

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

**Ecole Nationale Polytechnique**



**Département d'Hydraulique**



## **Mémoire de Master en Hydraulique**

Présenté par :

**M<sup>lle</sup> Ahlam BENKHELIL**

Thème

**Conception et réalisation des éléments  
hydrauliques d'une turbomachine génératrice  
d'énergie à fluide incompressible**

**Soutenu le 15 Juin 2015**

**Devant le Jury :**

BILEK Amar	<b>Maître de conférence ; M.C. B ;</b>	<b>ENP : Président</b>
BELHADJ Omar	<b>Chargé de cours ; M.A. A ;</b>	<b>ENP : Rapporteur</b>
MESSAHLI Rabie	<b>Chargé de cours ; M.A. B ;</b>	<b>ENP : Examineur</b>
BELHADEF Ikhlef	<b>Chargé de cours ; M.A. A ;</b>	<b>ENP : Examineur</b>

*École Nationale Polytechnique 10, Avenue Hassan Badi. El-Harrach. Alger*

**PROMOTION: 2015**

## Remerciements

En premier et en dernier, avant tout et après tout, dans le bonheur et dans le malheur, merci à Allah le tout puissant pour toutes ses grâces et ses faveurs, pour nous avoir accordé la chance d'étudier à l'Ecole Nationale Polytechnique et m'avoir donné le courage et la force d'accomplir ce modeste travail. Ce travail a été réalisé au sein de l'Ecole Nationale Polytechnique (Alger). Je tiens à exprimer, en premier lieu, mes plus vifs remerciements à mon promoteur, Monsieur **Omar BELHADJ**, Enseignant-Chercheur à l'Ecole Nationale Polytechnique (Alger), d'avoir proposé le sujet, pour son attention, son implication et son entière disponibilité, ainsi que ses précieux conseils malgré ses occupations.

Je suis reconnaissante pour lui de m'avoir réservé le meilleur accueil et de m'avoir guidés dans mon projet à chaque étape de sa réalisation. On le Remercie aussi pour la somme des choses qu'on a appris avec lui pendant les trois années précédentes.

Je remercie monsieur **Rabie MESSAHLI** Enseignant-Chercheur du département d'hydraulique, pour ses remarques et suggestions, pour l'amélioration de la qualité de cette thèse.

Je remercie toutes les personnes, qui, de près ou de loin, ont contribué à l'aboutissement de ce travail particulièrement monsieur **Ikhlef BELHADEF** et monsieur **Lakhdar RIACHE**, des enseignants-Chercheurs du département du génie mécanique, et aussi pour monsieur **Abdelmalek OUABDESSLAM** technicien au labo du génie mécanique.

Mes remerciements s'adressent, également, aux membres du jury et au président monsieur **Amar BILEK**. C'est un très grand honneur de porter un jugement sur mon travail.

Enfin, mon gratitude va à monsieur **Lahcen ABDELOUEL**, Enseignant-Chercheur à l'Ecole Nationale Polytechnique (Alger), pour son accueil au laboratoire de génie industriel, pour son aide et pour m'avoir laissé utiliser et manipuler le matériel du labo.

*À toute ma famille  
À mes très chers parents  
À mon frère, ma sœur et ma belle sœur  
À mes neveux et ma nièce  
Ainsi qu'à tous mes amis*

## ملخص:

صناعة الماكينات التوربينية في جميع أنحاء العالم محجوز للشركات متعددة الجنسيات الذي يقاس رؤوس أموالهم بمليارات دولارات، لديهم الموارد الضرورية والخبرة اللازمة لجعل الصناعة جيدة. في الجزائر عدد قليل من الشركات لديها القدرة على تصنيع مضخات ذات جودة. الهدف من هذا العمل هو رفع التحدي بمحاولة صنع نماذج من اثنين من الأجزاء الرئيسية في الجزء الهيدروليكي (مروحة وغلاف حلزوني) لماكينة توربينية مولدة للطاقة. يكون هذا التجسيد بواسطة القطع للخشب.

**الكلمات المفتاحية:** الماكينات التوربينية – صناعة – مولدة للطاقة – المائع – غير قابل للانضغاط – حساب أبعاد – مروحة – غلاف حلزوني – عمود التحريك – القطع – الطباعة ثلاثية الأبعاد.

---

## Résumé:

La fabrication des turbomachines à travers le monde est réservée à des d'entreprises multinationales dont le chiffre d'affaire cumulé se compte en milliard de \$, elles disposent les moyens essentiels et de l'expérience requis pour faire une bonne construction. En Algérie peu d'entreprises ont la capacité de fabriquer des pompes de qualité. L'objectif du présent travail est de relever le challenge d'essayer de fabriquer des prototypes des deux pièces principales dans la partie hydraulique (roue et volute) d'une turbomachine génératrice d'énergie. Cette réalisation est faite par usinage de pièces en bois.

**Mots clés :** turbomachine – fabriquer – génératrice d'énergie – fluide – incompressible – dimensionnement – roue – volute – arbre – usinage – impression 3D

---

## Abstract:

The manufacture of turbine engines worldwide is reserved for multinational corporations whose combined turnover is measured in billion \$, they have the essential resources and experience required to make a good construction. In Algeria few companies have the ability to manufacture quality pumps. The objective of this work is to take up the challenge of trying to build prototypes of the two main parts in the hydraulic part ( wheel and flip ) of a power generating turbine engine. This embodiment is made by machining of wooden parts.

**Keywords:** turbomachinery – generating energy – fluid– incompressible – determine the dimensions – Wheel – Volute – shaft – 3D printing – machining

## Sommaire

I. INTRODUCTION.....	1
II. METHODOLOGIE.....	2
<b>Chapitre 1 : Eléments de construction hydrauliques d'une turbomachine .....</b>	<b>3</b>
I. Arbre.....	4
1. Définition.....	4
2. Contrainte sur l'arbre.....	4
3. Moment quadratique polaire.....	5
4. Déformations sur l'arbre.....	5
a. Torsion.....	5
b. Angle unitaire de torsion.....	6
c. Module d'élasticité transversal.....	8
d. Moment de torsion.....	8
e. Concentration de contraintes.....	9
II. Mode d'assemblage.....	10
1. Assemblage indirect.....	10
2. Mode d'accouplement arbre-moyeu.....	11
a. Clavette.....	11
b. Écrou.....	12
III. Roue.....	15
IV. Volute.....	16
1. Corps de la volute.....	16
2. Diffuseur.....	16

3.	Construction de la volute .....	18
a.	Paramètres de construction de la volute .....	18
b.	Sections de volute .....	19
c.	Bec de la volute .....	20
V.	Etanchéité.....	21
<b>Chapitre 2 : Conception des éléments hydrauliques de la turbomachine.....</b>		<b>24</b>
I.	La conception sous SolidWorks .....	24
1.	Présentation de SolidWorks .....	24
2.	L'utilité de SolidWorks.....	25
II.	Les étapes de conception sous SolidWorks.....	26
1.	Conception de l'arbre.....	26
2.	Conception de la clavette .....	28
3.	Conception de l'écrou .....	29
4.	Conception de la roue .....	30
5.	Conception de la volute .....	34
a.	La partie spirale .....	34
b.	Le cache.....	40
6.	Les accessoires de la conception.....	42
a.	La bague d'étanchéité(1).....	42
b.	La bague d'étanchéité(2).....	42
c.	Les goujons .....	43
d.	Les boulons .....	43
III.	L'assemblage de la turbomachine génératrice d'énergie .....	44

<b>Chapitre 3 : Modes de fabrication traditionnels d'une turbomachine .....</b>	<b>46</b>
I. Le moulage .....	46
1. Généralité sur le moulage .....	47
a. Les étapes du moulage semblent simples.....	47
b. Possibilités et avantages du moulage .....	47
c. Inconvénients du moulage.....	47
d. Les pièces réalisées par moulage.....	47
e. Le moule de fonderie.....	47
2. Les différentes catégories de procédés de moulage des métaux .....	48
A. Moules non permanents.....	48
a. Moulage en sable.....	48
b. Moulage en carapace .....	50
c. Moulage à la cire perdue .....	51
B. Moules permanents .....	53
a. Moulage en coquille .....	53
b. Moulage par centrifugation .....	54
3. Table des catégories de procédés de moulage .....	55
II. Usinage.....	57
1. Généralité sur l'usinage .....	57
2. Les machines.....	58
a. Le fraisage .....	58
b. Le perçage .....	59
c. Le tournage.....	59

3.	Condition de coupe .....	60
a.	Les paramètres de coupe .....	60
b.	Choix des paramètres de coupe .....	61
III.	Autres procédés de fabrication .....	61
1.	Le formage .....	61
2.	L'Assemblage .....	61
<b>Chapitre 4 : Impression 3D d'une turbomachine génératrice d'énergie .....</b>		<b>63</b>
I.	De quoi s'agit-il ?.....	63
II.	Avantages – Faiblesses – Opportunités.....	67
1.	Avantages.....	67
2.	Faiblesses .....	67
3.	Opportunités :.....	68
III.	Objet numérique .....	68
1.	Principe : .....	68
2.	Logiciels.....	69
a.	Introduction .....	69
b.	Définition .....	69
c.	Utilisation :.....	70
IV.	Réalisation .....	71
1.	Impression de la roue .....	72
2.	Impression de la volute :.....	75

<b>Chapitre 5 : Réalisation d'une turbomachine génératrice d'énergie par usinage</b> .....	80
I. Réalisation de la turbomachine dimensionnée par usinage.....	80
1. Les principales fonctionnalités du logiciel Stratoconcept PRO.....	80
a. Description du logiciel: .....	80
b. Visualisation et modification des fichiers STL .....	81
c. Stratification .....	84
d. Réalisation .....	85
2. Etapes de la réalisation sur la machine Stratoconception .....	88
II. Les éléments hydrauliques de la turbomachine réalisés.....	91
1. La volute .....	91
2. La roue .....	93
III. La similitude entre la turbomachine dimensionnée et l'autre réalisée .....	96
CONCLUSION GENERALE .....	98
REFERENCES.....	100

## Liste des figures

### Chapitre 1 : Eléments de construction hydrauliques d'une turbomachine

Figure 1- 1 : Pompe centrifuge.....	3
Figure 1- 2 : Moment quadratique d'une forme circulaire.....	5
Figure 1- 3 : Arbre mis à la torsion .....	6
Figure 1- 4 : Coupure d'une section droite d'un arbre mis à la torsion.....	6
Figure 1- 5 : Angle de torsion .....	7
Figure 1- 6 : Module d'élasticité transversal en fonction des matériaux .....	8
Figure 1- 7 : Coefficient de concentration de contraintes <b>Kts</b> en torsion sur des arbres de section variable.....	9
Figure 1- 8 : Assemblages vissés .....	10
Figure 1- 9 : Types de clavette .....	12
Figure 1- 10 : Profil de position de la clavette .....	12
Figure 1- 11 : Types d'écrou .....	13
Figure 1- 12 : Profil des dimensions d'un écrou borgne .....	14
Figure 1- 13 : Type de roues selon le trajet du fluide par rapport à l'axe .....	15
Figure 1- 14 : Type de roues radiales selon la forme des flasques.....	15
Figure 1- 15 : Volute .....	16
Figure 1- 16 : Diffuseur.....	17
Figure 1- 17 : Paramètres de la volute.....	18
Figure 1- 18 : Constante du tracé de la volute.....	18
Figure 1- 19 : Sections de volute courantes .....	19
Figure 1- 20 : Comparaison de trois sections de volute avec la même roue .....	19
Figure 1- 21 : Modification de bec de la voute .....	20
Figure 1- 22 : Type de bague d'étanchéité.....	23
Figure 1- 23 : Garniture d'étanchéité .....	23

## Chapitre 2 : Conception des éléments hydrauliques de la turbomachine

Figure 2- 1: Les trois choix offerts lors de l'ouverture d'un nouveau projet .....	24
Figure 2- 2: Vue d'ensemble de la fenêtre de SolidWorks .....	25
Figure 2- 3 : Esquisse du tracé de l'arbre et la partie filetage .....	26
Figure 2- 4 : l'arbre après révolution .....	26
Figure 2- 5 : Esquisse de la rainure de la clavette .....	27
Figure 2- 6 : L'arbre sous SolidWorks .....	27
Figure 2- 7 : Esquisse pour la conception de la clavette .....	28
Figure 2- 8 : La clavette sous SolidWorks .....	28
Figure 2- 9 : Ecrou M6 normalisé .....	29
Figure 2- 10 : L'esquisse de courbe pour l'écrou borgne .....	29
Figure 2- 11 : L'écrou sous SolidWorks .....	30
Figure 2- 12 : Esquisse du tracé de la roue .....	30
Figure 2- 13 : la roue après révolution .....	31
Figure 2- 14 : Esquisse du tracé de la courbe des aubes point par point.....	31
Figure 2- 15 : Contrainte de coïncidence avec les extrémités de la roue .....	32
Figure 2- 16 : Répétition circulaire de la courbe des aubes en 6 fois .....	32
Figure 2- 17 : Esquisse de la rainure de la clavette sur la roue .....	33
Figure 2- 18 : Enlèvement de la matière sur la roue pour avoir la rainure de la clavette.....	33
Figure 2- 19 : La roue sous SolidWorks .....	34
Figure 2- 20 : La courbe spirale de la volute.....	34
Figure 2- 21 : Les plans d'esquisse pour le lissage de la spirale.....	35
Figure 2- 22 : Lissage de la forme spirale .....	35
Figure 2- 23 : Lissage du cône du diffuseur.....	36
Figure 2- 24 : Esquisse de la paroi arrière de la voute .....	36
Figure 2- 25 : Extrusion de la paroi.....	37

Figure 2- 26 : Enlèvement de la matière pour le trou correspond à l'arbre .....	37
Figure 2- 27 : Esquisse pour facilité la jonction de la volute et la conduite de refoulement ...	38
Figure 2- 28 : Trous de fixation la conduite de refoulement avec la volute.....	38
Figure 2- 29 : Esquisse pour les trous des goujons .....	39
Figure 2- 30 : Création de trous taraudés de M6.....	39
Figure 2- 31 : Esquisse du cache .....	40
Figure 2- 32 : Cache après révolution .....	40
Figure 2- 33 : Trous de goujon pour la jonction ave la partie spirale .....	41
Figure 2- 34 : Trous de fixation la conduite d'amenée avec la volute .....	41
Figure 2- 35 : La bague d'étanchéité (1) .....	42
Figure 2- 36 : La bague d'étanchéité (2) .....	42
Figure 2- 37 : Goujon sous SolidWorks.....	43
Figure 2- 38 : Boulon sous SolidWorks .....	43
Figure 2- 39 : Assemblage des pièces de la turbomachine .....	44
Figure 2- 40 : Coupe sur les pièces assemblées .....	44
Figure 2- 41 : Vue éclatée de la turbomachine.....	45

### **Chapitre 3 : Modes de fabrication traditionnels d'une turbomachine**

Figure 3- 1 : Principe de moulage .....	46
Figure 3- 2 : Moulage en sable.....	48
Figure 3- 3 : Etapes du moulage en carapace.....	50
Figure 3- 4 : Etapes du moulage en carapace.....	52
Figure 3- 5 : Etapes de moulage en coquille .....	53
Figure 3- 6 : Mise en œuvre du moulage par centrifugation.....	54
Figure 3- 7 : Double tête de fraisage pour usiner les maquettes de voiture en résine.....	58
Figure 3- 8 : Centre de fraisage à axe vertical.....	58
Figure 3- 9 : Outil de perçage.....	59

Figure 3- 10 : Tour à commande numérique .....	59
Figure 3- 11 : Tour conventionnel.....	59
Figure 3- 12 : Diagramme choix de paramètre de coupe .....	61
<b>Chapitre 4 : Impression 3D d'une turbomachine génératrice d'énergie</b>	
Figure 4- 1 : Pièces fabriquées par impression 3D.....	63
Figure 4- 2 : Modelage par dépôt de matière fondue .....	64
Figure 4- 3 : La Stéréolithographie .....	64
Figure 4- 4 : Le frittage sélectif par laser .....	65
Figure 4- 5 : Filament d'ABS générique.....	65
Figure 4- 6 : Filament de PLA .....	66
Figure 4- 7 : Objet imprimé en résine transparente.....	66
Figure 4- 8 : Une balle en cobalt-chrome.....	66
Figure 4- 9 : Objets imprimés en céramique .....	67
Figure 4- 10 : Schéma de processus d'impression 3D .....	68
Figure 4- 11 : Vue d'ensemble de la fenêtre du logiciel Repetier-host.....	70
Figure 4- 12 : Interface logiciel slicer .....	71
Figure 4- 13 : La roue sous logiciel Repetier-host.....	72
Figure 4- 14 : Les statistiques d'impression de la roue.....	72
Figure 4- 15 : Couche numéro 7 de la roue.....	73
Figure 4- 16 : Couche numéro 13 de la roue.....	73
Figure 4- 17 : Couche numéro 22 de la roue.....	74
Figure 4- 18 : Couche numéro 38 de la roue.....	74
Figure 4- 19 : Couche numéro 74 de la roue.....	75
Figure 4- 20 : Roue près à imprimer .....	75
Figure 4- 21 : La volute sous logiciel Repetier-host .....	76
Figure 4- 22 : Les statistiques d'impression de la volute.....	76

Figure 4- 23 : Couche numéro 67 de la volute .....	77
Figure 4- 24 : Couche numéro 89 de la volute .....	77
Figure 4- 25 : Couche numéro 119 de la volute .....	78
Figure 4- 26 : Couche numéro 174 de la volute .....	78
Figure 4- 27 : Couche numéro 197 de la volute .....	79
Figure 4- 28 : Volute près à imprimer .....	79

## **Chapitre 5 : Réalisation d'une turbomachine génératrice d'énergie par usinage**

Figure 5- 1 : Le logo du logiciel.....	80
Figure 5- 2 : Interface logiciel Stratoconcept PRO .....	80
Figure 5- 3 : Structure de sauvegarde des pièces .....	81
Figure 5- 4 : Aperçu 3D .....	82
Figure 5- 5 : visualisation de la pièce avec analyse des dépouilles.....	82
Figure 5- 6 : Plans de tranchage .....	83
Figure 5- 7 : Tranche normale/ Tranche exidée .....	83
Figure 5- 8 : Tranche décomposée .....	84
Figure 5- 9 : Choix de la précision du prototype.....	85
Figure 5- 10 : Retournement et usinage resto .....	85
Figure 5- 11 : Outil choisis dans la base de données .....	86
Figure 5- 12 : Parcours d'outil .....	86
Figure 5- 13 : Optimisation de la matière.....	87
Figure 5- 14 : Machine de conception.....	88
Figure 5- 15 : Réglage de la machine.....	89
Figure 5- 16 : Collage du contre-plaqué sur le plateau martyr.....	89
Figure 5- 17 : Couverture de l'outil .....	89
Figure 5- 18 : Parcours de l'outil sur la machine .....	90
Figure 5- 19 : Aspiration des copeaux et de la poussière.....	90

Figure 5- 20 : Usinage de la volute .....	91
Figure 5- 21 : Usinage de la roue .....	91
Figure 5- 22 : L'usinage de la première tranche de la volute.....	91
Figure 5- 23 : L'usinage de la deuxième tranche de la volute .....	91
Figure 5- 24 : L'usinage de la troisième tranche de la volute .....	91
Figure 5- 25 : L'usinage de la quatrième tranche de la volute.....	91
Figure 5- 26 : L'usinage de la jonction entre la volute et la conduite de refoulement.....	92
Figure 5- 27 : Le corps de la volute usinée .....	92
Figure 5- 28 : L'usinage de la première tranche de la roue.....	93
Figure 5- 29 : L'usinage de la deuxième tranche de la roue .....	93
Figure 5- 30 : Le collage des deux tranches donne le flasque arrière .....	93
Figure 5- 31 : L'usinage de la tranche des aubes de la roue .....	94
Figure 5- 32 : L'usinage de la dernière tranche de la roue.....	94
Figure 5- 33: Le collage de la roue.....	94
Figure 5- 34 : La roue usinée .....	95
Figure 5- 35 : La turbomachine usinée.....	95

## Liste des tableaux

### Chapitre 1 : Eléments de construction hydrauliques d'une turbomachine

Tableau 1- 1 : Tolérances pour clavettes.....	12
Tableau 1- 2 : Tableau des diamètres de l'écrou H normalisés.....	13
Tableau 1- 3 : Tolérances pour écrous borgnes.....	14
Tableau 1- 4 : Perte par fuite en pour cent du débit nominal à différentes vitesses ; pompe de 76 mm, $n_s= 21.2$ , $D_s= 257$ mm, diamètre de l'anneau= 105 mm.....	22

### Chapitre 3 : Modes de fabrication traditionnels d'une turbomachine

Tableau 3- 1: Composition et propriétés des sables de moulage .....	49
Tableau 3- 2 : Catégories de procédés de moulage.....	55
Tableau 3- 3 : Paramètres de coupe « Tournage » .....	60
Tableau 3- 4 : Paramètres de coupe « Fraisage ».....	60
Tableau 3- 5 : Comparaison des procédés de fabrication.....	62

### Chapitre 5 : Réalisation d'une turbomachine génératrice d'énergie par usinage

Tableau 5- 1 : Résultats de la similitude .....	97
---	----

## Liste des symboles

### Lettres latines

Symbole	Nom	Unité
$D_e$	Diamètre de l'ouïe	$m$
$D_{ref}$	Diamètre de la conduite de refoulement	$m$
$D$	Diamètre de la roue	$m$
$d_0$	Diamètre de l'arbre sans contraintes admissibles	$m$
$d_e$	Diamètre du moyeu	$m$
$d$	Diamètre de l'arbre	$m$
$G$	Module d'élasticité transversal	$N.m^{-2}$
$g$	Accélération de la pesanteur	$m.s^{-2}$
$H_\varphi$	Hauteur de tracé de la forme de la volute	$m.C.E$
$H$	Hauteur manométrique	$m.C.E$
$I_0$	Moment quadratique polaire	$m^4$
$K_{ts}$	Coefficient de concentration de contraintes	-
$L$	Longueur	$m$
$l$	Largeur	$m$
$M_T$	Moment de torsion	$N.m$
$N$	Nombre d'aube	-
$n$	Nombre de tours	$min^{-1}$
$P$	Puissance	$W$
$Q_c$	Débit de construction de la volute	$m^3.s^{-1}$
$Q$	débit	$m^3.s^{-1}$
$R, r$	Rayon	$m$
$S$	Surface	$m^2$
$s$	Epaisseur de l'aube	$m$

### Lettres grecques

Symbole	Nom	Unité
$\alpha_x$	Angle de torsion	-
$\beta$	Angle de la vitesse relative (d'aube)	[°]
$\eta$	Rendement globale	-
$\rho$	Masse volumique	$Kg.m^{-3}$
$\sigma$	Contrainte normale	$N.m^{-2}$
$\tau$	Contrainte tangentielle	$N.m^{-2}$
$\varphi$	Angle de tracé de la forme de la volute	[°]
$\theta_i$	Angle de tracé de la forme d'aube	[°]
$\theta$	Angle unitaire de torsion	$mm^{-1}$

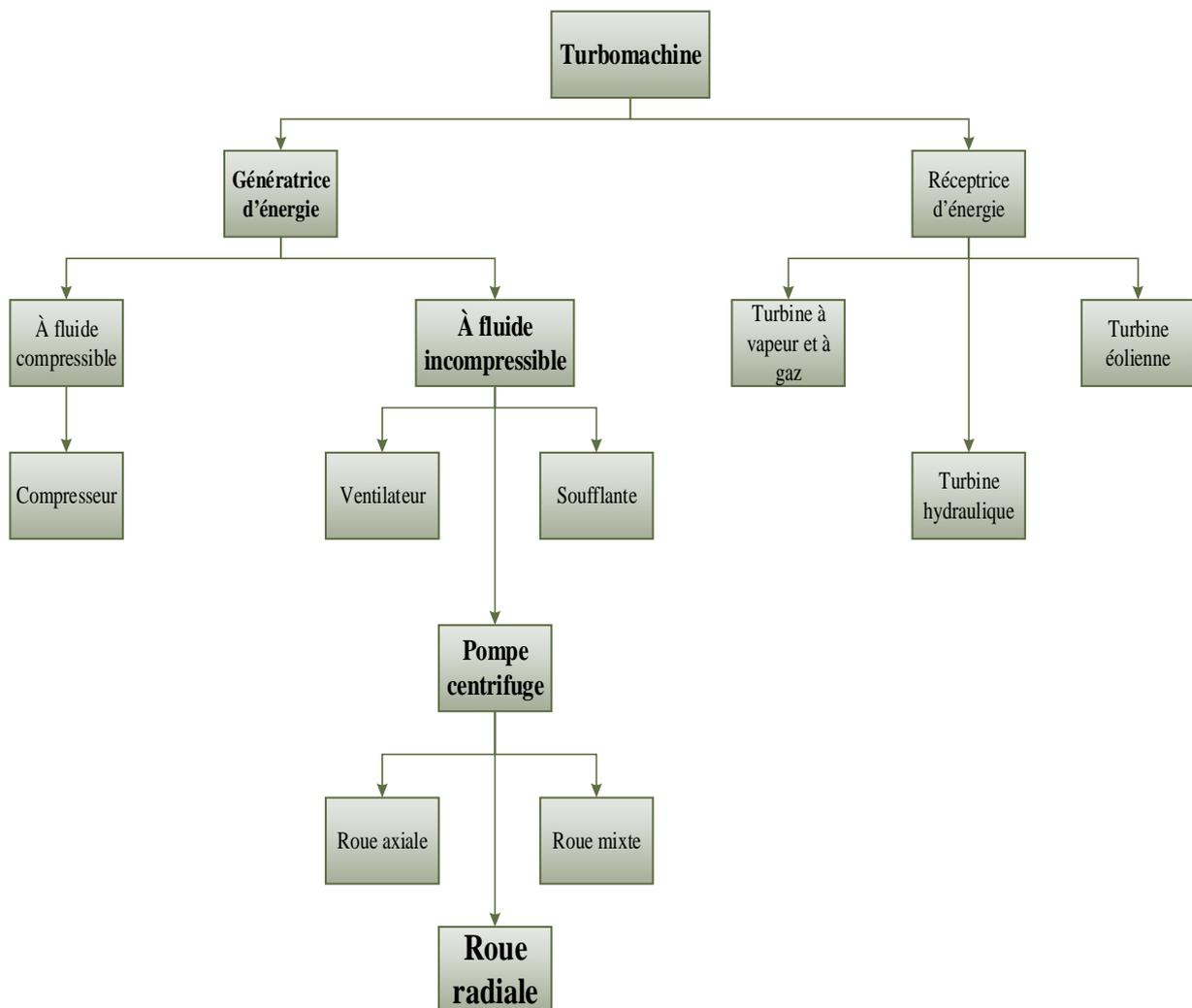
### Indices

Symboles	Désignation
1	Entrée de la roue
2	Sortie de la roue
3	volute
$\varphi$	Tracé spirale
adm	admissible

# **INTRODUCTION**

## I. INTRODUCTION

La turbomachine est un ensemble mécanique de révolution comportant une ou plusieurs roues mobiles munies d'aubes qui ménagent entre elles des canaux à travers lesquels le fluide s'écoule. L'échange d'énergie s'effectue dans la roue et résulte du travail des forces aérodynamiques sur les aubes produites par un écoulement du fluide autour de celles-ci, et qui résultent principalement de la différence de pression entre les deux faces des aubes. Un premier classement des turbomachines est fait à partir du sens de l'échange d'énergie. Il est à distinguer les machines génératrice qui reçoivent du travail et les machines réceptrices qui en fournissent. Parmi les machines génératrice, il y a les pompes roto-dynamiques, les ventilateurs, les compresseurs et les soufflantes. Les principales machines motrices sont les turbines à vapeur, les turbines à gaz, les turbines hydrauliques, ainsi que les turbines éoliennes comme représenté sur la figure ci-dessous.



**Organigramme des turbomachines**

Pour la réalisation d'un produit manufacturé peu importe leur utilité, il faut passer par une chaîne de production, de la matière première jusqu'à la mise sur le marché et la fabrication des turbomachines passe aussi par ces étapes de la production.

Dans ce mémoire, on va parler de la phase de la réalisation qui est considéré comme l'étape finale de notre Processus de fabrication d'une turbomachine génératrice d'énergie.

Ce travail explore les procédés de fabrication traditionnels comme : l'usinage et le moulage, et parle même de la nouvelle technique de la réalisation des objets qui est l'impression 3D.

Vu le manque des moyens au sein de l'école nationale polytechnique et des problèmes rencontrés lors de la réalisation (imprimante 3D en panne), on a été dans l'obligation de réaliser juste un prototype des deux principales pièces (la roue et la volute) avec un usinage en bois.

## II. METHODOLOGIE

Cette thèse de master se compose de cinq (5) chapitres, chaque chapitre traite d'une partie spécifique nécessaire ou complémentaire pour les autres chapitres. On commence par :

- Le premier chapitre, explore chacune des éléments de construction d'une turbomachine génératrice d'énergie à fluide incompressible (la roue, l'arbre, la volute, ...) ainsi que les pièces d'assemblage (écrou et clavette).
- Dans le deuxième chapitre, on exploite les résultats de l'exécution de l'outil de calcul pour la conception sur logiciel SolidWorks des éléments de construction d'une turbomachine génératrice d'énergie à fluide incompressible.
- Dans le troisième chapitre, on parle des modes traditionnels de fabrication des pièces: le moulage.
- Le quatrième chapitre se focalise sur la nouvelle technologie qui est l'impression 3D, en montrant des images des pièces sur le logiciel d'impression.
- Le cinquième et dernier chapitre décrit la phase de la réalisation des prototypes des pièces (roue et volute) par usinage en bois.

# **Chapitre 1**

**Eléments de construction  
hydrauliques d'une turbomachine**

## Introduction

Afin de compléter la description des pompes, nous détaillons ci-après les différents organes constitutifs et les principes de base de fonctionnement de ceux-ci.

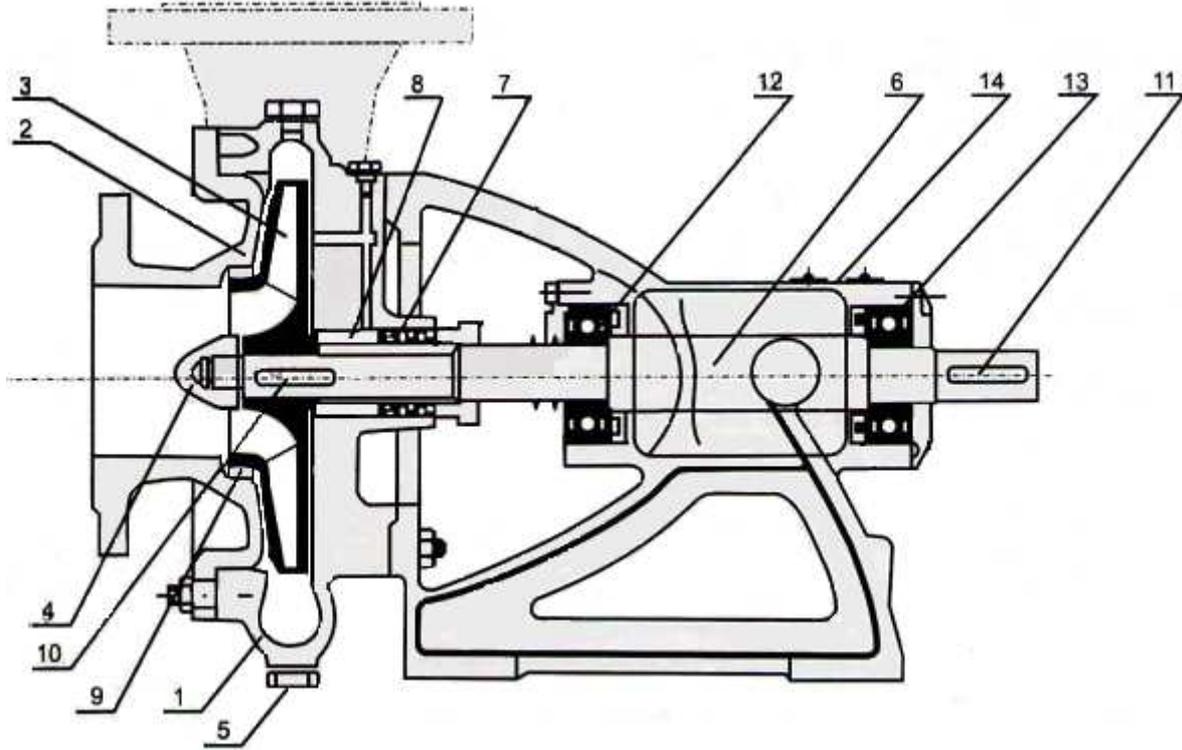


Figure 1- 1 : Pompe centrifuge

### NOMENCLATURE

- |                            |                       |
|----------------------------|-----------------------|
| 1- volute                  | 8- Bague fixe         |
| 2- Corps avant de la pompe | 9- Bague d'étanchéité |
| 3- Roue                    | 10- Clavette          |
| 4- Ecrou de blocage        | 11- Clavette          |
| 5- Bouchon de vidange      | 12- Roulement         |
| 6- Arbre                   | 13- Roulement         |
| 7- Presse-étoupe           | 14- Corps de palier   |

### I. Arbre

#### 1. Définition

Un arbre est un organe mécanique transmettant une puissance sous forme d'un couple permettant d'obtenir un mouvement de rotation. La forme cylindrique de cet organe est à l'origine de son nom.

Les arbres de machines sont généralement issus de bruts forgés puis usinés par tournage. L'extrusion est également un mode d'obtention courant pour ce type de pièce. Ils sont très rarement issus de bruts moulés, pour des raisons de résistance mécanique.

L'arbre supporte généralement des engrenages, poulies, volants, manivelles, pignons de chaînes ou autres éléments qui transmettent une position angulaire ou une puissance. Il est donc l'un des éléments mécaniques les plus fréquemment utilisés.

Selon sa géométrie et ses fonctions, un arbre peut porter différentes qualifications telles que :

- arbre de transmission, s'il transmet une puissance d'un moteur à une machine ou à un élément de machine ;
- arbre de renvoi, s'il distribue un mouvement de rotation entre différents éléments ;

La contrainte de torsion est la sollicitation principale auquel est soumis un arbre. Ce type de sollicitation implique que les contraintes maximales soient à la surface de la pièce. La qualité de cette surface (rugosité) est donc un paramètre essentiel pour la tenue d'un arbre.

Suivant le rôle qui lui est dévolu, l'arbre peut être également soumis à des contraintes de flexion et de charge axiale. Dans ces cas, les efforts mécaniques au sein de la matière sont souvent variables, à la manière d'une sinusoïde. Cela implique alors une résistance nécessaire à la fatigue.

Un arbre est maintenu par des paliers, qui permettent sa rotation ou empêchent son déplacement axial (butée). (wikipedia, s.d.)

#### 2. Contrainte sur l'arbre

Les forces intérieures en général ont des supports disposée d'une manière quelconque par rapport au plan de la section  $S$ , pour étudier les forces intérieures, est-il plus commode de les projeter sur un axe perpendiculaire au plan de section, et sur le plan de section, puis d'étudier les projections normales et tangentielles  $f_n$  et  $f_t$  ainsi obtenues. Sur chaque élément  $\Delta s$  de la section  $S$  agissent 2 forces intérieures : la force normale  $f_n$  et la force tangentielle  $f_t$ . On appelle contrainte normale en un point A le quotient de la force intérieure normale  $f_n$  par l'étendue de la surface  $\Delta s$ , très petite, qui entoure ce point.

$$\text{On écrit : } \sigma = \frac{f_n}{\Delta s}$$

$\sigma$  : contrainte normale.

On appelle contrainte tangentielle en un point le quotient de la force intérieure normale  $f_t$  par l'étendue de la surface  $\Delta s$ .

On écrit :  $\tau = \frac{f_t}{\Delta s}$

$\tau$  : contrainte tangentielle.

En générale les forces sont exprimées en daN, les forces en mm<sup>2</sup> ou en cm<sup>2</sup> ; par suite les contraintes s'expriment en daN/mm<sup>2</sup> ou en daN/cm<sup>2</sup>. L'un des objets essentiels de la résistance des matériaux est la détermination des contraintes. (GIET)

### 3. Moment quadratique polaire

Par définition  $I_0 = \sum \Delta s \cdot \rho^2$

Relation entre les moments quadratiques par rapport à deux axes rectangulaires et le moment quadratique polaire par rapport au point de rencontre de ces axes.

Or :  $\rho^2 = x^2 + y^2$

$$I_0 = \sum \Delta s (x^2 + y^2) = \sum \Delta s x^2 + \sum \Delta s y^2 \quad (1-1)$$

$$I_0 = I_y + I_x$$

La figure 2-5 donne la valeur du moment quadratique par rapport à un diamètre :

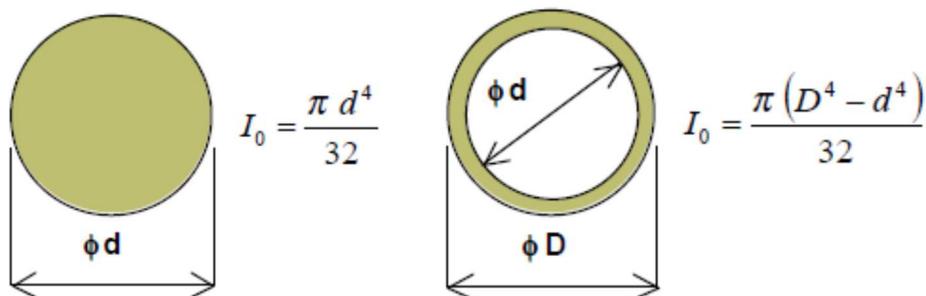


Figure 1- 2 : Moment quadratique d'une forme circulaire

$$I_x = \frac{\pi d^4}{64} \quad \text{et} \quad I_y = \frac{\pi d^4}{64}$$

$$I_0 = I_y + I_x = \frac{\pi d^4}{32} \approx 0.1 d^4 \quad (1-2)$$

### 4. Déformations sur l'arbre

#### a. Torsion

Soit une poutre de section circulaire constante ou lentement variable, et de ligne moyenne (son axe) rectiligne, soumise à deux coupes égales et opposés agissant dans 2 sections distinctes. On dit que cette poutre est sollicitée en torsion simple. Au cours de la torsion, une génératrice primitivement rectiligne, se déforme et devient un arc d'hélice.

Exemple : les arbres de transmission sont toujours sollicités à la torsion. La torsion peut intéresser toute la longueur ou une partie de l'arbre. La torsion des poutres non circulaires ne peut être étudiée qu'avec la théorie de l'élasticité.

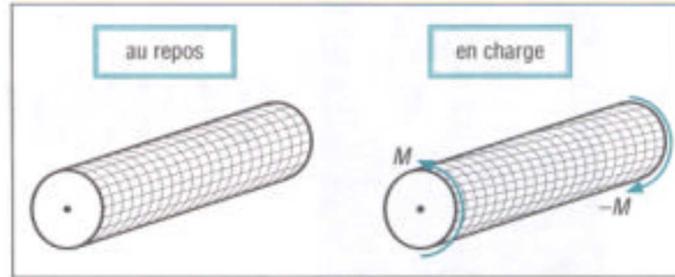


Figure 1- 3 : Arbre mis à la torsion

En torsion, et dans le cas des petites déformations, les contraintes normales  $\sigma$  sont négligeables. Les contraintes dans la coupure (S) se réduisent à des contraintes tangentielles ou de cisaillement  $\tau$ . A partir de la relation :

$$\tau = G \theta r \quad (1- 3)$$

avec

$\tau$ : contrainte tangentielle(MPa)

$\theta$ : angle unitaire de torsion (rad.mm-1)

$G$ : module d'élasticité transversal (MPa)

$r$ : rayon GM (mm)

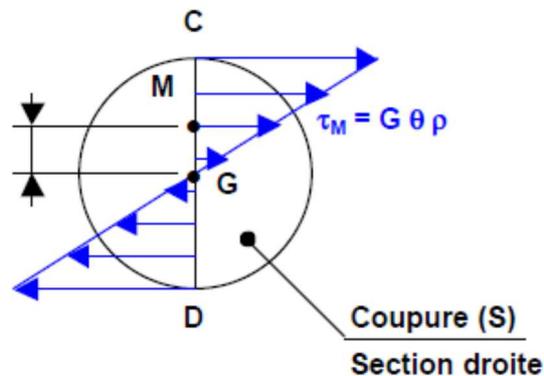
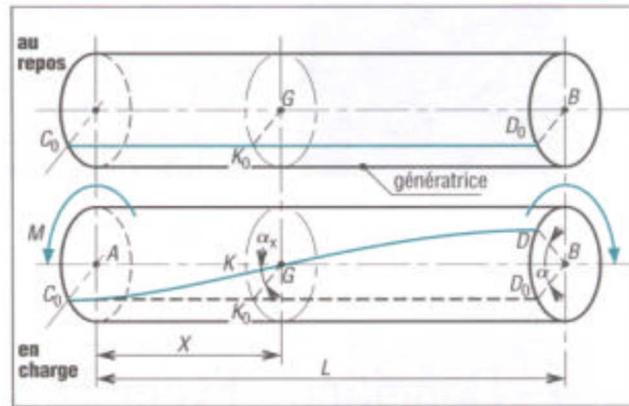


Figure 1- 4 : Coupure d'une section droite d'un arbre mis à la torsion

### b. Angle unitaire de torsion

#### Constatations expérimentales

Les sections droites avant déformation restent droites après déformation (planes et perpendiculaires à la ligne moyenne).



**Figure 1- 5 : Angle de torsion**

Les fibres ou génératrices initialement parallèles à la ligne moyenne s'enroulent suivant des hélices autour de cet axe. La longueur des fibres restent sensiblement invariable ou constante (hypothèse des petites déformations).

Les sections droites tournent ou glissent en bloc les unes par rapport aux autres (rotations d'axe la ligne moyenne). Les rayons GK restent droits dans le domaine élastique, mais s'incurvent dans le domaine plastique.

$\alpha_x = \text{angle } (GK_0, GK) = \text{angle de torsion entre les sections droites A et G}$

$\alpha = \text{angle } (BD_0, BD) = \text{angle de torsion de la poutre.}$

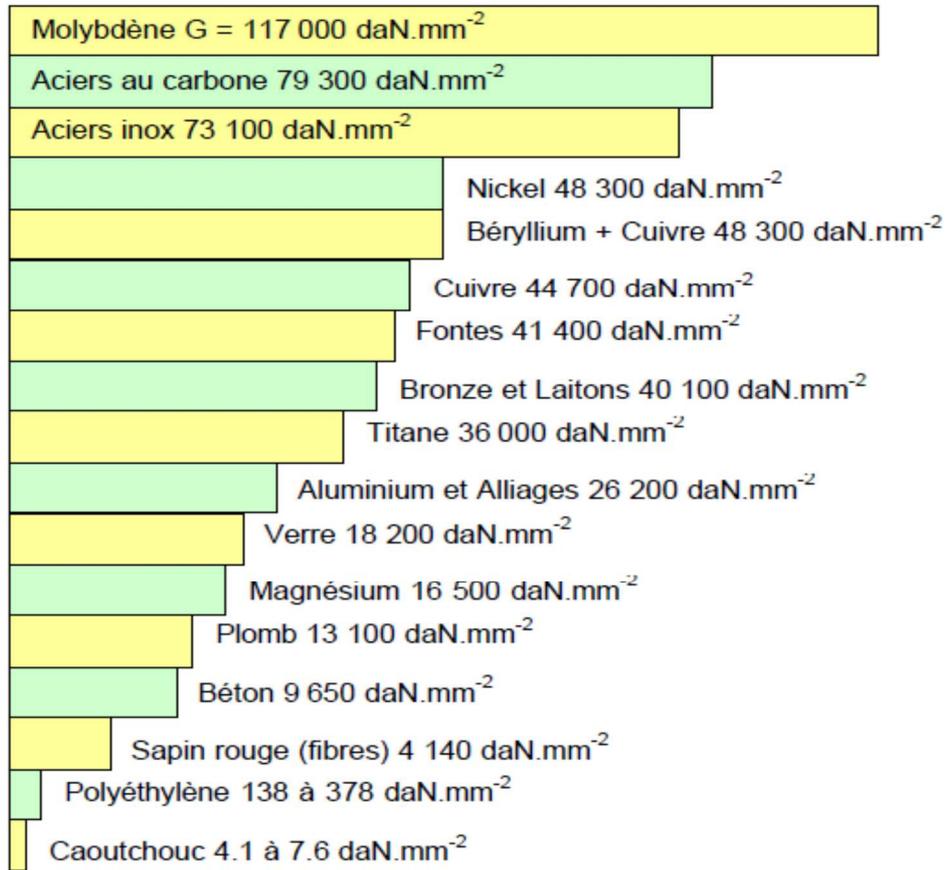
### Angle unitaire de torsion

Si on suppose que les sections droites tournent toutes entre elles de la même façon, alors l'angle de torsion entre deux sections droites quelconques est proportionnel à la distance entre celles-ci. Autrement dit :

$$\theta = \frac{\alpha}{L} = \frac{\alpha_x}{X} : \text{angle unitaire de torsion}$$

**c. Module d'élasticité transversal**

Le module d'élasticité transversal dépend du type des matériaux de construction de l'arbre, voici nous avons les valeurs de G des différents matériaux :



**Figure 1- 6 : Module d'élasticité transversal en fonction des matériaux**

**d. Moment de torsion**

Le moment de torsion  $M_T$  est égal au moment résultant en G (figure 2-7) de toutes les forces élémentaires  $\Delta f$  de la section (S).

$$M_T = \sum_{(S)} M_G(\overline{\Delta f}) = \sum_{(S)} \Delta f \cdot \rho = \sum_{(S)} \tau \rho \Delta S = \sum_{(S)} G \theta \rho^2 \Delta S$$

$$M_T = G \theta \sum_{(S)} \rho^2 \Delta S = G \theta \int_{(S)} \rho^2 \Delta S \tag{1-4}$$

$$M_T = G \theta I_0$$

Le terme  $\int_{(S)} \rho^2 \Delta S = I_0$  est le moment polaire de la section (S) par rapport au point G.

