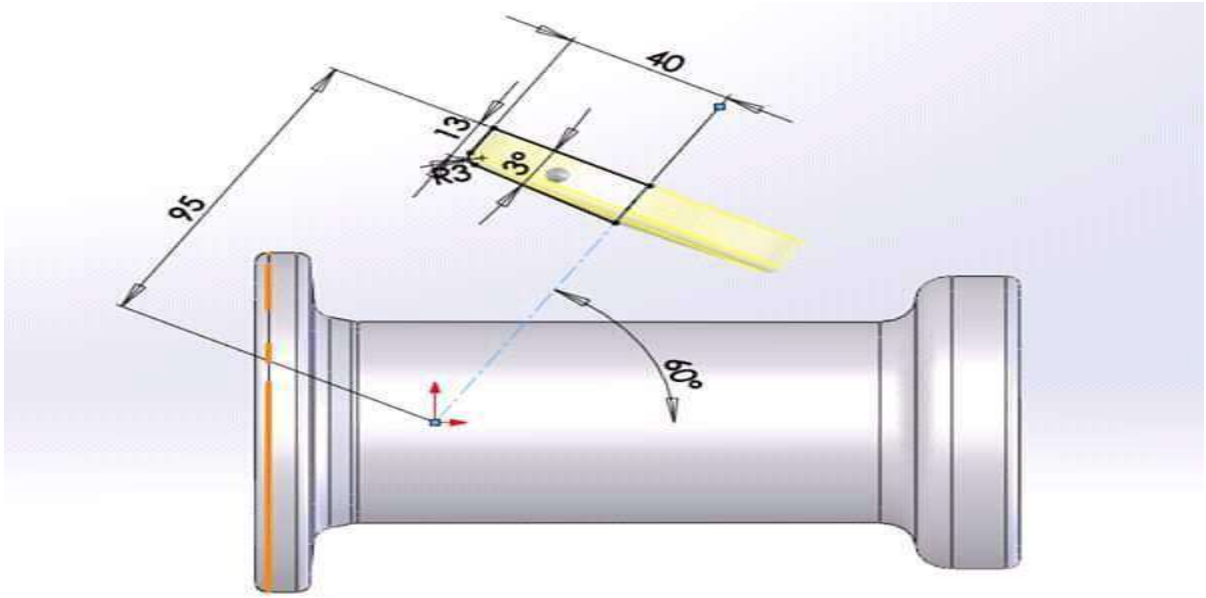
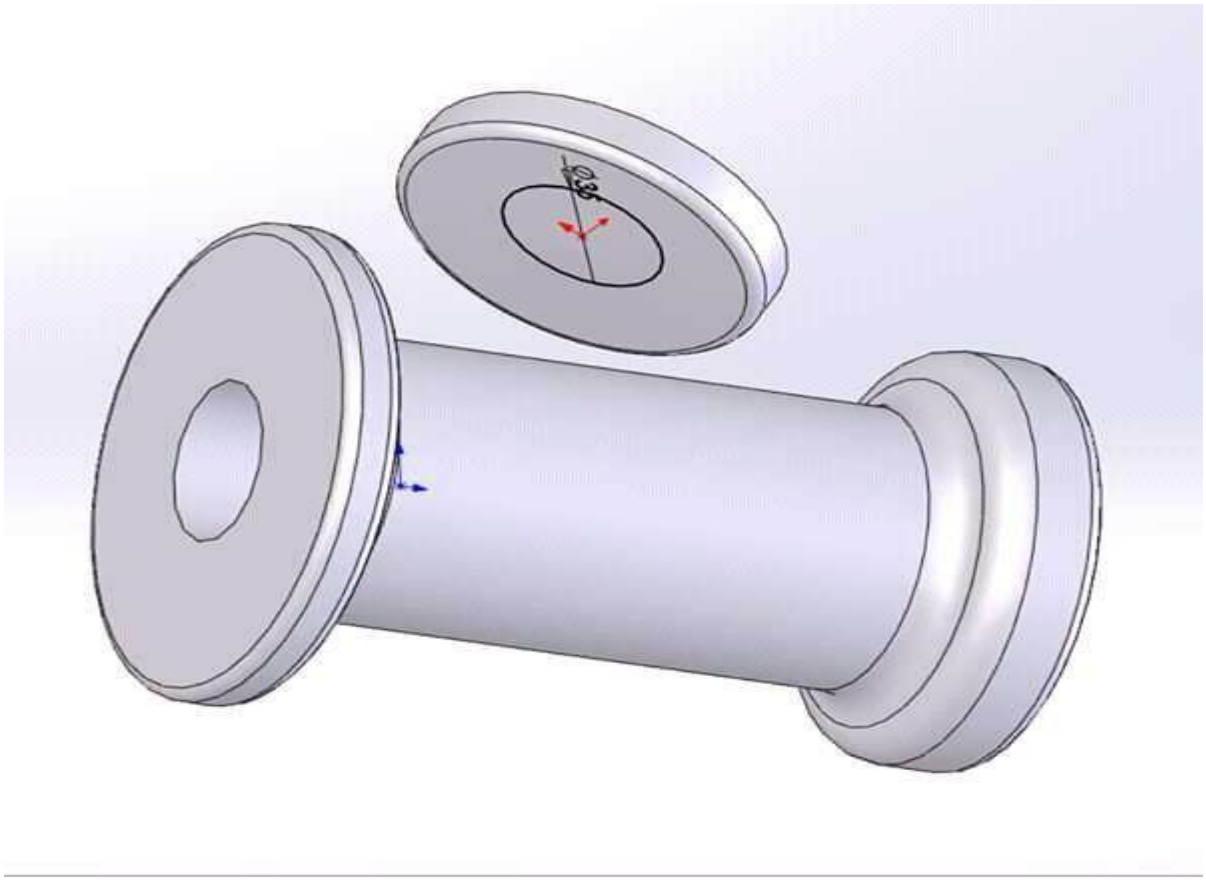


Figure 13 : conception à pièce l'usine


40
13
R3
30
95
60°


Ø35

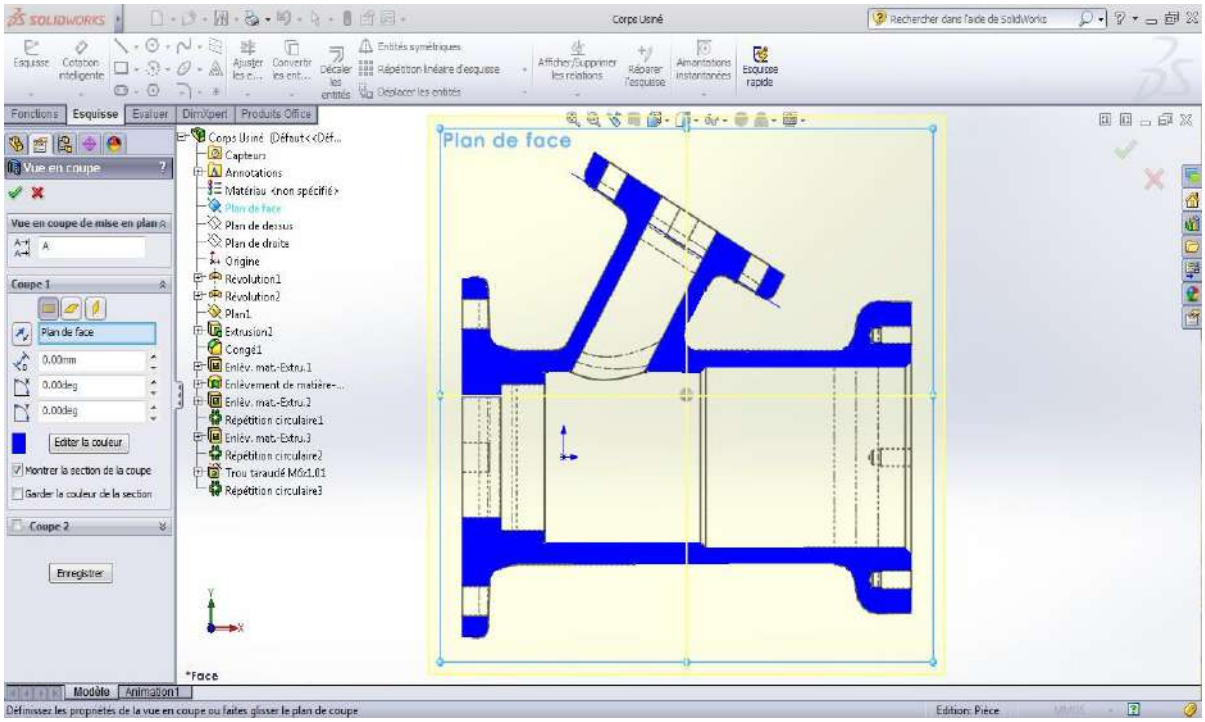
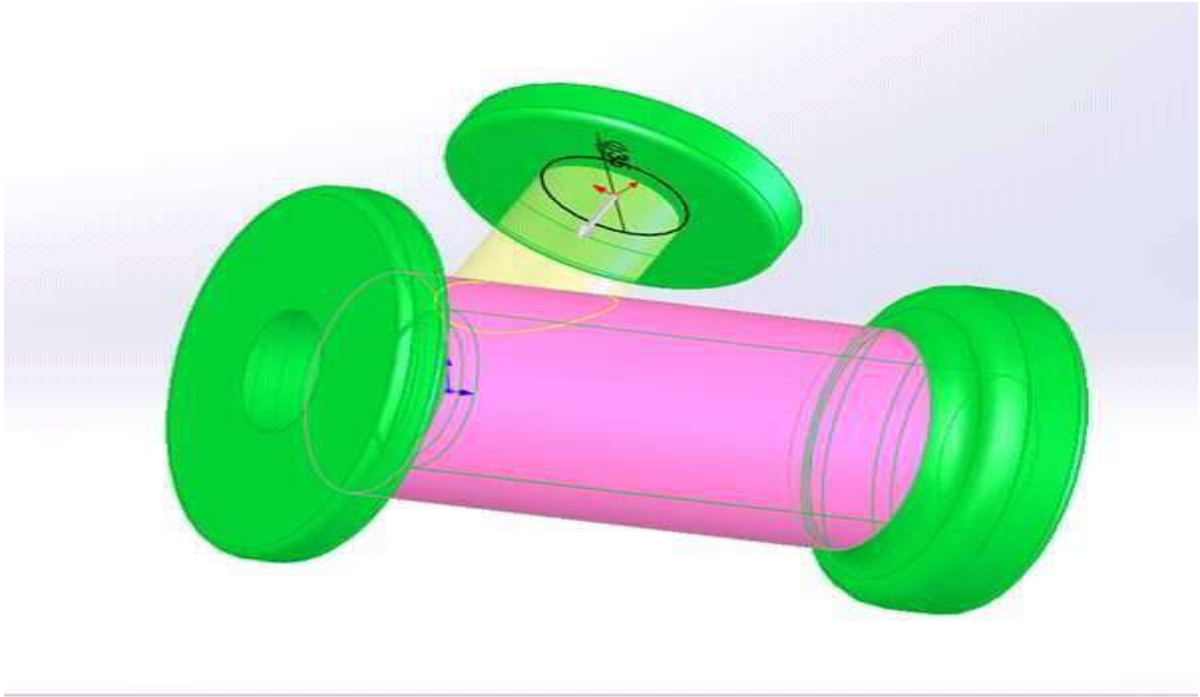
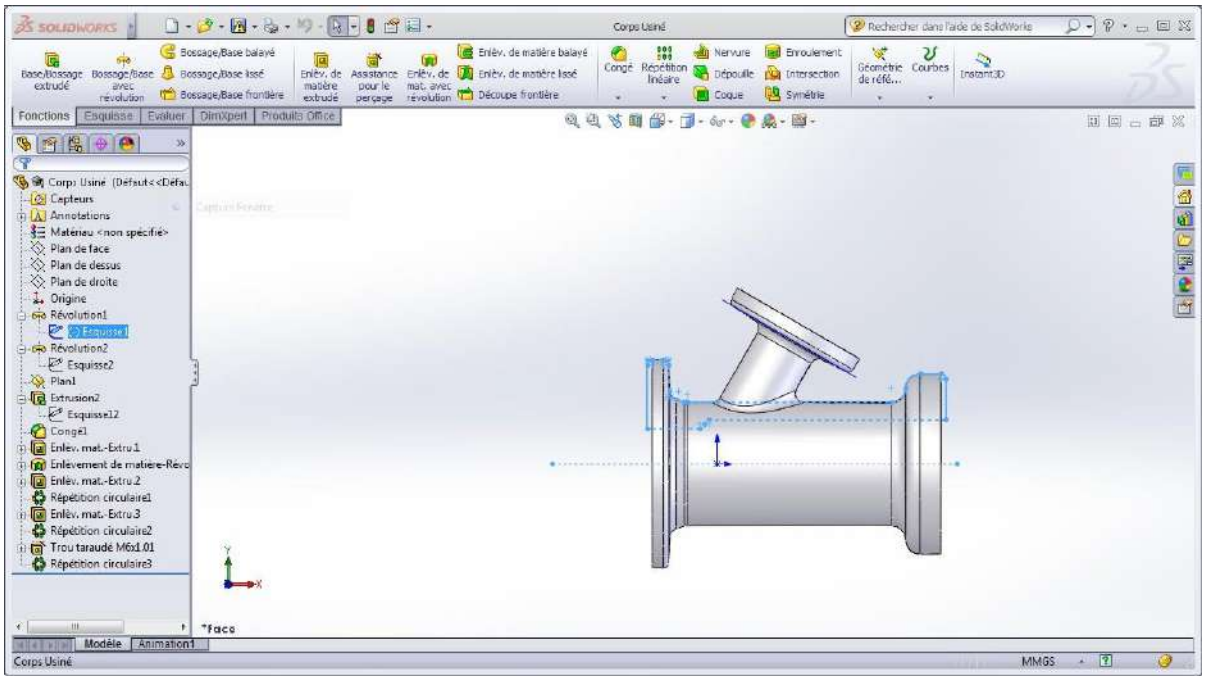


Figure 14 : corps l'usiné (plane de face)





III .3.2- Corrige remoulage de pièce l'usine :

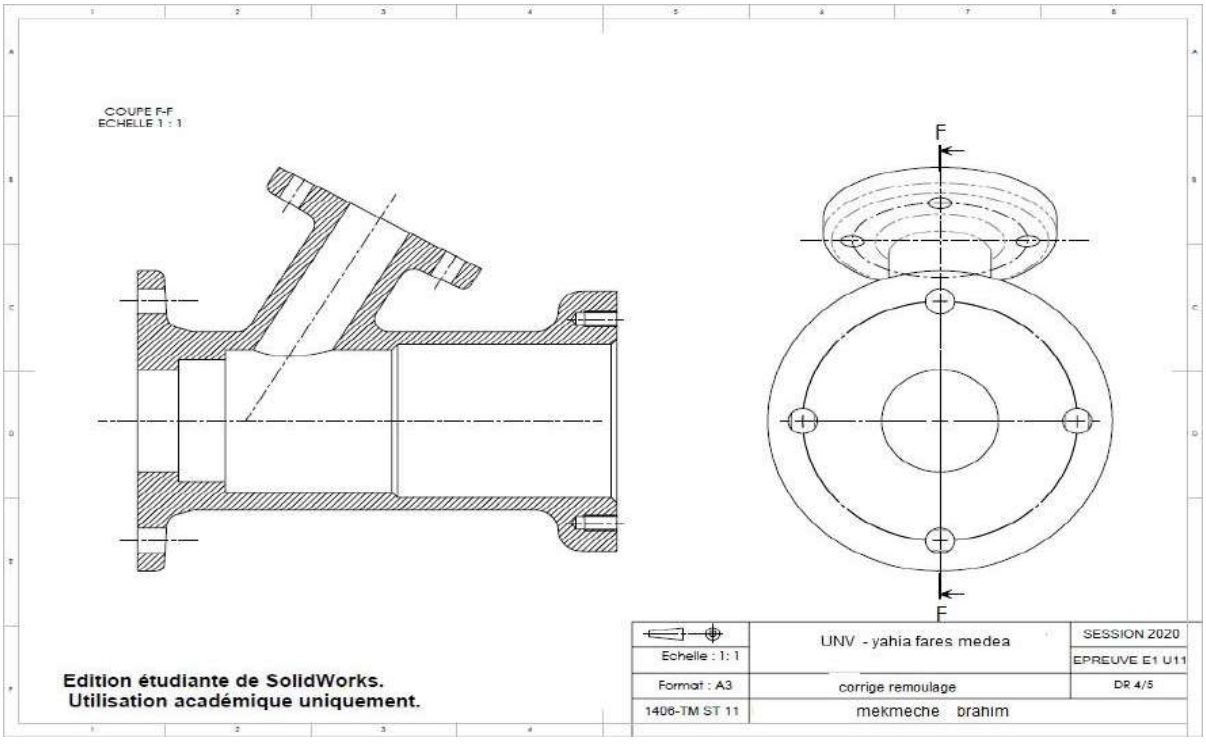


Figure 15 : corps l'usine mis en plane

III.4- Pièce brute :

III.4.1- Pièce brute sons dépouille :