A partir des relations  $\tau = G \theta r$  et  $M_T = G \theta I_0$  on peut écrire :

$$G \theta = \frac{\tau}{r} = \frac{M_T}{I_0} \tag{1-5}$$

On obtient ainsi :

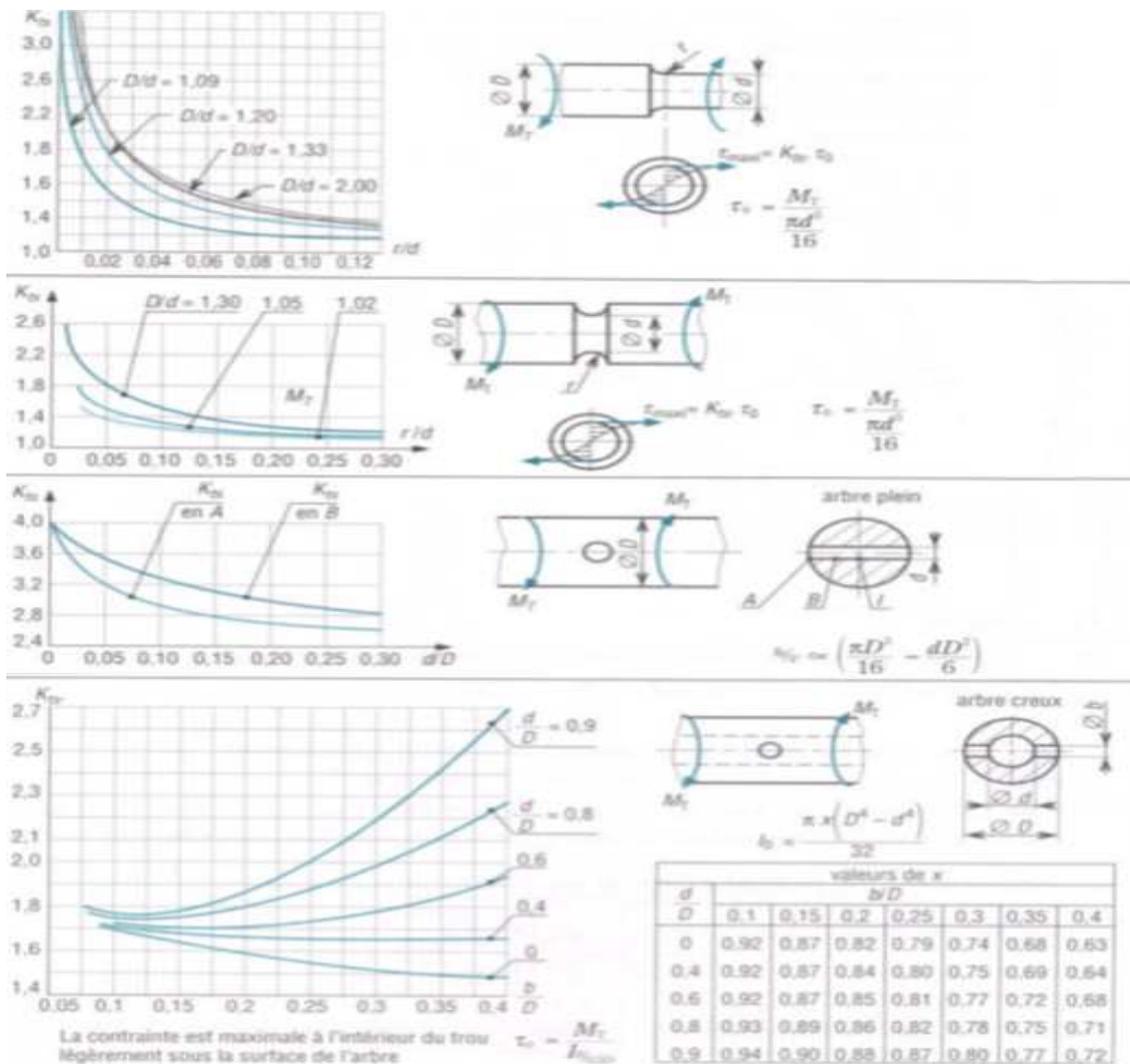
$$\tau = \frac{M_T}{I_0} r \tag{1-6}$$

**e. Concentration de contraintes**

Lorsque les arbres étudiés présentent de brusques variations de section (gorge, épaulement, trou de perçage...), les relations précédentes ne sont plus applicables. Au voisinage du changement de section, la répartition des contraintes est modifiée,  $\tau_{max}$  est supérieure à  $\tau_0$  calculée : on dit alors qu'il y a concentration de contraintes.

Avec  $K_{ts}$  est le coefficient de concentration de contraintes (c'est un facteur adimensionnelle supérieur à 1):

$$\tau_{max} = K_{ts} \cdot \tau_0 \tag{1-7}$$



**Figure 1- 7 : Coefficient de concentration de contraintes  $K_{ts}$  en torsion sur des arbres de section variable**

### II. Mode d'assemblage

On distingue alors différents types d'assemblage, un assemblage peut être permanent ou démontable, direct ou indirect.

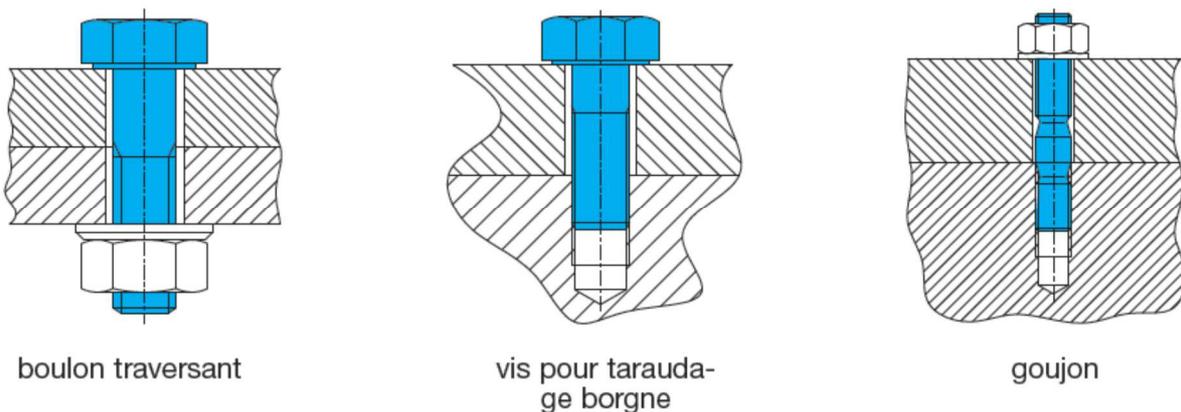
Ce que nous intéresse dans notre étude, l'assemblage indirect.

#### 1. Assemblage indirect

Une ou plusieurs pièces intermédiaires sont utilisées.

- Collage
- Agrafage
- Anneau élastique
- Bague de tolérance
- Clavette
- Clou
- Embrèvement (avec tenon, mortaise et cheville)
- Goupille
- Rivet
- Éclisse
- Visserie : vis, écrou, boulon, goujon, filetage, taraudage :

Les assemblages vissés sont constitués par des boulons (vis traversantes avec écrous), des vis pour taraudage borgne ou non ou par des goujons.



**Figure 1- 8 : Assemblages vissés**

Les vis pour taraudage assemblent deux éléments en traversant le premier et en pénétrant le deuxième par un taraudage.

Sur les goujons, la tête de la vis est simplement remplacée par un écrou.

### 2. Mode d'accouplement arbre-moyeu

En mécanique, un accouplement est un dispositif de liaison entre un élément (moteur, pompe) et un arbre en rotation, permettant la transmission du couple.

Il permet éventuellement un certain désalignement (accouplement élastique, joint de cardan...), autorise des décalages angulaires (accouplement hydraulique...) et peut être temporairement inactif (embrayage, crabotage).

Un accouplement mécanique peut être un accouplement élastique, un accouplement à membranes, un accouplement à denture métallique ou encore un accouplement à soufflet.

Les accouplements mécaniques sont utilisés dans l'industrie pour des applications variées, voici les utilisations les plus communes :

- pour entraîner en rotation un élément récepteur à partir d'un élément moteur ;
- pour réaliser un raccordement rapide entre deux éléments d'un système (par exemple entre un moteur et une pompe) et pouvoir effectuer facilement des travaux d'entretien sur ces éléments ;
- pour pallier un désalignement axial, radial ou angulaire ;
- pour ajouter plus de flexibilité dans le système ;
- pour amortir les vibrations ;
- pour ajouter une protection contre les pics de couple.

#### a. Clavette

En mécanique, une clavette (étymologiquement une petite clé) est une pièce qui a pour fonction de lier en rotation deux pièces (liaison de moyeux). En complément, elle peut être dimensionnée pour se rompre par cisaillement lorsque le couple transmis est trop important.

#### Type de clavettes

Il existe cinq grandes familles de clavettes :

- clavettes parallèles
- clavettes parallèles fixées par vis
- clavettes disques
- clavettes tangentielles
- clavettes inclinées (à encastrer, à chasser ou à talon)
- clavette à talon

#### Clavettes parallèles

Elles sont utilisées lorsque le diamètre  $d$  de l'arbre est proche de la longueur  $l$  de la clavette ( $l < 1,5d$ ). Il existe trois formes de clavettes parallèles :

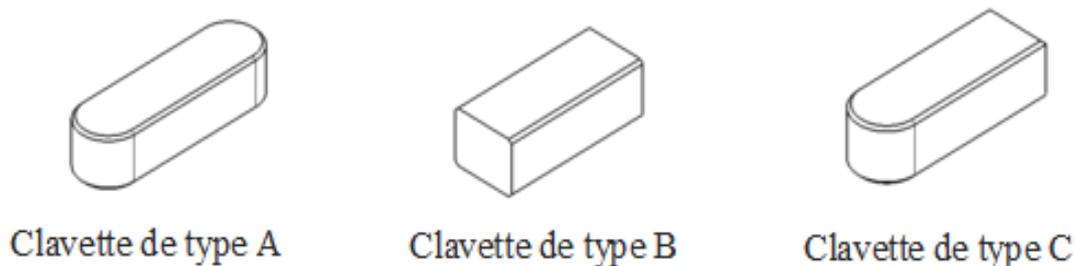


Figure 1- 9 : Types de clavette

Le tableau (2-2) permet de choisir le coefficient de concentration de la contrainte de torsion sur l'arbre, donc nous avons choisi  $K_{ts} = 3.4$  pour  $r = 0.2 s$  avec  $s = d - j$

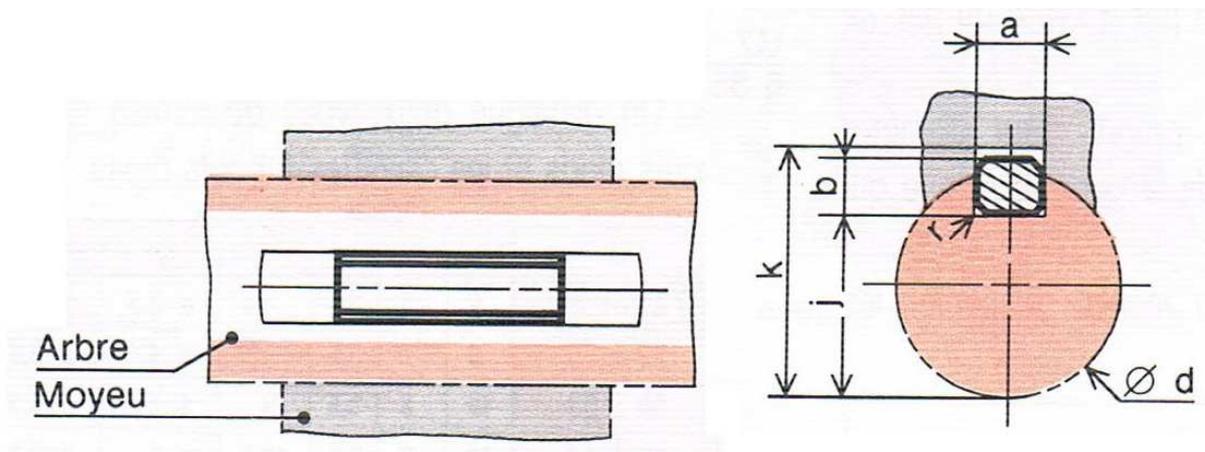


Figure 1- 10 : Profil de position de la clavette

On détermine les dimensions de la clavette après la détermination du diamètre de l'arbre comme ce tableau indique :

Tableau 1- 1 : Tolérances pour clavettes

d	a	b	$s_{min}$	j	k	d	a	b	$s_{min}$	j	k
de 6 à 8 inclus	2	2	0,16	$d - 1,2$	$d + 1$	58 à 65	18	11	0,6	$d - 7$	$d + 4,4$
8 à 10	3	3	0,16	$d - 1,8$	$d + 1,4$	65 à 75	20	12	0,6	$d - 7,5$	$d + 4,9$
10 à 12	4	4	0,16	$d - 2,5$	$d + 1,8$	75 à 85	22	14	1	$d - 9$	$d + 5,4$
12 à 17	5	5	0,25	$d - 3$	$d + 2,3$	85 à 95	25	14	1	$d - 9$	$d + 5,4$
17 à 22	6	6	0,25	$d - 3,5$	$d + 2,8$	95 à 110	28	16	1	$d - 10$	$d + 6,4$
22 à 30	8	7	0,25	$d - 4$	$d + 3,3$	110 à 130	32	18	1	$d - 11$	$d + 7,4$
30 à 38	10	8	0,4	$d - 5$	$d + 3,3$	130 à 150	36	20	1,6	$d - 12$	$d + 8,4$
38 à 44	12	8	0,4	$d - 5$	$d + 3,3$	150 à 170	40	22	1,6	$d - 13$	$d + 9,4$
44 à 50	14	9	0,4	$d - 5,5$	$d + 3,8$	170 à 200	45	25	1,6	$d - 15$	$d + 10,4$
50 à 58	16	10	0,6	$d - 6$	$d + 4,3$	200 à 230	50	28	1,6	$d - 17$	$d + 11,4$

### b. Écrou

Un écrou est un composant élémentaire d'un système vis/écrou destiné à l'assemblage de pièces ou à la transformation de mouvement.

Comme pièce d'assemblage mécanique élémentaire, il s'agit d'un organe indépendant comportant un trou taraudé en son centre (c'est-à-dire un trou dans lequel est gravé un filet) qui, vissé sur une vis (ou sur toute tige filetée dont le diamètre et le pas de vis correspondent), constitue un des deux éléments d'une liaison par obstacle.

### Types d'écrou d'assemblage

Les principaux modèles d'écrous normalisés : (1) écrou hexagonal normal, (2) écrou hauteur réduite dit contre-écrou, (3) écrou borgne, (4) écrou double, (5) écrou à frein Nylstop, (6) écrou carré, (7) écrou à embase, (8) écrou à oreilles, (9) écrou fendu, (10) écrou à créneaux.

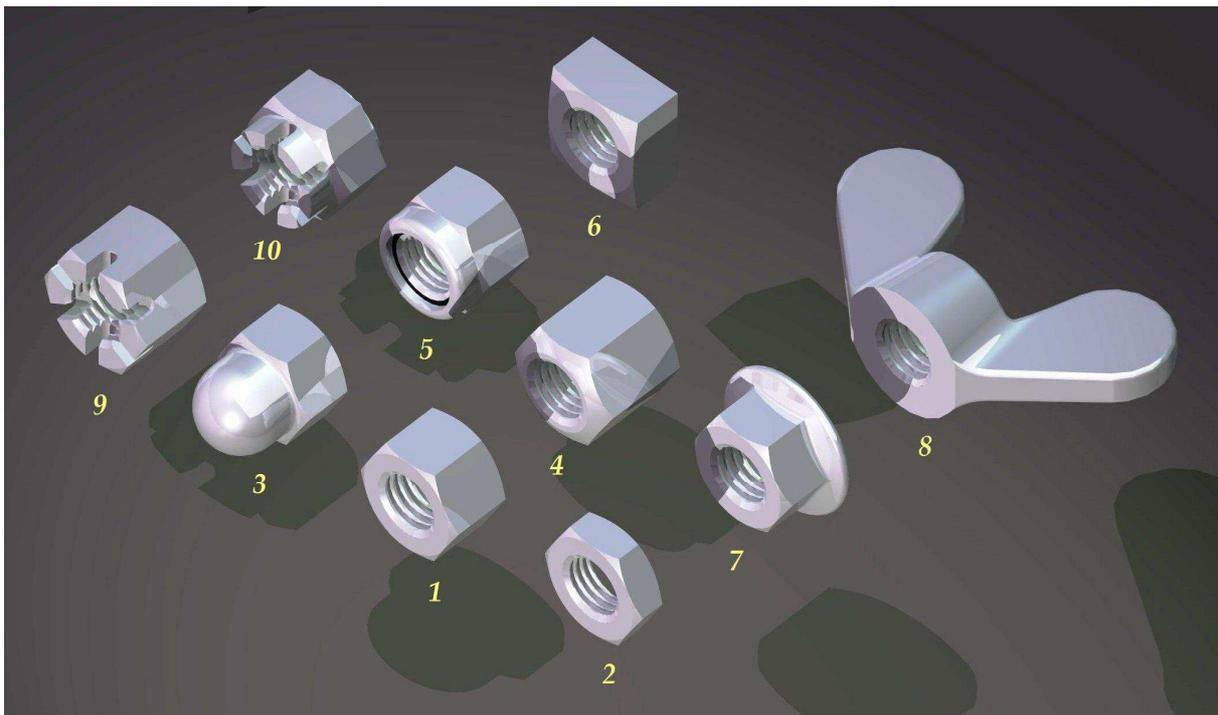


Figure 1- 11 : Types d'écrou

### Écrou hexagonal

Les écrous H (hexagonaux ou à six faces) sont de loin les plus courants. Il existe de nombreuses dimensions d'écrous, caractérisées par :

- le diamètre du trou central ;
- le pas de vis ;
- la distance entre deux faces opposées.

Tableau 1- 2 : Tableau des diamètres de l'écrou H normalisés

Ø d nominal (H)	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M10	M12	M14	M16
taille de la clé	5.5	7	8	10	11/12	13/14	15/17	17/19	19/22	21/24

On a choisi un écrou borgne car son avantage est de protéger l'extrémité des vis contre les chocs et améliorer l'esthétique.

Tableau 1- 3 : Tolérances pour écrous borgnes

d	a	H	h	d	a	H	h	d	a	H	h
M 3	5,5	5,1	2,4	M10	16	16,5	8	M24	36	37	19
M 4	7	6,7	3,2	M12	18	19,5	10	M30	46	47	24
M 5	8	8	4	(M14)	21	22	11	M36	55	56	29
M 6	10	10	5	M16	24	25	13	M42	65	66	34
M 8	13	13	6,5	M20	30	31	16	M48	75	75	38

Et le tableau ci-dessus est pour le dimensionnement des écrous à partir de la connaissance du diamètre de filetage de l'arbre d.

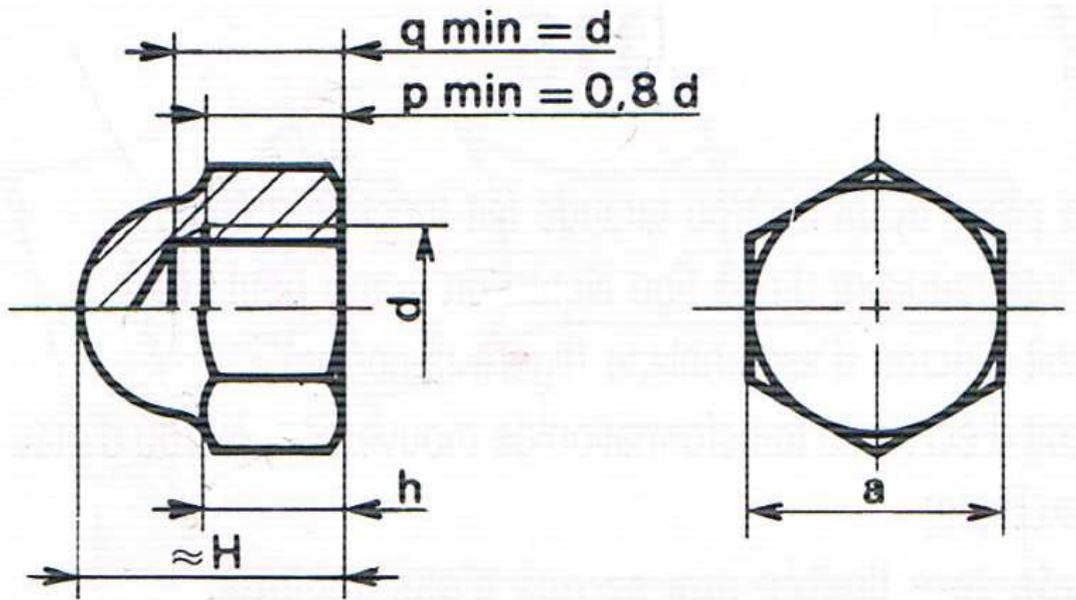


Figure 1- 12 : Profil des dimensions d'un écrou borgne

### III. Roue

La fonction de la roue est de communiquer de l'énergie au liquide qui le traverse grâce aux aubages dont il est muni. Ce transfert d'énergie s'effectue selon les lois que nous avons déjà établies au chapitre précédent et que nous détaillons dans les chapitres suivant.

#### ➤ Types de roue pour les pompes centrifuges

Les roues axiales sont plutôt utilisées pour des débits élevés et de faibles HMT. Les roues radiales génèrent des HMT plus élevées pour des débits moindres. Plusieurs roues peuvent être associées en série sur un même arbre de manière à augmenter la HMT globale de la pompe que l'on appelle pompe multicellulaire. On trouve parfois une roue double en parallèle, l'objectif étant alors d'augmenter le débit.

Les roues des pompes centrifuges sont également appelées impulseur ou hélice (selon forme)

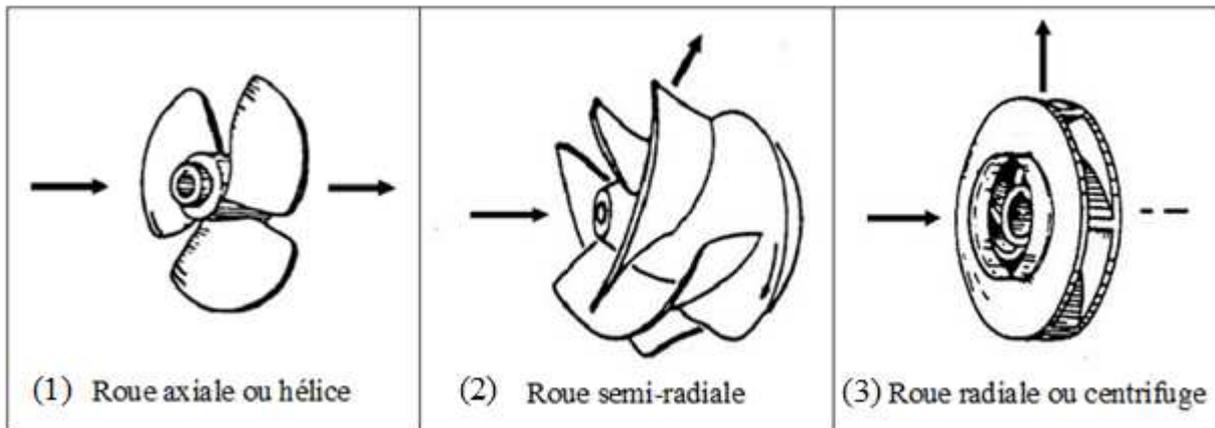


Figure 1- 13 : Type de roues selon le trajet du fluide par rapport à l'axe

Pour le troisième type il possède trois d'autres types possibles :

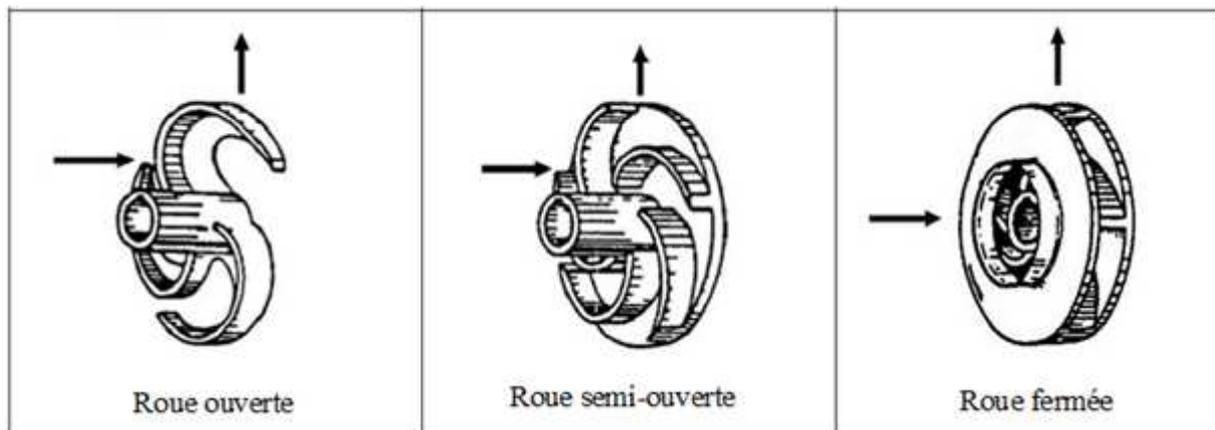


Figure 1- 14 : Type de roues radiales selon la forme des flasques

#### IV. Volute

##### 1. Corps de la volute

La volute collecte le fluide à la sortie du diffuseur ou directement à la sortie de la roue si le diffuseur n'existe pas. Sa forme est optimisée afin de transformer l'énergie cinétique résiduelle de sortie de la roue en énergie de pression et d'amener progressivement la section de passage du fluide à la section circulaire de la bride de sortie.

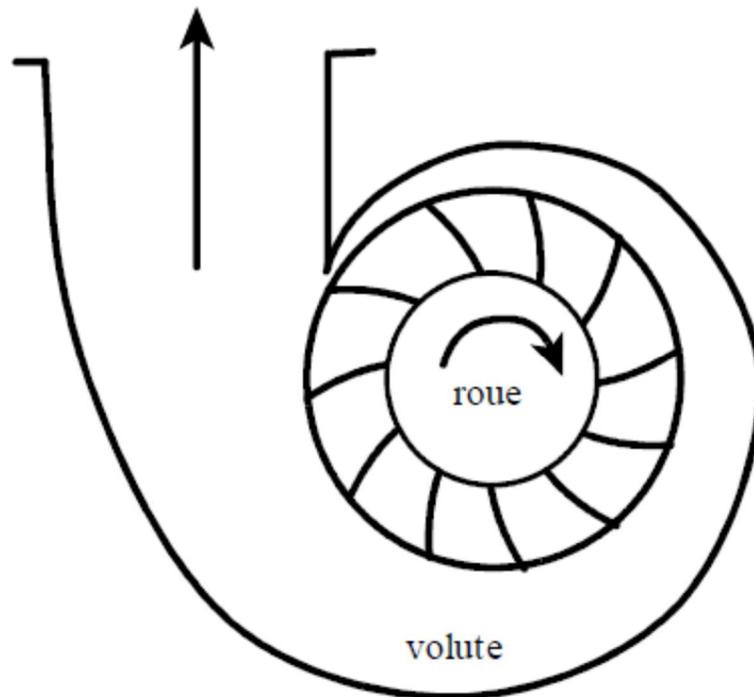


Figure 1- 15 : Volute

##### 2. Diffuseur

Situé entre la roue et la volute le diffuseur est un organe de révolution offrant au fluide des sections croissantes. Il existe des diffuseurs lisses, c'est à dire non ailettés, à parois parallèles ou divergentes et des diffuseurs ailettés. Souvent pour les pompes monocellulaires, le diffuseur est inexistant, la roue débouchant directement dans la volute.

Rôle du diffuseur sur l'écoulement : dans une machine génératrice, l'organe fixe était situé après l'organe mobile. Dans une pompe centrifuge on a alors une arrivée axiale du fluide sans perturbation soit un angle  $\alpha_1 = \pi/2$  ce qui implique que  $C_{u1} = 0$ . On peut alors tracer le diagramme des vitesses entre l'entrée (1) et la sortie (2) de l'organe mobile comme indiqué sur la figure 3-1.

On a alors  $H_{th} = \frac{c_{u2}U_2}{g}$  et  $Q_i = \pi D_1 b_1 C_{m1} = \pi D_2 b_2 C_{m2}$ . Le fluide sort donc de la roue avec une vitesse  $\vec{c} = \vec{u} + \vec{w}$ . On retrouve cette vitesse à l'entrée (2) du diffuseur où le fluide va être transformé jusqu'à la sortie (3). De par la construction des pompes centrifuges, on a toujours  $D_3 > D_2$  et  $b_3 \geq b_2$ . La conservation du débit dans la pompe permet d'écrire entre l'entrée (2) et la sortie (3) du diffuseur la relation :

$Q_i = \pi D_3 b_3 C_{m3} = \pi D_2 b_2 C_{m2}$  . On déduit alors que la vitesse de sortie  $C_{m3}$  est inférieure à la vitesse d'entrée dans le diffuseur  $C_{m2}$  . Le diffuseur a donc un rôle de réducteur de vitesse, ce qui se traduit par une augmentation de la pression du fluide.

Il y a donc à la sortie de la roue une certaine énergie cinétique disponible pour être transformée en énergie de pression, généralement plus intéressante pour l'utilisateur. Dans une pompe centrifuge, cette transformation est effectuée dans le diffuseur et la volute. Elle est régie par l'équation de l'énergie en mouvement absolu ; en supposant les pressions mesurées par rapport au même niveau de référence, la relation de Bernoulli nous donne

$$\frac{(p_3 - p_2)}{\rho g} = \frac{(C_2^2 - C_3^2)}{2g} - \Delta H_{2-3} \quad (1-8)$$

On qualifie cette transformation par un rendement de diffusion défini par :

$$\eta_d = \left[ \frac{(p_3 - p_2)}{\rho g} + \left( \frac{C_3^2}{2g} \right) \right] / \left( \frac{C_2^2}{2g} \right) = 1 - \left[ \frac{\Delta H_{2-3}}{\left( \frac{C_2^2}{2g} \right)} \right] \quad (1-9)$$

En général ce rendement est faible et ne dépasse pas 0.7.

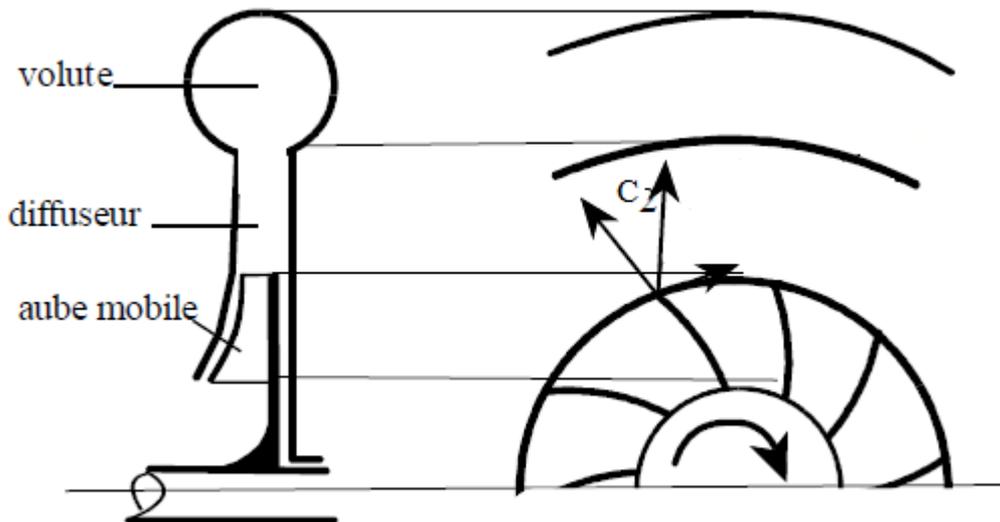


Figure 1- 16 : Diffuseur

**Remarque :**

Si le diffuseur ne comporte pas d'aubages, on aura  $r_3 C_{u3} = r_2 C_{u2}$  ce qui montre également la réduction de vitesse dans le diffuseur.

### 3. Construction de la volute

#### a. Paramètres de construction de la volute

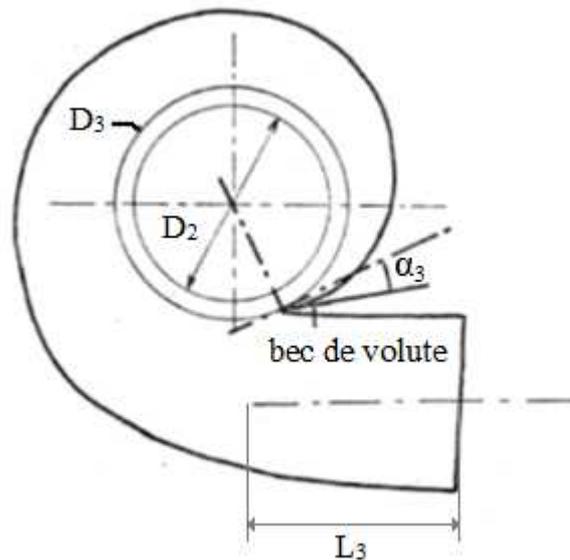


Figure 1- 17 : Paramètres de la volute

$\alpha_3$  l'angle du bec de la volute ou l'angle de divergence

$D_3$  le diamètre de son cercle de base qui conditionne le jeu radial minimum existant entre la roue mobile et la volute, ainsi que la disposition et la forme du bec de volute.

$b_3$  la largeur à l'entrée de la volute

$L_3$  la hauteur du bec de a volute

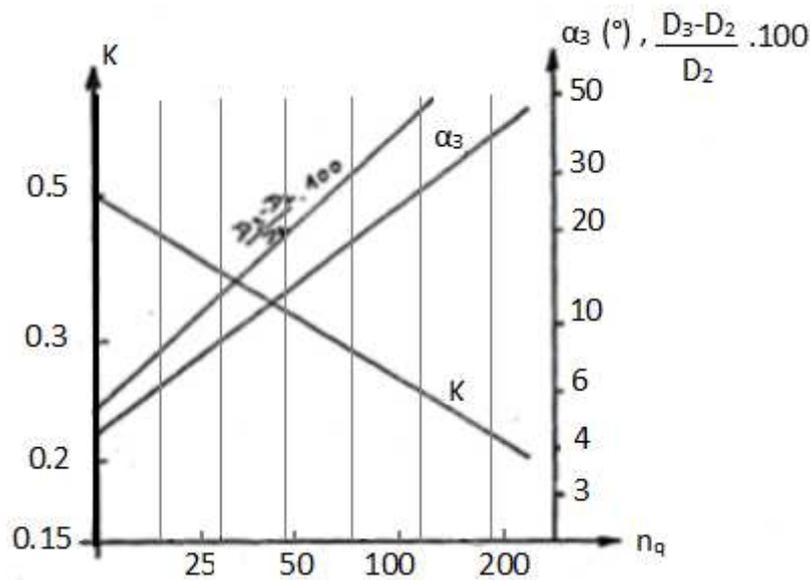
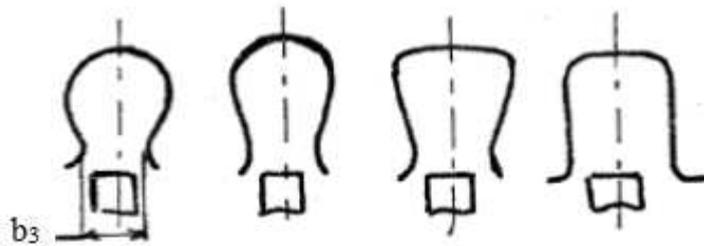


Figure 1- 18 : Constante du tracé de la volute

**b. Sections de volute**

La figure 2 - 16 nous montre que les différentes sections de volute sont traversées par une fraction du débit de la pompe, fraction dépendant de la position angulaire de la section par rapport au bec de volute.

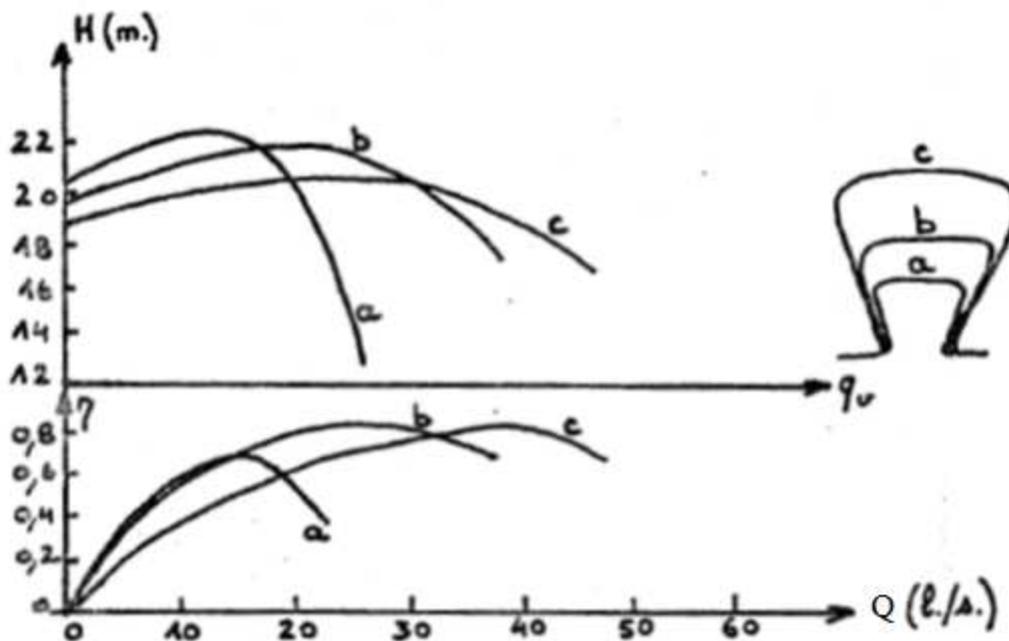


**Figure 1- 19 : Sections de volute courantes**

➤ **Influence de la taille de section**

En ce qui concerne l'adaptation d'un type de section avec une roue donnée, rappelons essentiellement les travaux de K. RUTSCHI

RUTSCKI compare tout d'abord trois volutes de sections différentes (figure 2-17), travaillant avec une même roue. Ceci permet de montrer que le point de rendement maximum dépend des dimensions choisies, ce qui ne semble pas surprenant à priori puisqu'en effet on peut considérer comme le fait R. C. WORSTER, que ce point est obtenu à l'intersection des caractéristiques  $(H, Q)$  de la roue seule et de la volute seule. Lorsqu'on passe de la section (a) à la section (b), on diminue les pertes dans la volute, ce qui donne une caractéristique  $(H, Q)$  de volute de pente moins importante et donc un point de rendement maximal décalé vers les débits plus importants.



**Figure 1- 20 : Comparaison de trois sections de volute avec la même roue**

### c. Bec de la volute

Le dernier paramètre sur lequel nous allons fixer notre attention est le bec de volute dont le rôle ne semble pas négligeable dans l'analyse du comportement de l'ensemble roue-volute.

L'influence du bec de volute peut être caractérisée globalement par les paramètres suivants :

- le jeu radial relatif au bec de volute
- la forme du bec de volute.

#### ➤ Jeu au bec de volute

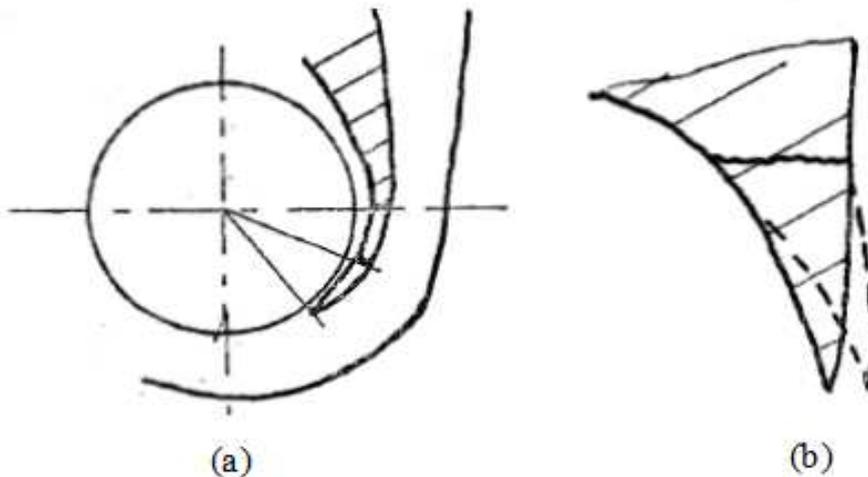
En effet, un jeu trop réduit conduit, comme nous le verrons dans notre étude expérimentale, à un fonctionnement bruyant du fait des interférences trop importantes de la roue avec la volute au voisinage du bec ; par opposition, un jeu trop important cause également une chute le rendement due à la circulation du fluide dans le passage entre le bec et la roue.

Notons cependant que ce paramètre "jeu" ne peut pas toujours être ajusté à la valeur "optimale" définie ci-dessus pour les raisons suivantes :

- il peut être éventuellement nécessaire de l'augmenter lorsque le fluide véhicule des éléments solides (risques de détérioration du bec)
- un jeu plus ou moins grand que le jeu initial peut être occasionné par un changement ou un rognage de la roue, qui sont des opérations relativement simples à effectuer pour adapter une pompe donnée à des nouvelles conditions de fonctionnement.

#### ➤ Forme du bec

Le jeu au bec peut d'ailleurs être modifié par action sur le bec lui-même, en agissant sur l'encombrement angulaire de la volute (figure 2-18(a)) ou en modifiant l'angle de volute au niveau du bec seulement (figure 2-18(b)).



**Figure 1- 21 : Modification de bec de la volute**

### Remarque

Il semble bien que le bec de volute soit un élément intéressant en ce qui concerne les possibilités d'adaptation d'une machine à un fonctionnement particulier.

En effet, les expérimentales montrent que :

- une rotation du bec de volute dans le sens d'une augmentation du jeu bec-roue permet d'augmenter la hauteur obtenue à petit débit, et de déplacer le point de rendement maximum vers les petits débits, avec cependant une légère diminution de la valeur de ce rendement maximum
- Une réduction de l'encombrement angulaire de la volute déplace le point de rendement maximum vers les petits débits ou vers les grands débits selon la valeur initiale de cet encombrement angulaire.

### V. Etanchéité

Dans une pompe centrifuge, plusieurs niveaux d'étanchéité sont nécessaires (fonction de ses caractéristiques):

- étanchéités statiques (carter, brides...) assurées par des joints fixes adaptés au produit,
- étanchéités dynamiques internes (entre volute, diffuseur et entrée de roue, pour éviter une recirculation de fluide trop importante), en général assurées par des bagues ou disques en rotation, le fluide pompé assurant un film liquide suffisant pour la lubrification et le refroidissement des parties en contact
- étanchéités dynamiques externes (arbre d'entraînement de la roue en rotation), assurées par tresses ou garnitures mécaniques

L'étanchéité la plus délicate est sans aucun doute celle de l'arbre en rotation entraînant la roue de la pompe. En cas de fuite, le produit peut aller vers l'extérieur, ce qui est parfois incompatible avec les conditions d'hygiène et/ou de sécurité. Plusieurs systèmes existent permettant d'assurer une étanchéité plus ou moins totale au niveau de l'arbre en rotation. On peut citer:

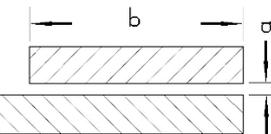
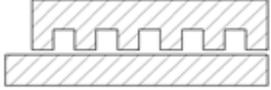
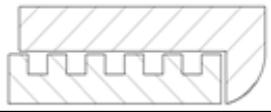
- les tresses avec presse-étoupe,
- les garnitures mécaniques simples,
- les garnitures mécaniques doubles.

Le point clefs des systèmes d'étanchéité dynamique est d'assurer un refroidissement efficace des pièces en frottement, en général avec le produit pompé, parfois avec une circulation sur un échangeur externe à la pompe. La casse répétée des garnitures (perte d'étanchéité) est souvent due à un défaut de refroidissement et/ou à des vibrations anormales (cavitation par ex).

### Presse-étoupe

Un presse-étoupe est une pièce d'étanchéité utilisée dans différents domaines.

Dans le domaine de l'hydraulique (automobile, pompes, etc.), un presse-étoupe est une pièce métallique cylindrique qui assure l'étanchéité entre l'axe et le corps d'une pompe ; le fluide peut être de l'eau, de l'huile, un carburant liquide, etc. L'étanchéité est réalisée par un élément souple, appelé tresse, enroulé autour de l'arbre de la pompe et comprimé légèrement par la pièce métallique. L'étanchéité n'est pas absolue, la tresse devant être lubrifiée par le fluide.

		a mm	b mm	Fuite (%) à la vitesse de :			
				1400	1700	2000	2500
1		0.30	28	1.52	1.80	2.00	2.18
2	   sur le diamètre	0.30	28	2.85	3.32	3.52	3.70
3		0.30	17.5	3.52	4.03	4.33	4.50
4		0.43	17.5	6.06	6.65	6.70	6.70
5		0.51	17.5	7.92	8.62	8.86	8.60
6		0.74	17.5	13.2	13.9	14.0	14.0
7		0.99	17.5	18.7	19.6	19.8	20.0
8			0.43	17.5	4.83	5.38	5.58
9	Gorge circulaire 1.5-1.5 mm Ecartement 3 mm	0.74	17.5	12.7	13.5	13.7	13.6
10	 3 mm	0.28	17.5	3.18	3.68	3.94	4.08
11		0.53	17.5	8.53	9.04	9.15	9.19
12		0.28	17.5	2.52	2.88	2.92	2.98
13	Gorge en spirale 1.5 – 1.5 mm	0.53	17.5	6.24	6.68	6.89	6.82
14		0.25	17.5	2.55	3.03	3.28	3.44
15		0.25	17.5	2.07	2.34	2.45	2.52

**Tableau 1- 4 : Perte par fuite en pour cent du débit nominal à différentes vitesses ;  
pompe de 76 mm,  $n_s = 21.2$ ,  $D_s = 257$  mm, diamètre de l'anneau= 105 mm**

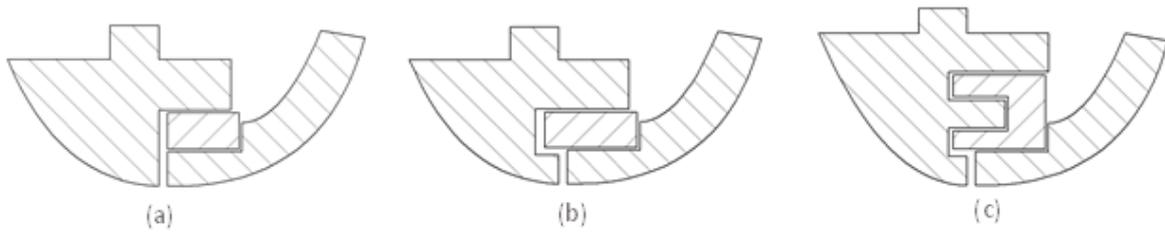


Figure 1- 22 : Type de bague d'étanchéité (Stepanoff page 194)

Pour notre étude, on a choisi comme une bague d'étanchéité entre la roue et a volute (ou bien le cartere) de type (a).

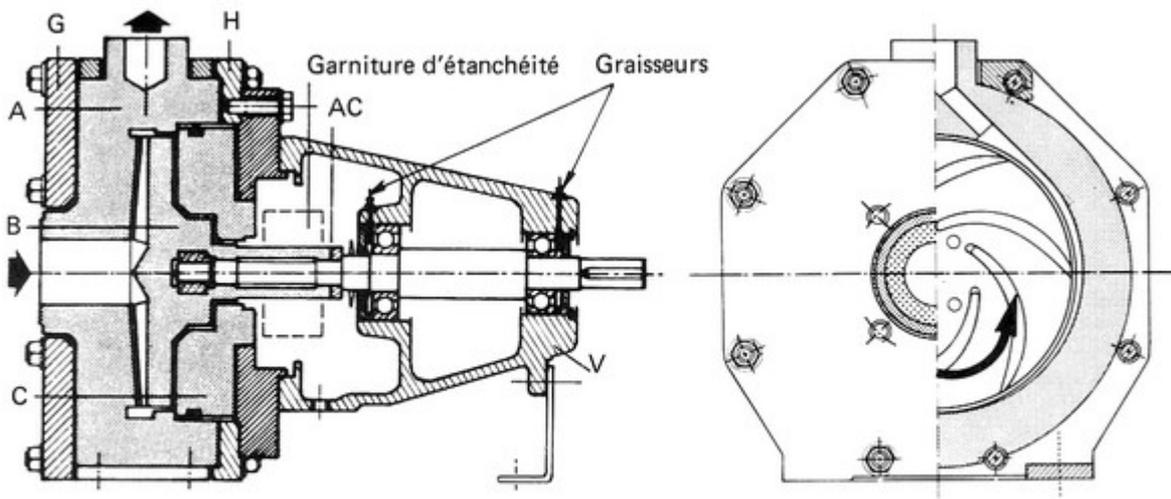


Figure 1- 23 : Garniture d'étanchéité

### Conclusion

La description de chaque élément nous a servi d'une base préalable au choix de chaque paramètre de dimensionnement de la pompe et à la conception sur SolidWorks de ces éléments.

# **Chapitre 2**

**Conception des éléments  
hydrauliques de la turbomachine**

## Introduction

L'outil de calcul élaboré précédemment nous a beaucoup aidé et facilité la tâche suivante dans le processus de fabrication d'une turbomachine qui est la conception.

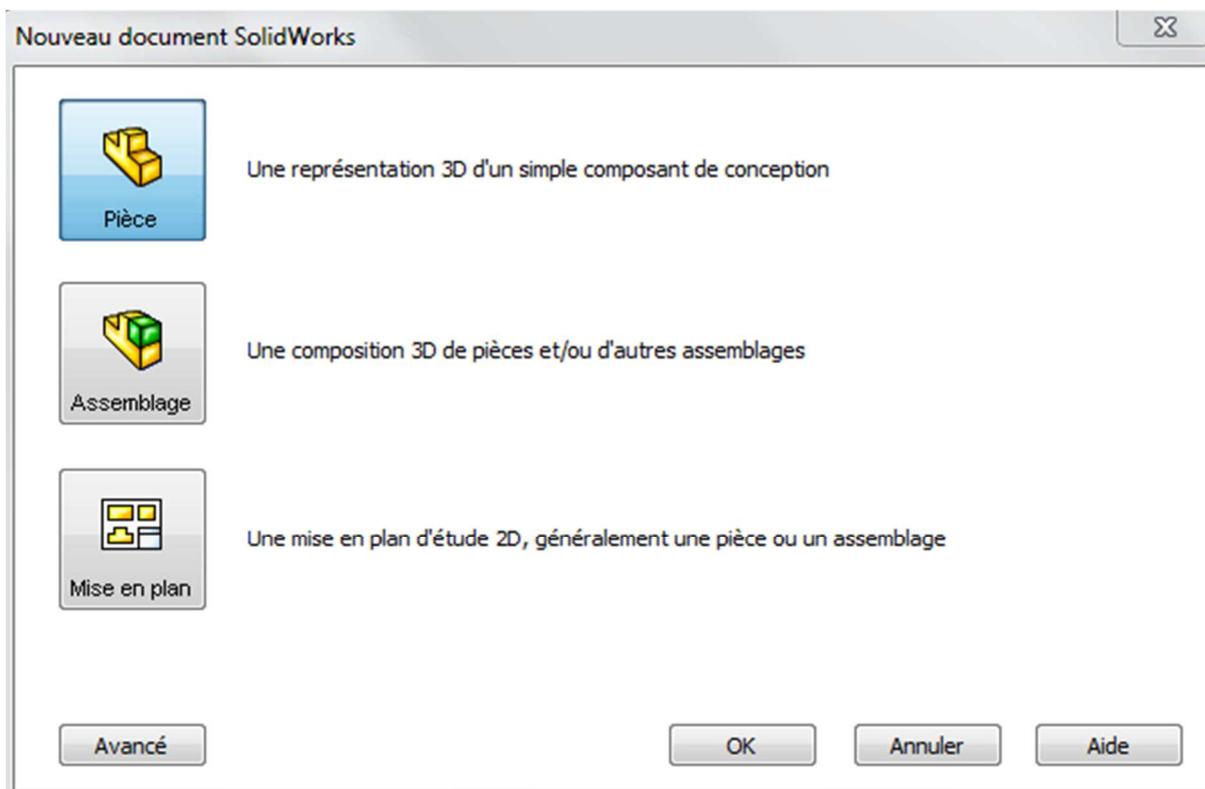
En utilisant les résultats d'exécution de notre programme de calcul qui nous offrent tous les dimensions nécessaires pour bien concevoir les pièces de la turbomachine, cette phase de conception est réalisée sur le fameux logiciel SolidWorks, ce logiciel a fait ses preuves dans le domaine industriel.

### I. La conception sous SolidWorks

Ce logiciel nous facilite beaucoup les choses lors du dessin et de la conception des pièces grâce aux plusieurs fonctions et outils de dessins offertes par l'interface SolidWorks.

#### 1. Présentation de SolidWorks

SolidWorks est un logiciel de CAO. C'est un modéleur 3D utilisant la conception paramétrique. Il génère 3 types de fichiers relatifs à trois concepts de base : la pièce, l'assemblage et la mise en plan. Ces fichiers sont en relation. Toute modification à quelque niveau que ce soit est répercutée vers tous les fichiers concernés.



**Figure 2- 1: Les trois choix offerts lors de l'ouverture d'un nouveau projet**

Fonctions de base :

- Plan d'esquisse exemple : Face (plan par défaut)
- Profil d'esquisse exemple : Rectangle 2D

- Type de fonction exemple : Fonction de bossage extrudé

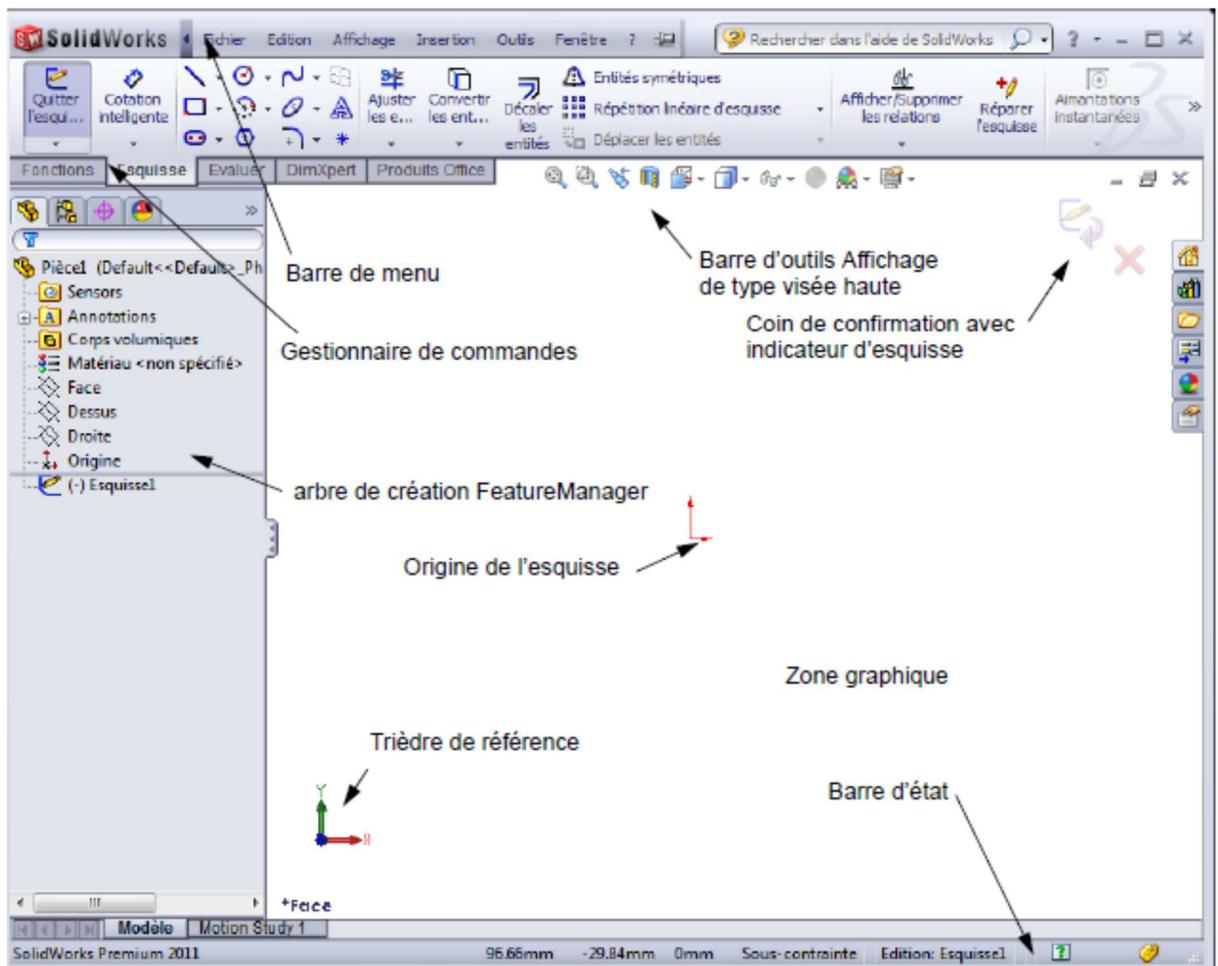


Figure 2- 2: Vue d'ensemble de la fenêtre de SolidWorks

## 2. L'utilité de SolidWorks

Solidworks...des solutions d'ingénierie et de conception dans tous les domaines :

Ce logiciel sert à des ingénieurs, des concepteurs pour l'élaboration de plans de pièces mécaniques, de prévisualisation 3D, ...

Ce logiciel est donc utilisé par des entreprises ayant comme secteurs d'activité l'industrie, la médecine, les transports, la grande consommation, les sciences, etc.

Il est relativement facile à utiliser et à prendre en main, et également très répandu dans les collèges et lycées, et dans les filières technologiques, où les élèves et étudiants l'utilisent pour les sciences de l'ingénieur et la technologie.

Solidworks intègre la conception, la simulation, la communication technique et la gestion des données. Les ingénieurs peuvent exécuter de nombreuses tâches de développement en toute simplicité, ce qui leur permet de réduire le cycle de conception, d'accroître la productivité et de commercialiser plus rapidement des produits innovants.

## II. Les étapes de conception sous SolidWorks

On utilise les résultats de la première exécution de l'outil de calcul sous MATLAB « outildecalcul » des dimensions de la turbomachine du (Master L.BENZADA), pour la conception sous logiciel « SolidWorks ».

On décrit les étapes de conception de

### 1. Conception de l'arbre

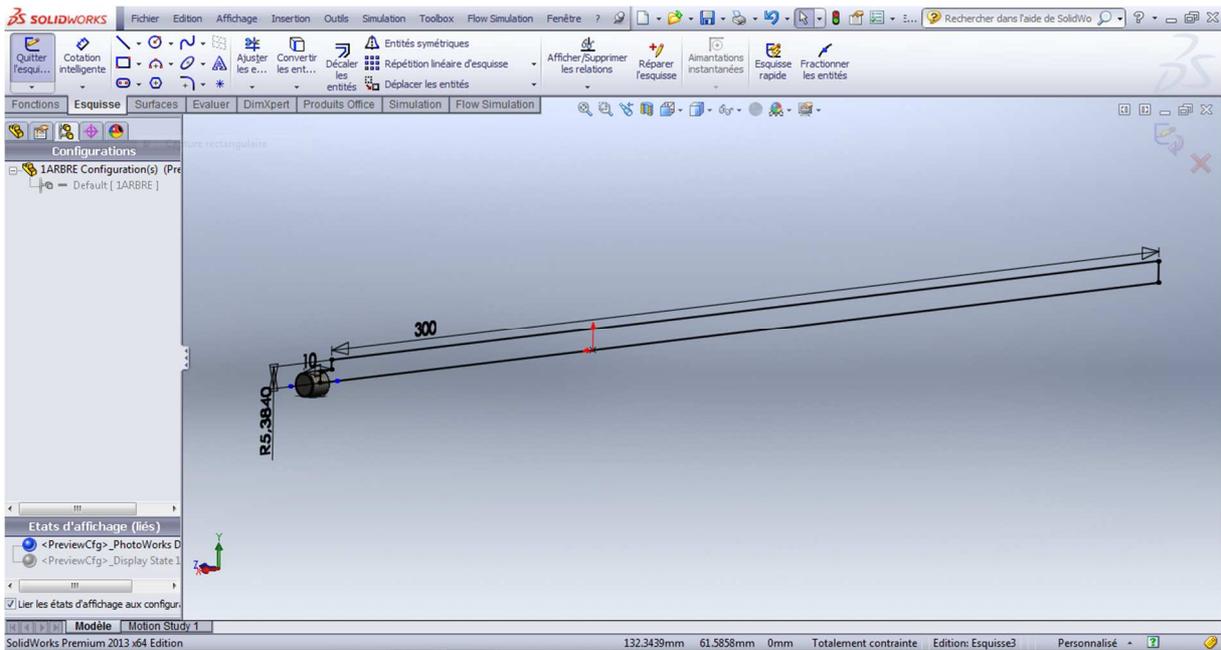


Figure 2- 3 : Esquisse du tracé de l'arbre et la partie filetage

Ici on utilise la fonction « révolution » pour avoir la forme cylindrique de l'arbre.

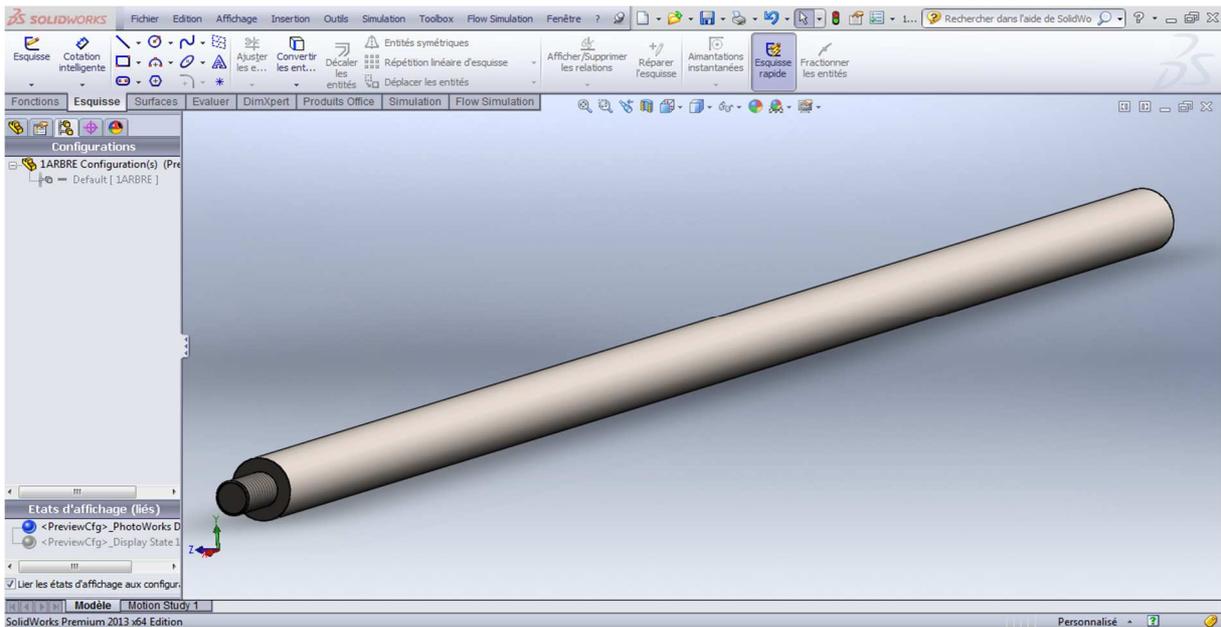


Figure 2- 4 : l'arbre après révolution

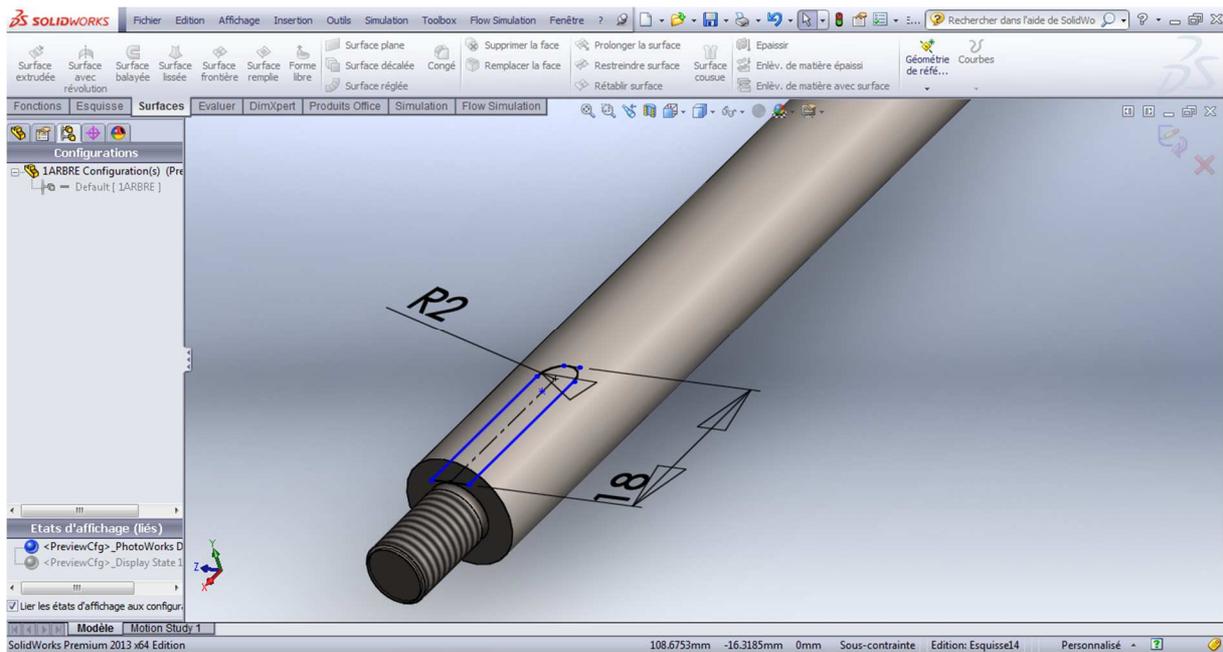


Figure 2- 5 : Esquisse de la rainure de la clavette

On applique la fonction « enlèvement de matière extrudé » pour obtenir la rainure de la clavette sur notre arbre.

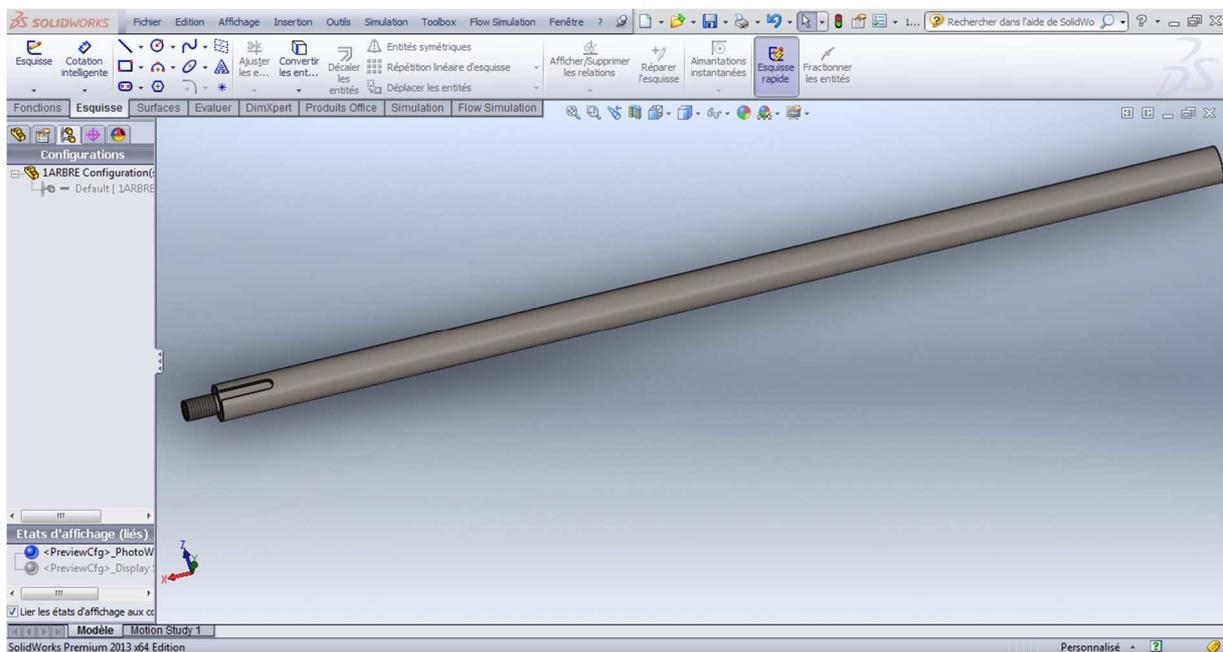


Figure 2- 6 : L'arbre sous SolidWorks

## 2. Conception de la clavette

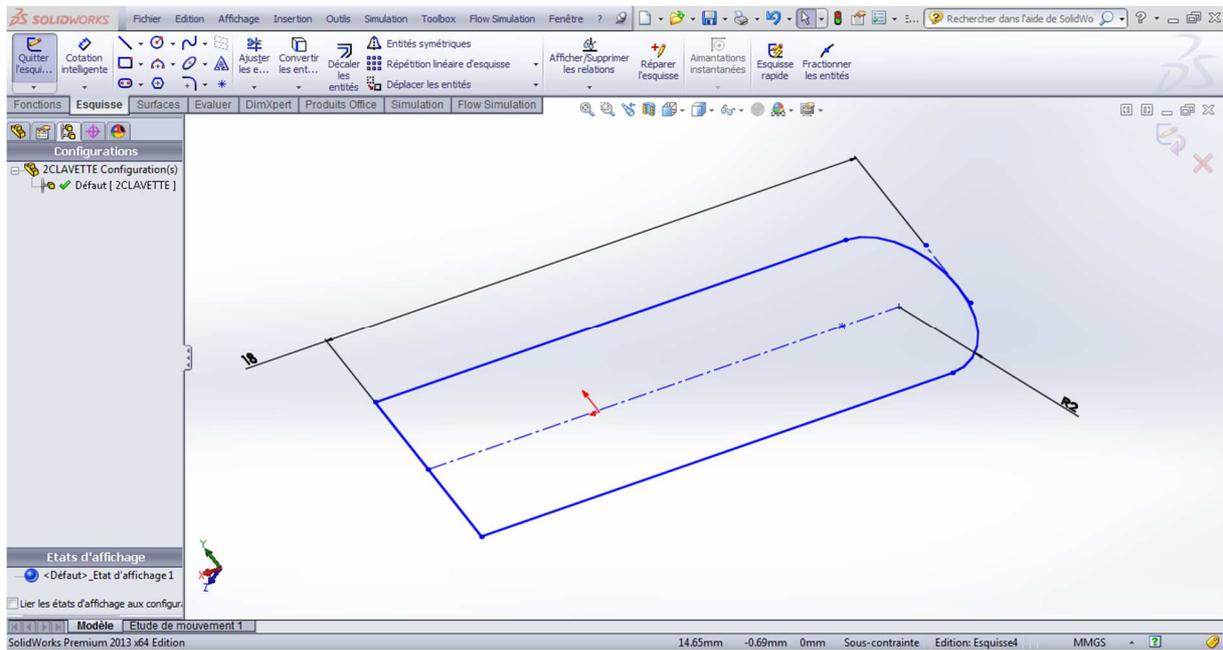


Figure 2- 7 : Esquisse pour la conception de la clavette

On applique la fonction «Bossage extrudé » pour obtenir la clavette en 3D

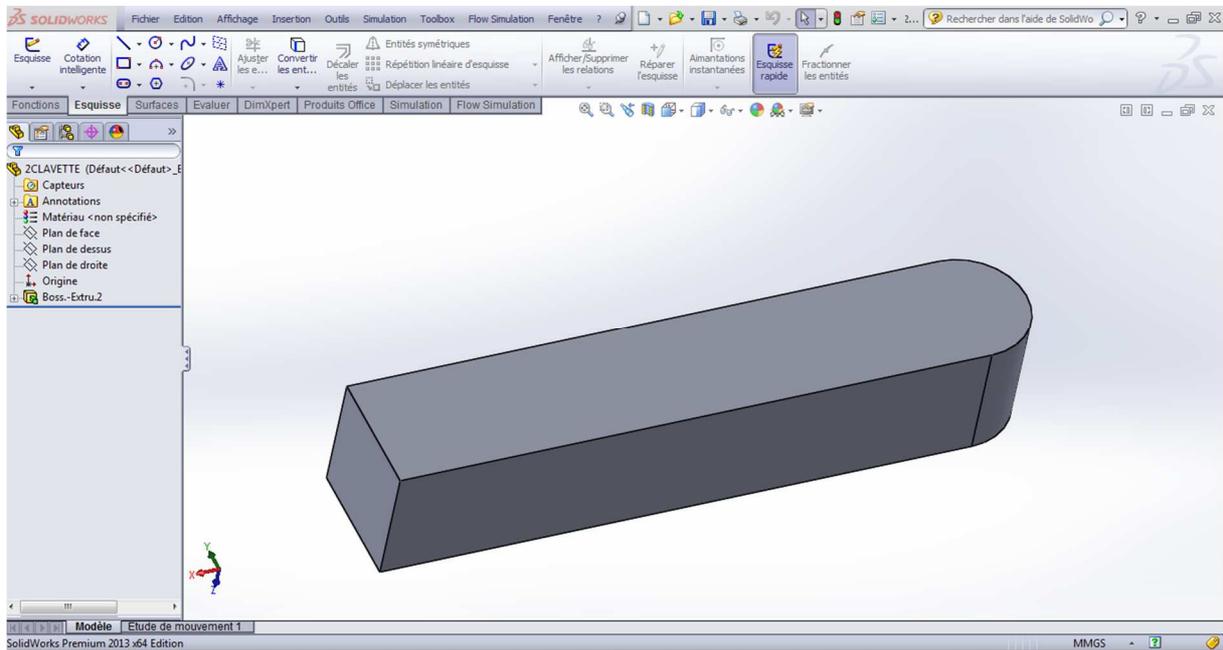


Figure 2- 8 : La clavette sous SolidWorks

### 3. Conception de l'écrou

On prend directement un écrou normalisé M6 à partir de la bibliothèque de SolidWorks

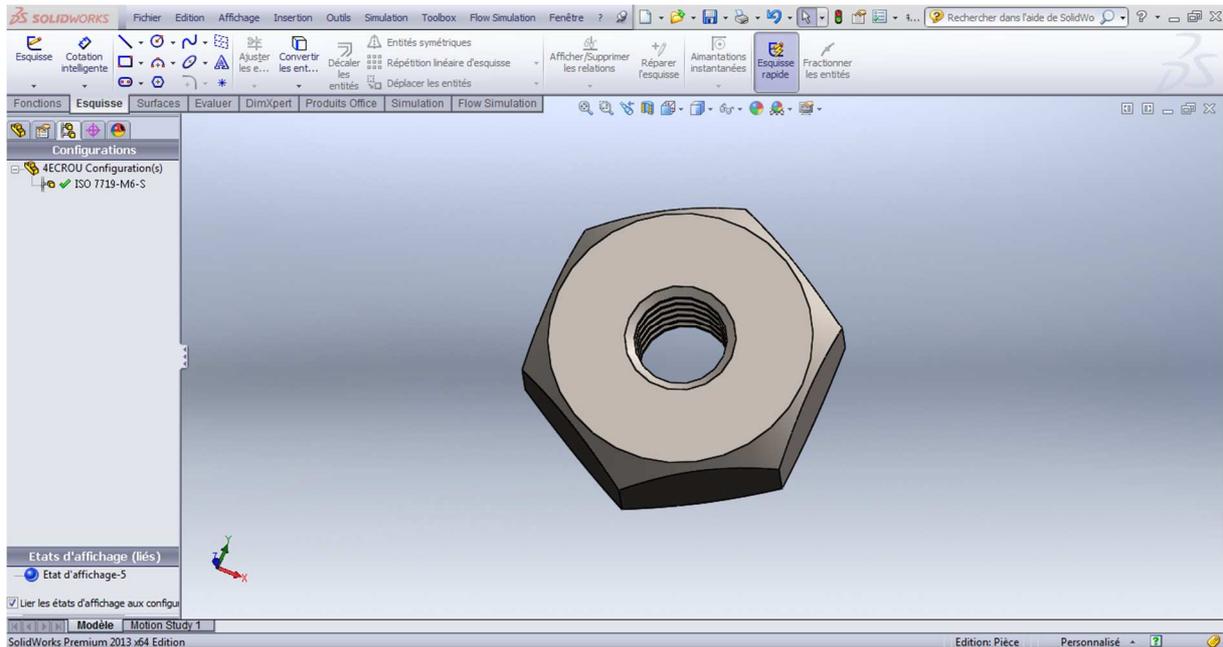


Figure 2- 9 : Ecrou M6 normalisé

On dessine une courbe sur l'écrou pour avoir un type d'écrou borgne, vu que ce type n'existe pas sur la bibliothèque de SolidWorks

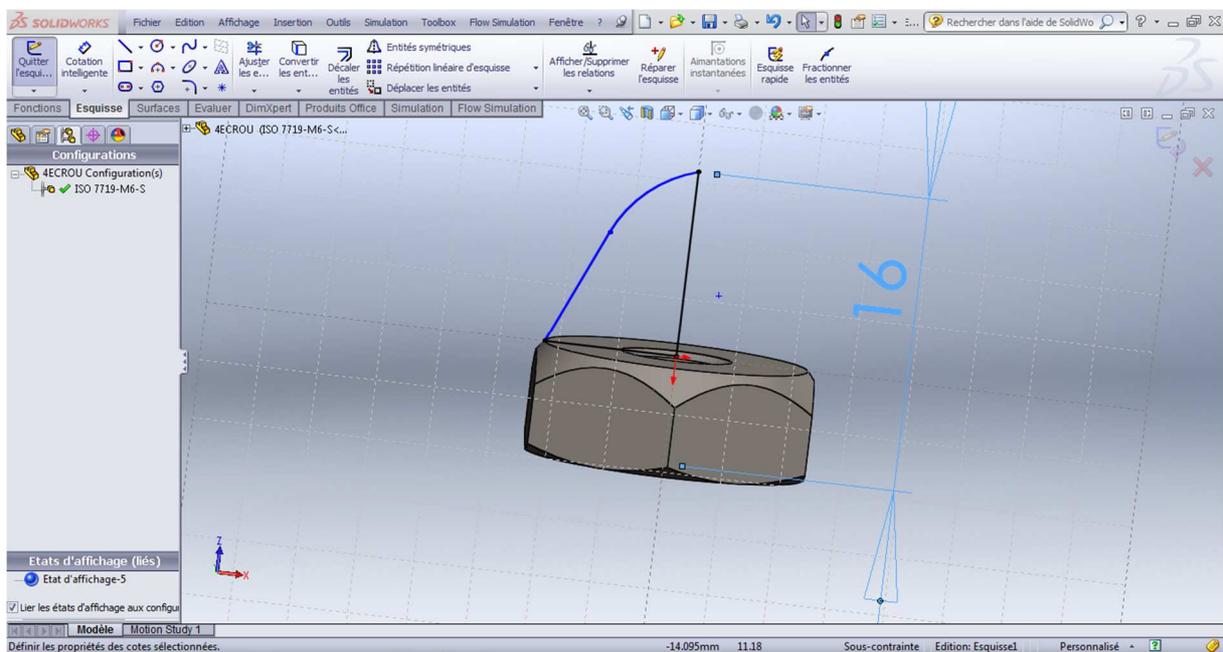


Figure 2- 10 : L'esquisse de courbe pour l'écrou borgne

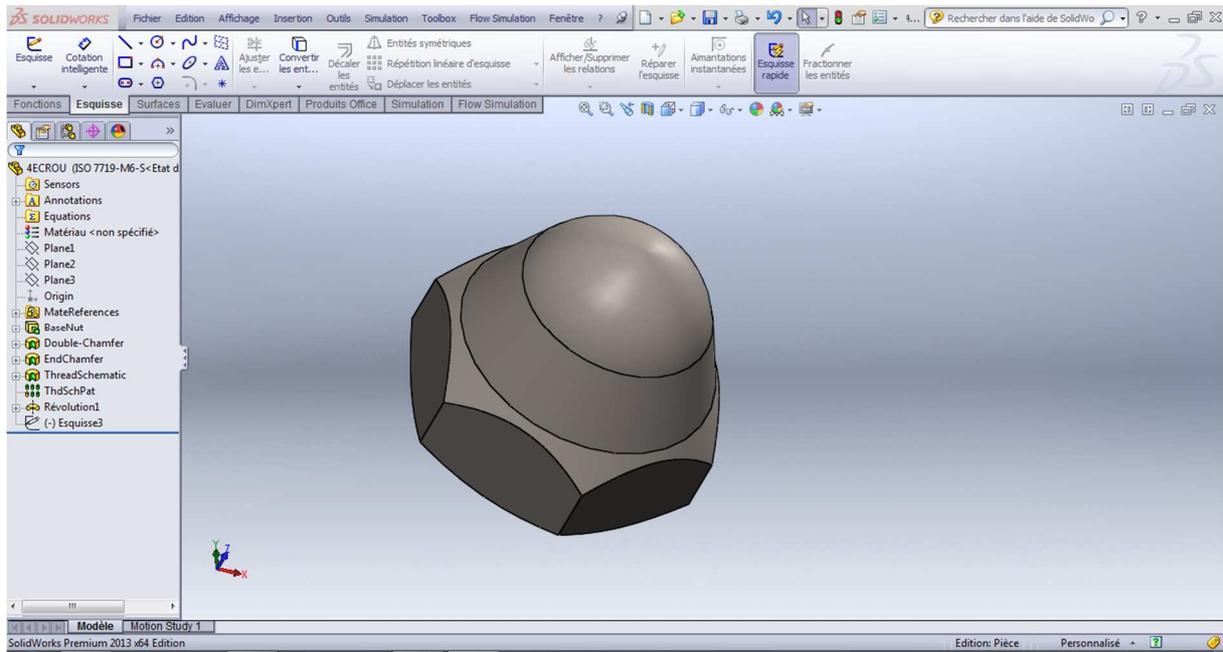


Figure 2- 11 : L'écrou sous SolidWorks

#### 4. Conception de la roue

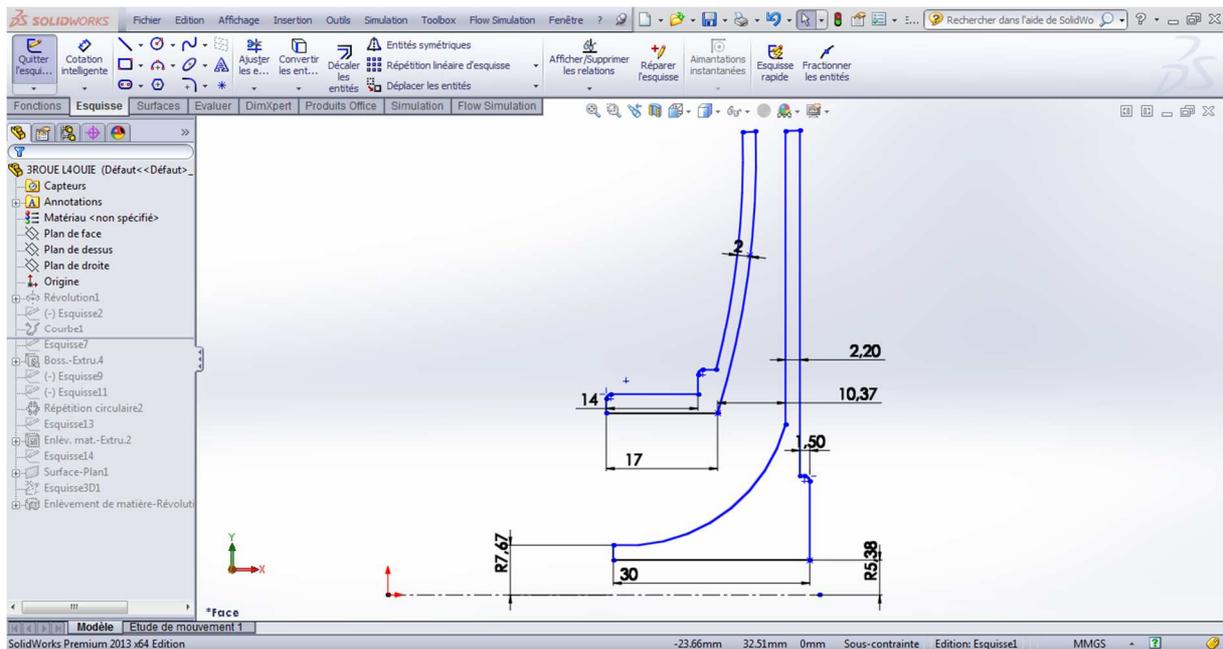
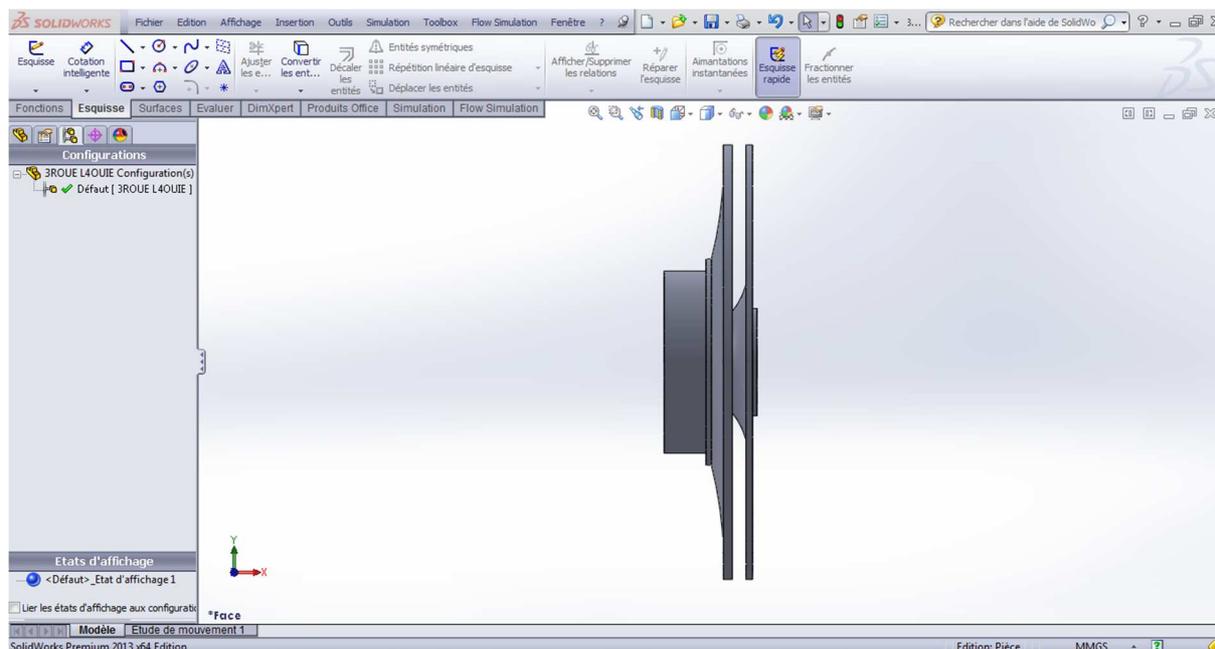
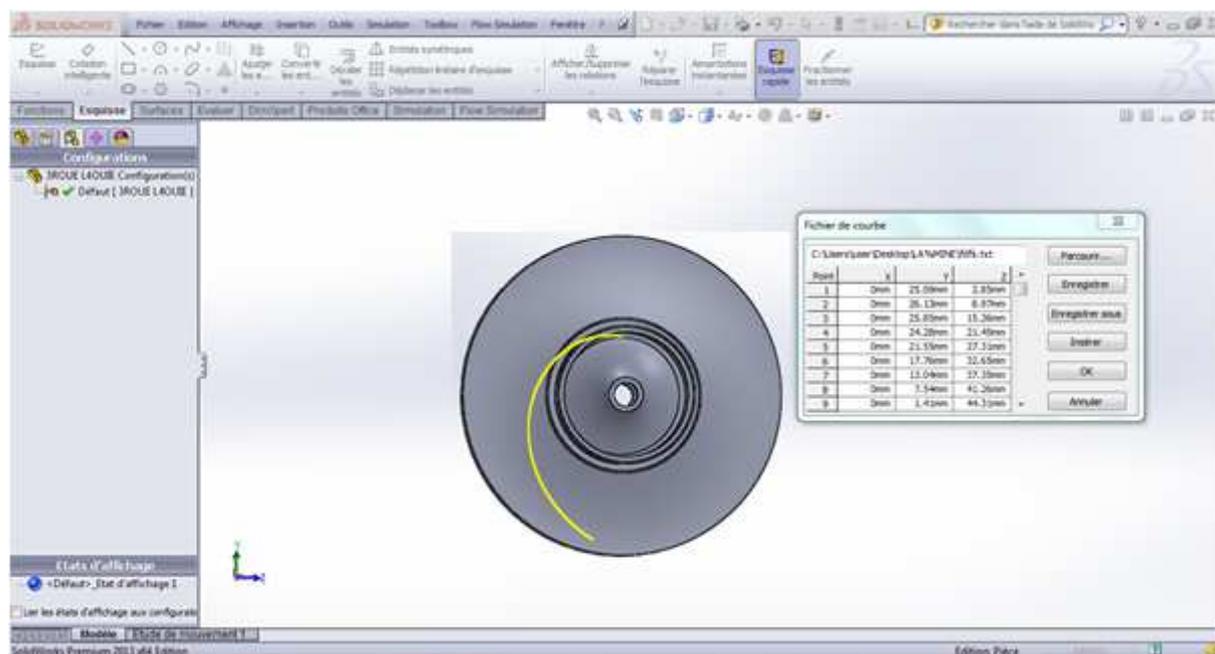


Figure 2- 12 : Esquisse du tracé de la roue



**Figure 2- 13 : la roue après révolution**

La courbe des aubes est générée à partir d'un fichier Excel qui donne les coordonnées (x, y, z).