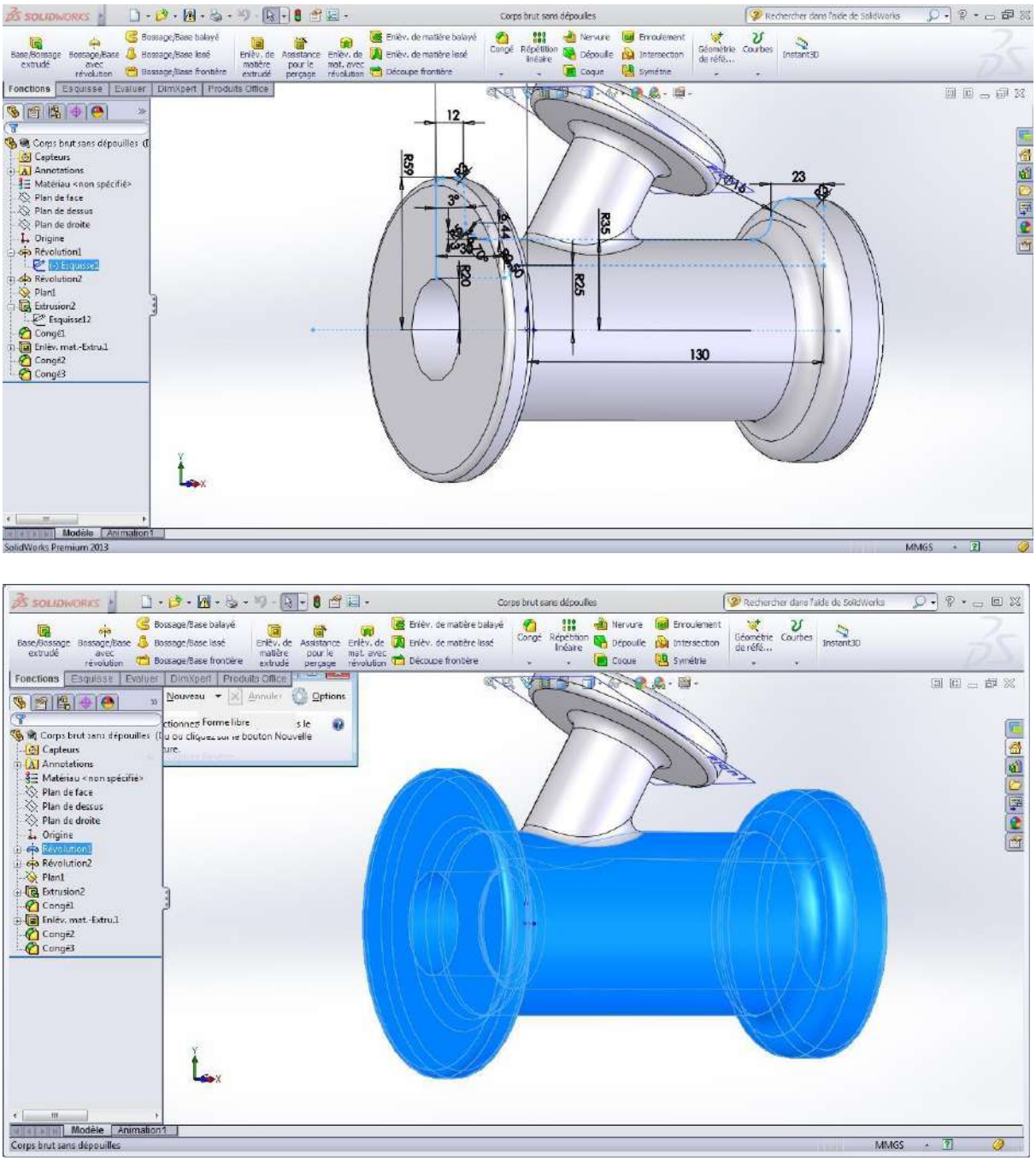


Figure 16 : corps brute sons dépouille



Figure17 : la forme générale de pièce brute

III.5- Modèle :

III.5.1- Conception le modèle :

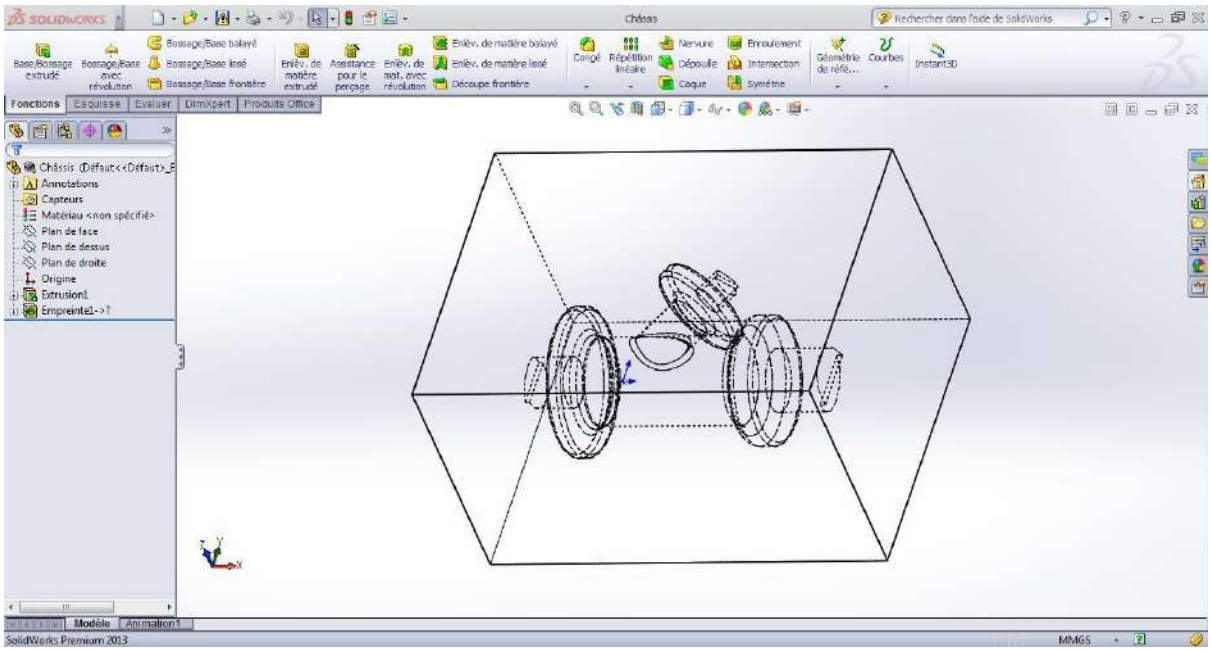


Figure 18 : chassai ou modèle

III.5.2- chassai ou modèle :

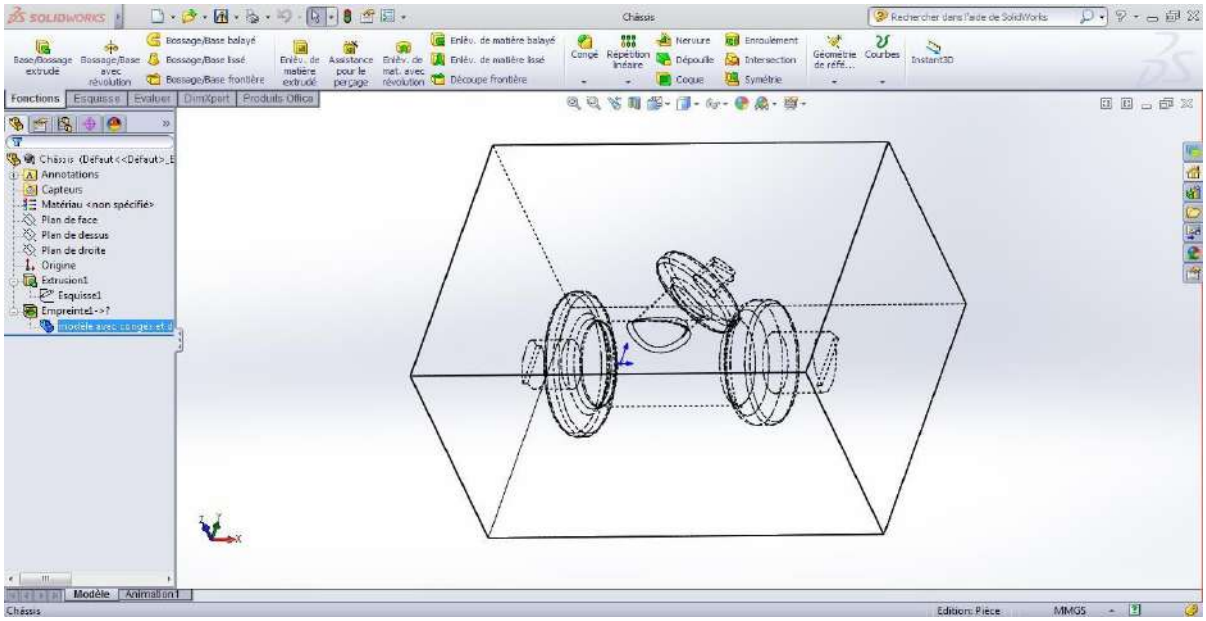


Figure 19 : chassai ou modèle avec congé

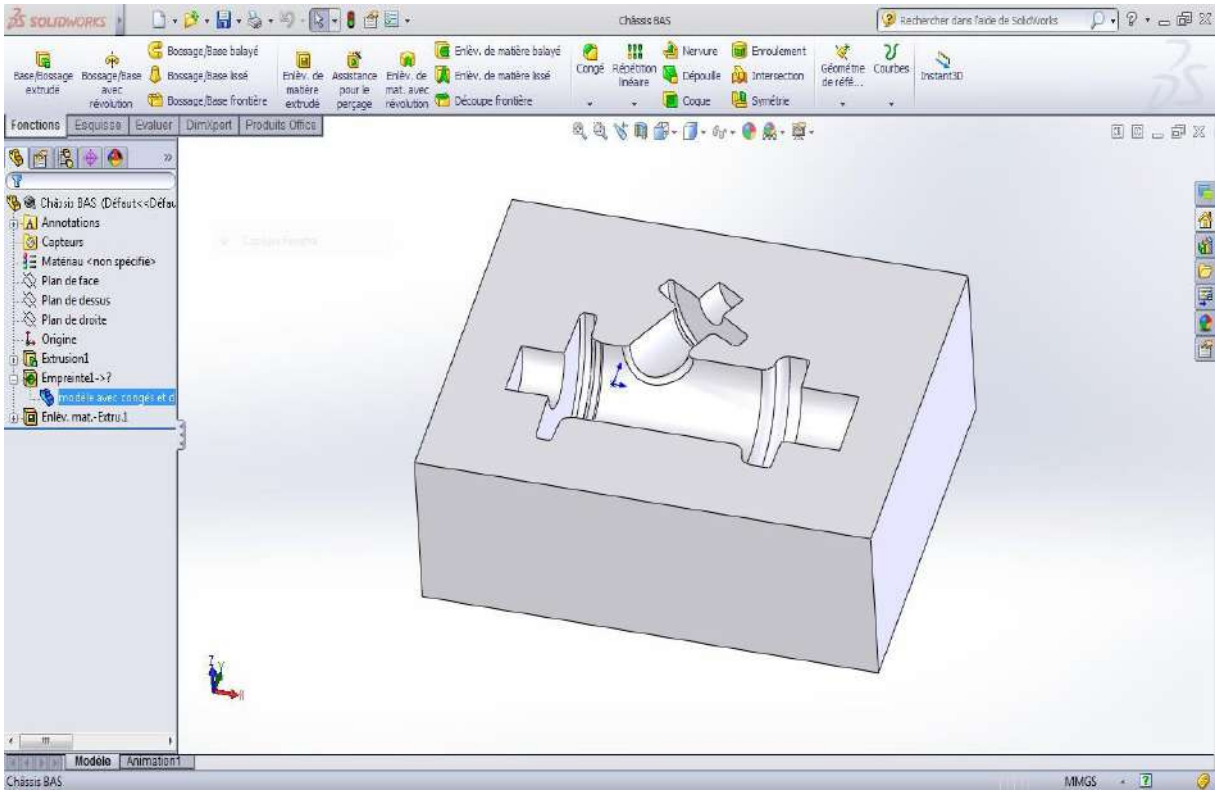


Figure 20 : chassai base avec congé et dépouille

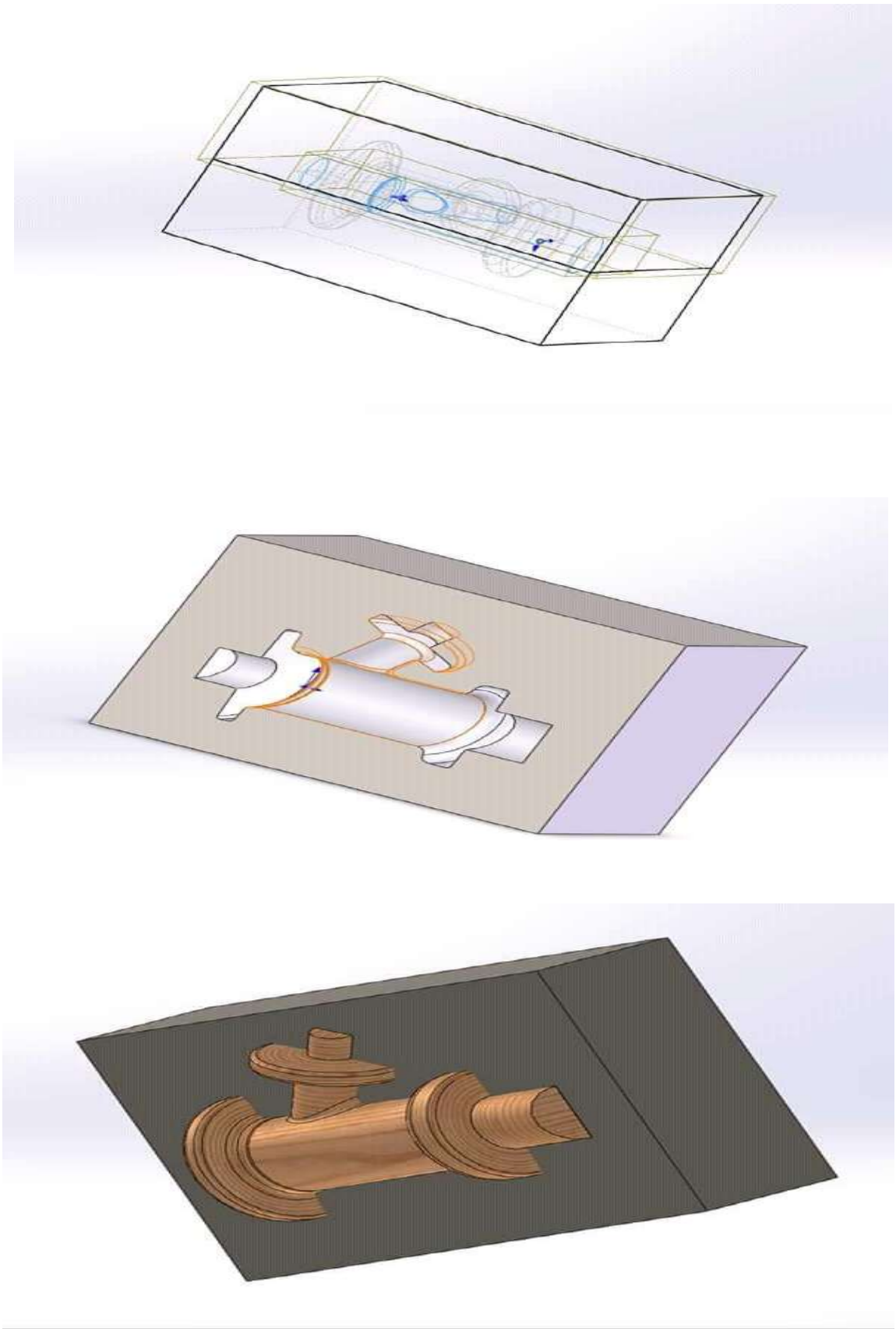


Figure 21 : extrude modèle

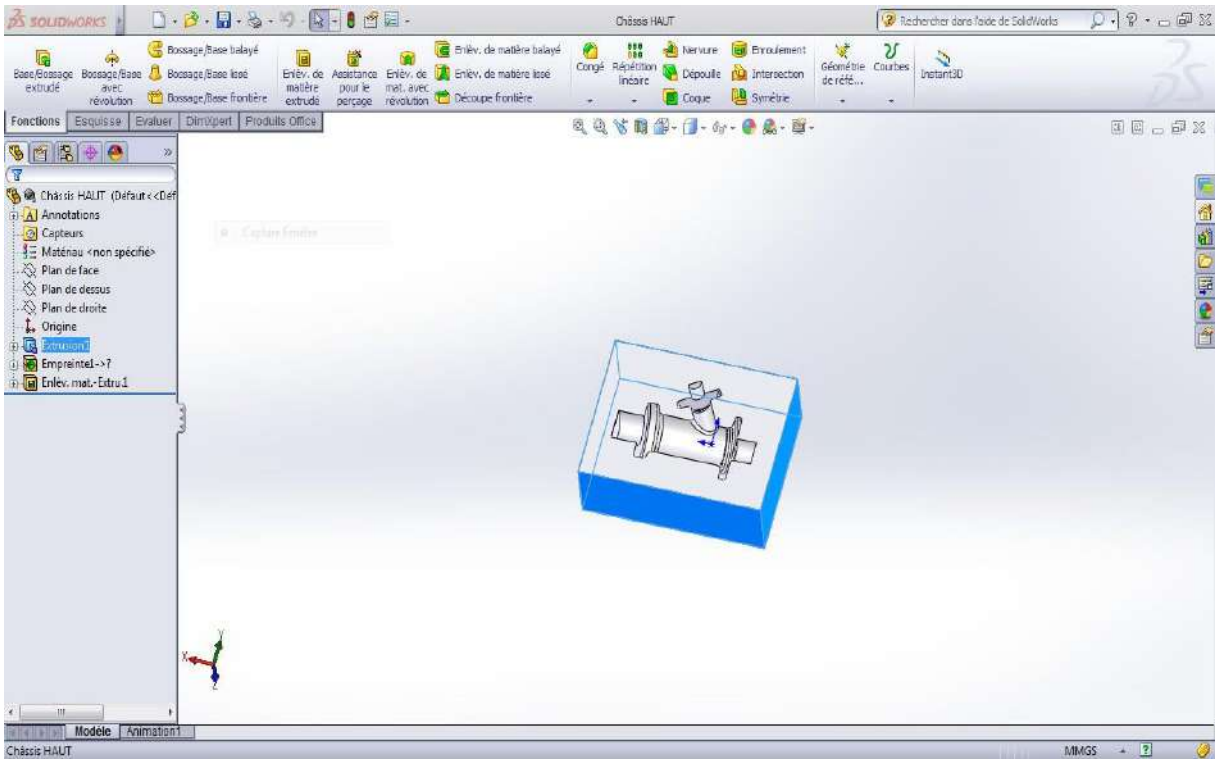