**Figure 2- 14 : Esquisse du tracé de la courbe des aubes point par point**

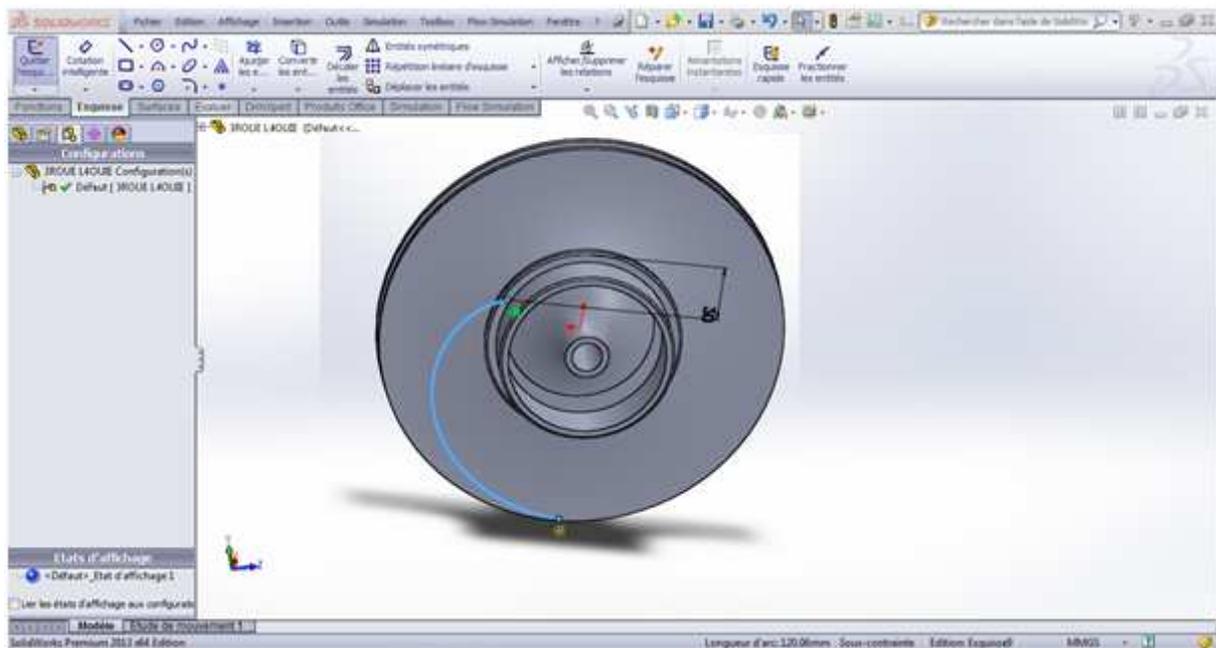


Figure 2- 15 : Contrainte de coïncidence avec les extrémités de la roue

Ici on utilise la fonction « répartition circulaire » pour dessiner les autres aubes par symétrie

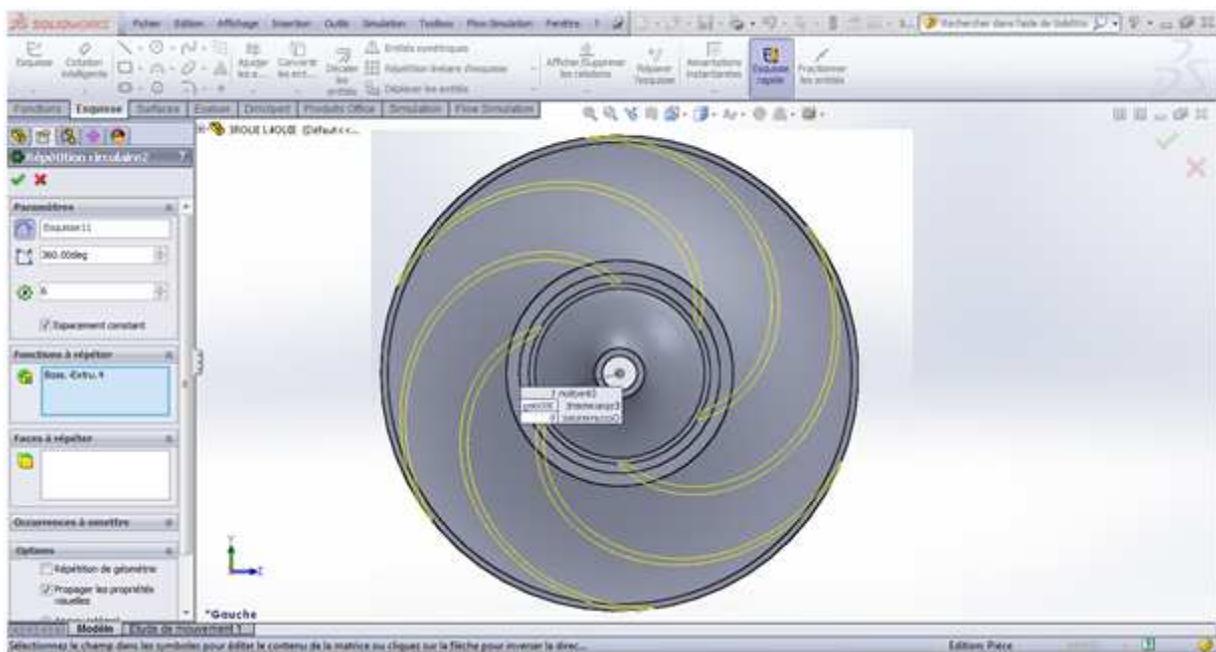


Figure 2- 16 : Répétition circulaire de la courbe des aubes en 6 fois

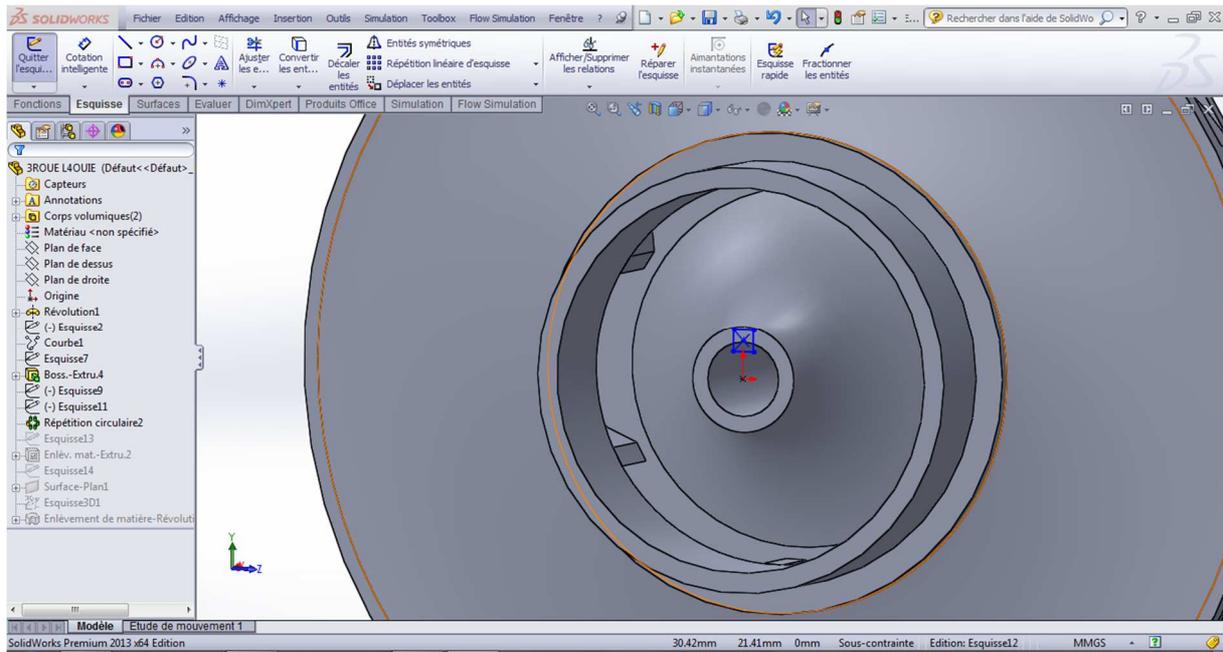


Figure 2- 17 : Esquisse de la rainure de la clavette sur la roue

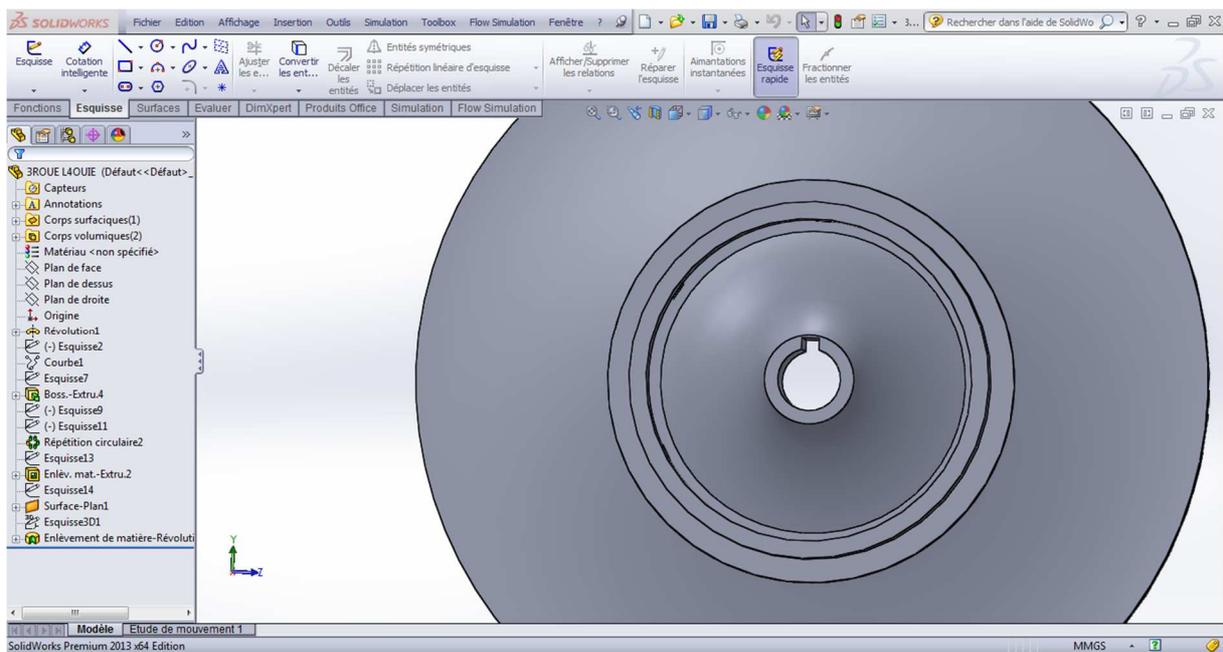


Figure 2- 18 : Enlèvement de la matière sur la roue pour avoir la rainure de la clavette

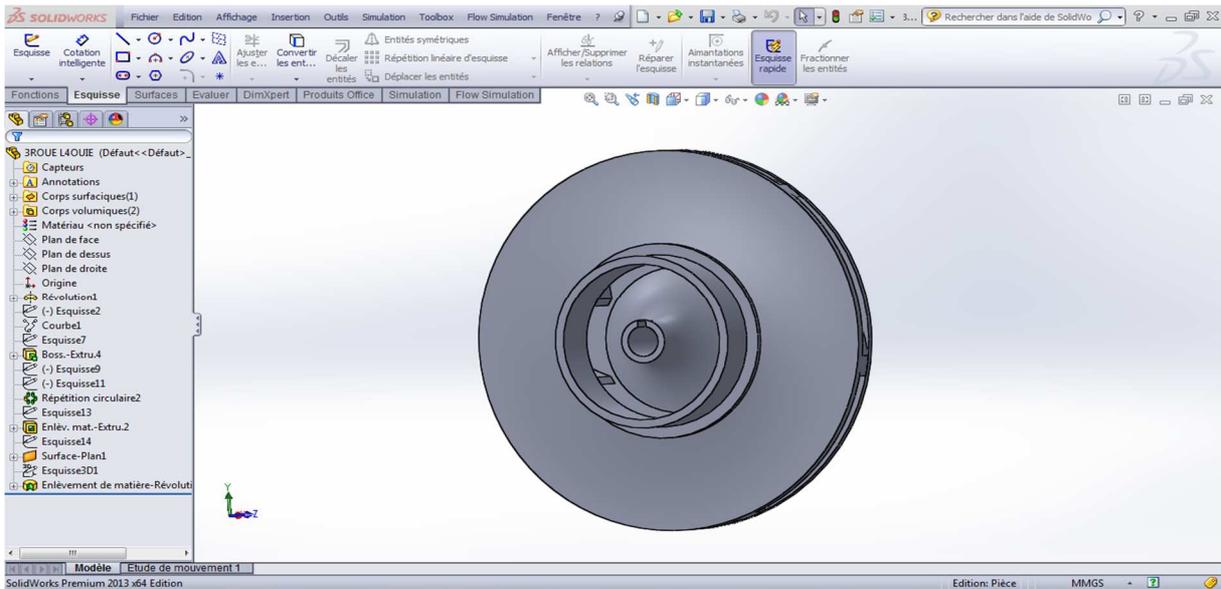


Figure 2- 19 : La roue sous SolidWorks

### 5. Conception de la volute

On propose pour le corps de la volute de le diviser en deux parties pour pouvoir assembler la roue à l'intérieur de ce corps après la réalisation, donc on considère la partie qui contient la variation de la section circulaire de la volute que c'est « la partie spirale » et la deuxième partie qui couvre le corps est nommée « le cache »

#### a. La partie spirale

La courbe de la spirale est générée à partir d'un fichier Excel qui donne les coordonnées (x, y, z) pour chaque point.

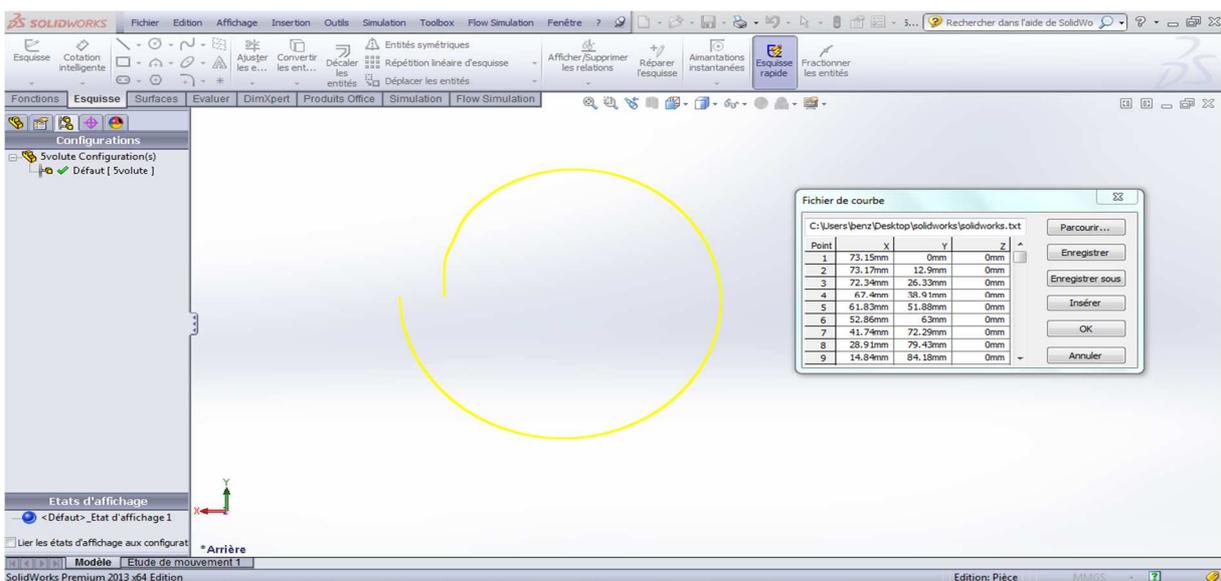


Figure 2- 20 : La courbe spirale de la volute

La conception de la section variée selon la spirale de 360° nous oblige de créer au moins huit plans et de tracer les formes de ces sections dans chaque plan, parmi ces plans on a deux plans pour les extrémités de la spirale et pour que le tracé soit bon on introduit des plans intermédiaires. Ces plans doivent être supérieur au égale à six plans c.à.d. au moins à chaque 50° il faut créer un plan.

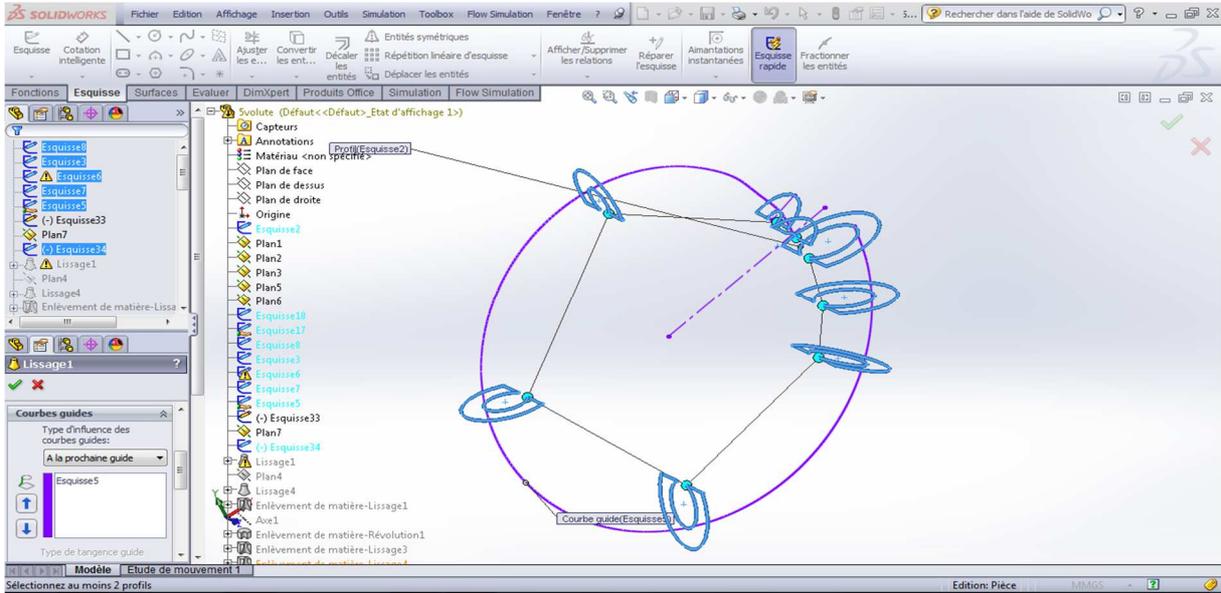


Figure 2- 21 : Les plans d’esquisse pour le lissage de la spirale

Après avoir créé les plans, on applique la liaison entre eux par la fonction « Bossage/base lissée »

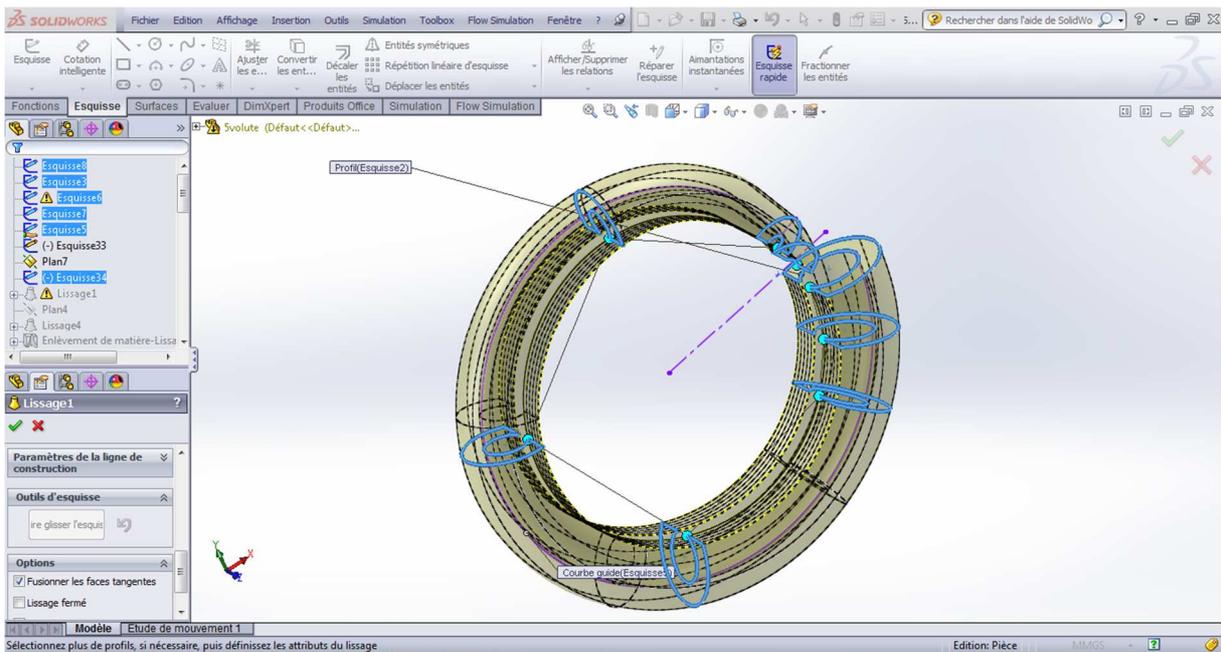


Figure 2- 22 : Lissage de la forme spirale

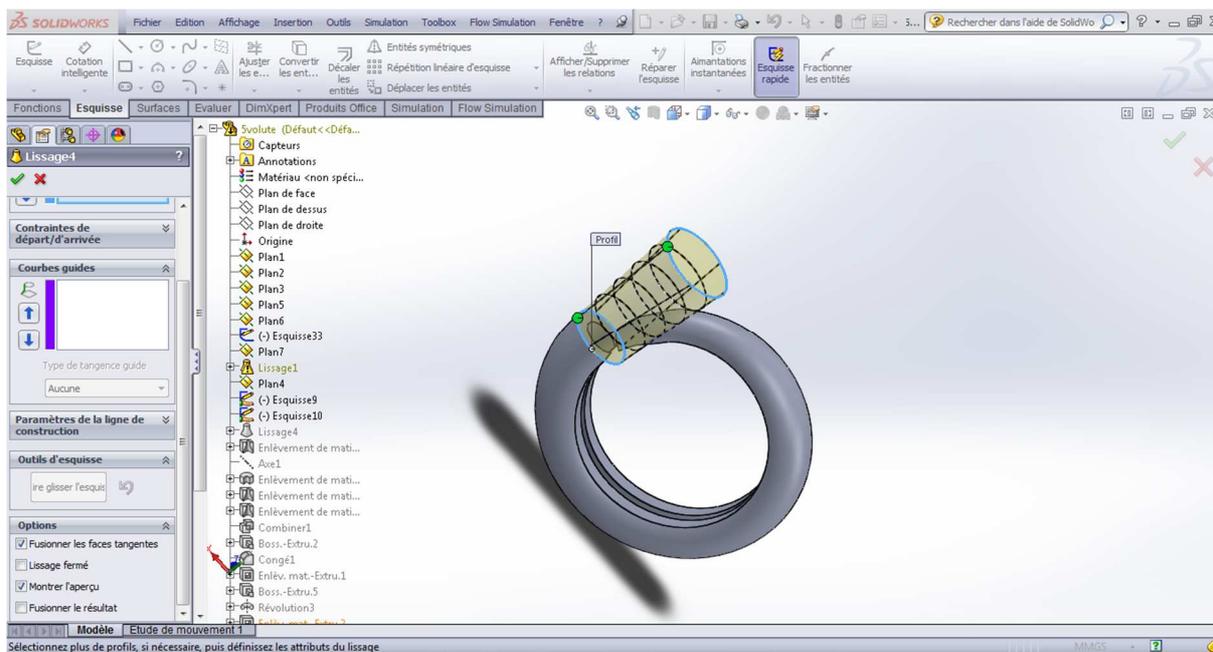


Figure 2- 23 : Lissage du cône du diffuseur

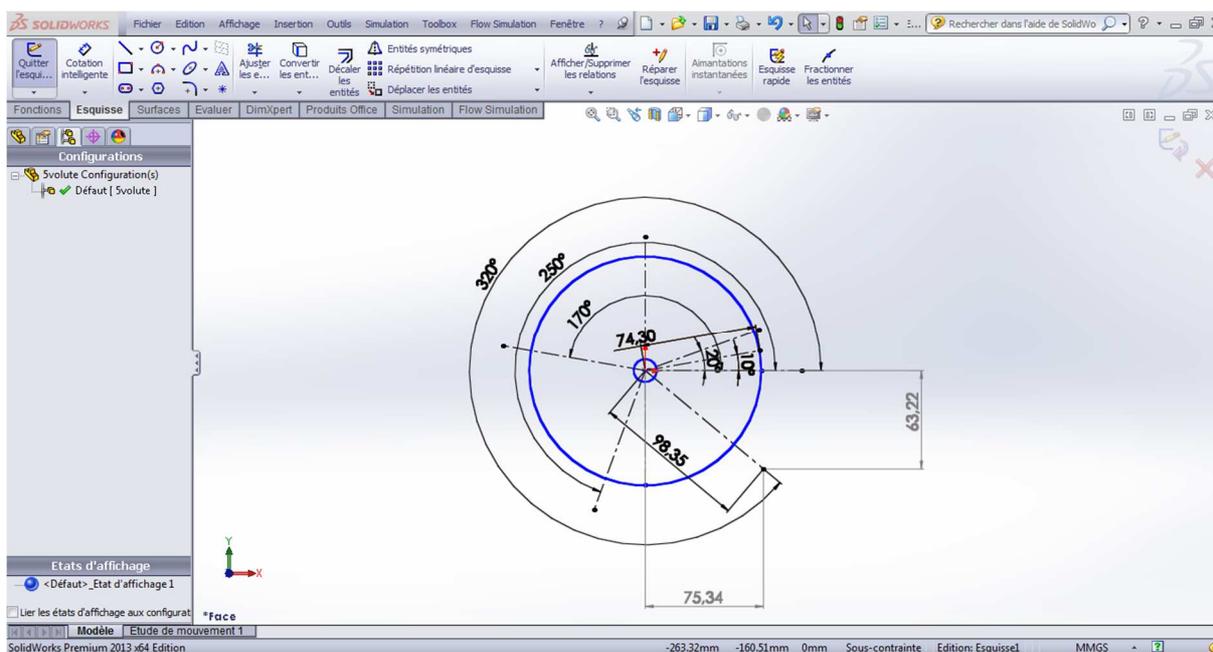


Figure 2- 24 : Esquisse de la paroi arrière de la voute

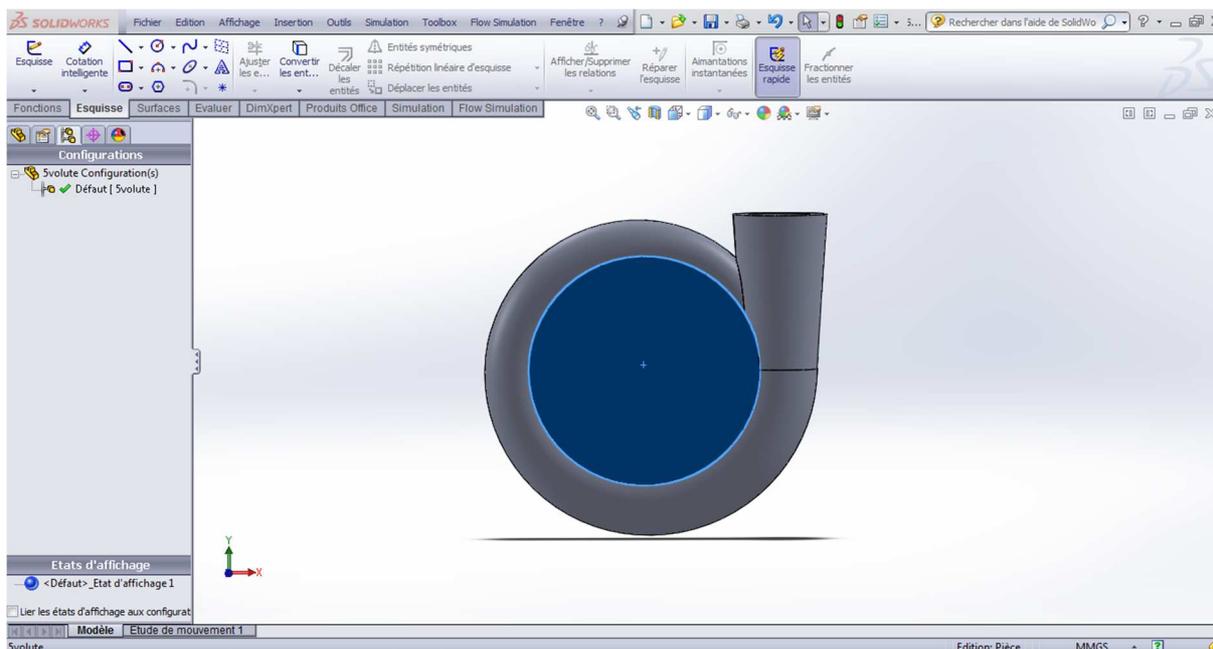


Figure 2- 25 : Extrusion de la paroi

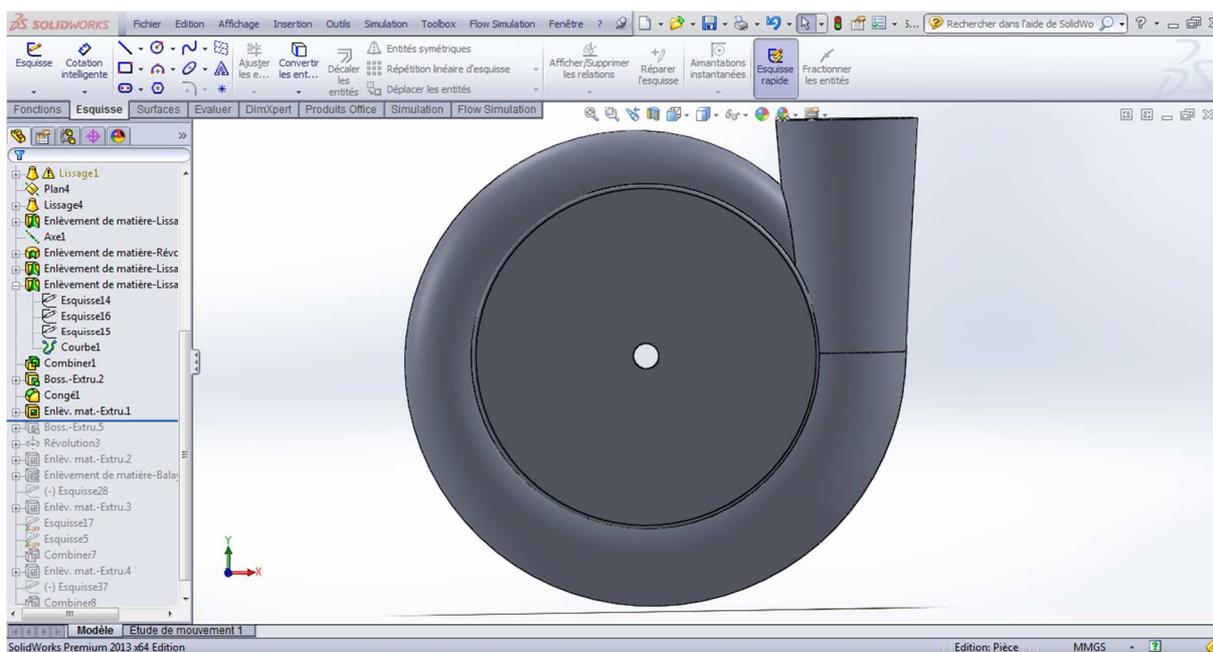


Figure 2- 26 : Enlèvement de la matière pour le trou correspond à l'arbre

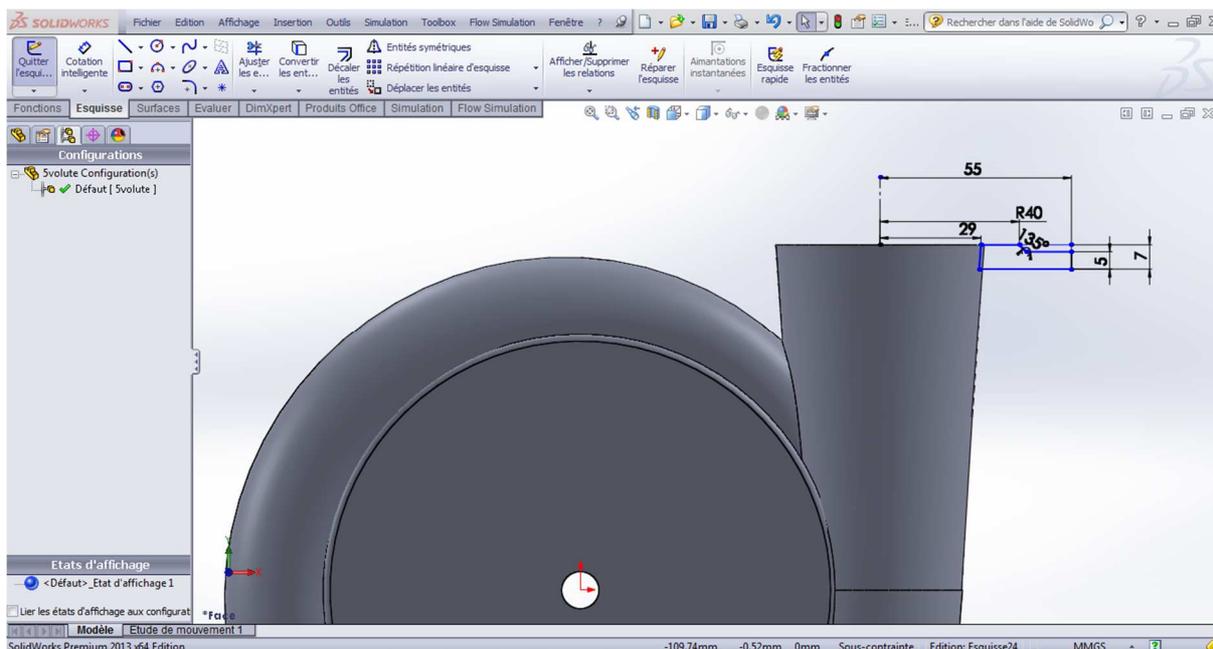


Figure 2- 27 : Esquisse pour facilité la jonction de la volute et la conduite de refoulement

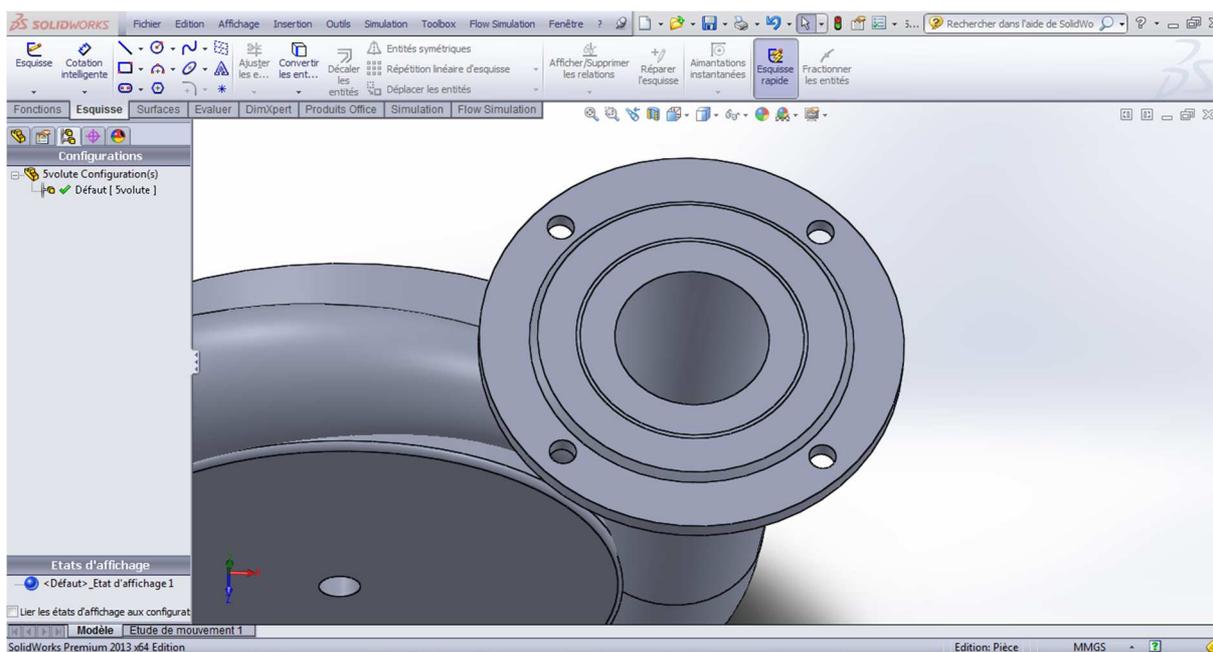


Figure 2- 28 : Trous de fixation de la conduite de refoulement avec la volute

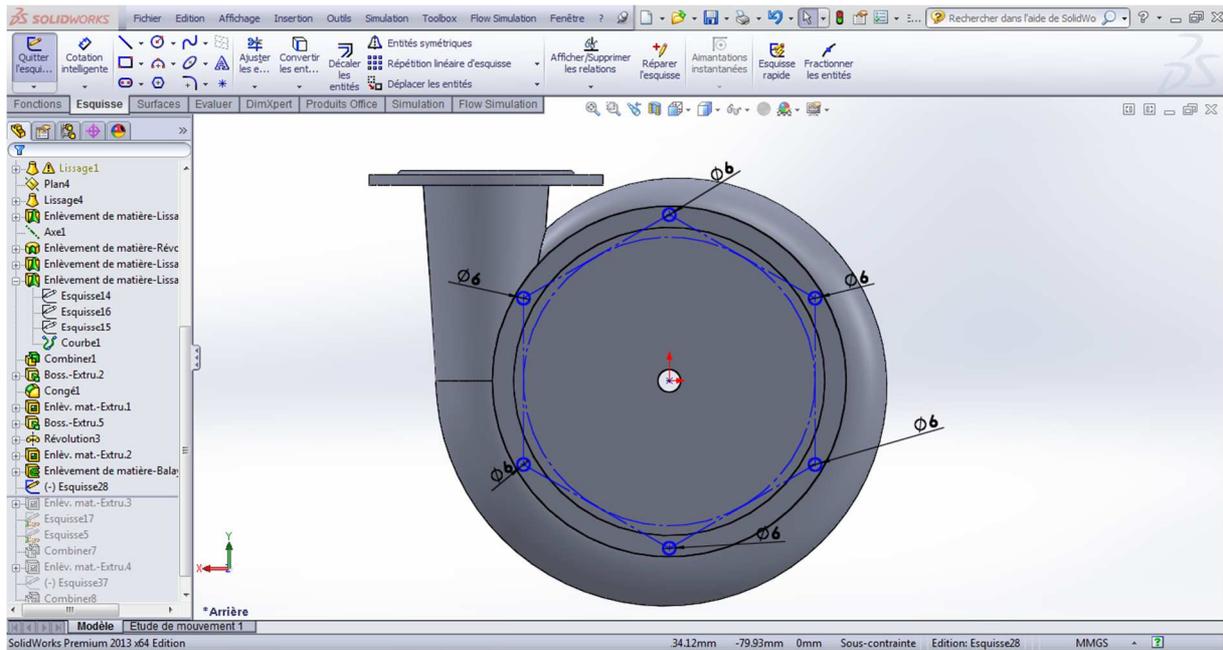


Figure 2- 29 : Esquisse pour les trous des goujons

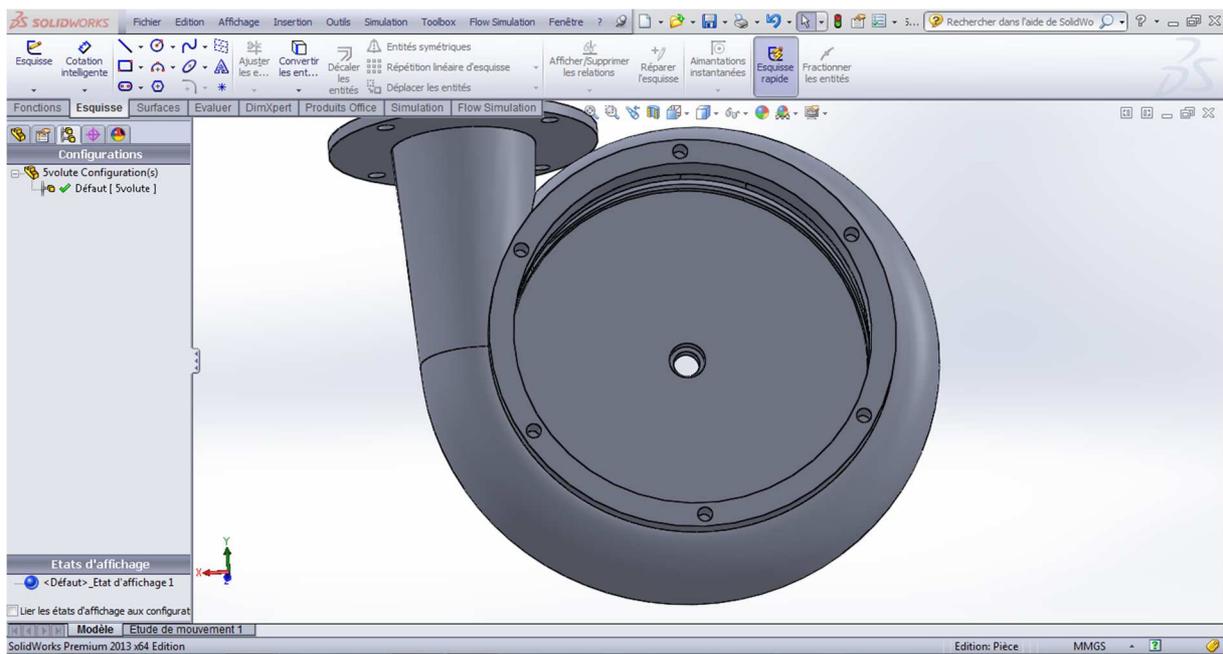


Figure 2- 30 : Création de trous taraudés de M6

### b. Le cache

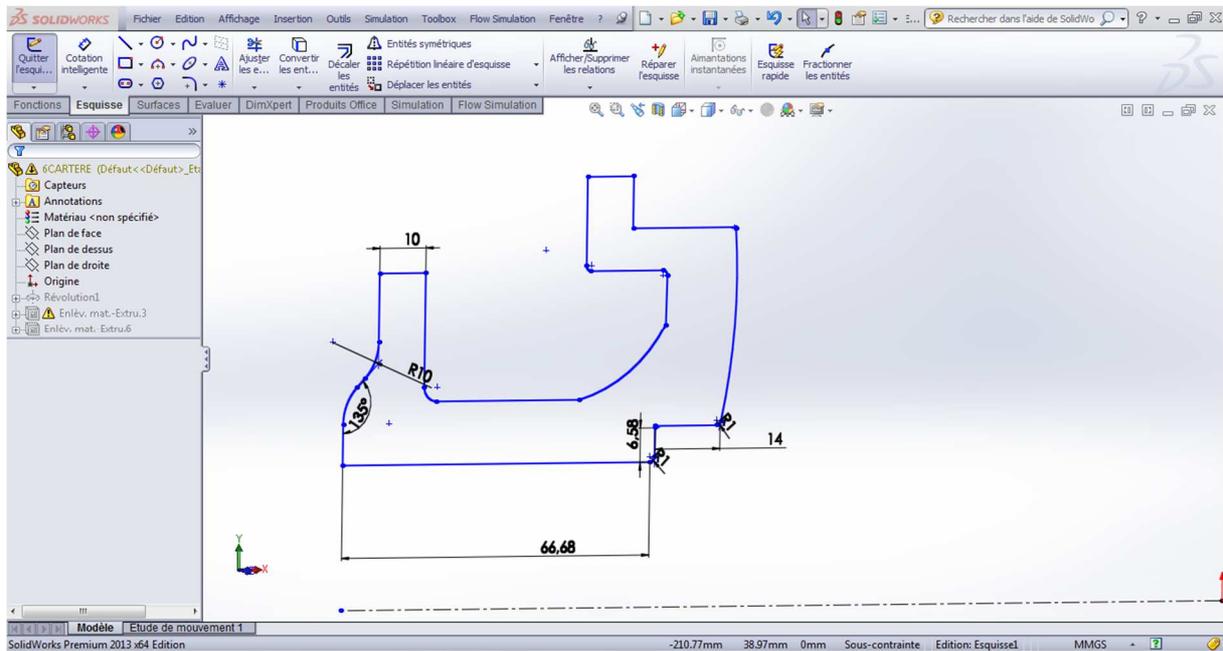


Figure 2- 31 : Esquisse du cache

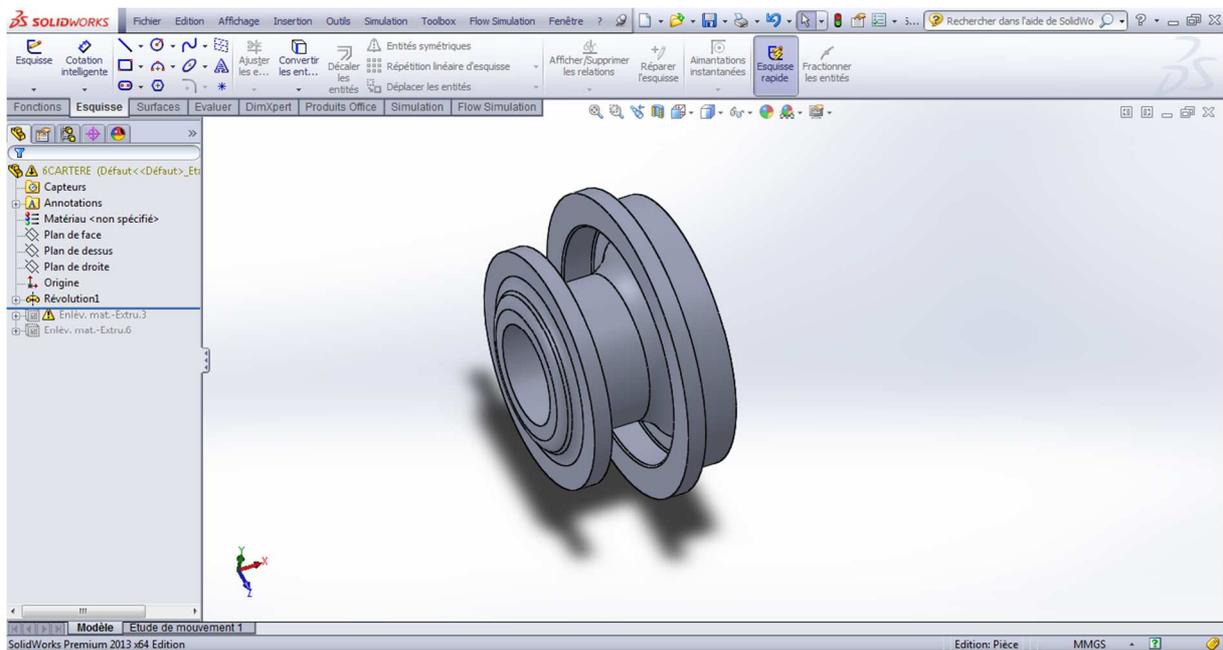


Figure 2- 32 : Cache après révolution

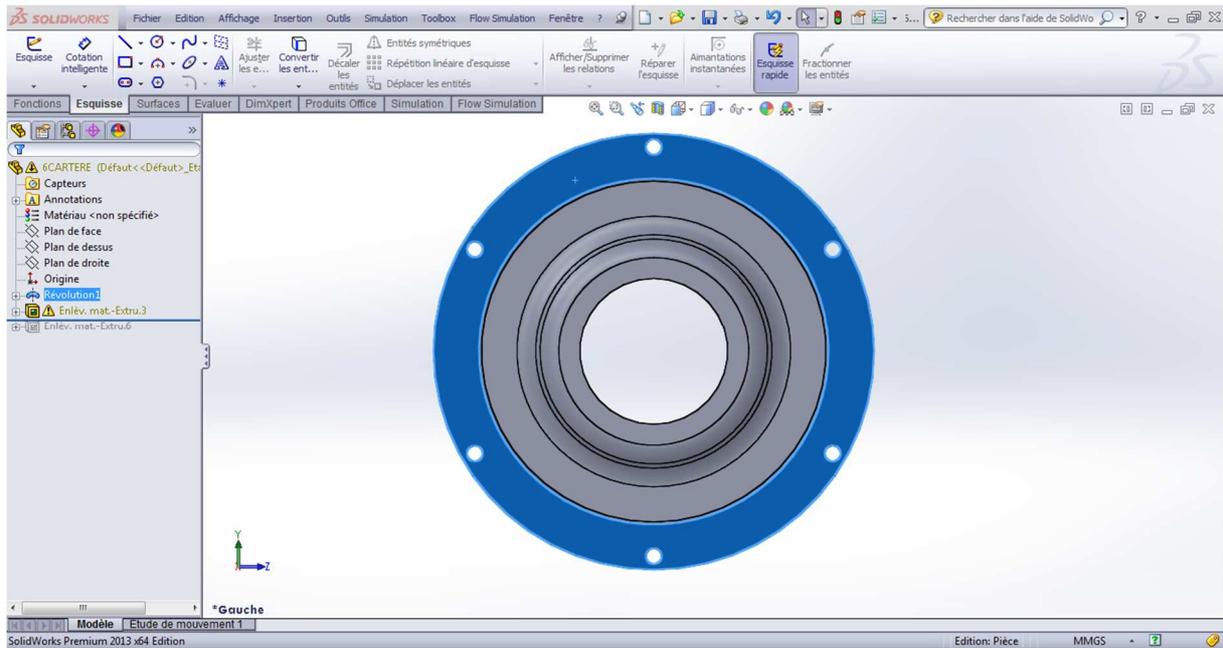


Figure 2- 33 : Trous de goujon pour la jonction avec la partie spirale

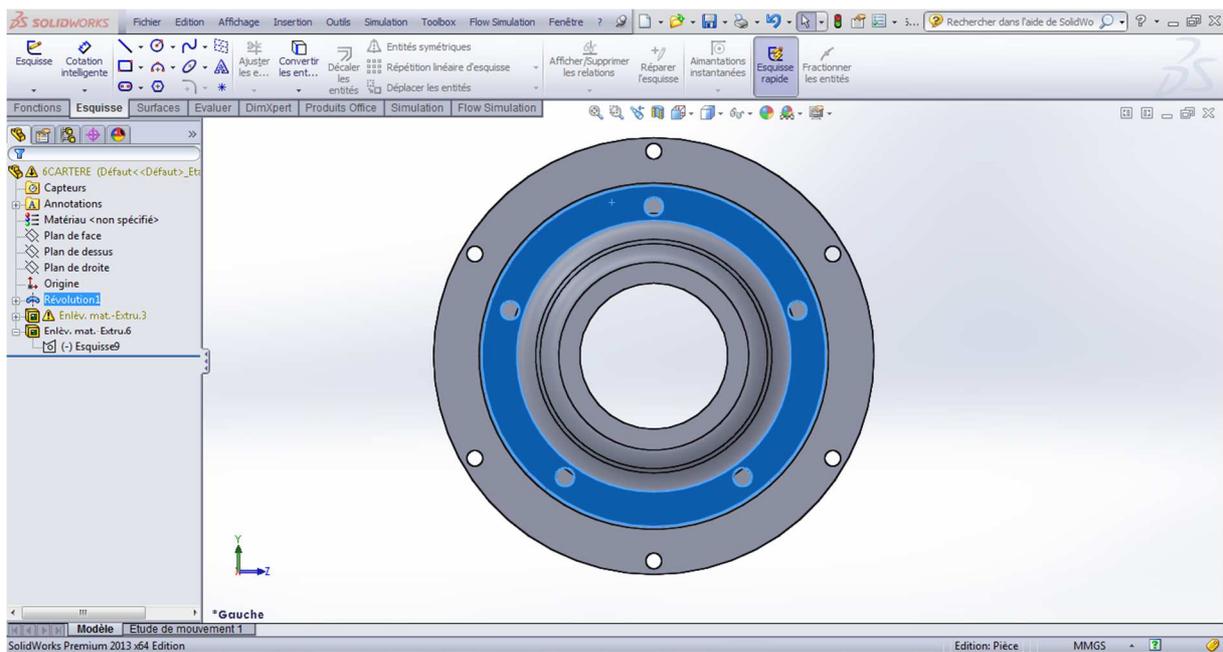


Figure 2- 34 : Trous de fixation la conduite d'amenée avec la volute

## 6. Les accessoires de la conception

Pour l'assemblage des pièces conçues, on ajoute à la conception les accessoires suivants :

### a. La bague d'étanchéité(1)

Elle assure l'étanchéité entre la partie spirale de la volute et la roue.