Figure 22 : chassai Haut

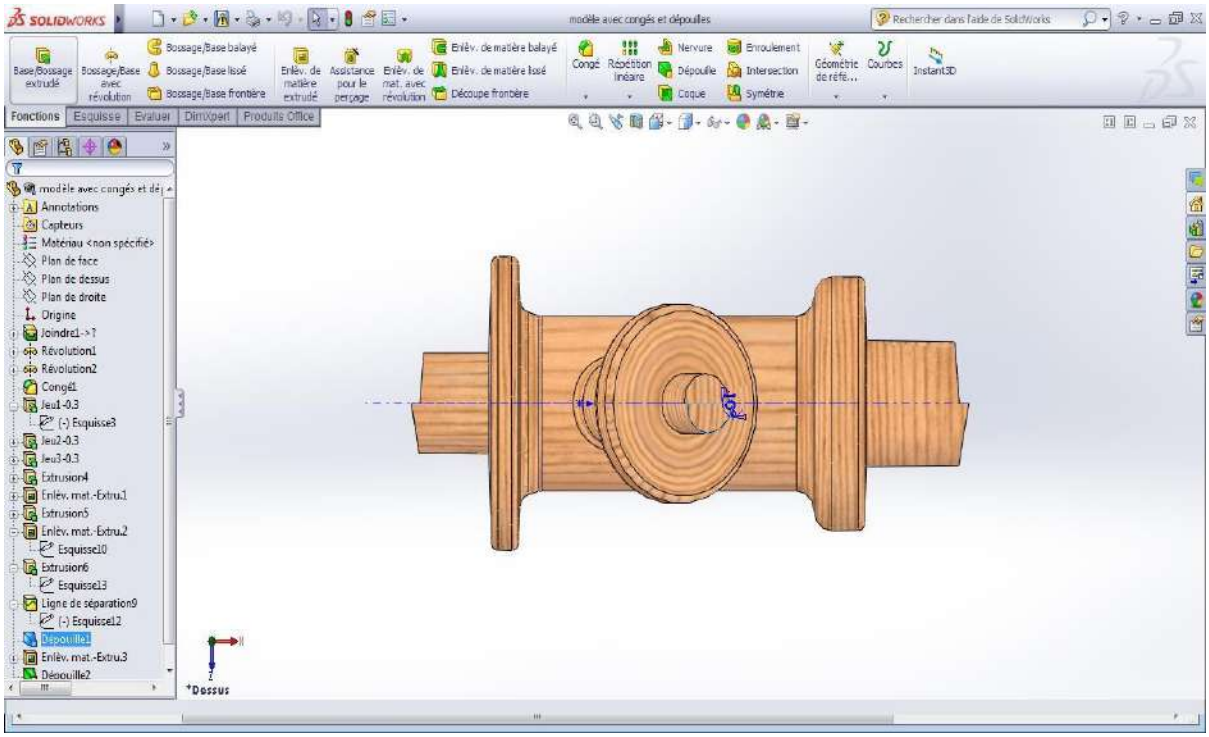


Figure 23 : modèle avec congé et dépouille

III.5.3- La forme de modèle :

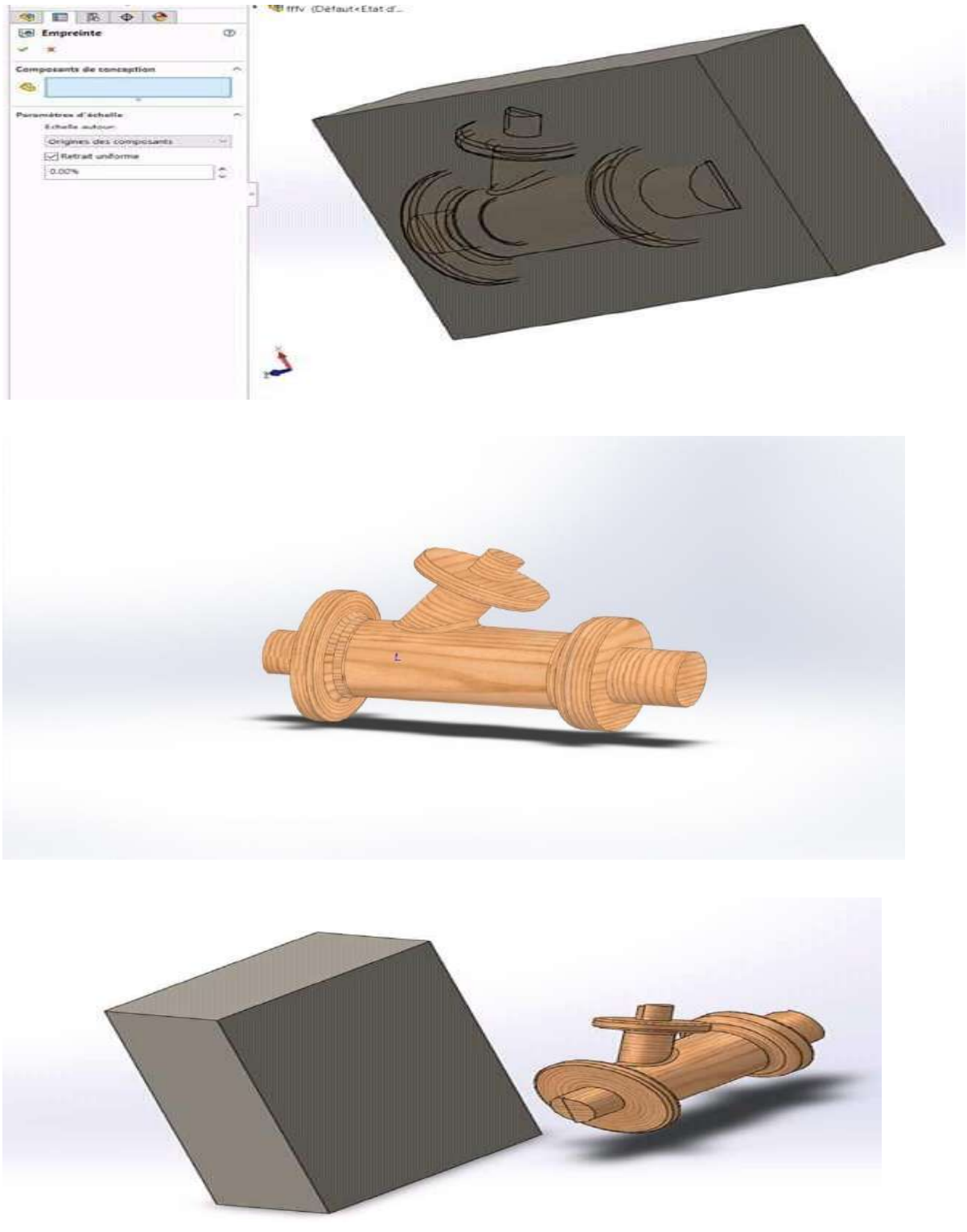


Figure 24 : la forme de modèle

III.6- Forme à noyau :

III.6.1- Conception à noyau :

III.6.1.1- Boite à noyau:

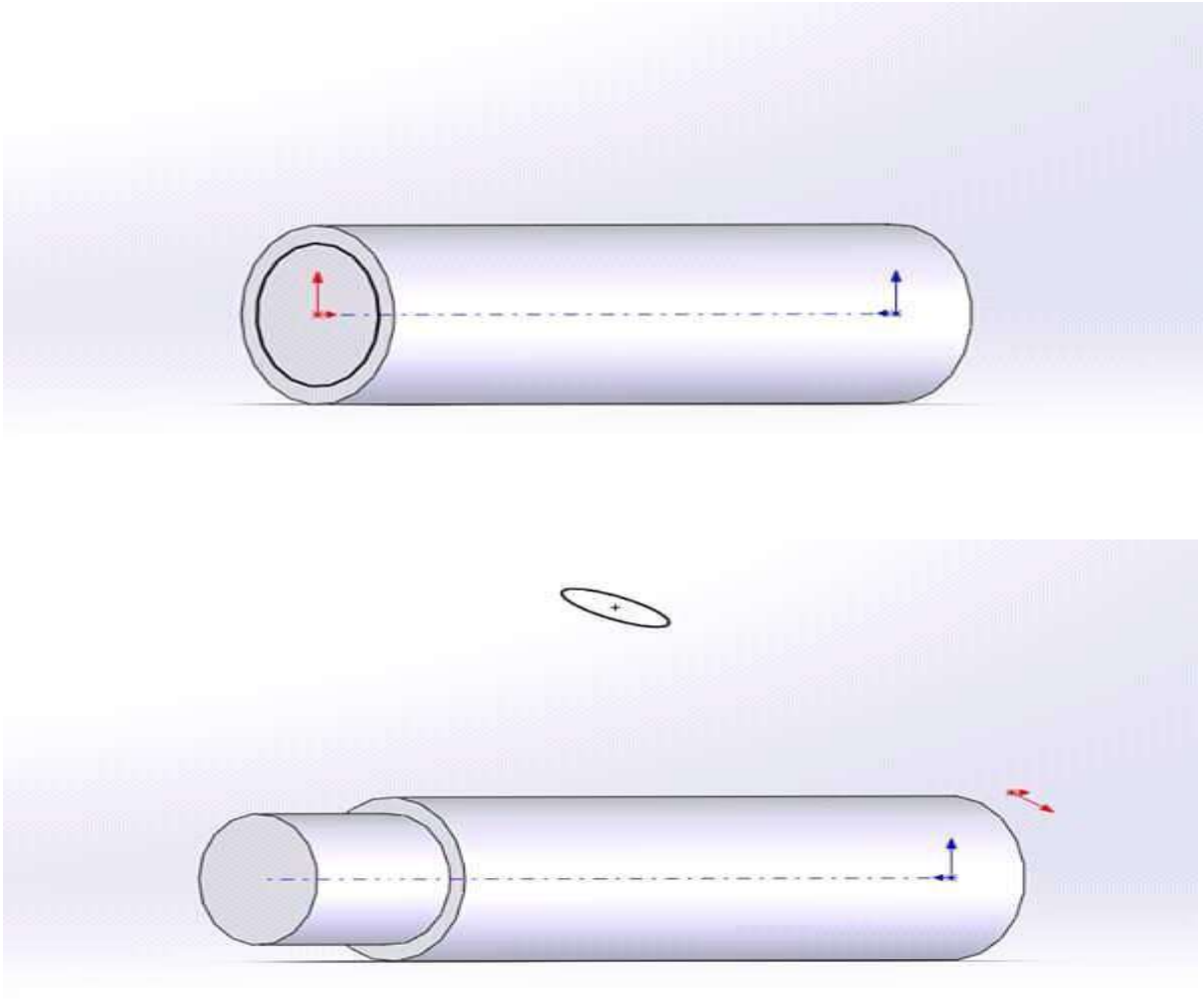


Figure 25 : extrude la forme à noyau

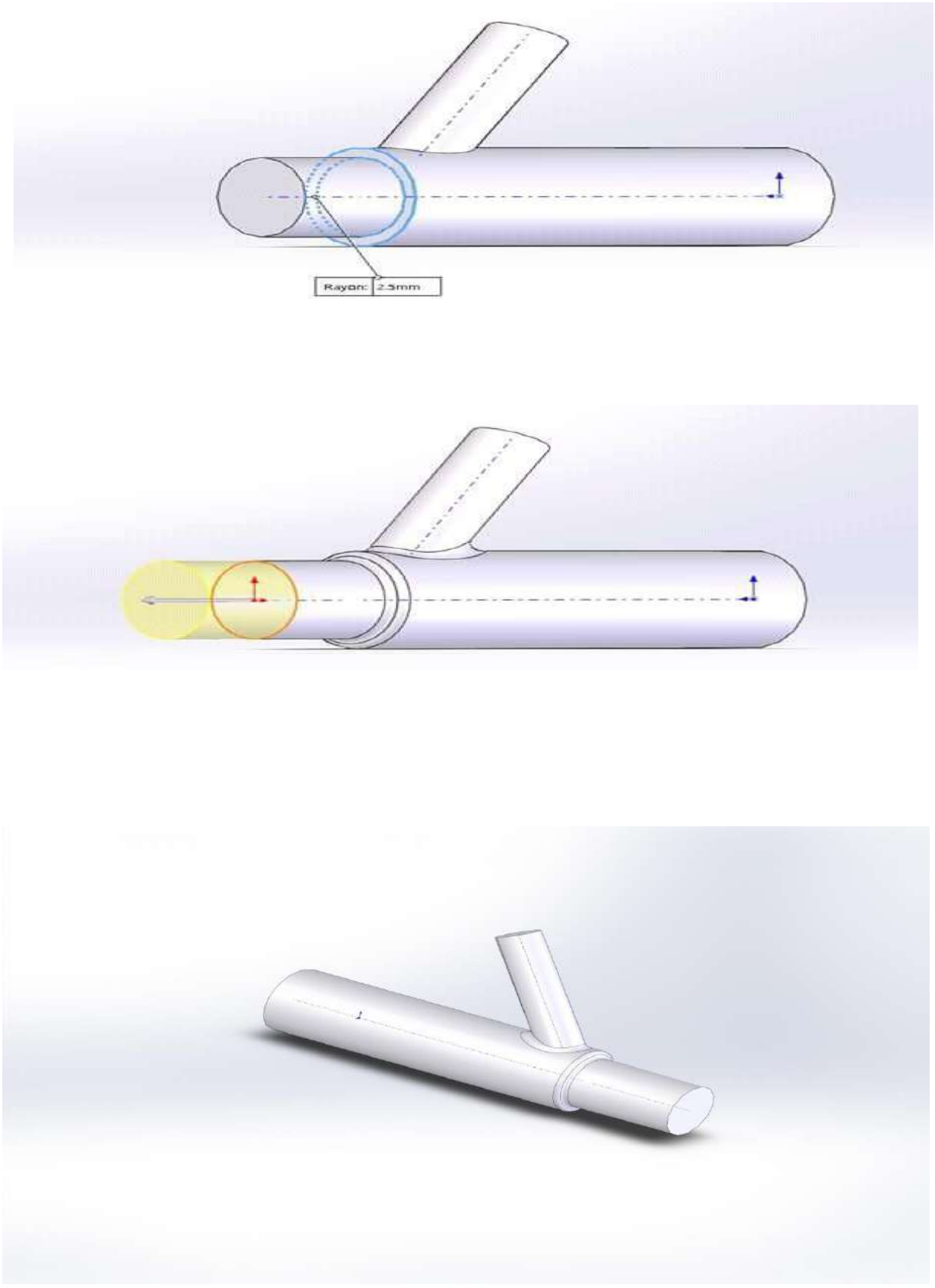


Figure 26:la forme ànoyau

III.6.1.2- Boite à noyau:

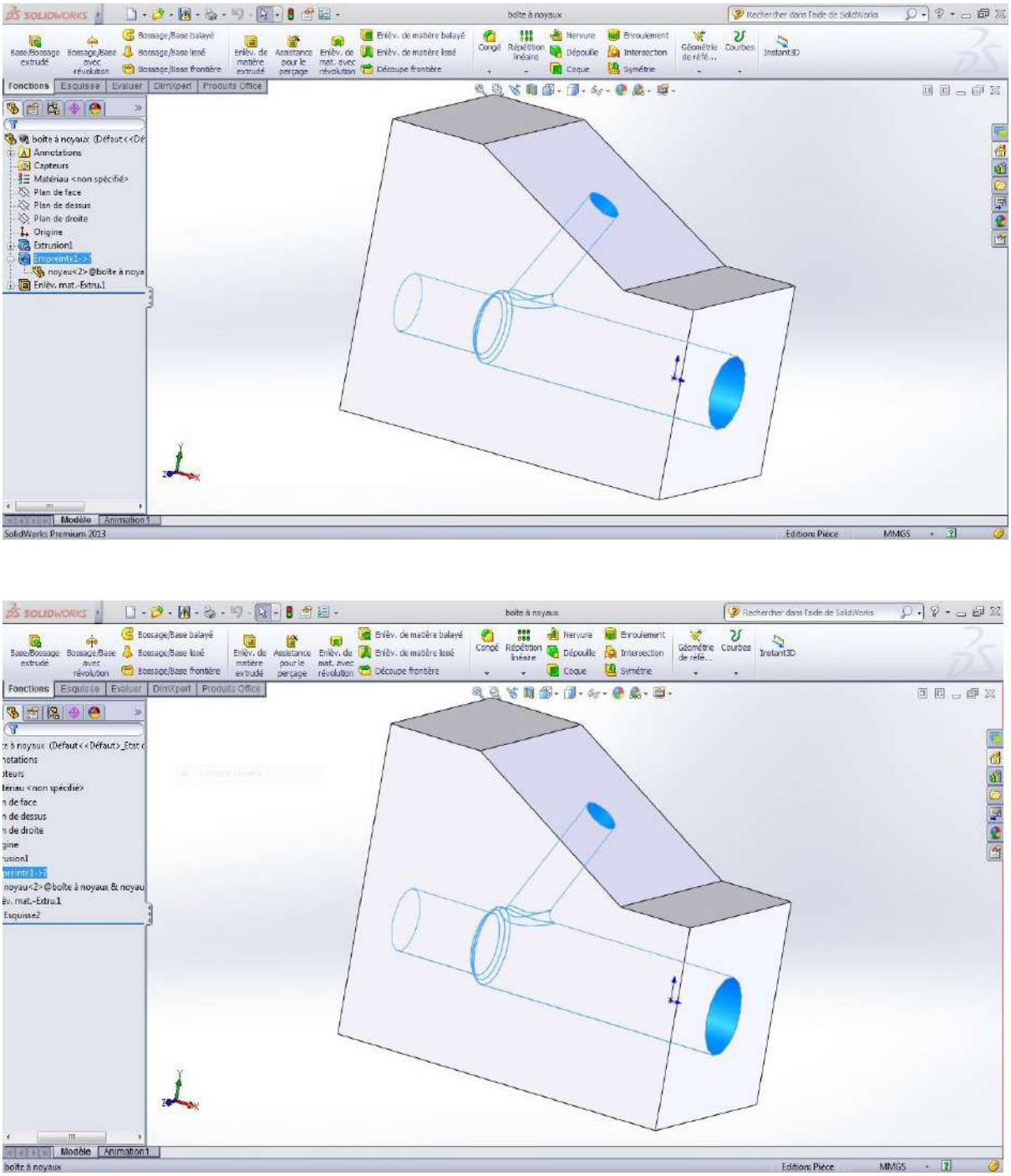
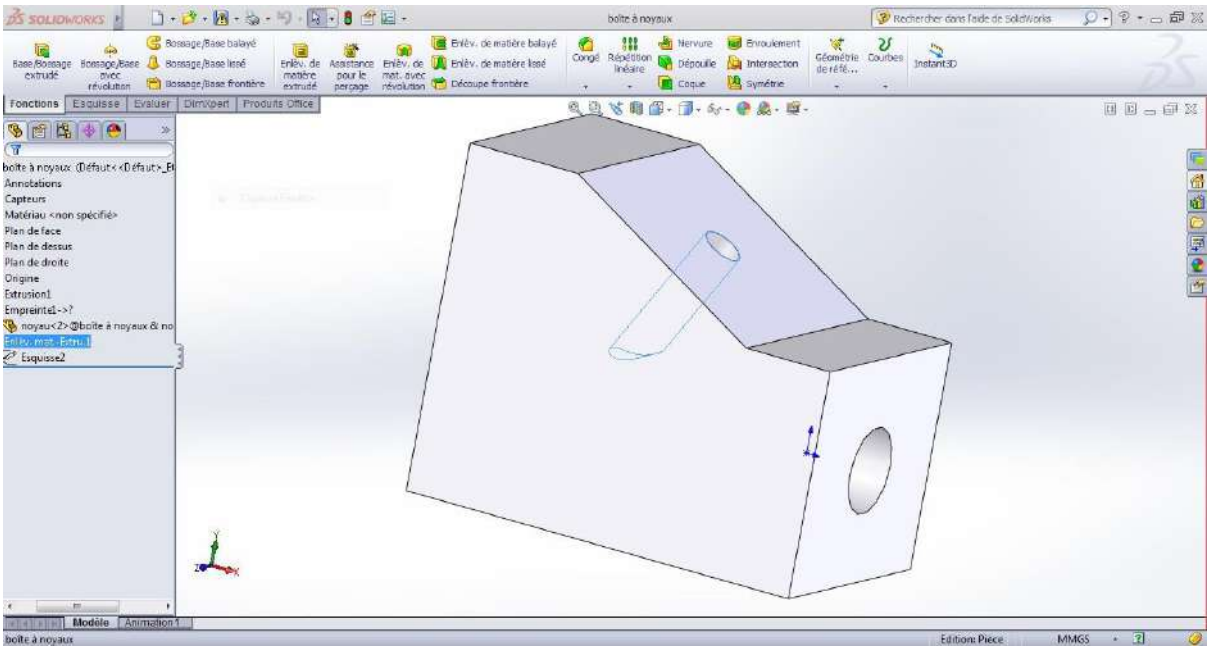