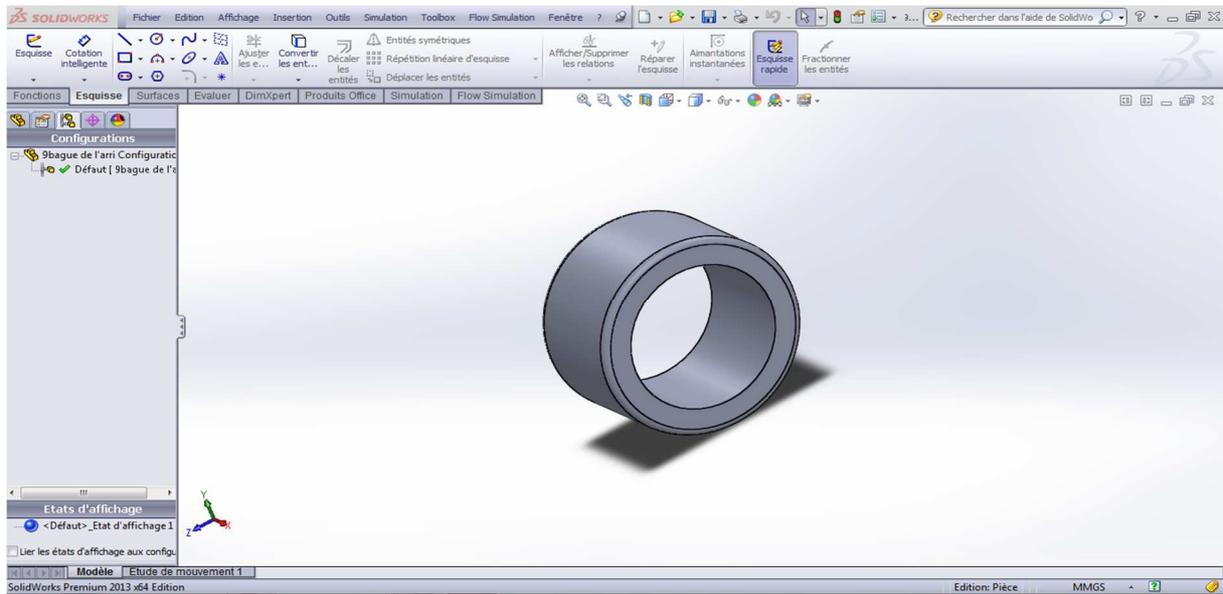


Figure 2- 35 : La bague d'étanchéité (1)

### b. La bague d'étanchéité(2)

Elle assure l'étanchéité entre le cache de la volute et la roue.

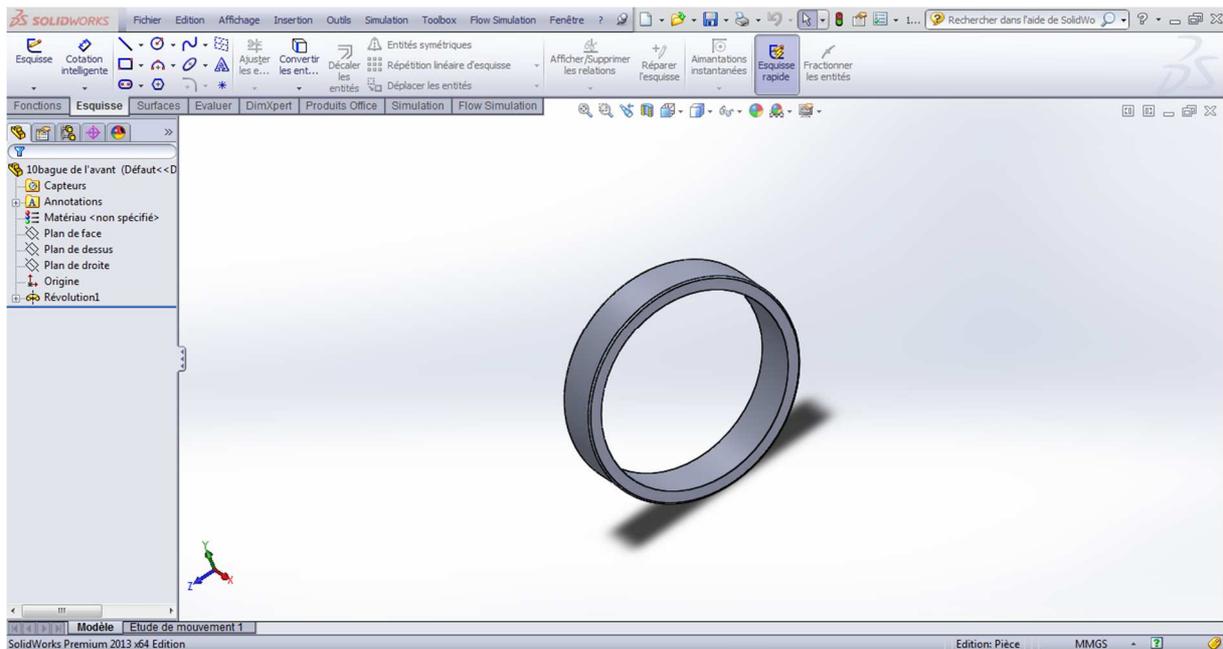


Figure 2- 36 : La bague d'étanchéité (2)

### c. Les goujons

Les goujons sont des éléments indispensables pour l'assemblage et la fixation des différentes pièces

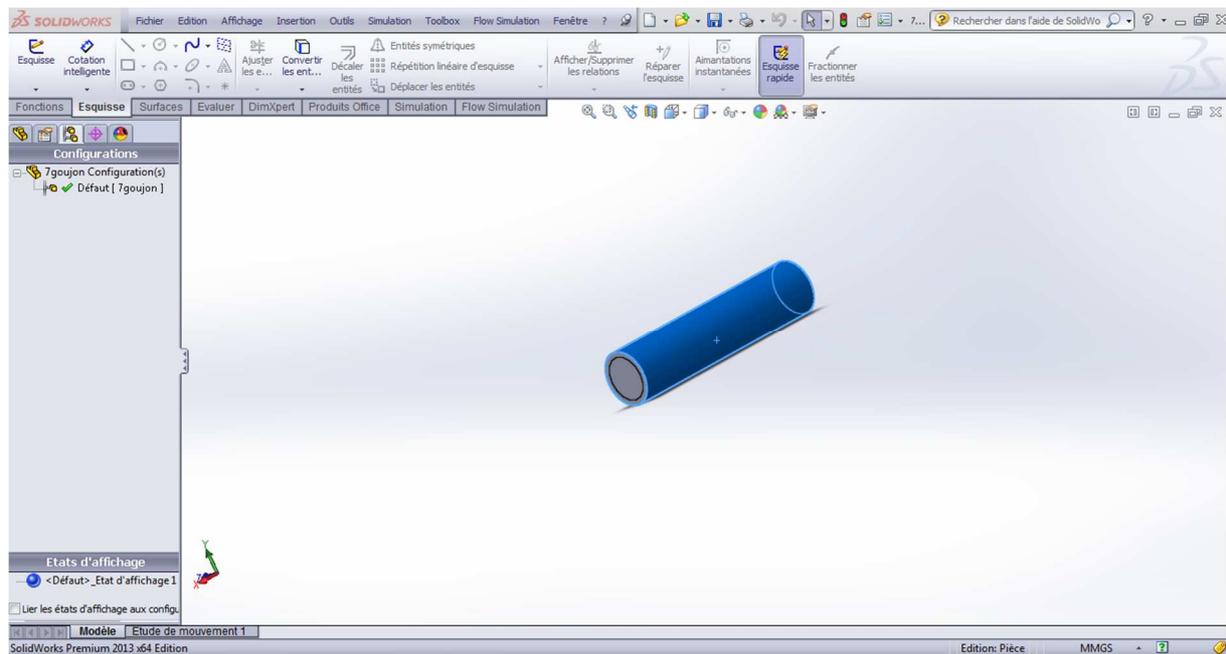


Figure 2- 37 : Goujon sous SolidWorks

### d. Les boulons

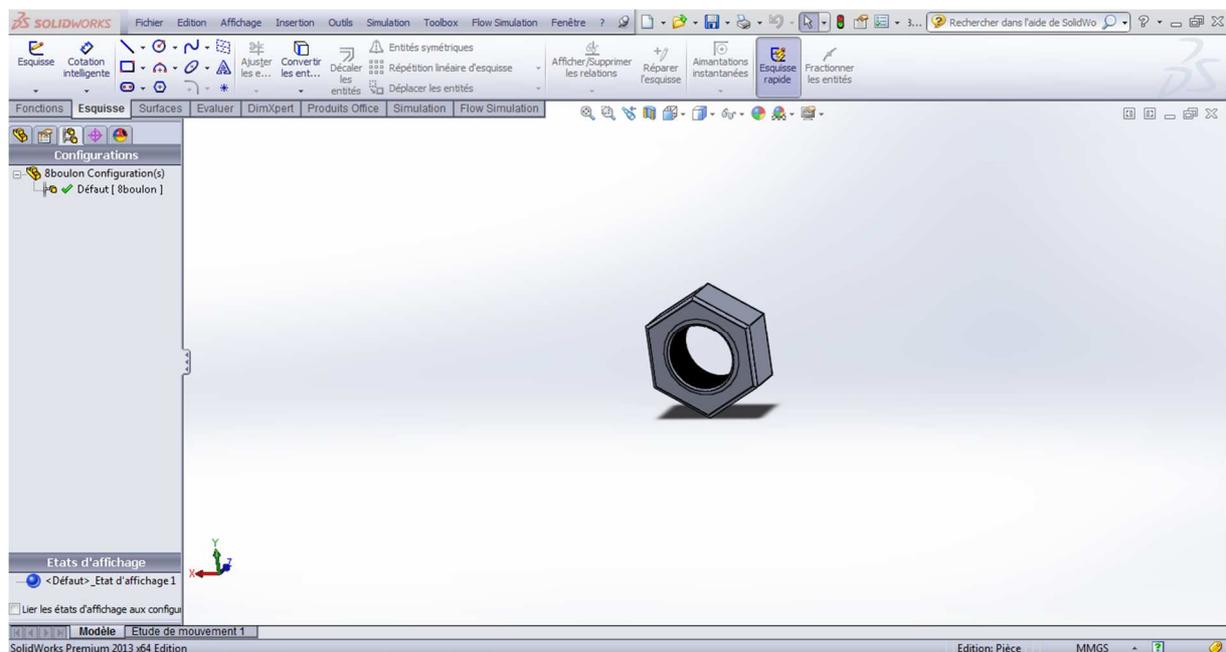


Figure 2- 38 : Boulon sous SolidWorks

### III. L'assemblage de la turbomachine génératrice d'énergie

On assemble toutes les pièces conçues :

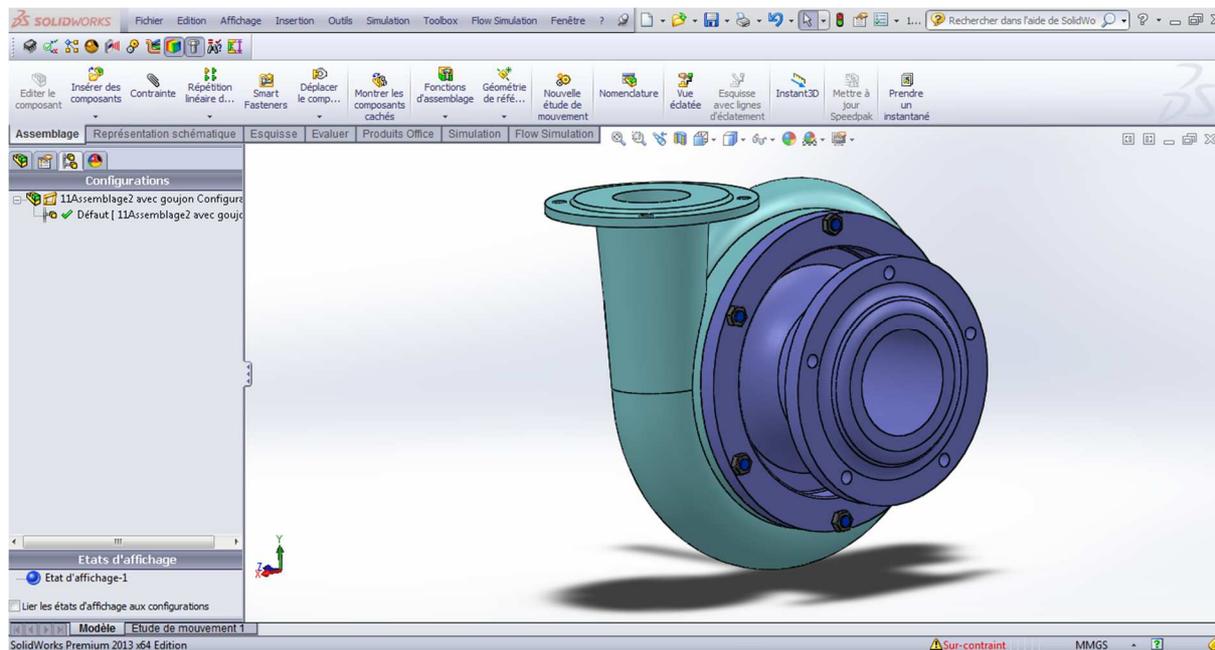


Figure 2- 39 : Assemblage des pièces de la turbomachine

La coupe suivante montre la divergence de la section de la spirale :

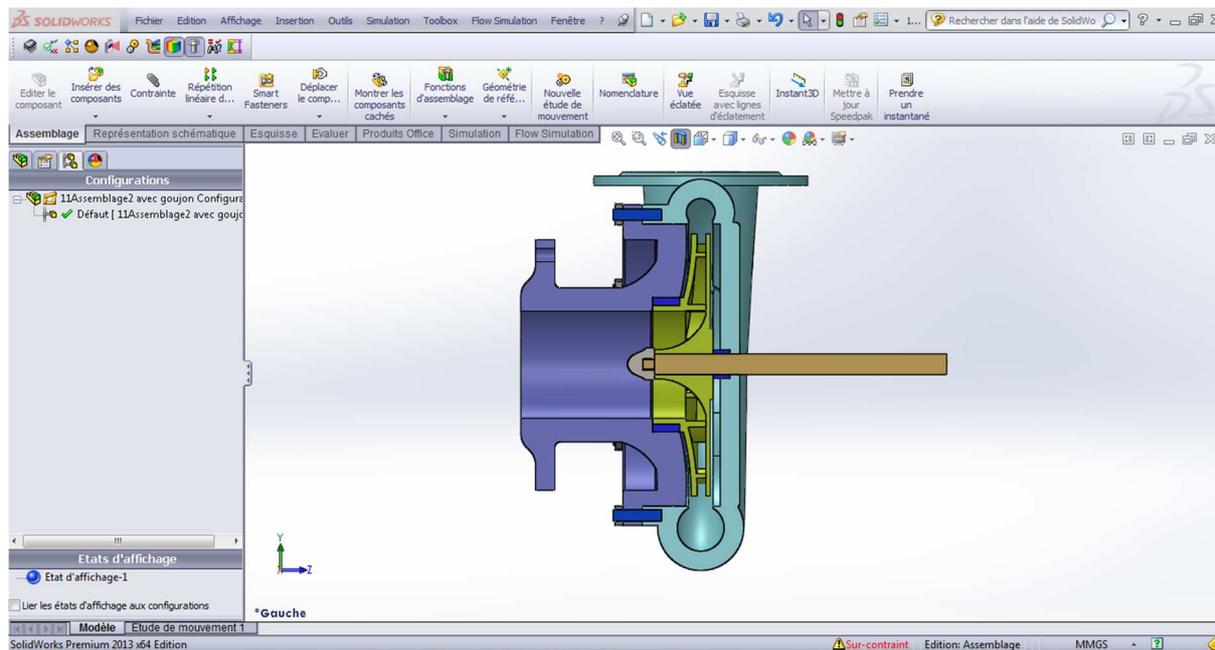


Figure 2- 40 : Coupe sur les pièces assemblées

La vue éclatée montre l'ordre des pièces lors du montage de la turbomachine :

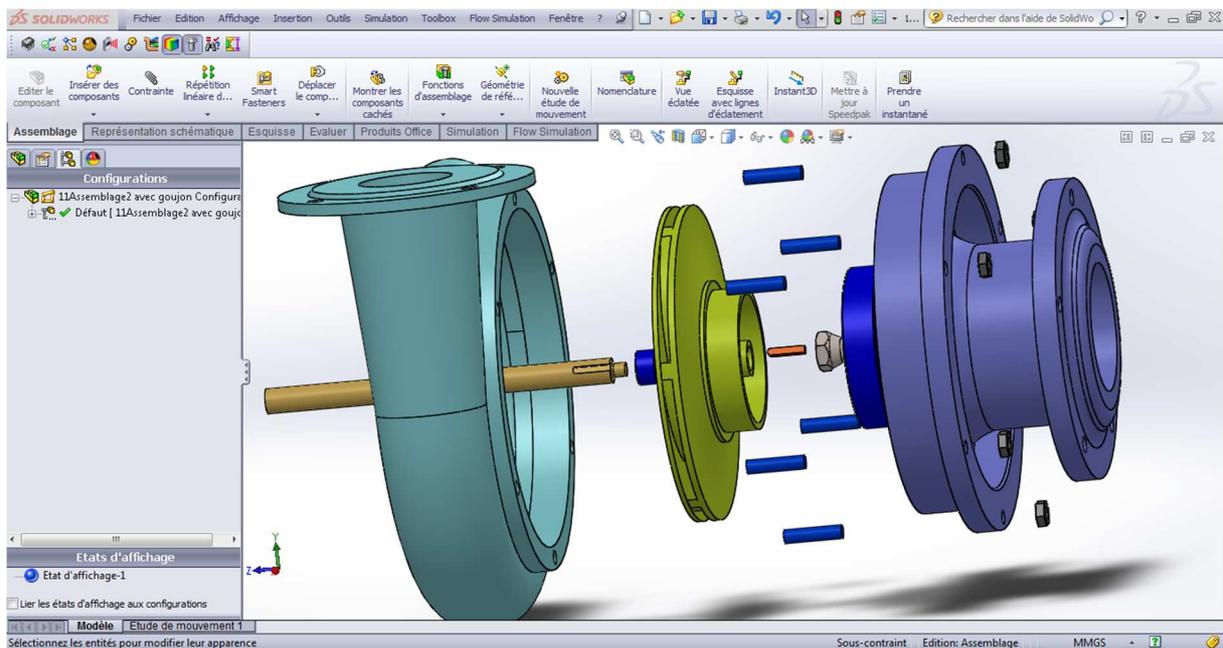


Figure 2- 41 : Vue éclatée de la turbomachine

## Conclusion

Dans la conception des pièces sous SolidWorks, on a retrouvé plusieurs difficultés surtout dans le dessin de la forme spirale et le tracé des aubes. Mais grâce à notre bonne maîtrise du logiciel SolidWorks nous avons pu générer les données à partir d'Excel et de l'outil de calcul sous Matlab pour pouvoir exactement tracer la forme des différentes courbes.

Une autre difficulté c'était dans la conception 3D de la volute. La fonction lissage, au début quand on avait juste deux plans pour la forme de la section, ne voulait pas suivre la courbe spirale mais on a trouvé la solution en créant d'autres plans intermédiaires pour que la fonction marche correctement.

Malgré tous ces problèmes, on a pu de terminer le travail dans les délais et pour une première tentative au dimensionnement on peut dire qu'on a réussie.

# **Chapitre 3**

**Modes de fabrication traditionnels  
d'une turbomachine**

## Introduction

Pour concevoir un produit, on peut faire appel à de nombreux procédés de fabrication qui visent l'obtention d'une pièce ou d'un objet par transformation de matière brute. Ces procédés de fabrication sont à la pointe de la technologie ou les procédés traditionnels : le formage, l'assemblage (soudage, collage...), le moulage et l'usinage (retrait de matière). Ces deux derniers font l'objet de ce chapitre.

### I. Le moulage

Le moulage ou fonderie est un ensemble de procédés qui permet de réaliser des pièces métalliques brutes. Le moulage proprement dit consiste à réaliser des pièces brutes par coulée du métal en fusion dans un moule en sable ou en métal (représentant l'empreinte de la pièce à obtenir), le métal en se solidifiant, reproduit les contours et dimensions de l'empreinte du moule.

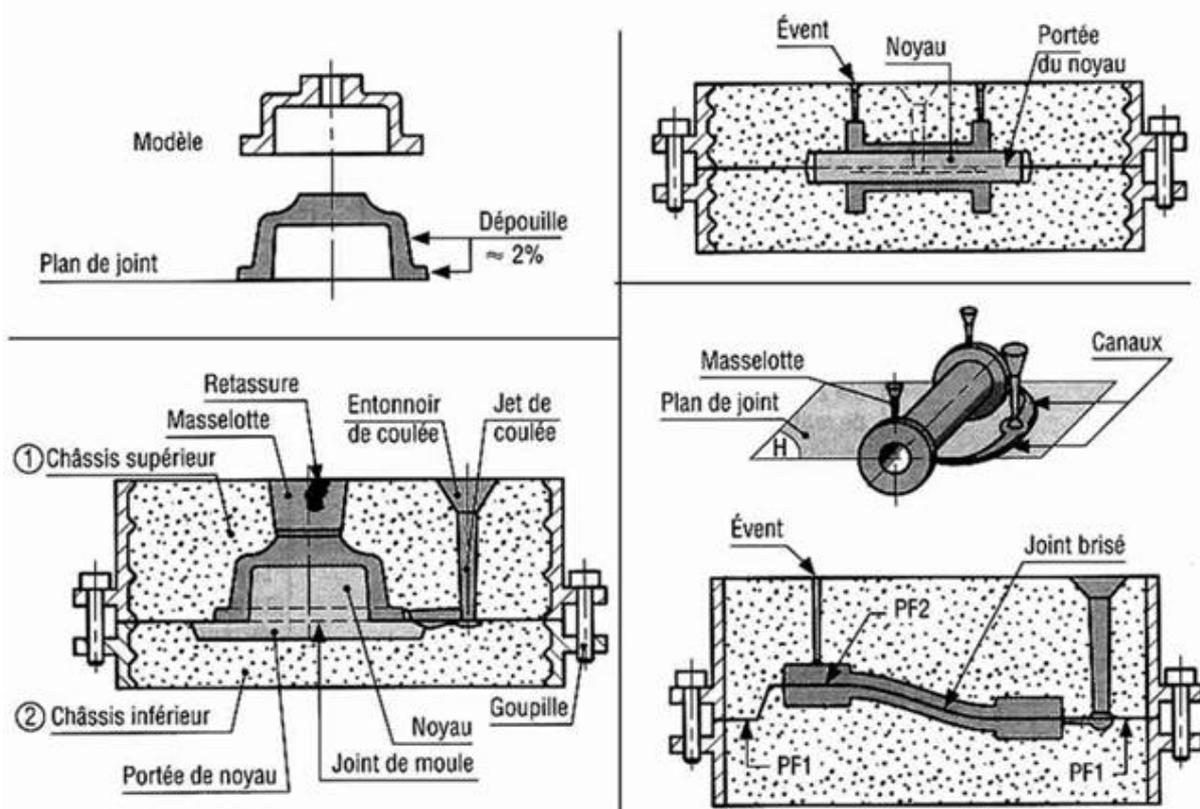


Figure 3- 1 : Principe de moulage

Le moulage est l'action de prendre une empreinte qui servira ensuite de moule dans lequel sera placé un matériau et qui permettra le tirage ou la production en plusieurs exemplaires d'un modèle. Le moulage consiste donc à placer un matériau (liquide, pâte, poudre, feuille, plaque, paraison, préforme, pastille, etc.) dans un moule dont il prendra la forme, une fois dans le moule, la matière refroidit et se solidifie. Un moulage réussi demande beaucoup de réflexion et de goût. Avant toute opération, il faut étudier minutieusement les formes, en sentir les moindres détails.

## 1. Généralité sur le moulage

### a. Les étapes du moulage semblent simples

- Fondre le métal
- Le verser dans le moule
- Le laisser refroidir

### b. Possibilités et avantages du moulage

- Permet de réaliser des pièces de formes complexes
- Permet de réaliser des formes intérieures et extérieures
- Suivant les procédés de moulage on peut obtenir des pièces dont les dimensions sont plus ou moins proches de la pièce finie
- On peut réaliser des pièces de très grande dimension
- Certains procédés de moulage permettent une production en très grandes séries

### c. Inconvénients du moulage

Les inconvénients dépendent des procédés de moulage :

- Limitation des propriétés mécaniques des pièces (matériau)
- Faible précision dimensionnelle et mauvais état des surfaces pour certains procédés (ex : moulage en sable)
- Procédés dangereux du fait de la manipulation de métaux en fusion
- Problèmes environnementaux (fumées...)

### d. Les pièces réalisées par moulage

- Grandes pièces : carters moteur pour les véhicules, les poêle à bois, les bâtis de machine, les roues ferroviaires, les canalisations, les cloches d'église, les grandes statues...
- Petites pièces : couronnes dentaires, bijoux, petites statues, et poêles
- Tous les métaux peuvent être coulés : les ferreux et les non ferreux

### e. Le moule de fonderie

Il contient une cavité dont la géométrie donne la forme de la pièce obtenue

- Les dimensions et la géométrie de la cavité doivent être légèrement surdimensionnées pour tenir compte du retrait du métal pendant la solidification
- Les moules peuvent être faits dans différents type de matériaux : sable, plâtre, céramique et métal...

## 2. Les différentes catégories de procédés de moulage des métaux

### A. Moules non permanents

Le moule est détruit pour extraire la pièce

– Avantages : des formes plus complexes sont possibles

– Inconvénients : la cadence de fabrication est souvent limitée. Le temps de réalisation du moule est plus élevé que la coulée.

#### a. Moulage en sable

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.

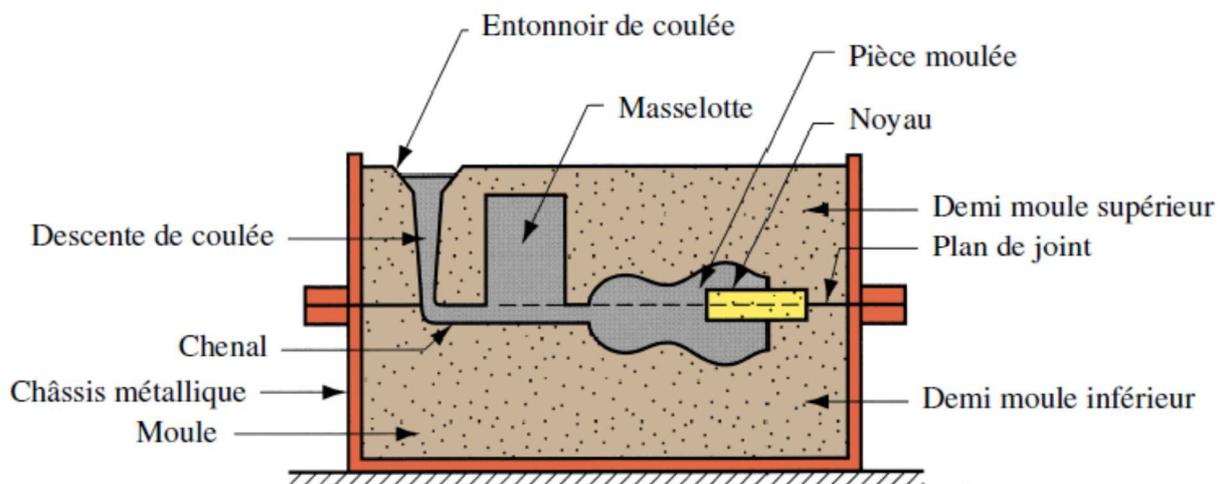


Figure 3- 2 : Moulage en sable

#### i. Les étapes du moulage en sable

- (1) Verser le métal liquide dans le moule
- (2) Attendre la solidification
- (3) Casser le moule et extraire la pièce (décochage)
- (4) Nettoyer et inspecter la pièce
- (5) Traitements thermiques

#### ii. Réalisation du moule en sable

- L’empreinte dans le moule en sable est réalisée en tassant le sable autour du modèle. On sépare les différentes parties du moule et on retire le modèle
- Le moule doit également contenir le système d’alimentation et les masselottes
- Pour obtenir des surfaces intérieures il faut également placer des noyaux dans le moule
- Un nouveau moule doit être fabriqué pour chaque pièce fabriquée

iii. Le sable de moulage

Le sable de moulage doit être infusible (résister à la température de coulée du métal), résistant (résister à l'érosion du métal liquide) et poreux (ne peut s'opposer au passage des gaz produits au moment de la coulée), et se compose en général :

- De sable quartzeux (86-96%) pratiquement infusible en contact avec le métal liquide.
- D'argile (bentonite) (3-10%) qui lie les grains de silice entre eux et empêche le moule de se détériorer après enlèvement du modèle. Dans certains cas au lieu de l'argile on utilise d'autres liants tels que : huiles végétales, verre soluble, dextrine, résine, bitumes, lessive sulfurique etc...
- Le noir de fonderie, graphite pulvérisé ou noir végétal (2-6%) (Charbon de bois pulvérisé) qui brûle en contact du métal en fusion et donne ainsi au moule la porosité et la perméabilité nécessaire à l'évacuation des gaz (eau, vapeur d'eau, oxyde de carbone) qui seraient emprisonnés dans l'empreinte.
- On incorpore de l'eau, des résines tyranniques accompagnées d'un catalyseur dans la proportion globale de 1,5%. Les résines provoquent le durcissement assez rapide du moule à la température ambiante.

On distingue les sables :

- de contact qui adhèrent à la surface du modèle et se trouve en contact avec le métal en fusion.
- de remplissage (vieux sable) utilisé pour combler tout le volume du châssis.
- unique utilisé dans les fonderies mécanisées, où on a recours au sablage mécanique.

On emploie le sable unique pour remplir tout le volume du châssis. Sa cohésion, sa perméabilité et réfractivité sont élevées.

Les compositions et différentes propriétés des différents types de sables sont représentées dans le tableau ci-dessous.

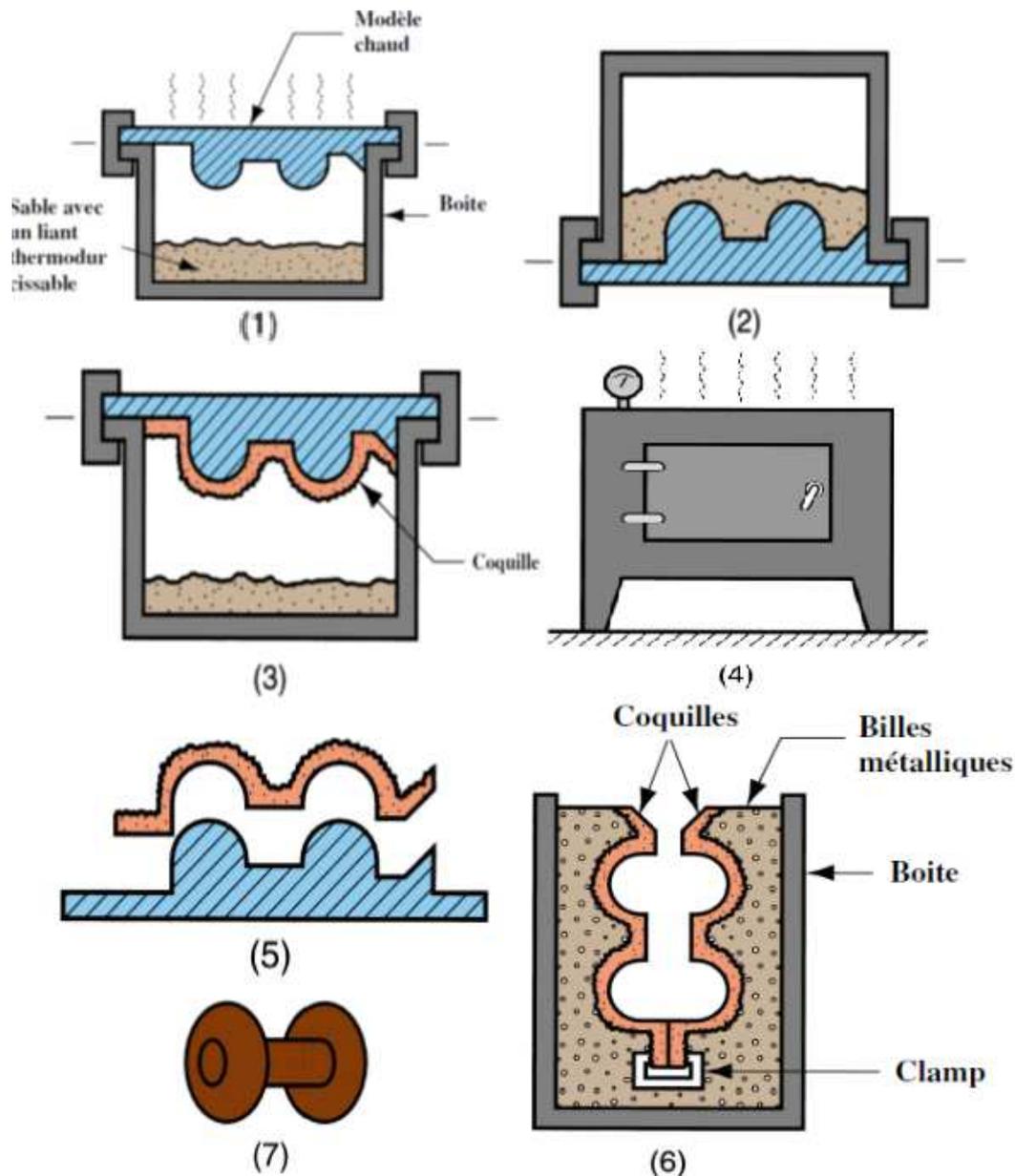
**Tableau 3- 1: Composition et propriétés des sables de moulage**

Sable de moulage	Composition %				Propriétés		
	Sable décoché	Sable quartzeux	Argile (bentonite)	Additions	Humidité %	Perméabilité	Résistance à la compression en état humide (Kgf/cm <sup>3</sup> )
Sable unique	85-90	Moulage de 10-5	La fonte 3 (1-0.5)	Lessive 1-sulfurique 0.5-charbon	4-5	70-80	0.4-0.6
Sable de contact	50-60	40-30	6.5-5.0 (2-1.5)	2-lessive sulfurique 3-charbon	4.5-5.5	80-100	0.5-0.6
Sable de remplissage	96-98	3-4.5	1.0-0.5	-----	5-5.5	60	0.3-0.4
Sable unique à grande résistance (pour la machine automatique)	93-96	3.5-2	----- (2-1.5)	1-charbon 0.1-amidon	3-3.4	120-150	1.5-1.7

**b. Moulage en carapace**

Le moulage en carapace est comme le moulage mécanique en sable et dont il a un aspect particulier. Le métal liquide est coulé dans un moule constitué de deux coquilles appelées carapaces ou masques

➤ Étapes du moulage en carapace



**Figure 3- 3 : Etapes du moulage en carapace**

- (1) un modèle en métal est chauffé et placé au-dessus d'une boîte contenant le sable mélangé à de la résine thermodurcissable
- (2) la boîte est renversée de sorte que le sable et la résine tombent sur le modèle chaud. Une couche du mélange est polymérisée
- (3) la boîte est replacée de sorte que les particules non solidifiées tombent dans la boîte
- (4) La coquille de sable et de résine est chauffée plusieurs minutes afin de compléter la polymérisation

(5) La coquille est séparée de la plaque modèle

(6) Les deux parties du moule en coquille sont assemblées et maintenue par du sable ou des billes de métal dans une boîte.

La coulée peut être effectuée : (7) La pièce finie est extraite

#### **c. Moulage à la cire perdue**

Les différents procédés de moulage étudiés précédemment partent tous du principe suivant : le moule est en deux ou plusieurs parties afin de pouvoir en sortir le modèle ou donner l'empreinte voulue à chacune des parties. L'expérience montre qu'un tel moule, même si les différentes parties sont assemblées avec beaucoup de soins, ne permet pas d'atteindre une grande précision. De là l'idée de faire un moule en une seule pièce pour obtenir un moulage très précis. Le moulage à la cire perdue est un moulage de précision dont le but est de supprimer tout ou en partie l'usinage s'il y a lieu.

La précision maximum pratiquement obtenue est de l'ordre de  $\pm 0.07\text{mm}$  est couramment de 0.3% en valeur relative.

Ce mode de moulage est connu depuis la plus haute antiquité. Les chinois et les grecs l'utilisent pour la fonderie d'objet d'art, il s'est conservé à peu près intégralement pour la fonderie artistique et s'est perfectionné de nos jours pour la coulée de bijouterie et la fabrication de prothèses dentaires en or ou en acier inoxydable exigeant une grande précision. Il s'est enfin étendu à la production de petites pièces mécaniques à partir de tous les alliages.

##### ➤ Etapas du moulage à la cire perdue

(1) On réalise des modèles en cire

(2) Plusieurs modèles sont attachés ensemble de façon à former une grappe

(3) La grappe de modèles est recouverte d'une fine couche de matériau réfractaire

(4) Le moule complet est formé de plusieurs couches afin d'obtenir un moule rigide

(5) Le moule est retourné puis chauffé afin d'évacuer par gravité la cire fondue

(6) Le moule est préchauffé à haute température ce qui permet d'évacuer toutes les impuretés. Cela facilite également le remplissage dans les détails du moule. Le métal est coulé et la pièce se solidifie

(7) Le moule est cassé et les pièces sont séparées de la grappe

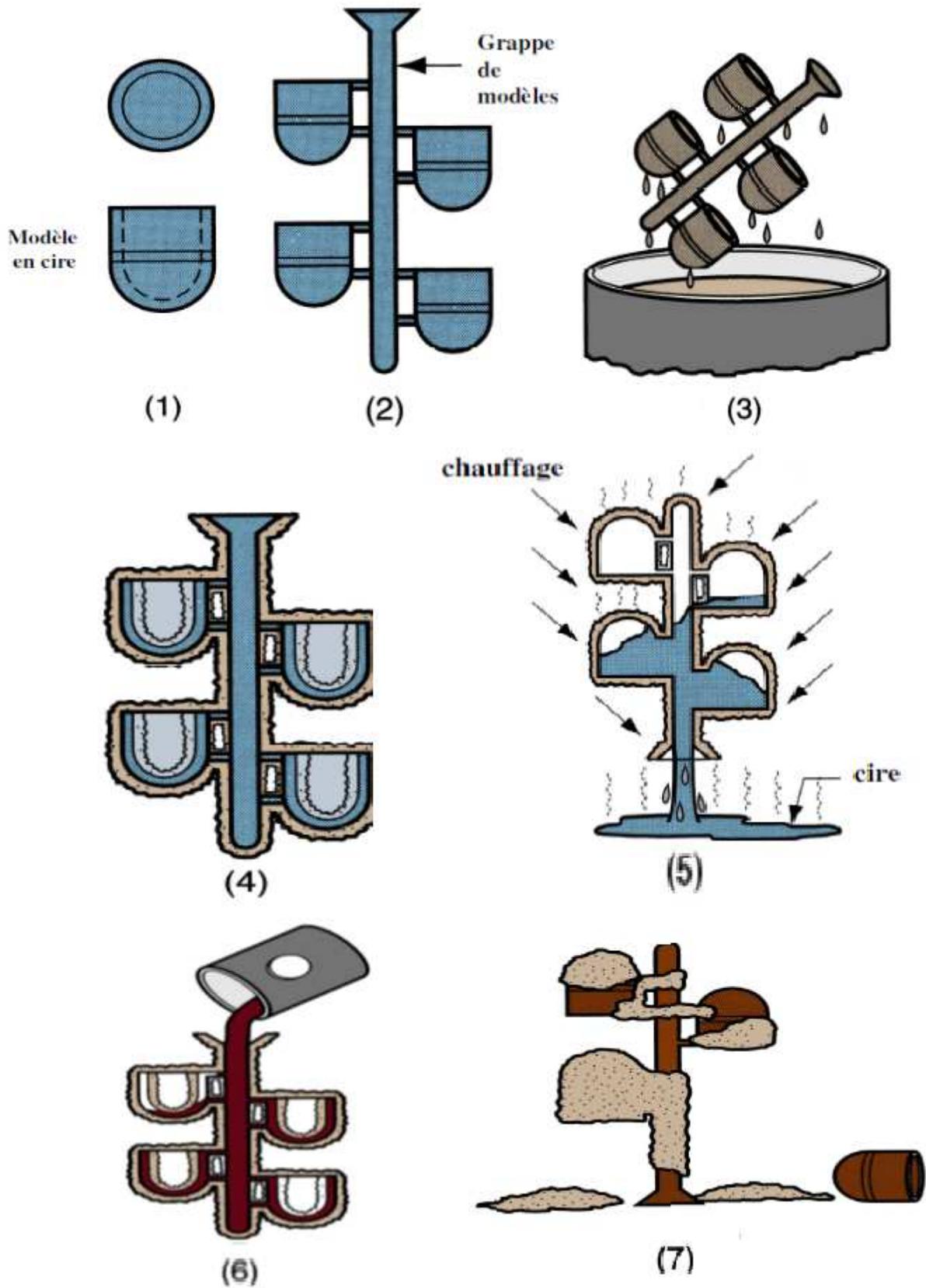


Figure 3- 4 : Etapes du moulage en carapace

## B. Moules permanents

Le moule est souvent métallique et peut être réutilisé

- Avantage : cadences de production plus élevées
- Inconvénients : géométrie limitées car il faut pouvoir démonter le moule

### a. Moulage en coquille

Le moulage en coquille est un procédé qui permet de couler par gravité le métal en fusion directement dans un moule métallique en fonte ou en acier appelé coquille.