Figure 27 : extrude boîte à noyau



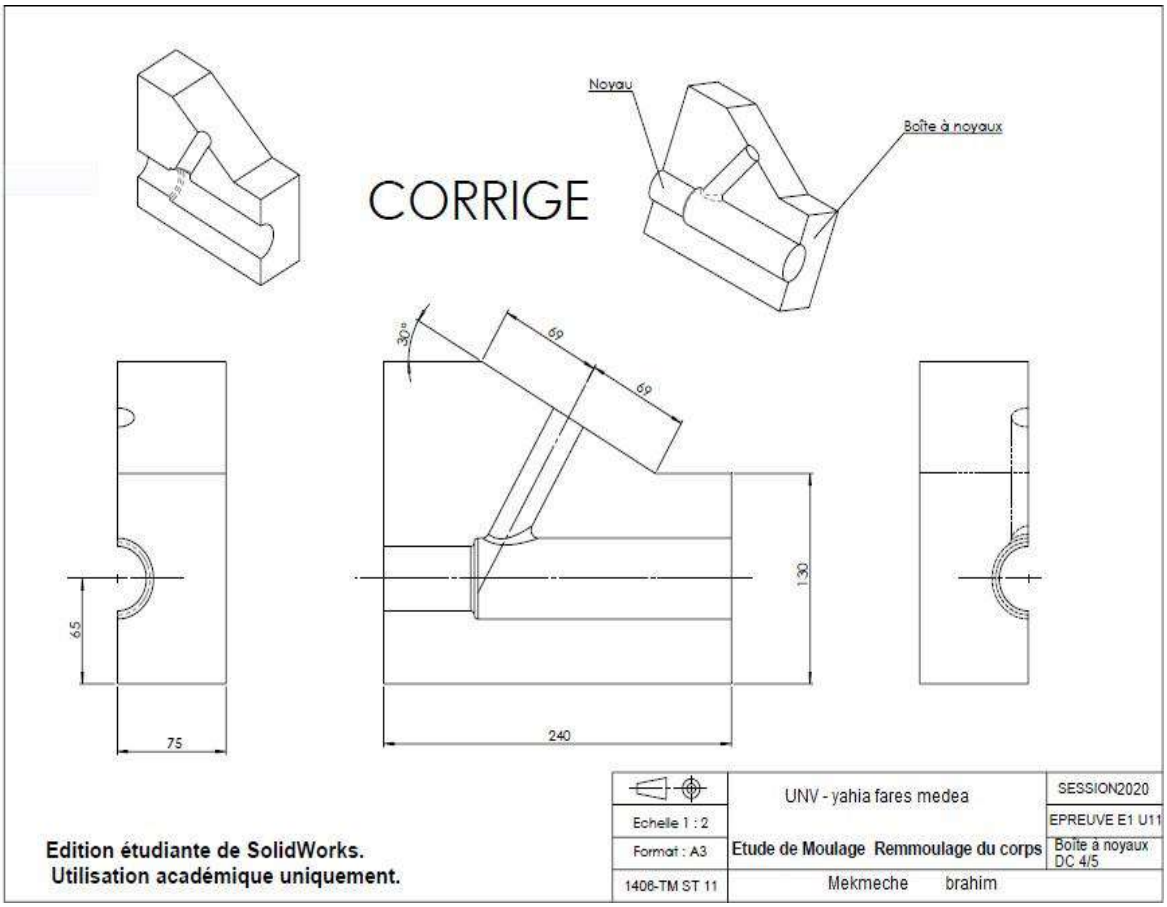


Figure 28 : mise en plane à boite de noyau

III.6.1.3- Noyau en position :

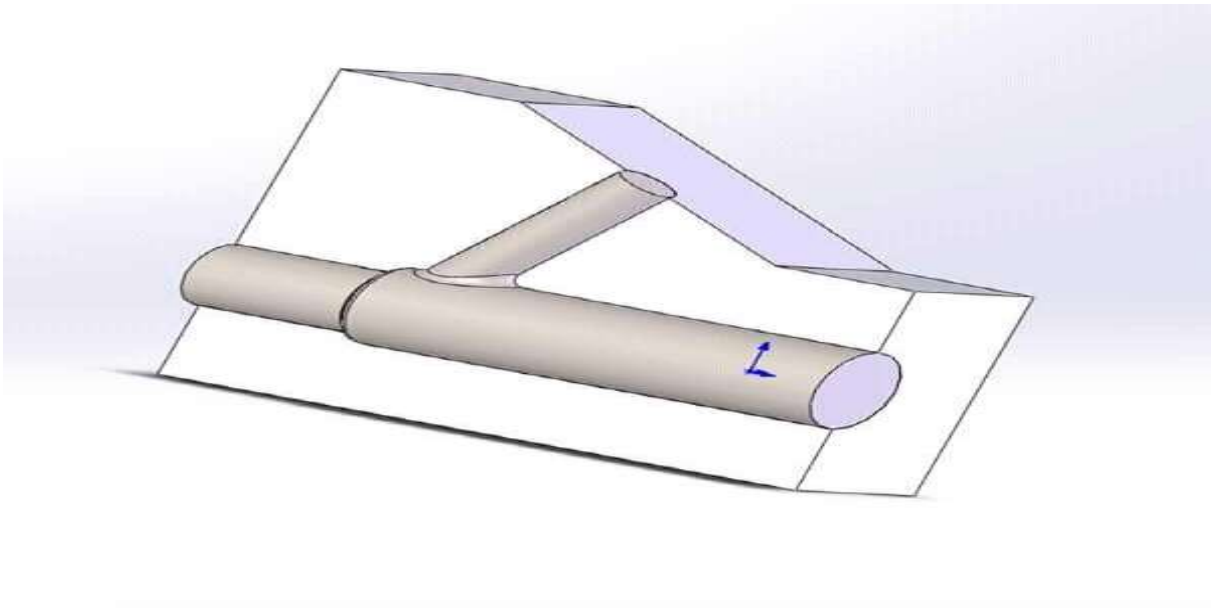


Figure 29 : partie A + noyau

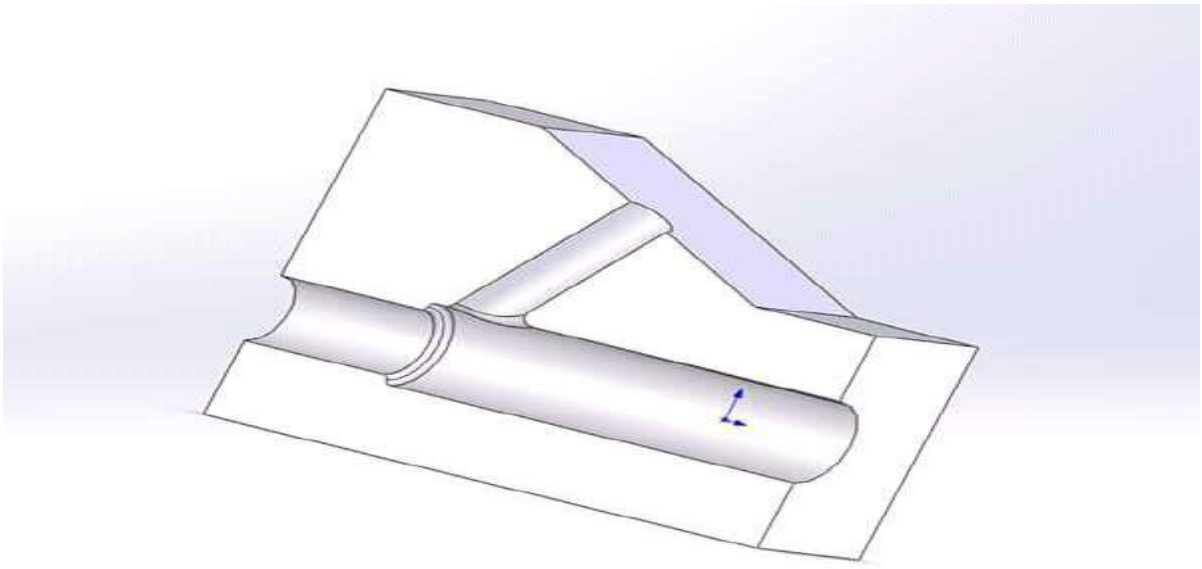


Figure 30 : partie B + noyau

III.7- le Moule :

III.7.1- Limitation :

Il n'est pas possible de prendre en compte l'outillage (moule, noyaux,..).