Ce type de moulage est destiné pour la réalisation de pièces compliquées en métaux et alliages ferreux (fonte grise et acier) et alliages non ferreux à point de fusion relativement bas, bronzes (10 -13%Zinc), Al-Si possédant de bonnes propriétés de fonderie, Al-Si-Cu et Al-Cu(4-12%Cu).

Le moule est constitué de deux ou plusieurs parties appelées chapes, formant l'empreinte, de trou de coulée et les évents (figure 3-5), les chapes sont solidement assemblées pendant la coulée du métal afin d'éviter leur séparation.

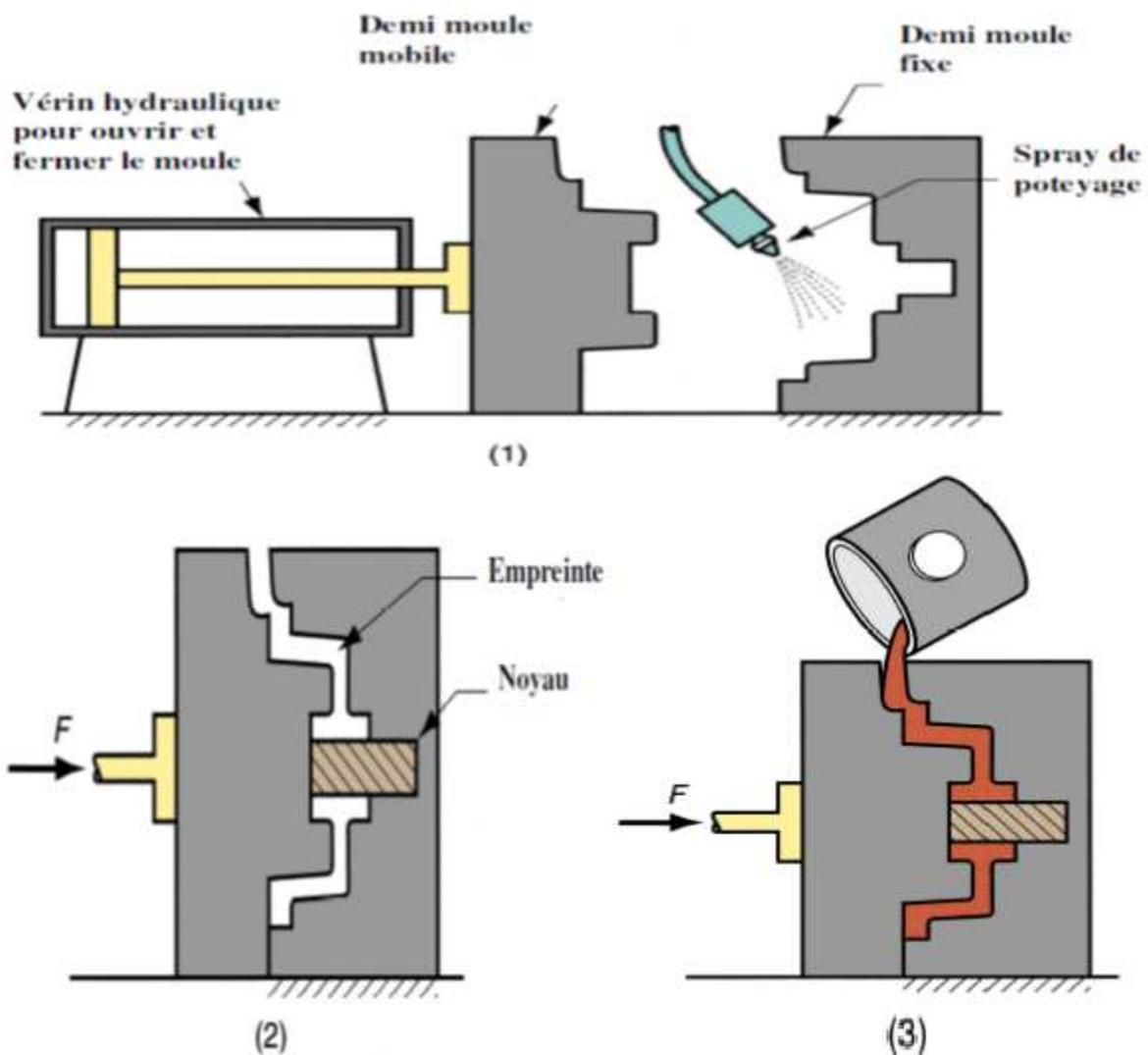


Figure 3- 5 : Etapes de moulage en coquille

### ➤ Étapes du moulage en coquille

- (1) Le moule est préchauffé et recouvert d'un liquide protecteur qui facilitera le démoulage
- (2) Les noyaux (si nécessaire) sont placés dans le moule qui est ensuite fermé
- (3) Le métal fondu est versé dans le moule

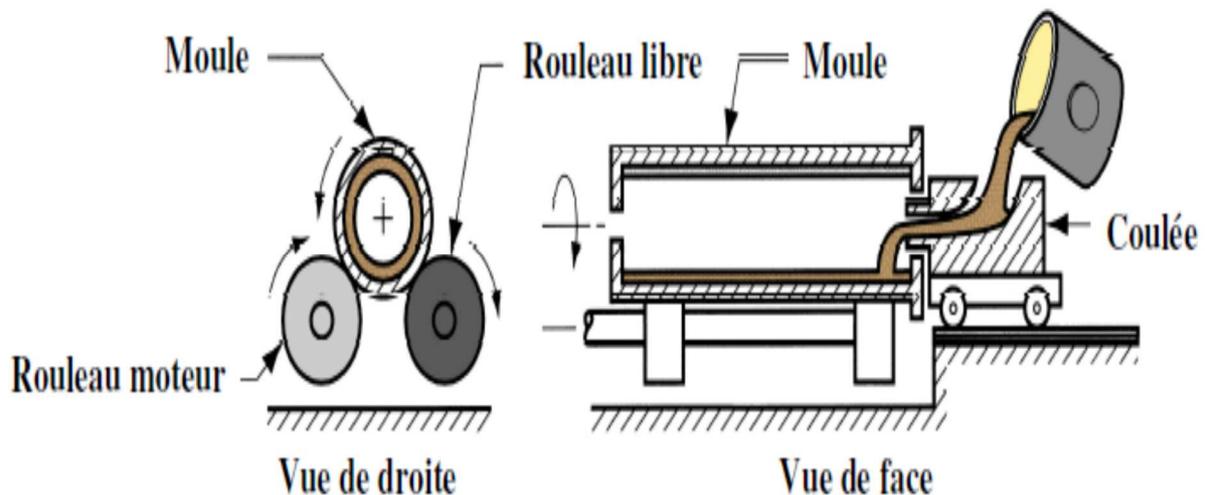
### **b. Moulage par centrifugation**

Ensemble des procédés pour lesquels le moule est entraîné en rotation à grande vitesse. Les forces d'inertie distribuent le métal liquide dans l'empreinte. On peut citer :

- La centrifugation à axe horizontal
- A axe oblique
- A axe vertical

Le métal liquide est coulé dans un moule rotatif pour produire des tubes

- Dans certaines opérations la rotation du moule commence après que le métal soit versé
- Pièces : tuyaux anneaux...
- La forme extérieure peut être cylindrique, octogonale, hexagonale... mais la forme intérieure est théoriquement parfaitement cylindrique du fait de l'axisymétrie de révolution



**Figure 3- 6 : Mise en œuvre du moulage par centrifugation**

3. Table des catégories de procédés de moulage

Avantages, inconvénients et domaines d'application de chaque procédé :

Tableau 3- 2 : Catégories de procédés de moulage

Catégories de procédés de moulage	Les procédés	Avantages	Inconvénients	Applications
Moules non permanents	<b>Moulage en sable</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Possibilité de mouler des matériaux dont le point de fusion est élevé (acier, fonte).</li> <li>- Possibilité de mouler des pièces de (très) grande taille (Moulage de carters de machines) - Procédé rentable pour les petites et moyennes séries (quelques dizaines à quelques milliers de pièces)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Surfaces obtenues peu précises ( ± 0,5 mm ) Nécessite un usinage des surfaces fonctionnelles - Procédé peu rentable pour les grandes séries</li> </ul>	
	<b>Moulage en carapace</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- l'empreinte a un meilleur état de surface ce qui facilite l'écoulement du métal liquide et conduit à un meilleur état de Surface des pièces finies</li> <li>- Bonnes précisions dimensionnelles</li> <li>- Ne nécessite pas obligatoirement de machine</li> <li>- l'aptitude au déburrage des noyaux permet d'éviter la Formation de fissures dans la pièce</li> <li>- Peut être mécanisé pour une production en série</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Plaques modèle plus coûteuses</li> <li>- Difficilement justifiable pour une petite série</li> </ul>	L'industrie automobile
	<b>Moulage à la cire perdue</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Des pièces d'une grande précision sont réalisables</li> <li>- Bonnes précision dimensionnelle et bon état de surface</li> <li>- La cire est recyclable</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- De nombreuses étapes dans le procédé</li> <li>- Procédé assez cher</li> </ul>	
Moules permanents	<b>Moulage en coquille</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bon control des dimensions et de la qualité des surfaces finies</li> <li>- Solidification plus rapide due au moule métallique. On</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Habituellement limité au matériau à basse température de fusion</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Du fait du coût élevé du moule, le procédé est mieux</li> </ul>

		<p>obtient des grains plus fins ce qui améliore les caractéristiques mécaniques des</p> <p>Pièces moulées</p>	<p>– Les formes sont plus simples qu'en moulage en sable car le moule</p> <p>Doit être ouvert</p> <p>– Coût élevé du moule</p>	<p>Adapté aux grandes séries et peut être automatisé.</p> <p>• Pièces typiques : pistons de moteurs thermiques,</p> <p>Corps de pompe, pièces d'avion et de missiles</p> <p>• Métaux couramment moulés : aluminium, Magnésium, alliages de cuivre...</p>
	<p><b>Moulage par centrifugation</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aucune perte de métal.</li> <li>- Propriétés mécaniques élevées du produit coulé.</li> <li>- Structure à grains fins.</li> <li>- Possibilité d'obtenir des pièces bimétalliques.</li> <li>- Rendement élevé.</li> </ul>	<p>Le coût élevé des équipements et installations.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-les moteurs à explosion à chemises humides</li> <li>-gros tuyau en fonte pour les canalisations</li> </ul>

### II. Usinage

#### 1. Généralité sur l'usinage

L'usinage regroupe un grand nombre de techniques de fabrication par retrait de matière telles que le perçage, le fraisage et le tournage. Ces techniques peuvent être employées sur à peu près tous les types de matériaux.

Les éléments à usiner sont attachés au sein des machines à commande numérique, puis un outil contrôlé par ordinateur effectue les retraits de matière désirés jusqu'à obtention de la pièce voulue. De même que pour le moulage par injection, l'usinage emploie un panel large de matériaux, qui peuvent être choisis en fonction de l'application souhaitée. Les machines utilisées sont très précises (tolérance de l'ordre de  $25\mu\text{m}$ ). Cependant, il peut être très compliqué (voire impossible) de réaliser des pièces à géométries complexes (entrelacées, imbriquées, assemblées) ou comportant des détails internes.

L'usinage est souvent utilisé pour la fabrication de pièces uniques, prototypes fonctionnels mais également pour produire des pièces de moteur ou de machines.

Généralement, l'usinage de matière telle que la fonte ne nécessite pas une grande précision, par contre, les pièces réalisées en matières techniques comme l'aluminium, le téflon, le quartz... doivent être réalisées avec des tolérances de précision de l'ordre du micron.

L'usinage des pièces mécaniques en bois, métal, céramique, plastique... se fait par étape successive sur des machines-outils spécifiques ayant chacune une fonction particulière.

La plupart de ces machines-outils d'usinage fonctionnent selon un ou plusieurs axes de rotation et de serrage. La matière brute est installée avec précision sur les machines-outils dédiées pour obtenir un usinage parfait, au micron près. Selon la matière utilisée, les vitesses de coupe varient énormément afin de respecter les spécificités techniques de résistance de chaque matière. L'usinage sur machines-outils à commande numériques est de plus en plus utilisé aujourd'hui dans les unités de production. Il permet de gagner un temps précieux sur les réglages préalables à l'usinage des pièces.

Actuellement parmi tous les axes de recherche en fabrication, on peut en citer deux : l'UGV (ou usinage à grande vitesse) et les machines à axes parallèles qui offrent une grande mobilité de la tête d'usinage.

Avec le travail à grande vitesse, la machine-outil passe à la vitesse supérieure.

La pièce usinée par UGV est d'une précision supérieure. Tout d'abord, les efforts de coupe sont réduits. Donc, la pièce subit moins de déformation. Ensuite, les calories sont dissipées dans les copeaux avant d'avoir le temps de pénétrer dans la pièce. Moins sollicitée en température, la pièce conserve sa stabilité dimensionnelle originelle.

L'état de surface de la pièce à usiner est amélioré par l'écoulement plastique du matériau dans la zone de cisaillement. L'augmentation du débit des copeaux autorise une meilleure productivité, qui peut être multipliée par un facteur de 3 à 10.

Enfin, l'UGV autorise l'usinage de pièces qu'il était impossible d'usiner auparavant avec les moyens conventionnels (comme les voiles minces en aéronautique, par exemple).

Avec l'apparition de l'UGV, le secteur de la machine-outil a tourné une page de son histoire et entamé une irréversible évolution. Les pièces sont désormais usinées très rapidement, avec une précision toujours croissante. Seulement, l'usinage ne représente que 15 % du temps du cycle total de production.

### 2. Les machines

Les machines sont classées en deux catégories :

-Fraisage : L'outil tourne, la pièce se déplace par rapport à l'outil. Cela permet de réaliser des formes planes, des moules...

-Tournage : La pièce tourne, l'outil se déplace par rapport à la pièce : pour réaliser des pièces de révolution.

Bien entendu, des industriels fabriquent des tours, où les outils peuvent tourner, ou des centre de fraisage où les pièces peuvent être entraînés en rotation... ce sont des machines hybrides, mixtes, ou machine multi-axe.

#### a. Le fraisage

Dans le cas du fraisage : l'outil tourne, la pièce se déplace. Les centre de fraisage comportent généralement 3 axes (que l'ont peut commander individuellement pour faire des formes complexe : hélices...) et un plateau tournant pour présenter toutes les faces de la pièce devant la broche.

On peut aussi imaginer de monter l'outil au bout un bras de robot. Voir exemple ci-contre.

L'outil tourne, la pièce se déplace par rapport à l'outil. Cela permet de réaliser des formes planes, des moules...

#### ➤ Fraiseuses



**Figure 3- 8 : Centre de fraisage à axe vertical**



**Figure 3- 7 : Double tête de fraisage pour usiner les maquettes de voiture en résine**

**b. Le perçage**

Le perçage est une forme de fraisage avec une caractéristique particulière : l'outil doit plonger dans la matière. Il faut donc qu'il soit capable de couper au centre (zone où la vitesse de coupe est nulle).

Le foret le plus courant est en ARS, il peut être revêtu d'une couche de carbure (couleur or), mais il existe des fraises à percer, l'arête de coupe étant formée de deux plaquettes se chevauchant au centre, afin de pouvoir couper le centre du trou.

Foret à centrer	Foret à pointer	Foret	Alésoir	Fraise à lamer
				
A utiliser pour situer l'axe d'une pièce en tournage	A utiliser pour positionner un perçage	Pour percer des trous (tolérance H10)	Pour la finition d'un trou de bonne qualité (tolérance H7)	Pour noyer une tête de vis Chc

**Figure 3- 9 : Outil de perçage**

**c. Le tournage**

La pièce tourne, l'outil se déplace par rapport à la pièce ; Cette opération permet de réaliser des pièces de révolution.

➤ Les machines de tournage :



**Figure 3- 11 : Tour conventionnel**



**Figure 3- 10 : Tour à commande numérique**

### 3. Condition de coupe

#### a. Les paramètres de coupe

**Tableau 3- 3 : Paramètres de coupe « Tournage »**

Symbole	Désignation	Unité	Calcul
$V_c$	La vitesse de coupe	m/min	Imposé par le fabricant d'outil
N	la vitesse de broche	tr/min	$V_c = \frac{\pi DN}{1000}$
f	l'avance par tour	mm/tr	Fonction de la rugosité désirée, du copeau mini
a	la profondeur de passe radiale	mm	1/3 de la largeur de la plaquette maxi. Fonction du diagramme brise copeaux
$h_m$	Epaisseur moyenne du copeau	mm	
D	Diamètre usiné	mm	
T	le temps de coupe	min	$T = \frac{1}{fN}$

**Tableau 3- 4 : Paramètres de coupe « Fraisage »**

symbole	Désignation	Unité	Calcul
$V_c$	La vitesse de coupe	m/min	Imposé par le fabricant d'outil
$V_f$	La vitesse d'avance pour le fraisage	mm/min	$V_f = f * n * N$
N	la vitesse de broche	tr/min	$V_c = \frac{\pi DN}{1000}$
f	l'avance par dent	mm/dents	Fonction de la rugosité désirée, du copeau mini
n	Nombre de dents sur la fraise	mm/min	
a	la profondeur de passe radiale	mm	1/3 de la largeur de la plaquette maxi. Fonction du diagramme brise copeaux
$h_m$	Epaisseur moyenne du copeau	mm	
D	Diamètre usiné	mm	
$t_c$	le temps de coupe	min	$T = \frac{1}{fnN}$

### b. Choix des paramètres de coupe

Lorsque l'on fait un usinage unitaire, il n'est pas nécessaire d'optimiser les conditions de coupe. On se contente alors de choisir les conditions pour que l'usinage se passe bien. Lorsque l'on fait une série de pièces, il devient intéressant d'essayer d'optimiser un des paramètres

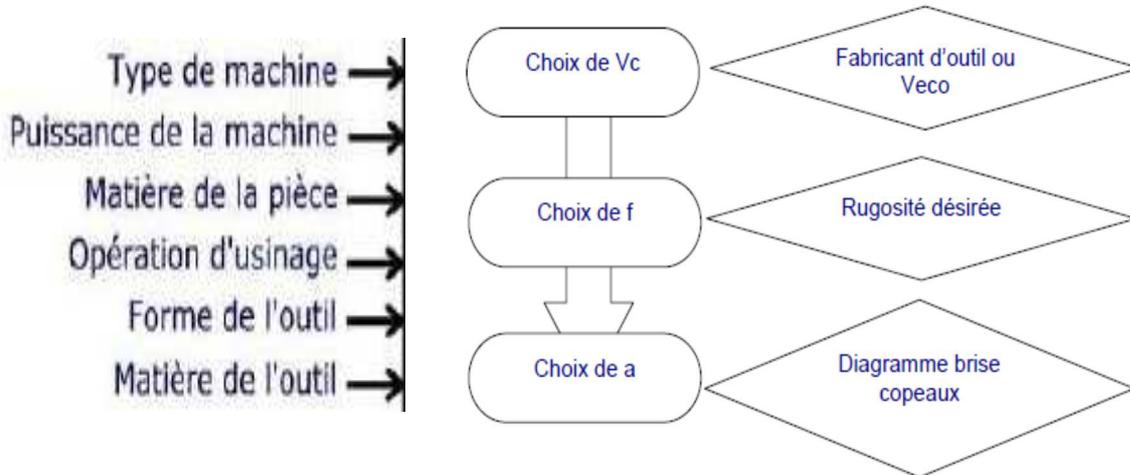


Figure 3- 12 : Diagramme choix de paramètre de coupe

## III. Autres procédés de fabrication

### 1. Le formage

Le formage est un procédé de fabrication consistant à donner forme à une pièce. Plusieurs méthodes de formage existent pour le plastique : thermoformage, formage sous vide, formage par pression, etc. Chacune de ces méthodes a ses spécificités mais de façon générale elles consistent à travailler une feuille de matière en utilisant la chaleur, la pression ainsi que des formes mâles et femelles pour créer la forme voulue.

L'inconvénient de ce procédé est qu'il ne permet de contrôler qu'une face de la pièce produite. En revanche, le coût d'outillage est en général moins élevé que pour des procédés comme l'injection plastique, en particulier pour des pièces larges à formes simples.

### 2. L'Assemblage

L'assemblage de pièces se réfère à toutes les techniques permettant d'assembler plusieurs produits semi-finis en un produit final. Cela inclut donc le soudage, le collage et les fixations.

Par fixations, il faut comprendre les mécanismes de verrouillage, les loquets, les charnières au sein de la pièce ou des éléments tels que les écrous et vis. Le soudage quant à lui consiste à assembler des pièces par chaleur et pression.

Les pièces étant produites en amont, les spécifications liées à l'assemblage dépendent beaucoup des procédés précédents. L'assemblage étant très dépendant de la forme des produits semi-finis, ce procédé peut s'avérer chronophage et induire des coûts de main d'œuvre considérables.

Ce tableau regroupe les principaux procédés de fabrication et montre les avantages, les inconvénients et le champ d'application de chaque procédé :

**Tableau 3- 5 : Comparaison des procédés de fabrication**

Procédé	Description	Avantages	Inconvénients	Applications
Usinage	Retrait de matière	Tous types de matériaux Tolérance élevée Délais de production raisonnables	Peu adapté pour des pièces complexes Coût des équipements élevé Taux de rebus important	Dispositifs et appareillages Automobile Aérospatial
Moulage	verser un métal liquide dans un moule dont il prendra la forme	Permet de réaliser des pièces de formes complexes Permet de réaliser des formes intérieures et extérieures	Limitation des propriétés mécaniques des pièces (matériau) Faible précision dimensionnelle et mauvais état des	carters moteur pour les véhicules, les poêle à bois, les bâtis de machine, les roues ferroviaires, les canalisations couronnes dentaires, bijoux
Formage	Etirements et mises en forme de fines feuilles de matière	Pièce de grande taille Prix abordable	Uniquement thermoplastiques Formes limitées Pièces à parois fines uniquement Contrôle unilatéral	Packaging Contenants Panneaux
Assemblage	Soudures et fixation de pièces	Tous types de matériaux	Délais importants Coûts élevés	Automobile Electronique Médical

### Conclusion

Les procédés de fabrication traditionnels donnent des avantages précieux et malgré qu'ils ont beaucoup d'inconvénients aussi mais ils restent vastement utilisées dans l'industrie, dans le chapitre suivant, on parlera d'une moderne procédé de fabrication qui va changer le domine industriels c'est l'impression 3D.

# **Chapitre 4**

**Impression 3D d'une turbomachine  
génératrice d'énergie**

### Introduction

Chacun aurait pu croire, il y a quelques années encore, à de la Sciences Fiction. Pourtant l'impression 3D est bel et bien aujourd'hui en train de prendre son envol.

Selon un responsable de General Electric Aviation, dans les décennies à venir, au moins 50% des moteurs d'avion seront fabriqués par fabrication additive.

A ce jour avec l'impression 3D, nous n'apercevons que le sommet de l'iceberg, il y a encore tout un bloc de glace sous l'eau dont nous ne pouvons imaginer les dimensions.

L'impression 3D va engendrer de nouveaux business, l'infrastructure qui se mettra en place autour sera gigantesque, et concernera tous les secteurs d'activité.



**Figure 4- 1 : Pièces fabriquées par impression 3D**

#### I. De quoi s'agit-il ?

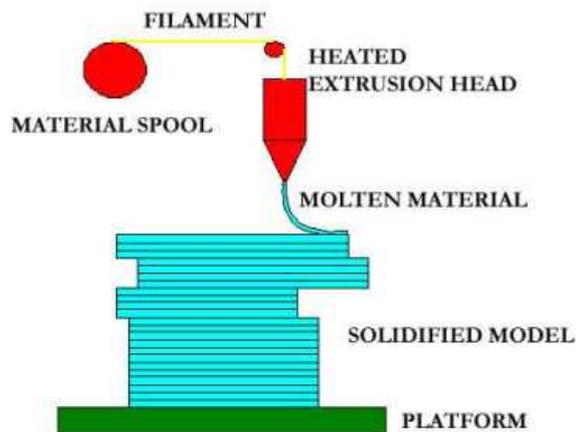
L'impression 3D est une nouvelle technologie appelée également « production additive », par opposition à l'usinage qui modèle un objet par extraction, soustraction ou déformation à partir d'un bloc de matière brute en lui donnant une forme (procédés lourds en outillage et qui nécessitent une main d'œuvre qualifiée). Elle est apparue dans les années 90.

L'impression 3D consiste, en fait, à superposer des fines couches de poudre de matériaux spécifiques (métal, plastique, bois, acier, etc ...) dont on veut que soit fait l'objet. Un rayon laser vient ensuite chauffer les parties que l'on veut solidifier. Il ne reste alors plus qu'à enlever la poudre superflue, et l'objet devient réel, palpable et fonctionnel.

La fabrication est lancée à partir d'un fichier CAO (objet 3D créé par ordinateur). L'idée est de reproduire l'objet virtuel découpé en tranches dans la réalité par un système d'impression. C'est l'empilement des couches qui crée le volume.

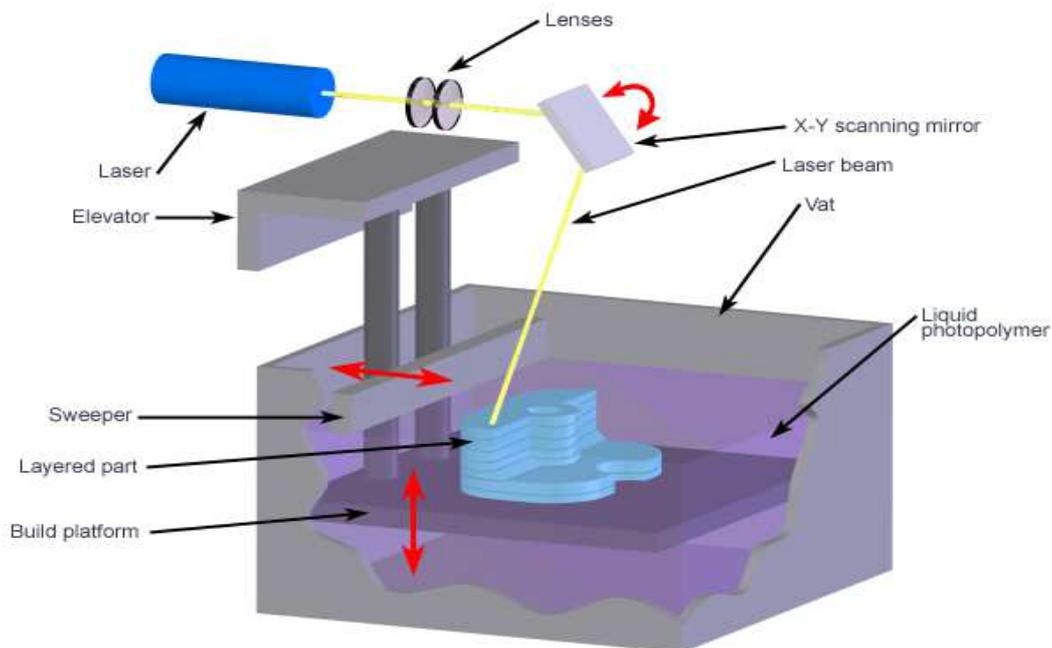
Sans rentrer dans des détails trop techniques, trois technologies principales coexistent :

-La FDM (Fuse Deposition Modeling) : c'est le modelage par dépôt de matière fondue.



**Figure 4- 2 : Modelage par dépôt de matière fondue**

-La Stéréolithographie: une lumière UV vient solidifier une couche de plastique liquide.



**Figure 4- 3 : La Stéréolithographie**

-Le Frittage Sélectif par Laser : c'est la liaison du matériau sous forme de poudre soit par jet d'une colle liquide, soit par exposition à un laser.

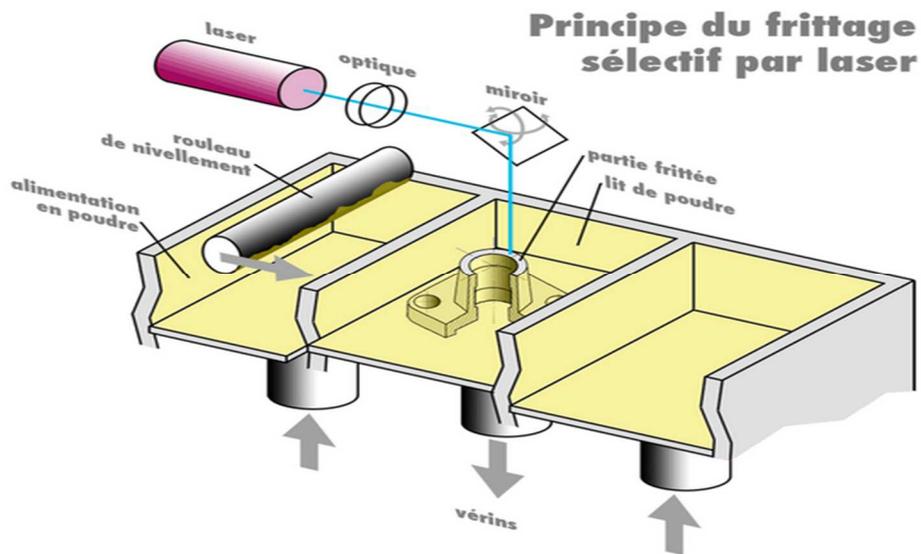


Figure 4- 4 : Le frittage sélectif par laser

Aujourd'hui, environ 200 matériaux sont disponibles pour l'impression. On peut les réunir en 5 grandes familles :

-Les plastiques (aujourd'hui 75% des impressions) :

\*ABS : surface rugueuse et ressemblante au plastique tant au niveau texture, dureté et fonctionnalité. L'ABS fond à 200°C. Il est résistant et disponible en plusieurs couleurs. La célèbre marque Lego utilise l'ABS pour concevoir ses pièces.



Figure 4- 5 : Filament d'ABS générique

\*PLA : issu de ressources renouvelables, respectueux de l'environnement et biodégradable. Le PLA fond à 160°C.



**Figure 4- 6 : Filament de PLA**

\*Résine : disponible en mat, brillant, blanc ou noir. Bonne finition de surface.



**Figure 4- 7 : Objet imprimé en résine transparente**

-Les métaux : principalement le titane et l'acier inoxydable. Egalement l'aluminium et le cobalt-chrome. A noter que l'or, l'argent et le bronze ne sont pas fabriqués directement avec les imprimantes 3D mais celles-ci permettent la fabrication de moules dans lesquels seront injectés les métaux précieux.



**Figure 4- 8 : Une balle en cobalt-chrome**

-La céramique : compatible avec la nourriture, elle est recyclable et résiste à la chaleur



**Figure 4- 9 : Objets imprimés en céramique**

-Les autres matériaux : bois, cire, sable, béton, ...

-Les matières alimentaires : chocolat par exemple

## **II. Avantages – Faiblesses – Opportunités**

### **1. Avantages**

- La fabrication additive se distingue par sa rapidité;
- la possibilité de fabriquer plus aisément des pièces comportant des canaux internes ;
- La fabrication additive permet de réduire certains délais de fabrication (rapidité);
- Conception innovante et optimisée ;
- Possibilité de réaliser en monobloc des pièces multi-matières ou des sous-ensembles (diminution des assemblages) ;
- Par l'utilisation de matière première le plus souvent à caractère discret (poudre ou gouttelette), contrôle fin de la matière et d'aboutir à des pièces à géométrie complexe (contre-dépouille, structures lattic(es) difficilement réalisables par les techniques usuelles. Production par exemple de pièces complexes creuses (allègement de structures), avec des « canaux » non rectilignes, conformes (fonctionnalisation) ;
- Nouvelles possibilités de personnalisation ;
- Réalisation de pièces de petites dimensions ;
- Production sans développer d'outillages (gain en termes de temps et élimination des coûts liés à l'outillage) ;
- Réduction de l'impact environnemental par la réduction de la quantité de matière;

### **2. Faiblesses**

- Le prix des machines reste élevé ainsi que celui des poudres-résines ;
- Productivité des machines encore trop faible ;
- Limite dimensionnelle des pièces fabriquées ;
- Nécessité de modifier les méthodes de conception en intégrant les possibilités offertes par la technologie : chaque produit est un cas particulier ;

- Maîtrise de nouveaux outils (optimisation topologique, maîtrise de la chaîne numérique de données qui viennent de scans ... ) ;
- Toutes les technologies de fabrication additive ne permettent pas d'assurer une reproductibilité certaine des pièces ;
- Nécessité de disposer d'une maîtrise plus large que la simple utilisation de la machine (granulométrie de la poudre, influence de la vitesse du laser, contraintes liées à certains procédés... ) ;
- Obtention d'un brut et non d'une pièce finie. Les caractéristiques mécaniques et la qualité des états de surface obtenues peuvent rester éloignées de celles attendues (rugosité, anisotropie des caractéristiques mécaniques, contraintes résiduelles élevées, porosité ... ) ;
- Intégration d'opérations complémentaires de parachèvement, de finition (traitements thermiques et/ou traitements de surfaces) de parachèvements spécifiques, de traitements de surface ;

### 3. Opportunités :

- Développement de nouveaux matériaux ;
- Émergence de nouveaux fabricants et distributeurs de matières premières ;
- Développement de machines hybrides (machines combinant procédés additifs et soustractifs) ;
- Validation réalisée sur des applications « phares » dans les domaines de l'aéronautique (injection de carburant : composants de moteur d'avion LEAP) et du médical ;
- Nombreux développements en cours pour fiabiliser les équipements, améliorer les caractéristiques mécaniques de pièces ;
- Augmentation des capacités de travail des équipements et de la puissance des sources d'énergie.

## III. Objet numérique

### 1. Principe :

Le composant numérique imprimable est constitué de données numériques majoritairement issues de logiciels de CAO pour la géométrie et d'informations complémentaires pour définir les matières utilisées, la description des machines, les phases du processus... Ce « composant numérique imprimable » contient toutes les informations nécessaires et suffisantes pour piloter le processus de fabrication.



Figure 4- 10 : Schéma de processus d'impression 3D

La pièce 3D du logiciel de CAO est convertie en triangles dans le fichier 3D. Par ailleurs, tous les logiciels CAO ont la capacité d'exporter le modèle 3D en format STL. La définition (résolution, finesse des triangles) doit être rigoureuse car la pièce fabriquée dépendra directement de cette précision. Il y a donc quasiment systématiquement un travail en amont dans le logiciel de CAO pour rendre le modèle « propre » sans trous dans les mailles (contours fermés, arêtes des facettes triangulaires jointives, sans "trous" dans la matière ou erreurs de topologie) Depuis la fin des années 1980, le format STL est le standard de l'industrie pour transférer des données de CAO en fichier pour impression 3D. Cependant, le format STL ne prend pas en compte les aspects de couleur, les textures, les matériaux, structures de maillage... Pour pallier aux évolutions de la technologie et aux besoins de la fabrication additive, des groupes de réflexions se sont créés pour « produire » un format normalisé du composant numérique imprimable. C'est dans ce cadre que la norme NF ISO/ASTM 52915 "Spécification normalisée pour le format de fichier pour la fabrication additive" a été défini ainsi que le format de fichier AMF (Additive Manufacturing File) qui prend en compte la géométrie mais aussi les matériaux, les états de surface, les couleurs, les nuances fonctionnelles et les procédés de réalisation. A ce jour, seuls quelques logiciels de CAO commencent à proposer cette approche.

Il ne s'agit pas seulement de transformer un fichier CAO en fichier STL mais bien de revoir les modes de conception en intégrant tout le potentiel de la fabrication additive, de prévoir les supports de façon pertinente et d'intégrer les données issues de l'optimisation topologique :

- Possibilité de minimiser le volume matière utilisé que ce soit la matière ou le support ;
- Fabrication d'une pièce respectant un cahier des charges de tenue mécanique. L'objectif est de tester sa tenue à son propre poids tout en respectant le critère de minimisation cité précédemment ;
- Libertés de forme fabricable grâce aux procédés additifs permettraient de directement imprimer les formes proposées par l'optimisation topologique. Une réadaptation du modèle n'est ainsi plus nécessaire.

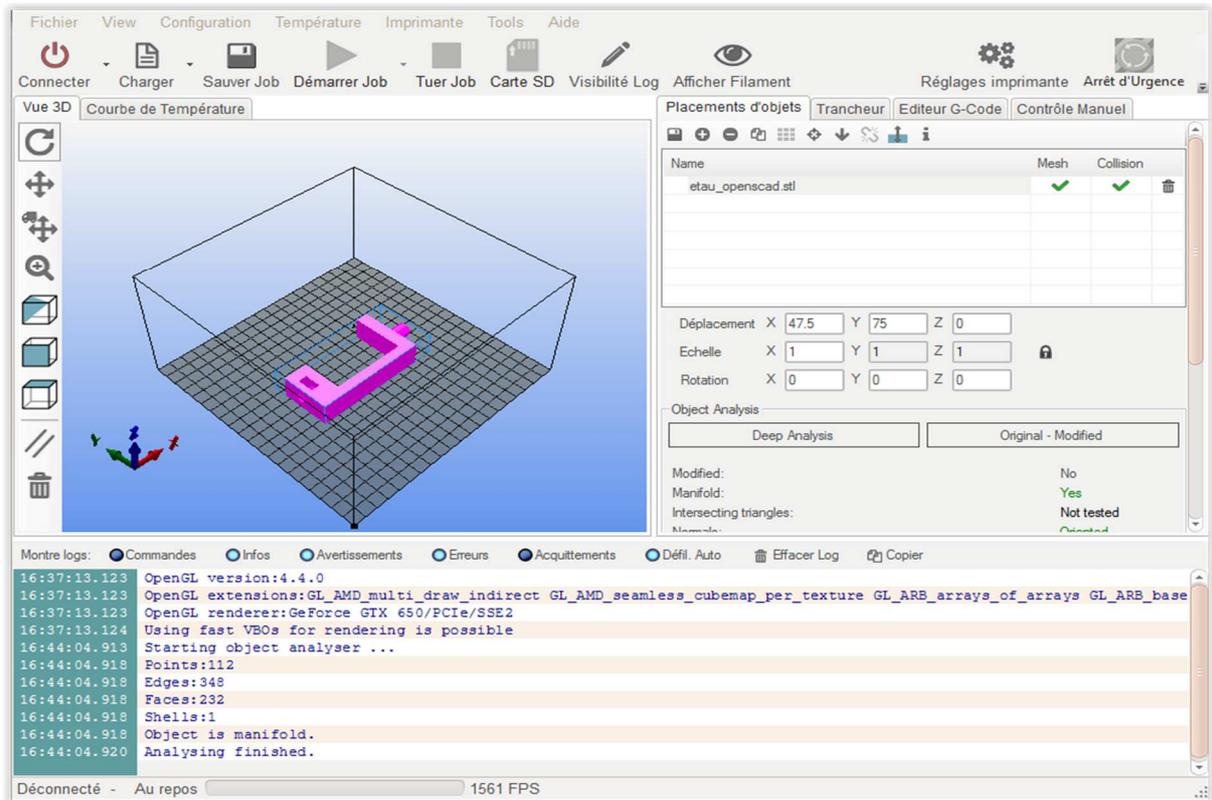
## 2. Logiciels

### a. Introduction

Si le secteur de l'impression 3D explose depuis quelques mois, on le doit bien évidemment à la levée de certains brevets qui bloquaient la libéralisation de cette technologie. Mais un tel essor n'aurait pas été possible sans la contribution d'éditeurs de logiciels libres comme Repetier Host.

### b. Définition

Repetier-host est un logiciel open source permet de contrôler une imprimante 3d. Il est sans conteste le pilote le plus complet à l'heure actuelle, mais souffre d'une interface qui peut paraître chargée et rebuter les novices de l'impression 3D. Pourtant, une fois familiarisé avec le vocabulaire de l'impression 3D, vous réaliserez très vite qu'il n'est pas plus compliqué à configurer qu'un smartphone ou n'importe quel objet technologique de notre quotidien.

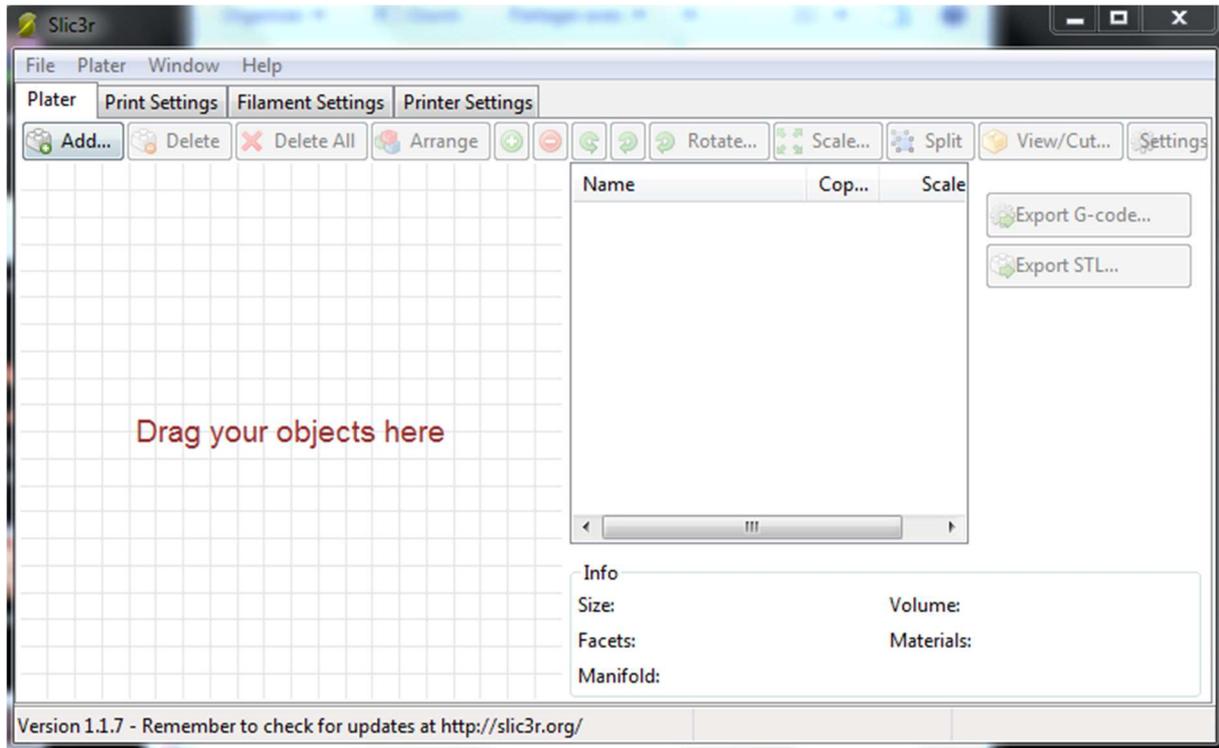


**Figure 4- 11 : Vue d'ensemble de la fenêtre du logiciel Repetier-host**

Une fois votre imprimante installée, le pilote vous permet d'affiner tous les réglages de votre imprimante 3D aussi simplement que vous le faite déjà en allant dans « propriété imprimante » avec votre imprimante classique (2D bureautique). Une fois vos propriétés par défaut enregistrée, vous n'avez plus qu'à lancer votre impression sans revenir sur les réglages pour vos travaux courants.

### **c. Utilisation :**

Repetier-host est associé avec le module Slic3r qui est un logiciel à part entière intégré à Repetier Host, il convertit les objets 3d en G-Code (coordonnées X, Y, Z) qui donne toutes les informations nécessaires à votre imprimante 3D pour qu'elle puisse reproduire un Fichier 3D.



**Figure 4- 12 : Interface logiciel slicer**

La difficulté principale de l'utilisation de Repetier-host est dans le réglage du Slic3r. Il faut connaître le vocabulaire technique et faire des tests pour calibrer au mieux son G-Code.

Les démarches de l'impression :

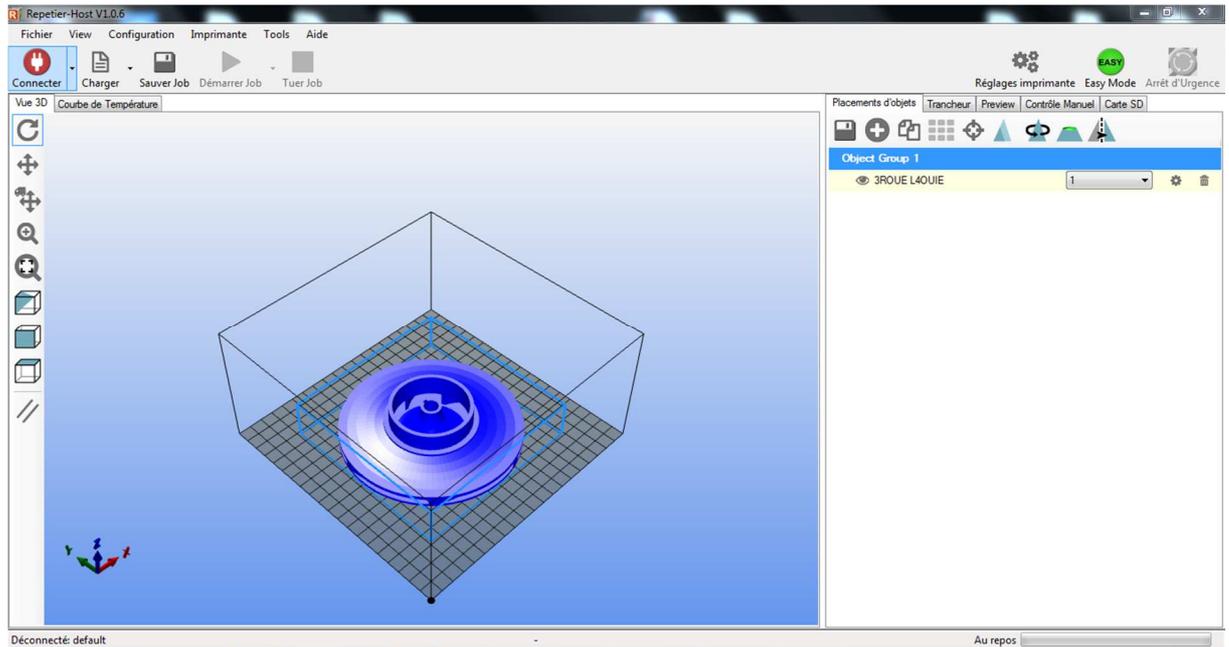
1. Concevoir la pièce puis la modéliser (format .stl)
2. Ouvrir Repetier-Host
3. Cliquer sur "Connecter".
4. Charger le fichier .stl. Vérifier si l'objet semble correct
5. Onglet "Trancheur".
6. Choisir les options de tranchage. Trancher
7. Vérifier si les couches semblent correctes.
8. Démarrer la réalisation.

#### **IV. Réalisation**

Au début, on a voulu réaliser notre turbomachine dimensionnée précédemment avec une imprimante 3D qui se trouve au sein de l'école nationale polytechnique d'Alger mais malheureusement l'appareil est tombé en panne dernièrement et le service de maintenance n'a pas pu le réparer avant la fin de délai pour remettre notre travail, alors on a opté de présenter juste les démarches de l'impression sous logiciel Repetier-host.

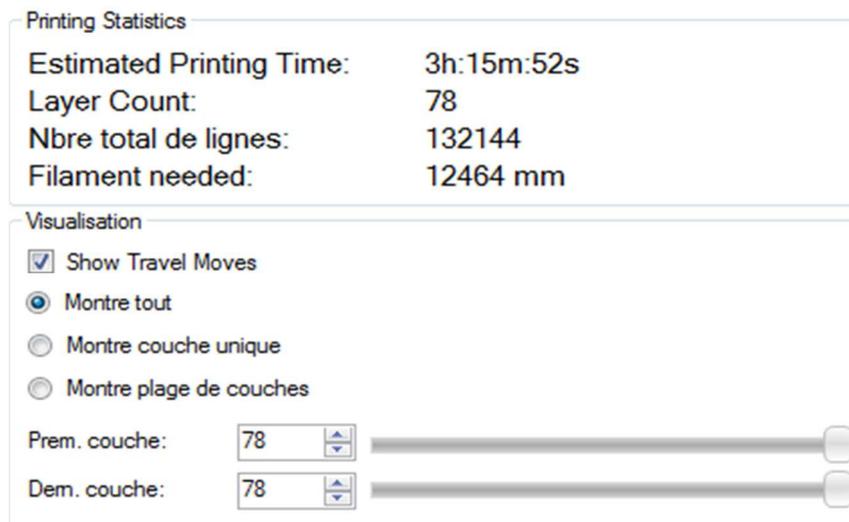
## 1. Impression de la roue

La figure montre l'ajout initial de notre roue sous logiciel Repetier-host.



**Figure 4- 13 : La roue sous logiciel Repetier-host**

Après l'importation de la roue, on la tranche avec slicer pour avoir les différentes couches et les lignes de travaux de la machine, slicer nous donne les statistiques de l'impression suivantes :



**Figure 4- 14 : Les statistiques d'impression de la roue**

La description de la figure (4-14) :

Temps d'impression estimé	3h15m52s
Nombres de couches	78
Nombres totales de lignes	132144
Longueur de filament	12464

Le logiciel a tranché la roue en 78 couches, voici des images prises de quelques couches :

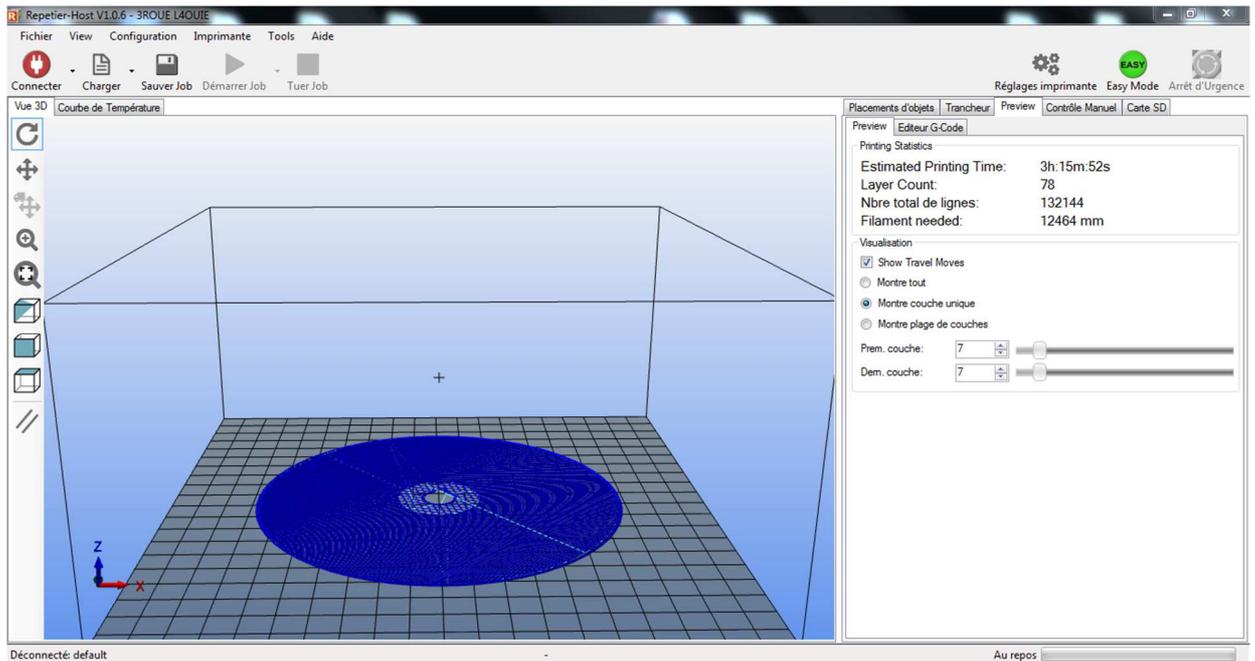


Figure 4- 15 : Couche numéro 7 de la roue

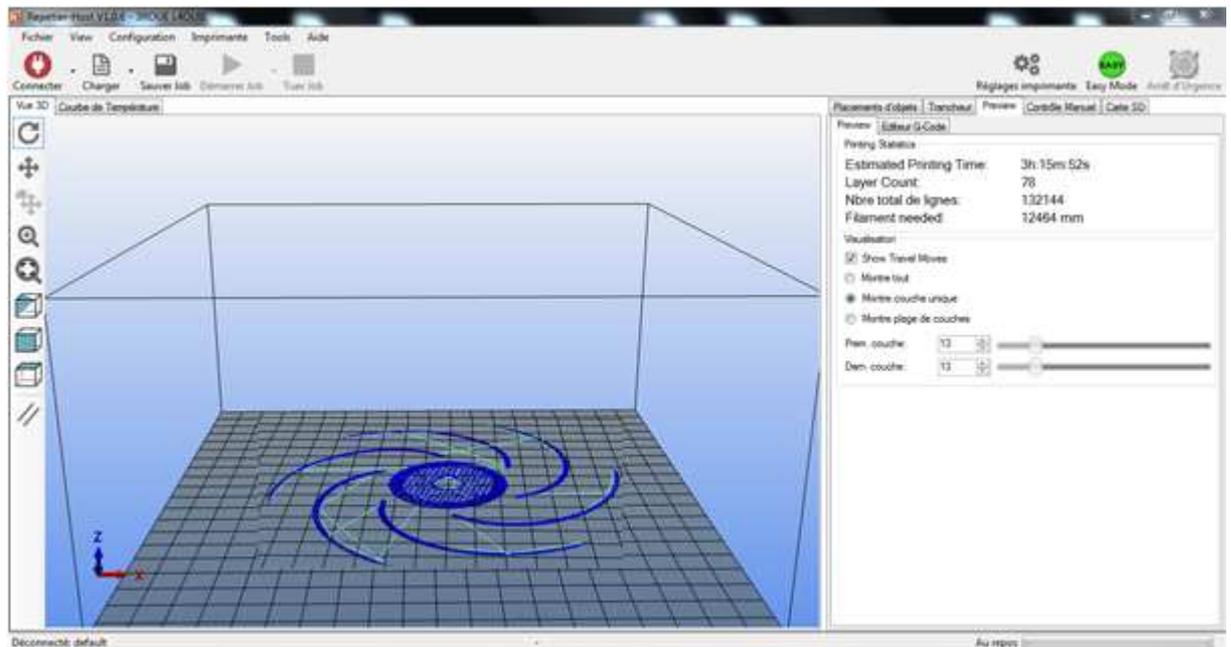


Figure 4- 16 : Couche numéro 13 de la roue

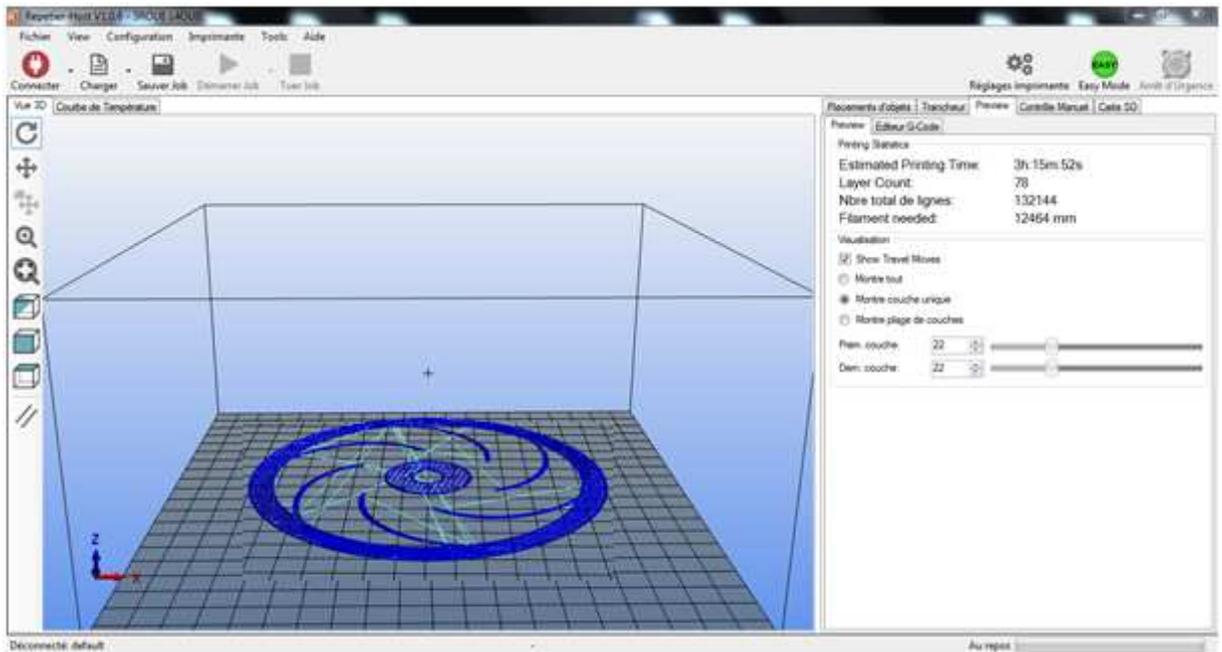


Figure 4- 17 : Couche numéro 22 de la roue

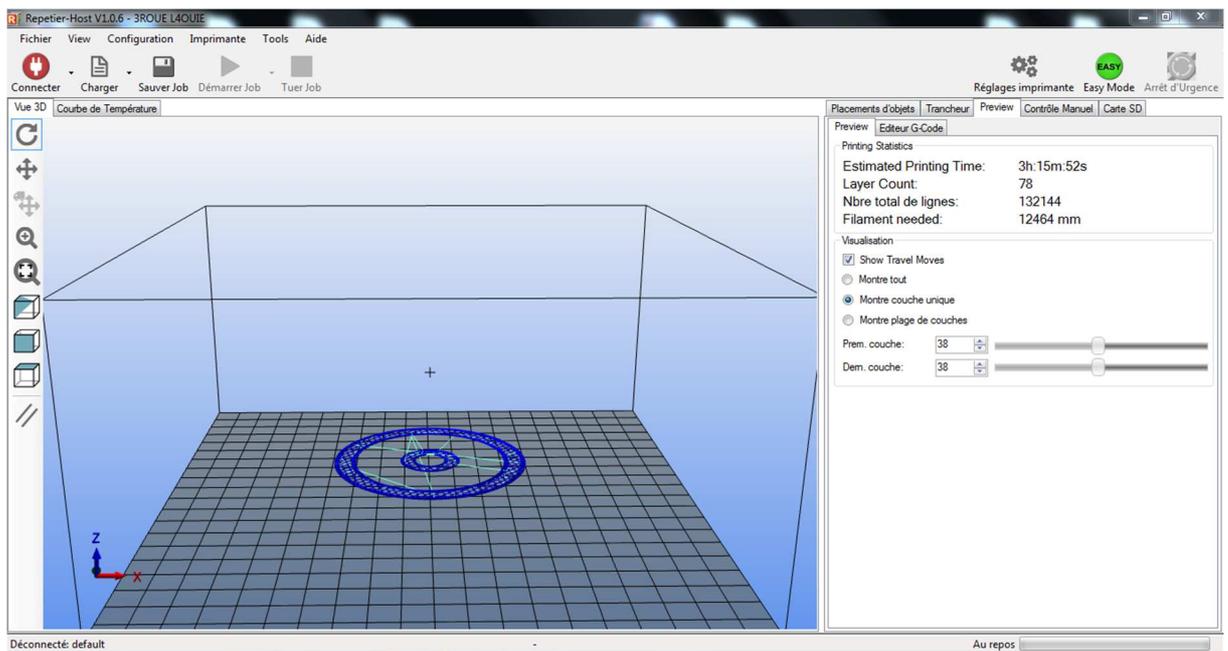
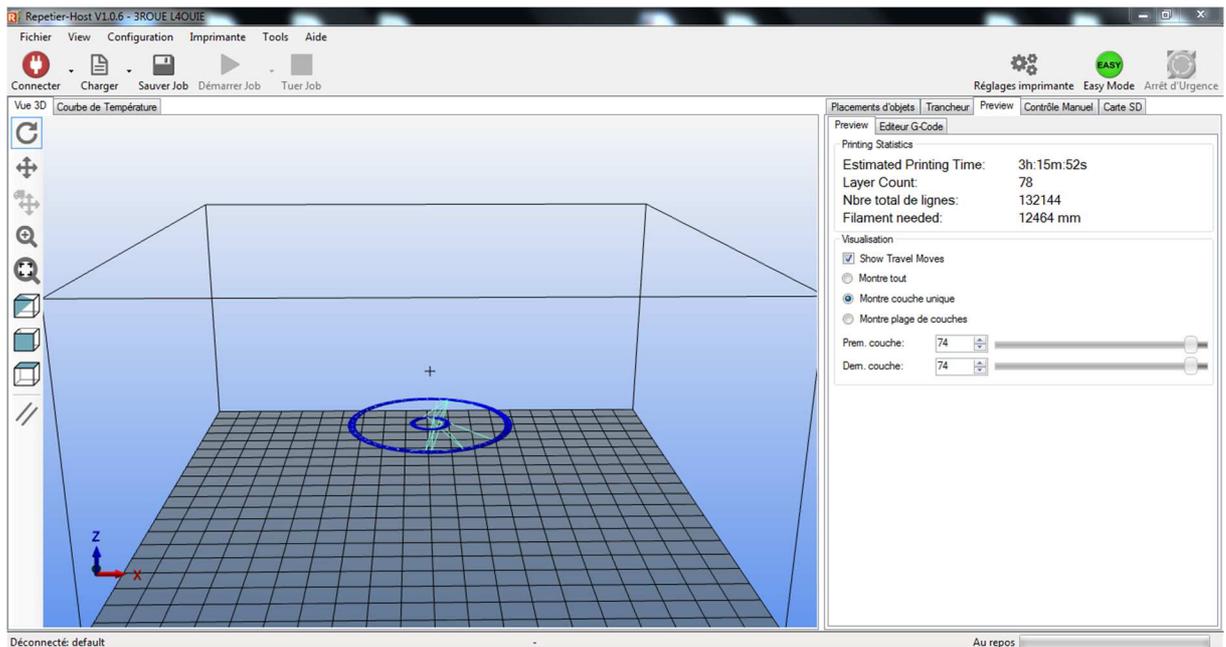
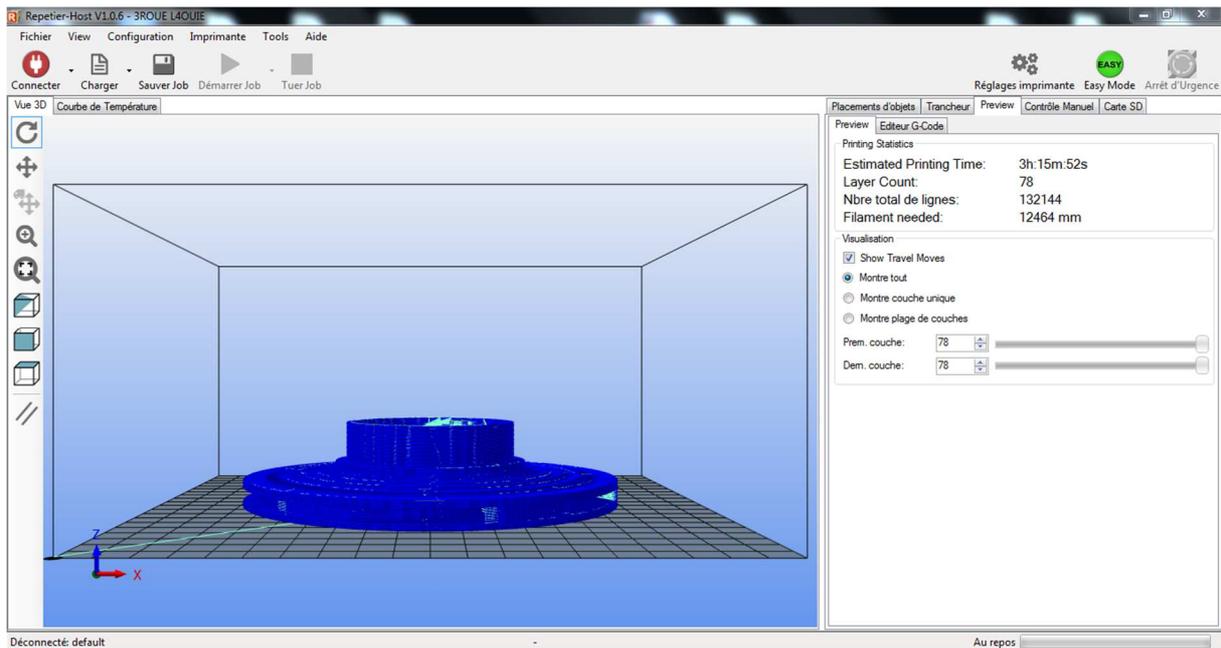


Figure 4- 18 : Couche numéro 38 de la roue



**Figure 4- 19 : Couche numéro 74 de la roue**

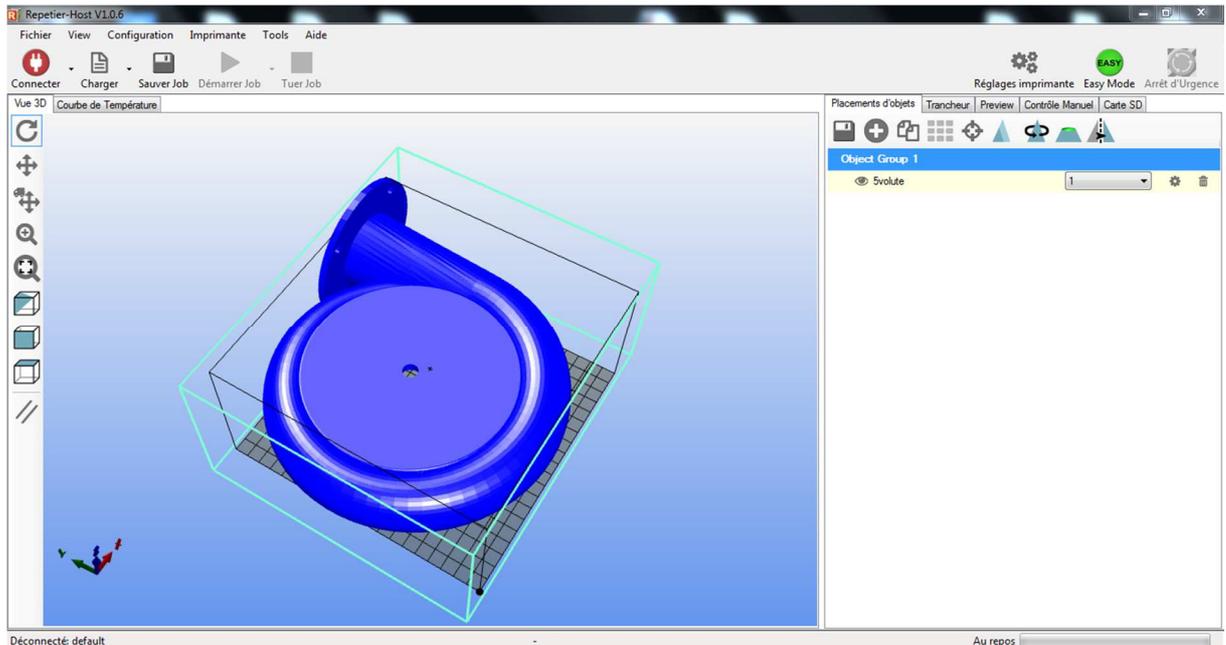
L'image ci-dessus montre l'aperçu finale de la roue imprimée.



**Figure 4- 20 : Roue près à imprimer**

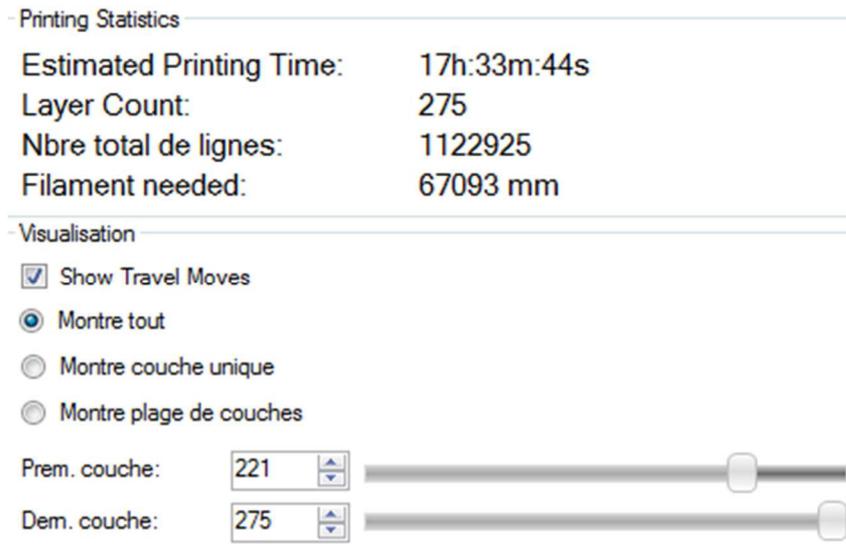
### 2. Impression de la volute :

La figure montre l'ajout initial de notre volute sous logiciel Repetier-host.



**Figure 4- 21 : La volute sous logiciel Repetier-host**

Après l'importation de la volute, on la tranche avec slicer pour avoir les différentes couches et les lignes de travaux de la machine, slicer nous donne les statistiques de l'impression suivantes :

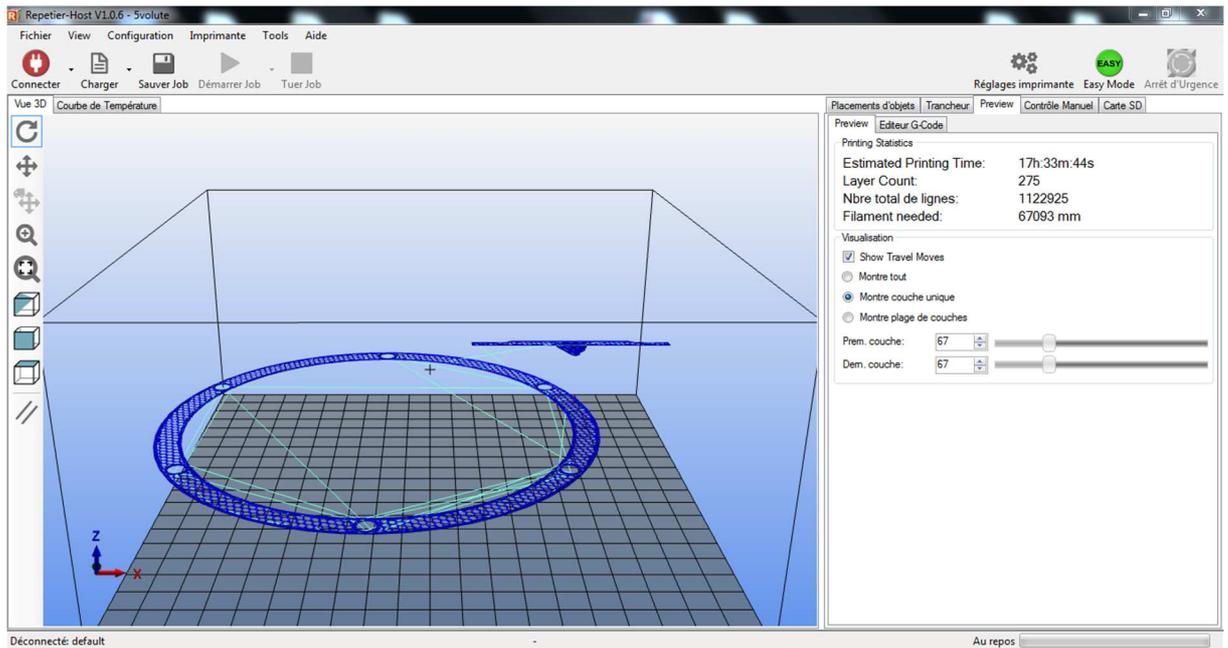


**Figure 4- 22 : Les statistiques d'impression de la volute**

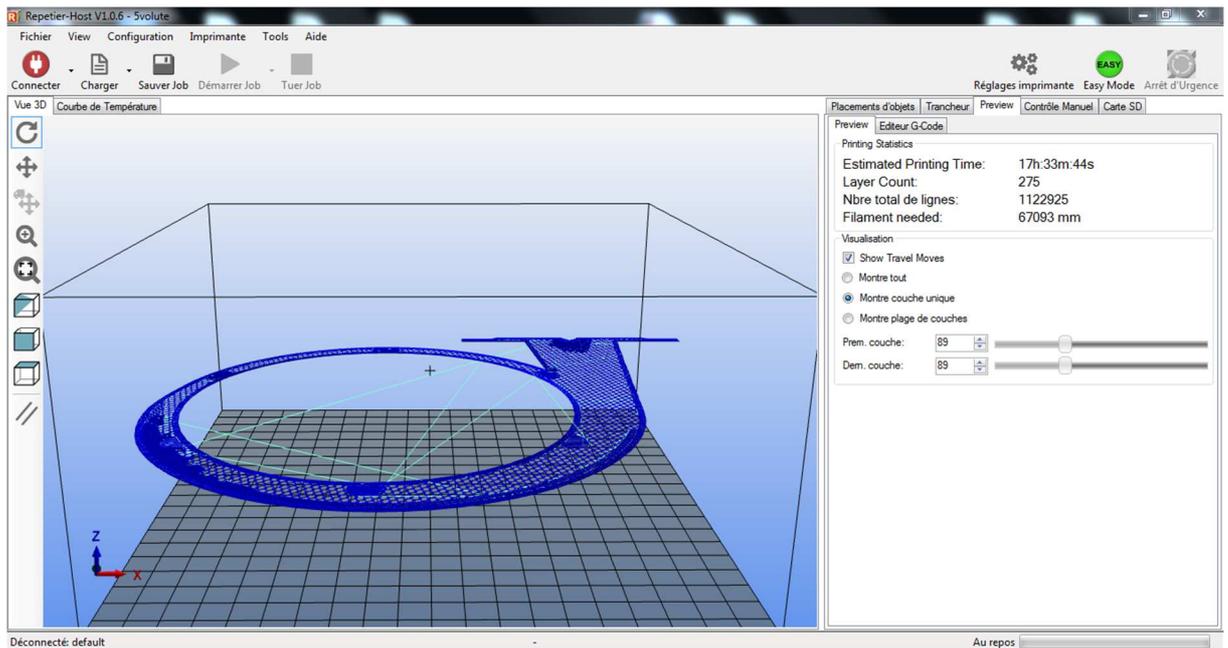
La description de la figure (4-22) :

Temps d'impression estimé	17h 33m 44s
Nombres de couches	275
Nombres totales de lignes	1122925
Longueur de filament	67093 mm

Le logiciel a tranché la volute en 275 couches, voici des images prises de quelques couches :



**Figure 4- 23 : Couche numéro 67 de la volute**



**Figure 4- 24 : Couche numéro 89 de la volute**

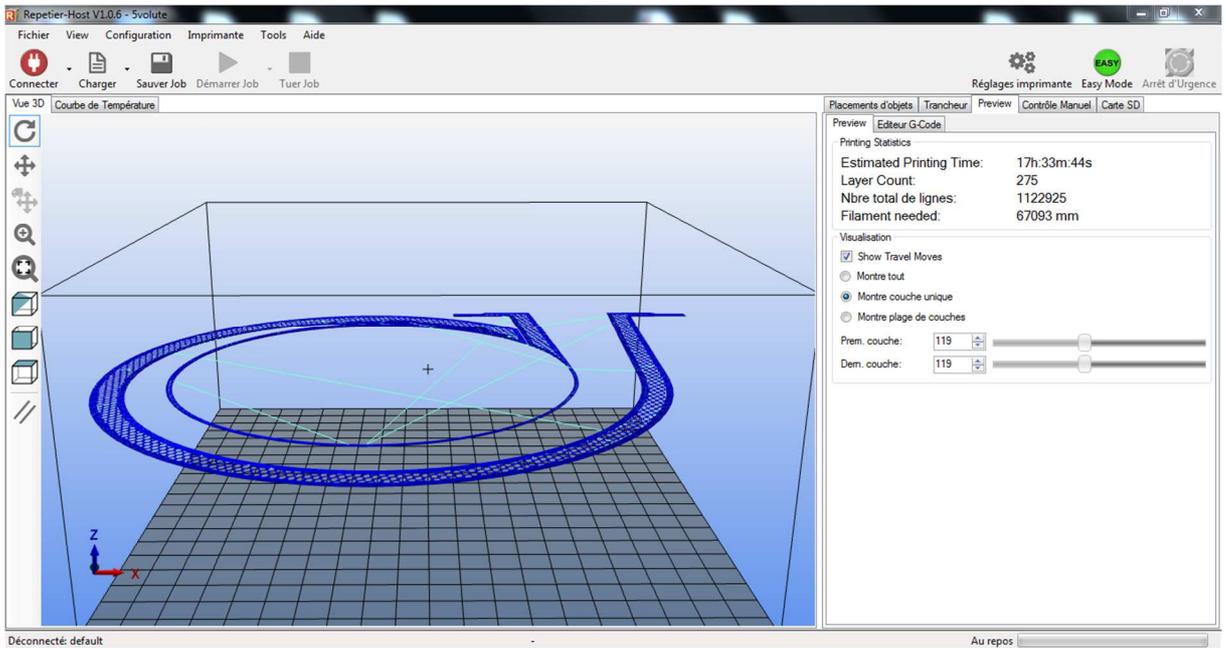


Figure 4- 25 : Couche numéro 119 de la volute

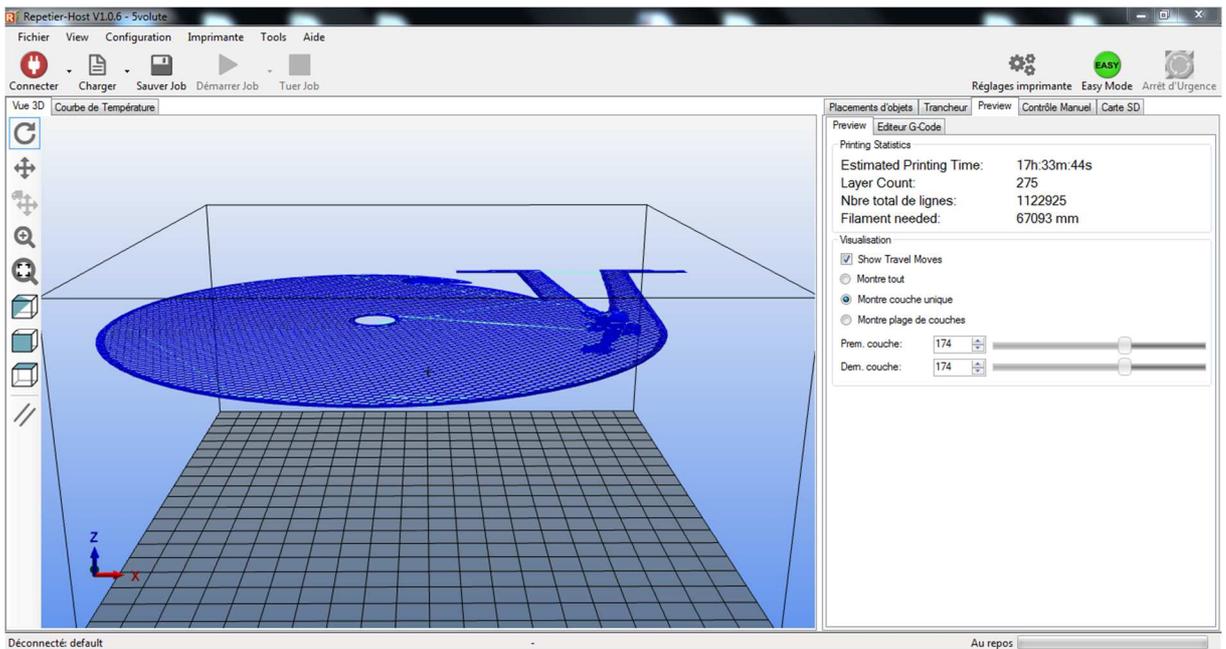
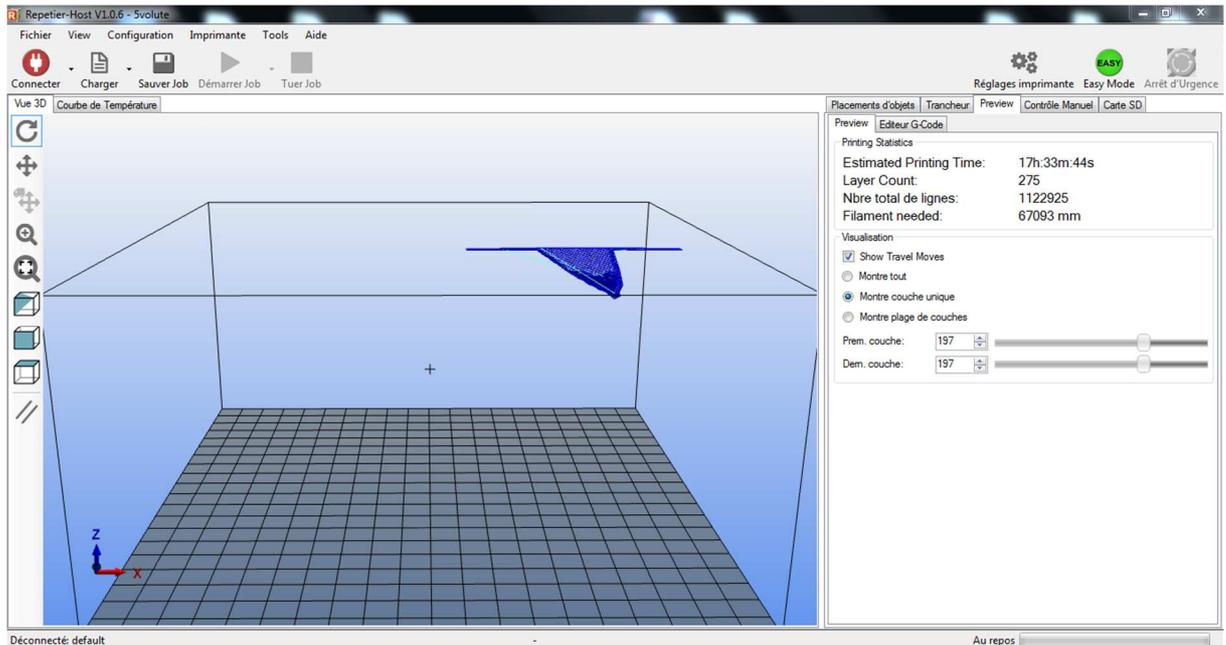
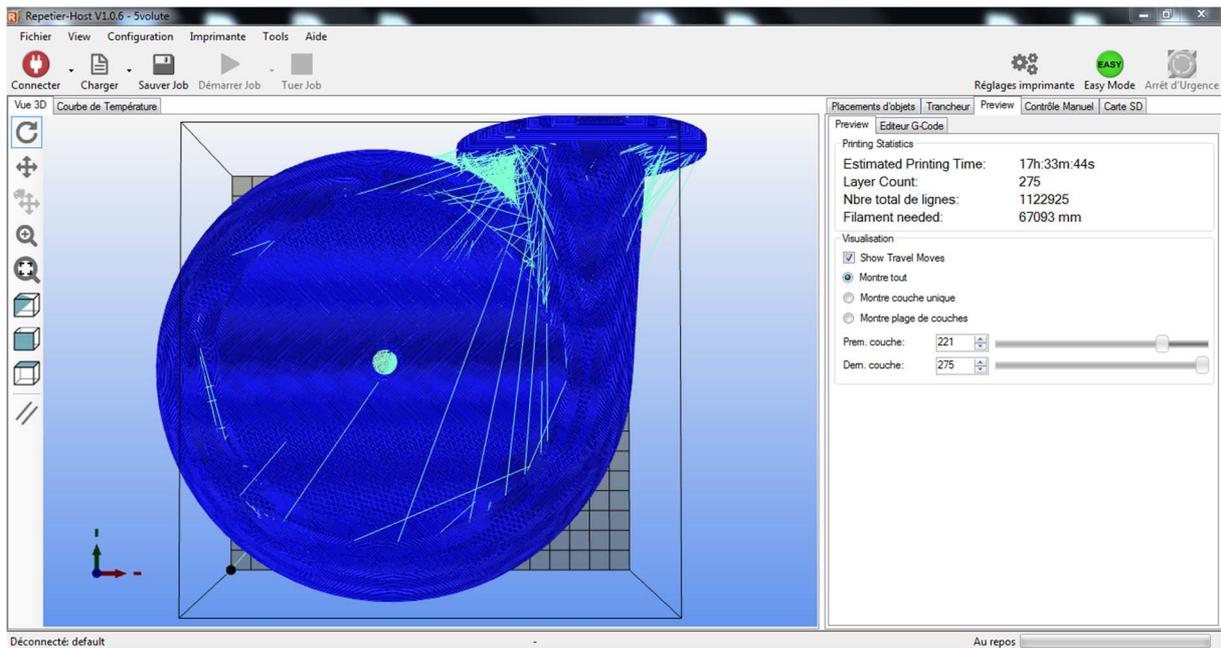


Figure 4- 26 : Couche numéro 174 de la volute



**Figure 4- 27 : Couche numéro 197 de la volute**

L'image ci-dessus montre l'aperçu final de la volute à imprimer



**Figure 4- 28 : Volute près à imprimer**

### Conclusion :

Au-delà de ces aspects à priori positifs, l'impression 3D pose cependant la question d'une réorganisation profonde de nos systèmes économiques et de nos sociétés. En donnant accès au plus grand nombre à des moyens de production d'objets physiques. Peut-on alors s'attendre, comme cela s'est produit pour les autres transformations numériques (celles dues à l'internet notamment), à un plus gros poids de la création individuelle ?

# **Chapitre 5**

**Réalisation d'une turbomachine  
génératrice d'énergie par usinage**

## Introduction

Le laboratoire du génie industriel au sein L'école nationale polytechnique dispose un appareil d'usinage nommé stratoconception piloté par le logiciel Stratoconcept PRO, cette machine marche avec plusieurs matériaux et vu que le laboratoire contient juste du bois MDF (M D F). On a utilisé ce type de bois pour fabriquer un prototype de notre turbomachine.

### I. Réalisation de la turbomachine dimensionnée par usinage

A cause du manque de la matière de la fabrication, on a été obligé de réduire la taille des pièces dimensionnées par un échelle de  $\frac{3}{4}$  et on va faire une similitude à la fin du chapitre pour trouver le nouveau débit et hauteur de la turbomachine réalisée à cette échelle.

#### 1. Les principales fonctionnalités du logiciel Stratoconcept PRO



Figure 5- 1 : Le logo du logiciel

##### a. Description du logiciel:

Grâce à une interface simple et intuitive, le logiciel Stratoconcept PRO vous permet de réaliser rapidement vos prototypes et vos outillages. A partir d'un fichier STL, vous allez décomposer le modèle en tranches 3D et générer automatiquement, en quelques minutes, les parcours d'outil pour la découpe de ces couches dans le matériau de votre choix (bois, plastique, mousse ou métal, ...).

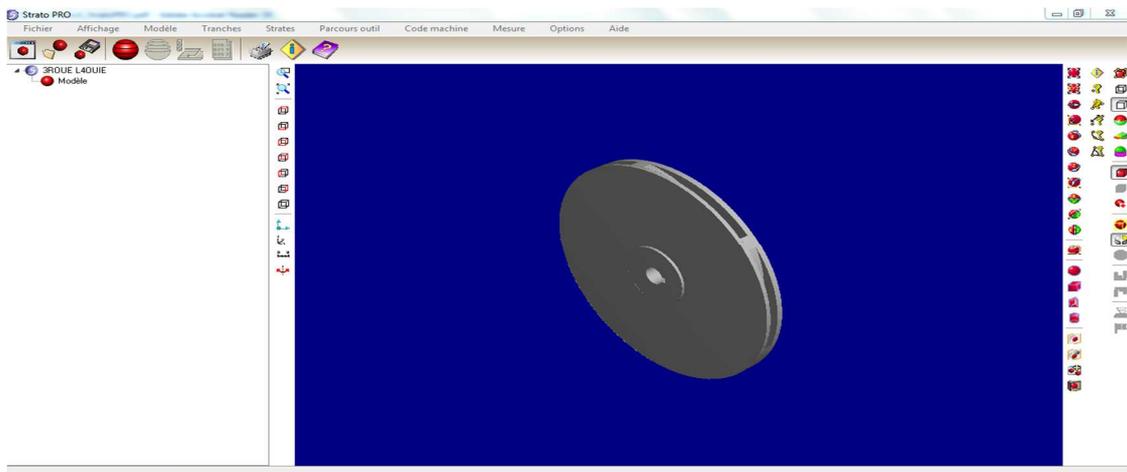


Figure 5- 2 : Interface logiciel Stratoconcept PRO

## b. Visualisation et modification des fichiers STL

Des outils simples et intuitifs vous permettront de visualiser vos fichiers STL et d'effectuer facilement des modifications sur vos modèles : mesures, transformations ou correction de fichiers défectueux.

### ➤ Importation/Exportation

- Importation / Exportation des fichiers au format STL ASCII ou binaire.
- Une organisation des modèles permet de conserver toutes les étapes et paramètres de réalisation des prototypes avec tous les fichiers associés : Cet ensemble est nommé pièce. Chaque pièce est enregistrée dans une structure classée par clients et projets, permettant une recherche aisée d'un fichier.
- De plus, une fonction d'aperçu 3D permet une visualisation rapide de la pièce.
- Une analyse automatique de la cohérence des fichiers STL est effectuée dès leur importation pour détecter les fichiers défectueux.
- Exportation d'images du modèle au format BMP.