- LA MISE EN DONNÉE

- CHOIX DU PROCÉDÉ

III.7.1.2- Choix du type de moulage :

- Moule permanant.
- Moule non permanant.

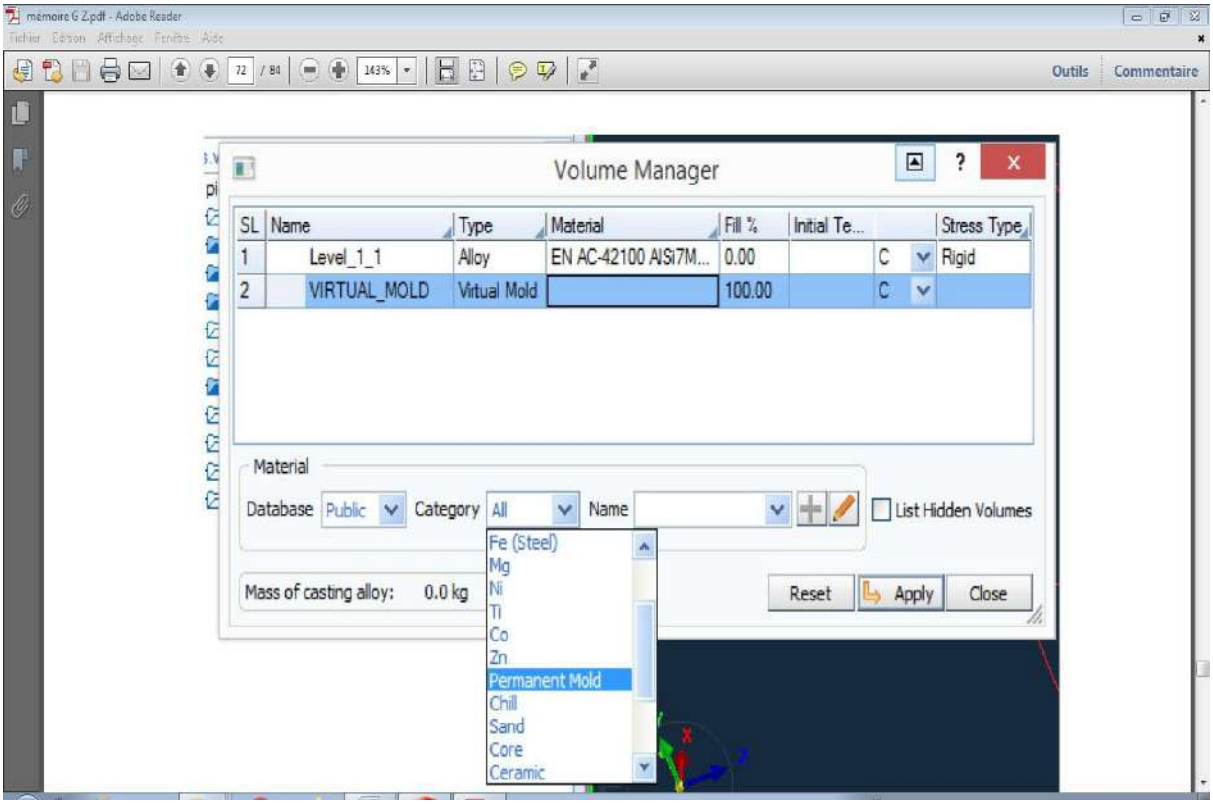


Figure 31 : *Type de moulage*

III.7.1.3- Conception le moule :

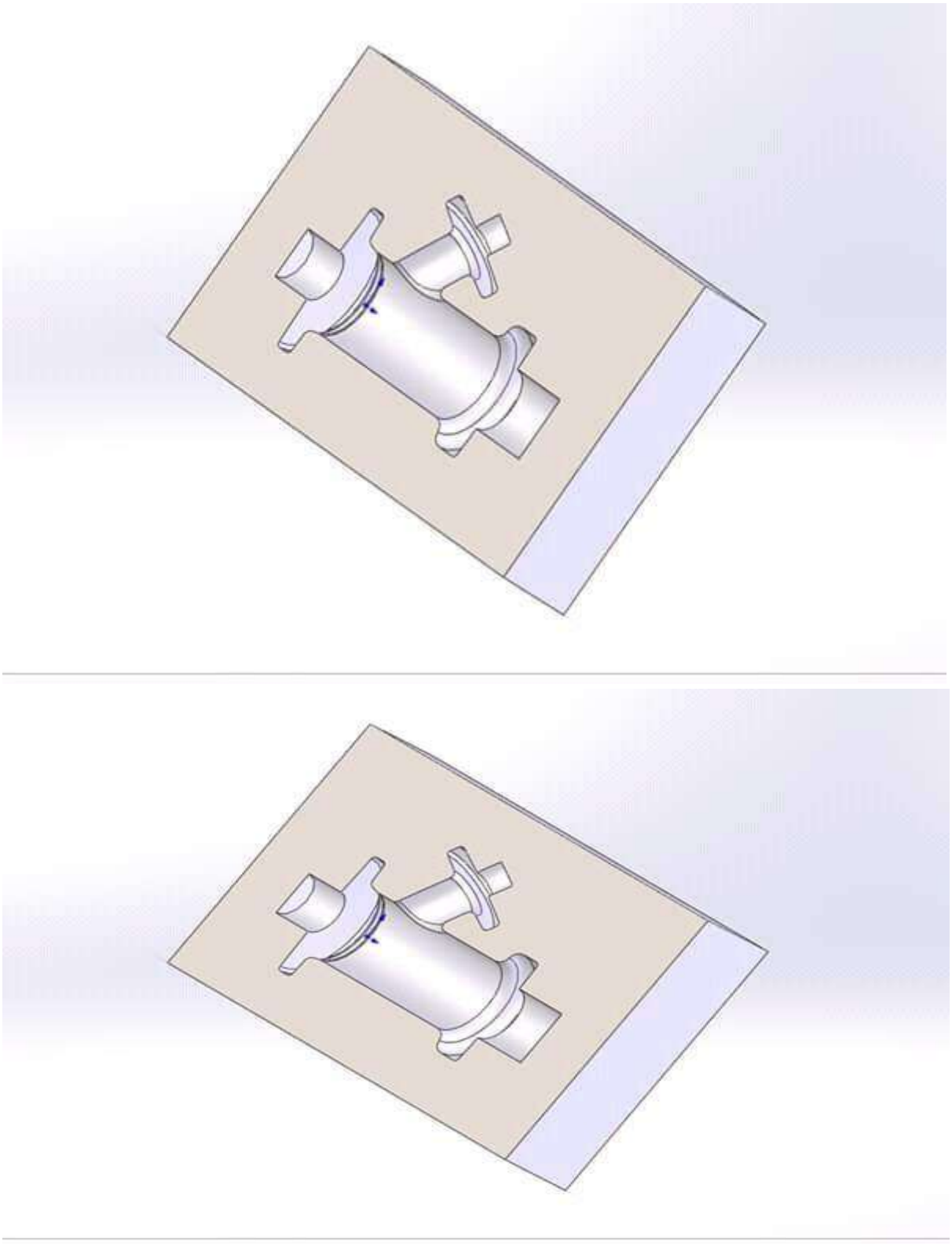


Figure 32 : la forme de moule

IV- Conclusion :

Le **moulage par injection** aussi connu sous le nom d'**injection** plastique est une méthode dont les hautes qualités de résultats ne sont plus à prouver. C'est la raison **pour** laquelle les secteurs d'activités les plus exigeants et les plus pointus ont recours à cette technique.

Cette étude a débuté par la présentation des polymères et une description du moulage par injection de matières plastiques. Une intention particulière a été donnée au phénomène rhéologique de la phase d'injection.

L'adaptation de la méthode de mise à plat pour la modélisation géométrique de l'empreinte de moule a nécessité l'établissement des modèles de résolution pour les trois géométries élémentaires, la plaque, le secteur et le canal.

Cette étude peut être sûrement améliorée par :

- La généralisation du programme pour des pièces plus complexes.

- Reformulation des hypothèses grossières adoptées tel que la gaine solide.

- Utilisation de méthode plus performante pour la détermination de la position de front tel que la méthode du taux de présences.

Liste de références bibliographiques

[1] : Adrien Toros, Jorge Zarate, Benoît Denkinger, Méthode de productions Moulage des
Métaux, école polytechnique fédérale de Lausanne. Edition 2012

[2]: https://www.forgefonderie.org/fr/forge-fonderie/panorama-economique

[3]: Ressource publiée sur Culture Sciences de l'Ingénieur :
http://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay

[4] Gilles DOUR, « Fonderie alliages, procédés, propriétés d'usage, défauts »,
Editeur Dunod 2004, France.

[5] ASM International, *ASM Handbook Volume 15 : Casting*, 2008

[6] Peter Beeley, *Foundry technology*. Butterworth-Heinemann, 2001

[7] http://en.wikipedia.org/wiki/Casting_(metalworking) Consulté le 15.11.12

[8]: http://www.maxisciences.com/imprimante-3d/un-robot-va-imprimer-en-3d-un-pont-en-acier-au-dessus-d-un-canal-d-amsterdam_art35128.html

[9]: Du prototypage rapide à la fabrication additive - Cours de Bruce Anglade, ENS Paris-Saclay