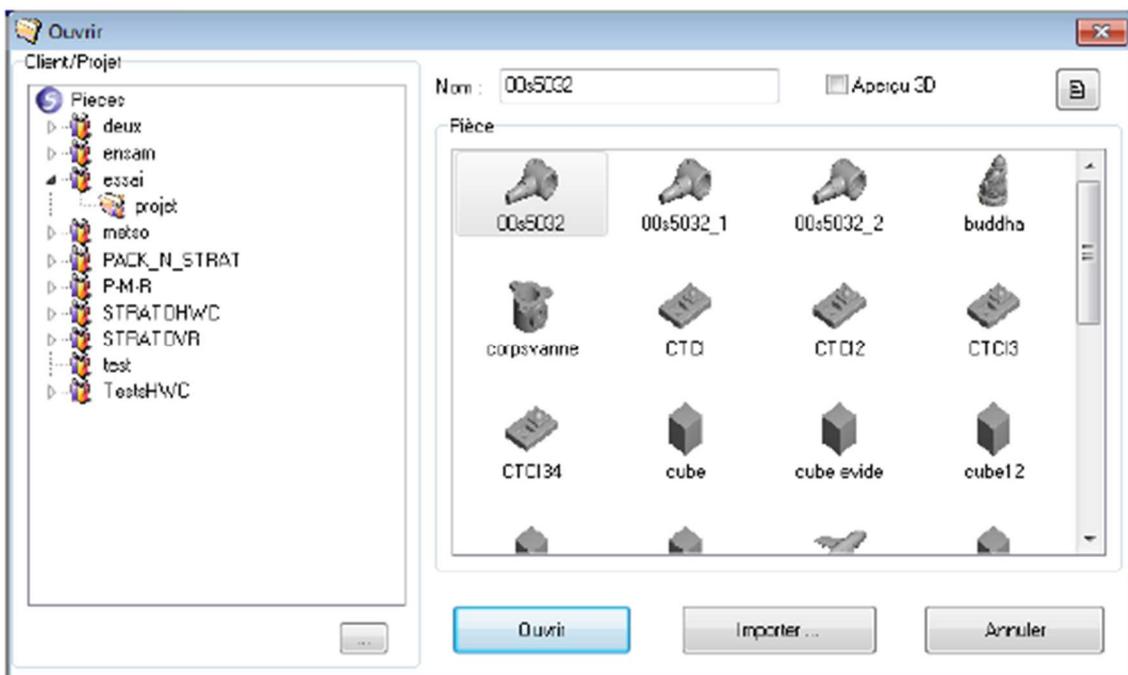
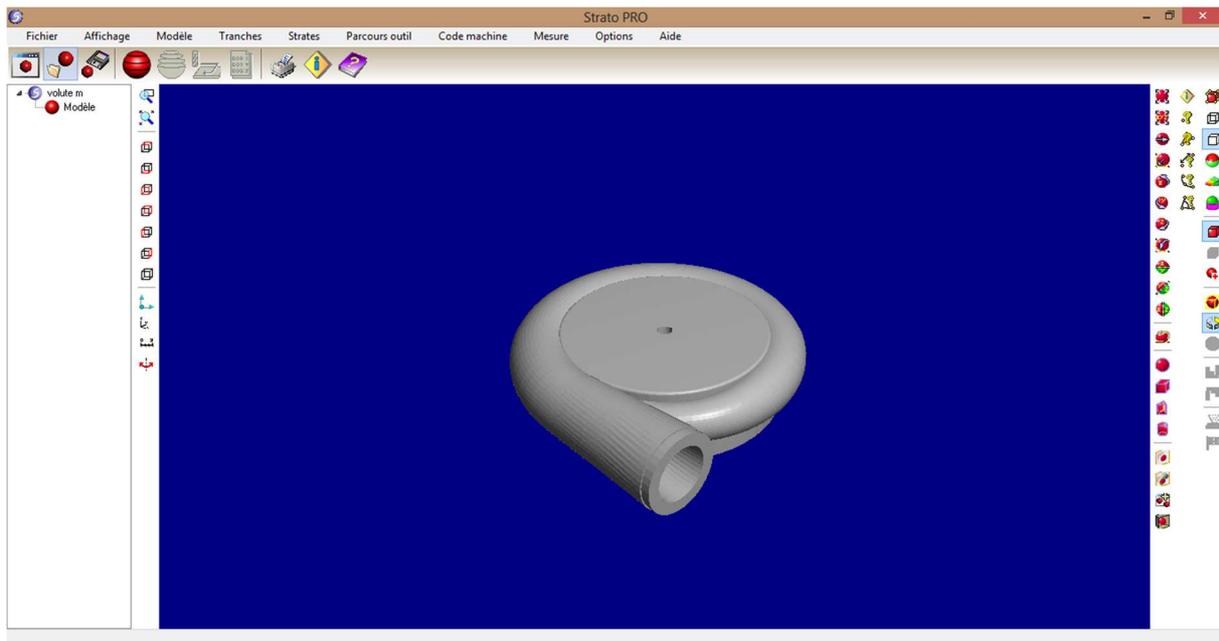


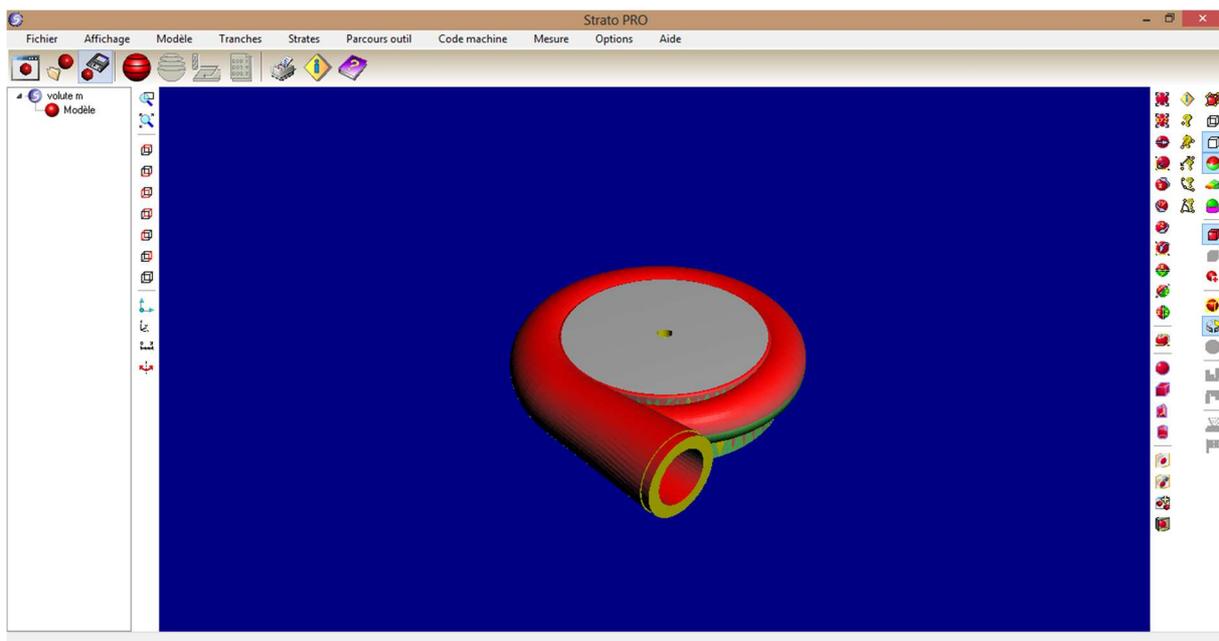
Figure 5- 3 : Structure de sauvegarde des pièces

### ➤ Visualisation

- Un module de visualisation avancée permet d'afficher le modèle en mode rendu, avec ses points, ses arêtes et ses facettes et également de représenter les dépouilles et contre-dépouilles.
- Ce module a été optimisé pour les cartes graphiques 3D (compatible OPENGL) et permet l'affichage en temps réel de modèles de plusieurs centaines de milliers de facettes en mode rendu



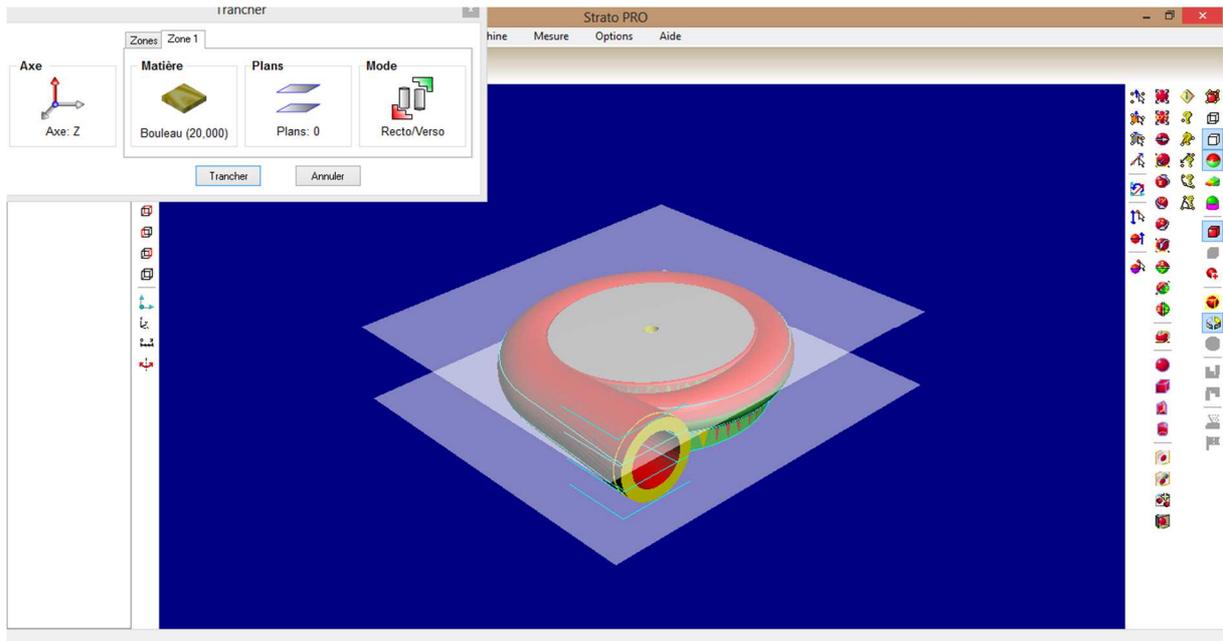
**Figure 5- 4 : Aperçu 3D**



**Figure 5- 5 : visualisation de la pièce avec analyse des dépouilles**

➤ Zones et Plans de passage

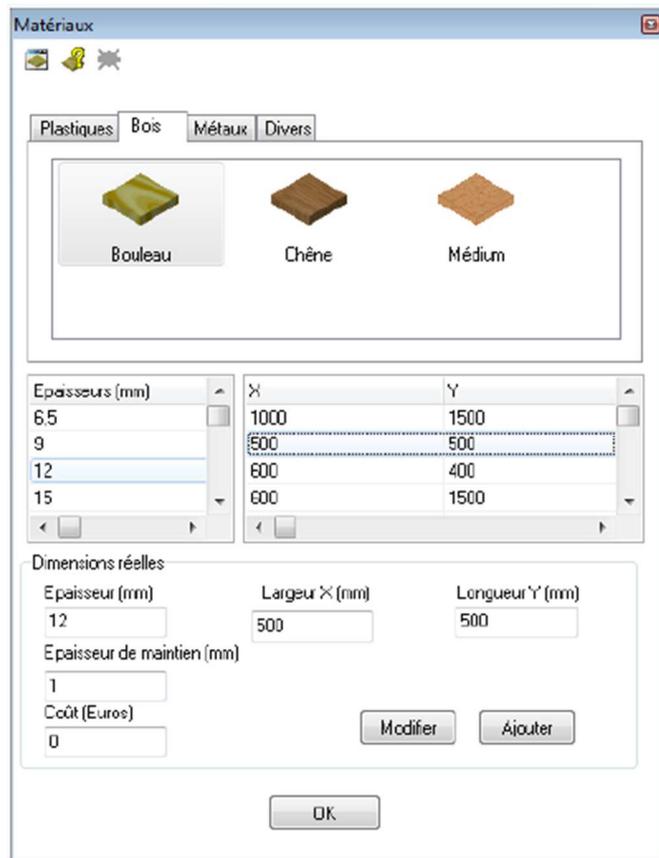
- Les zones permettent de réaliser un prototype avec des couches d'épaisseurs variables, en plusieurs matériaux, avec différents modes de tranchage
- Les plans de passage permettent d'effectuer un tranchage à une hauteur donnée. Cela permet, par exemple de réaliser une séparation au milieu d'un trou



**Figure 5- 6 : Plans de tranchage**

➤ Choix du matériau

- Les matériaux en plaques sont choisis dans une base de données contenant les matières validées en Stratoconception® avec leurs épaisseurs et dimensions les plus courantes. Cette base de données peut être enrichie à tout moment par l'utilisateur.



**Figure 5- 7 : Tranche normale/ Tranche oxidée**

➤ Décomposition des tranches

- La décomposition permet de scinder chaque tranche en plusieurs parties.
- La décomposition permet de réaliser des pièces de grandes dimensions sur des machines de faibles ou trop petites courses.
- Elle permet également d'optimiser la quantité de matière nécessaire à la fabrication d'un prototype si cette pièce est creuse où lorsqu'on utilise l'évidement des tranches.
- La décomposition en quinconce permet de renforcer l'assemblage final de la pièce.
- Des clés d'assemblage sont générées automatiquement pour faciliter le réassemblage.

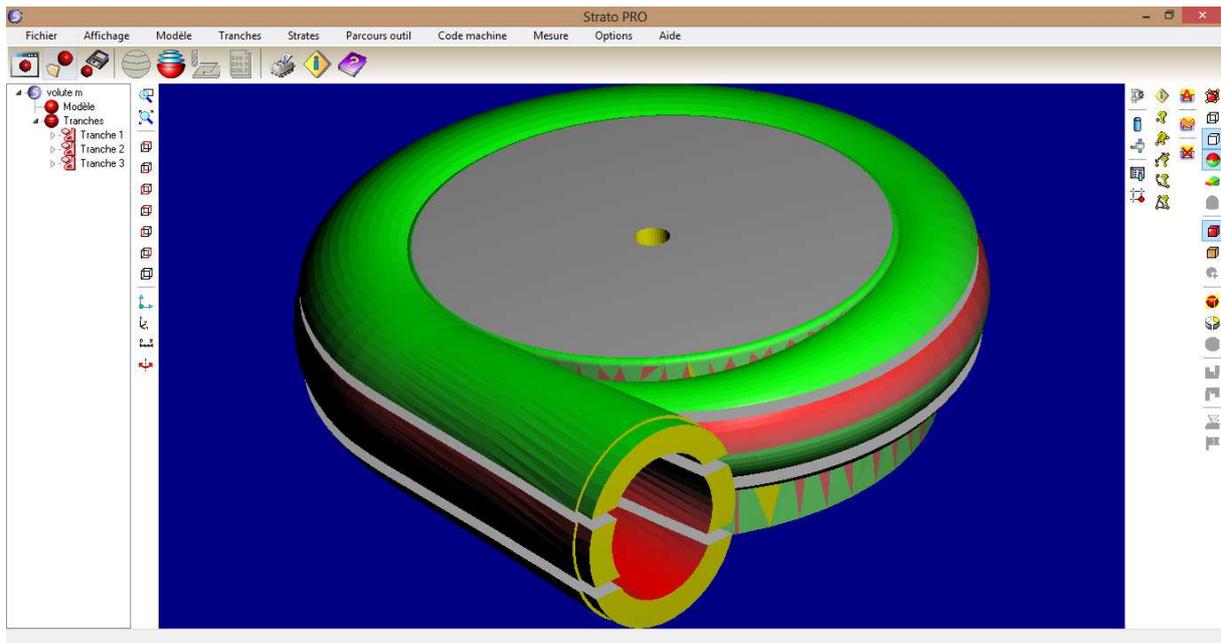


Figure 5- 8 : Tranche décomposée

**c. Stratification**

Chaque strate est constituée de plusieurs sections encore appelées passes. Le nombre de passes par strate est automatiquement calculé par le logiciel en fonction du profil de la strate et du paramètre de précision choisie.

➤ Stratification Recto

- Choisissez la précision de réalisation du prototype en fonction du matériau et de vos besoins.
- Le logiciel calcule automatiquement le nombre de passes adapté à chaque partie de la couche 3D, accélérant ainsi sa réalisation et améliorant sa précision (stratification adaptative).
- Vous réaliserez des formes complexes grâce à la méthode de retournement et d'usinage recto. Le logiciel Stratoconcept® gère automatiquement l'usinage des couches des deux cotés.

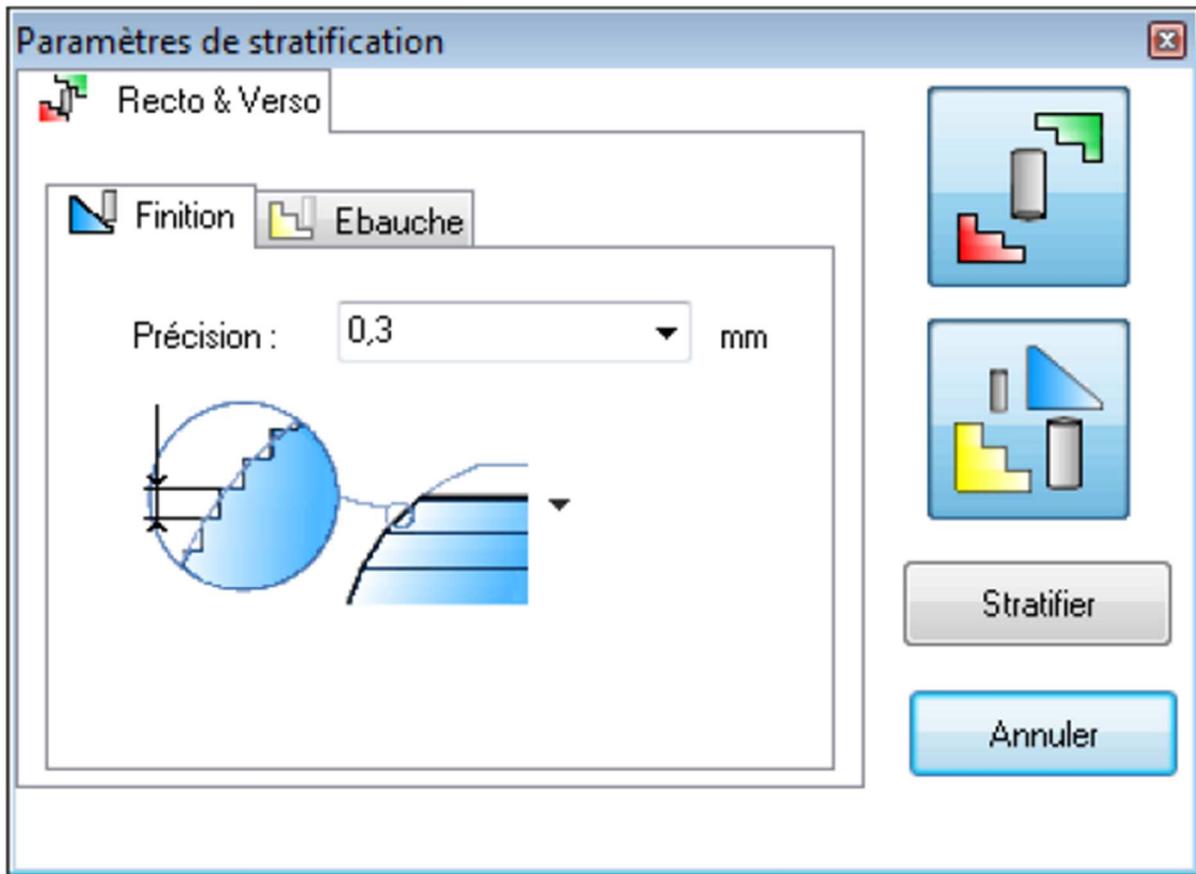


Figure 5- 9 : Choix de la précision du prototype

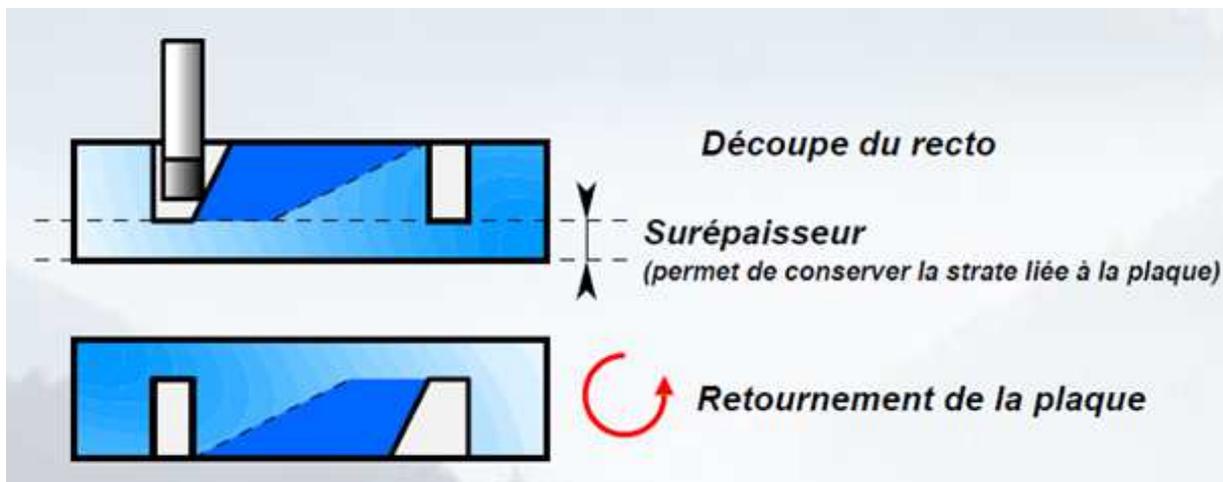


Figure 5- 10 : Retournement et usinage resto

#### d. Réalisation

La génération du parcours d'outil pour l'usinage des couches 3D est automatique, après le choix des outils, le code machine est généré pour la station choisie.

##### ➤ Outils et conditions de coupe

- Les outils - intégrés à la base de données - sont associés aux matériaux permettant le réglage automatique des conditions de coupe pour réaliser un usinage optimal en temps et qualité de surface.

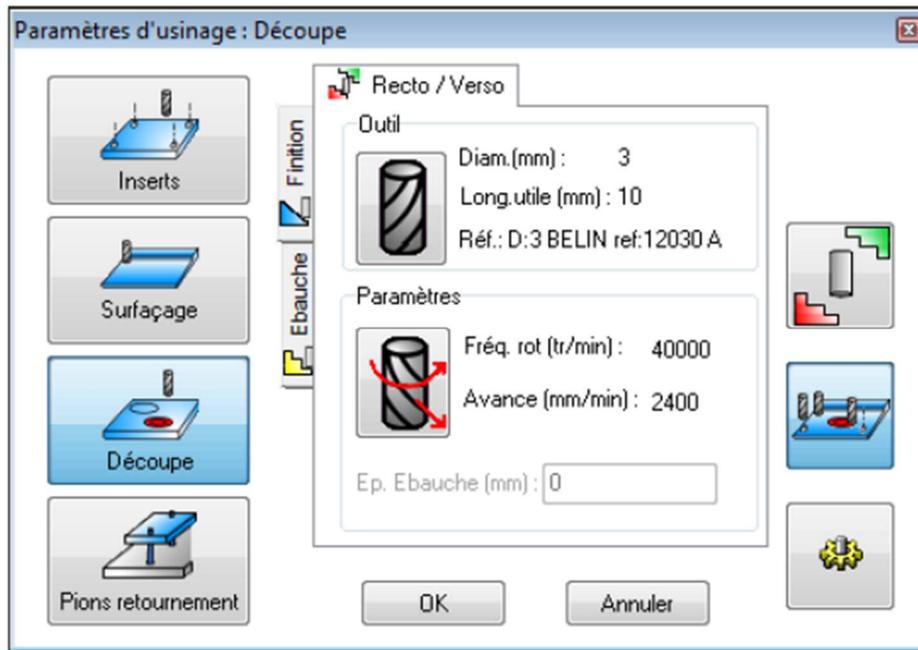


Figure 5- 11 : Outil choisi dans la base de données

➤ Parcours d'outils

- Les trajectoires d'outil effectuant la découpe des couches sont mises en panoplie sur les plaques de matière brute.
- Chaque opération d'usinage (découpe, surfaçage, perçage des inserts, perçage des pions) est identifiée et peut être usinée avec des outils et des conditions de coupe différents.
- La mise en panoplie des couches est optimisée pour économiser au maximum la matière brute.
- Suivant la machine-outil choisie un code machine spécifique (post-processeur) est généré.
- Des post-processeurs spécifiques peuvent être développés sur toutes les machines-outil à commande numérique

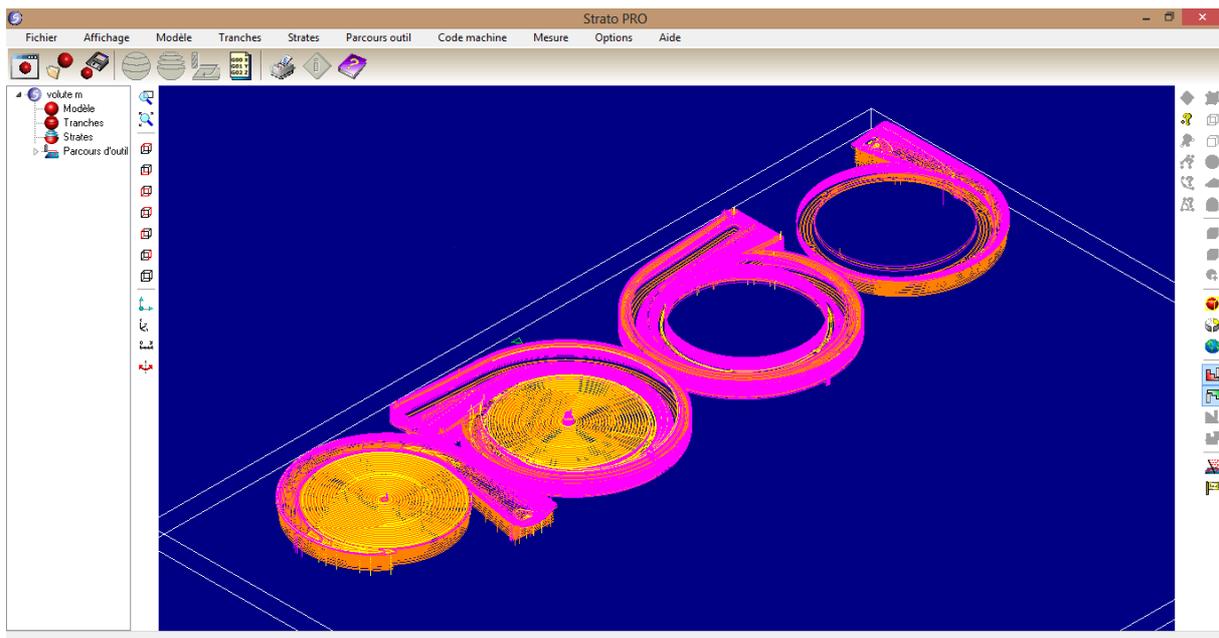
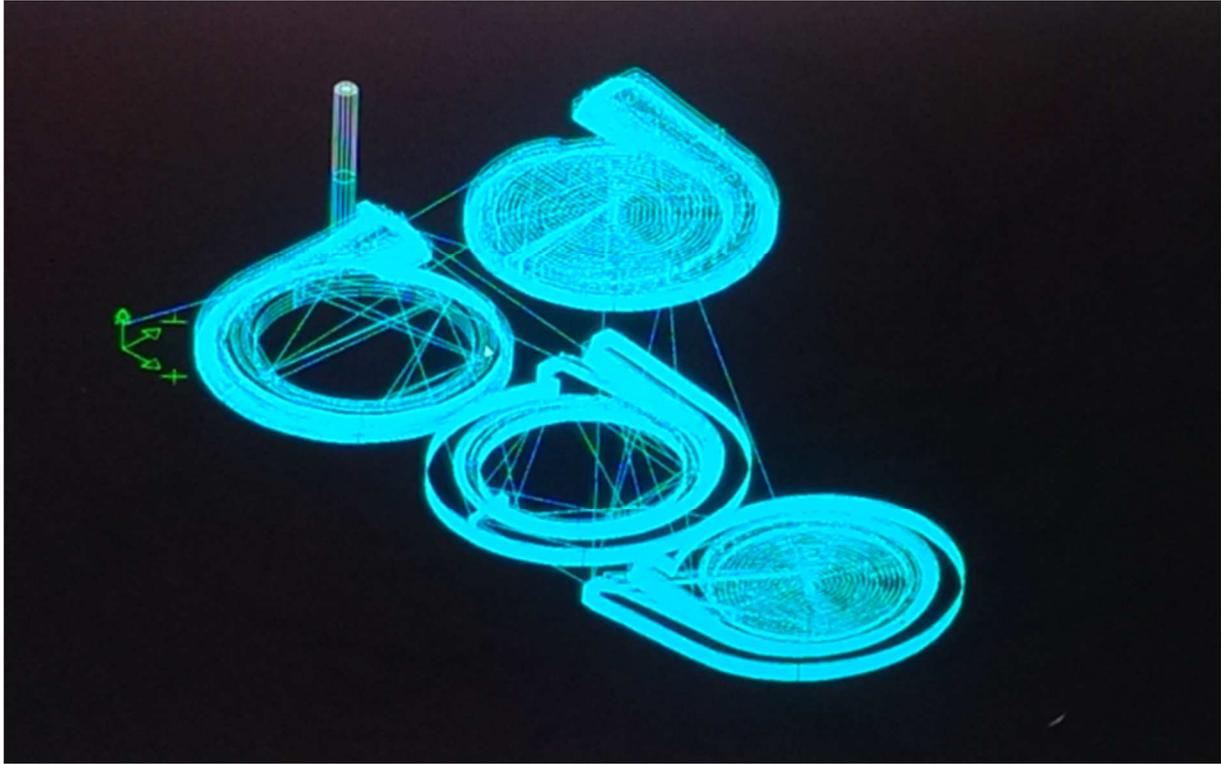


Figure 5- 12 : Parcours d'outil



**Figure 5- 13 : Optimisation de la matière**

## 2. Etapes de la réalisation sur la machine Stratoconception



Figure 5- 14 : Machine de conception

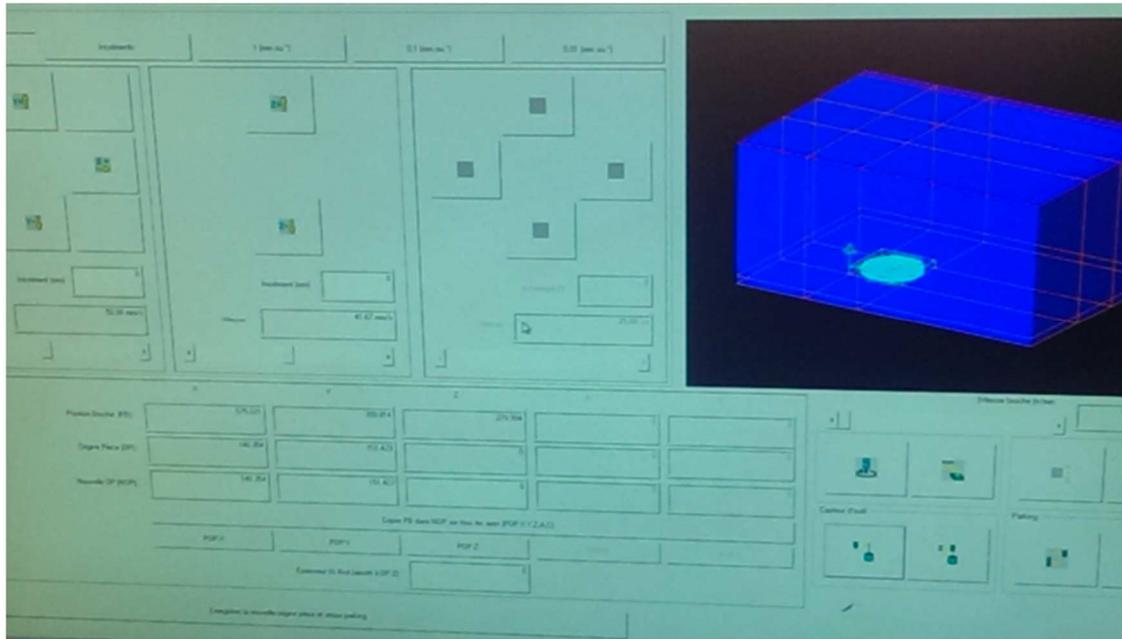


Figure 5- 15 : Réglage de la machine

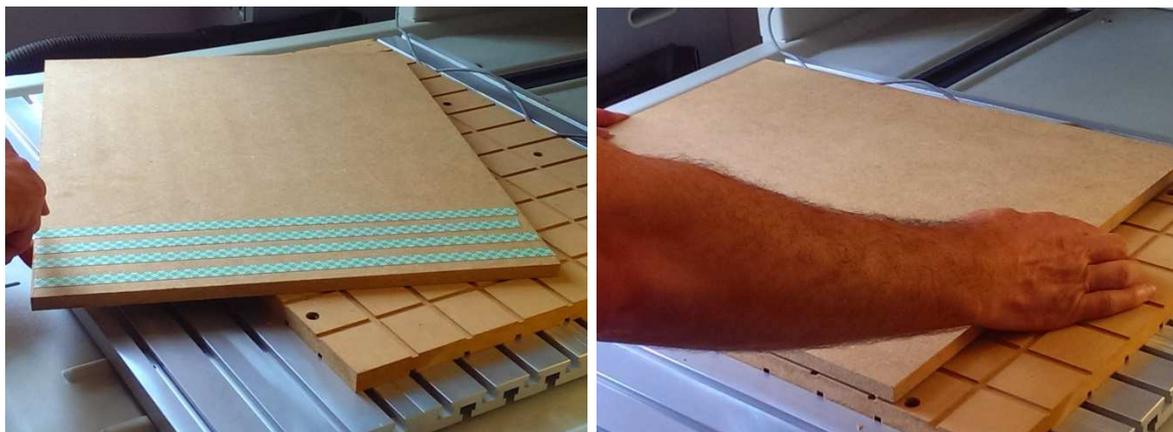
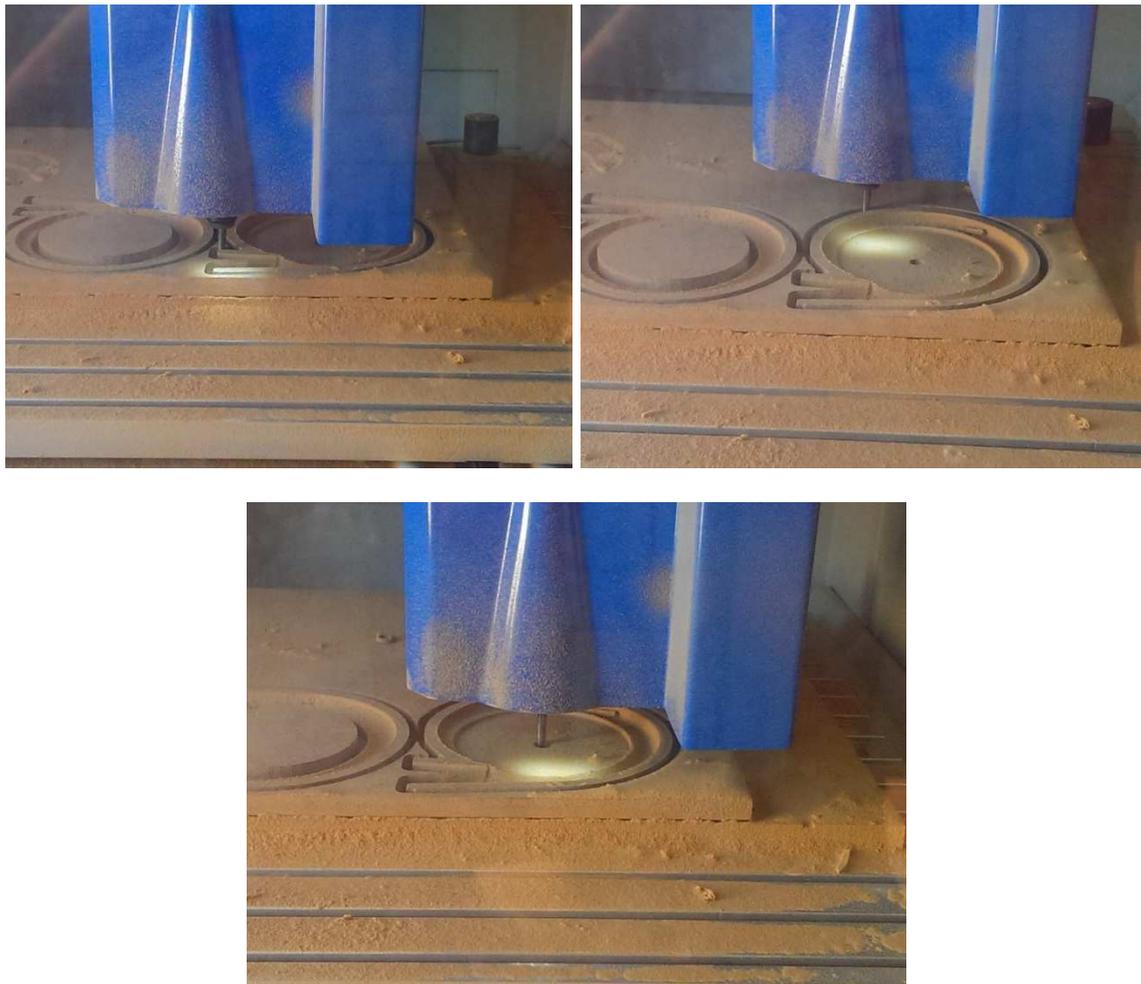


Figure 5- 16 : Collage du contre-plaqué sur le plateau martyr



Figure 5- 17 : Couverture de l'outil



**Figure 5- 18 : Parcours de l'outil sur la machine**



**Figure 5- 19 : Aspiration des copeaux et de la poussière**



Figure 5- 20 : Usinage de la volute



Figure 5- 21 : Usinage de la roue

## II. Les éléments hydrauliques de la turbomachine réalisés

### 1. La volute



Figure 5- 22 : L'usinage de la première tranche de la volute



Figure 5- 23 : L'usinage de la deuxième tranche de la volute



Figure 5- 24 : L'usinage de la troisième tranche de la volute



Figure 5- 25 : L'usinage de la quatrième tranche de la volute



**Figure 5- 26 : L'usinage de la jonction entre la volute et la conduite de refoulement**



**Figure 5- 27 : Le corps de la volute usinée**

## 2. La roue



**Figure 5- 28 : L'usinage de la première tranche de la roue**



**Figure 5- 29 : L'usinage de la deuxième tranche de la roue**



**Figure 5- 30 : Le collage des deux tranches donne le flasque arrière**



**Figure 5- 31 : L'usinage de la tranche des aubes de la roue**



**Figure 5- 32 : L'usinage de la dernière tranche de la roue**



**Figure 5- 33: Le collage de la roue**



**Figure 5- 34 : La roue usinée**



**Figure 5- 35 : La turbomachine usinée**

### III. La similitude entre la turbomachine dimensionnée et l'autre réalisée

$$H_p = \left(\frac{n_p}{n}\right)^2 \left(\frac{D_p}{D}\right)^2 H$$

$$Q_p = \frac{n_p}{n} \left(\frac{D_p}{D}\right)^3 Q$$

Par proportionnalité principale :

$$P_p = \frac{\rho_p}{\rho} \left(\frac{n_p}{n}\right)^3 \left(\frac{D_p}{D}\right)^5 P$$

$$M_p = \frac{\rho_p}{\rho} \left(\frac{n_p}{n}\right)^2 \left(\frac{D_p}{D}\right)^5 M$$

Tel que les dimensions du prototype représentent l'échelle :

$$\frac{D_p}{D} = \frac{3}{4}$$

On estime le nouveau débit et hauteur pour les dimensions  $D_p$  du prototype avec le nombre de tours reste constant :

$$Q_p = \left(\frac{3}{4}\right)^3 Q = 6.33 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$H_p = \left(\frac{3}{4}\right)^2 H = 13.22 \text{ m}$$

On utilise le programme élaboré dans (Master L.BENZADA) pour le nouveau débit  $Q_p$  et  $H_p$  hauteur et le même nombre de tours, on obtient :

On reste dans la même classification de la pompe tel que  $n_q$  ne change pas ;

La puissance du moteur s'a diminuée jusqu'à 386.27 W qui correspond avec  $P_p = \left(\frac{3}{4}\right)^5 P$  ;

**Tableau 5- 1 : Résultats de la similitude**

Dimensions	Pompe à l'échelle 3/4	Pompe redimensionnée
$d$	9	8.6
$d_e$	12	11.93
$D_e$	36.32	36.98
$D_1$	13.82	36.98
$D_2$	101.11	101.23
$b_1$	8.3	8.7
$b_2$	4.2	4.3
$D_3$	109.91	109.64
$b_3$	8.04	8.24

**Interprétation des résultats :**

N ayant pas les moyens matériels pour réaliser le prototype calculé à l'échelle 1. Comme l'échelle qui nous a été imposée par les dimensions de la plaque en bois disponible est de 0.75, nous sommes obligés d'utiliser les lois de la similitude afin de vérifier les résultats obtenus par réalisation.

**Conclusion**

Malgré les peu moyens qu'on dispose au niveau de l'école, on n'a pas baissé les bras et on a fait de notre possible pour réaliser des prototypes similaires aux pièces réelles.

**CONCLUSION**  
**GENERALE**

Le dimensionnement des turbomachines a travers le monde s'effectue par des grands bureaux d'étude associés à des sociétés et entreprises géantes qui ont tous les moyens et surtout l'expérience requis pour que le travail soit excellent.

Malgré le manque remarquable des moyens au sein de l'école nationale polytechnique, nous nous sommes jamais baissés les bras face aux obstacles confrontés lors de l'élaboration de notre travail, on a fait de notre mieux pour que ce mémoire soit bon, riche et le plus important utile pour nous et pour les prochaines promotions.

Dans ce travail, nous avons relevé un challenge et nous avons essayé de donner une suivre et fiable méthodologie de dimensionnement des turbomachines qui nous permet de concevoir et de réaliser des pièces de pompes qu'on peut les qualifier de qualité.

Nous sommes retrouvés face au défi d'apprendre à manipuler des logiciels de calcul, de programmation et du dessin dans un peu de temps, malgré sa on a réussi à bien apprendre à utiliser ces logiciels et les introduire dans la réalisation de ce projet.

Notre dimensionnement a été focalisé juste sur un type des machines (les machines radiales) on peut élargir cette étude en essayant de dimensionner d'autres types de machines que ce soit axiales ou mixtes.

On peut attribuer à une turbomachine le titre de « carrefour de technologie » pour la raison que le dimensionnement et la fabrication d'une pompe englobe et touche profondément multi secteurs de technologie tel que l'hydraulique en premier lieu, la mécanique, l'électricité et aussi la métallurgie donc nous avons remarqué et on recommande les intéressés par ce travail d'approfondir dans l'étude chacun dans sa spécialité et pourquoi pas extraire d'autres sujets de projets de fin d'études pour améliorer ou compléter ce travail.

On a bien aimé que notre réalisation soit faite sur une imprimante 3D mais malheureusement la machine de l'école été en panne alors on a fait notre mieux pour réaliser un prototypage usiné en bois

En hydraulique, la simulation de l'écoulement dans la turbomachine peut faire l'objet d'un intéressant PFE dans le but de suivre les trajectoires d'écoulement du fluide et corriger les erreurs si elles existent pour diminuer toutes sortes de pertes et améliorer le rendement de notre machine.

En mécaniques aussi on peut bien creuser dans l'étude des frottements et puis sur les forces et les moments (torsion, flexion, traction...) qui influent sur les éléments de construction de la turbomachine (arbre, clavette, roue...)

On peut bien parler sur la partie électrique de la pompe c.à.d. les moteurs et voir le développement rapide qui touche ce domaine et essayer de travailler sur une des technologies récentes.

Un autre côté de la pompe qu'on peut l'étudie profondément c'est le coté des matériaux adaptés pour le dimensionnement et la construction de la turbomachine, on peut également varier les métaux utilisés et remarquer l'influence de cette variation.

## CONCLUSION GENERALE

---

Toutes ces remarques prouvent que le milieu des pompes centrifuges est vaste et que les recherches expérimentales et théoriques sur les pompes sont au cours de développement et d'amélioration alors l'étude des turbomachines peut toujours construire un objet de recherche inédit.

Enfin, nous sommes optimistes que notre travail trouvera une large audience auprès des étudiants et il sera une référence qui permet de bien gérer les études et les projets en matière de pompe centrifuge monocellulaire génératrice d'énergie.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

- ASUAJE M. (2011). *Méthodologie et optimisation dans la conception et l'analyse des performances des turbomachines à fluide incompressible*. Ecole Nationale d'Arts et Métiers de Paris.
- BELAHADJI B. ; THUMA A. (Directeur) (1988). *Etude hydraulique d'une pompe centrifuge*. ENP Alger.
- CAIGNAERT G. (1978). *Contribution à l'étude des interactions entre le bec de la volute et la roue d'une pompe centrifuge*. Université de Sciences et Techniques de LILLE.
- CHEVALIER A. (1996). *Guide du dessinateur industriel pour maîtriser la communication technique*.
- GIET A. (1982). *Résistance des matériaux (Tome I)*.
- KSB. (2005). *Détermination des pompes centrifuges*. Allemagne: 5<sup>ème</sup> Edition révisée et étendue.
- MASSINISSA D. (2011). *Identification numérique des paramètres d'amélioration des performances d'une pompe centrifuge: roue, roue-volute et roue-diffuseur*. Université de Québec.
- PANTALE O. (2008). *Machines Mécaniques et Turbomachines, cours de S8*. Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tarbes.
- SEDILLE M. (1967). *Turbo-machines hydrauliques et thermiques ( TOME II Pompe centrifuges et axiales; Turbines hydrauliques )*. Paris.
- STEPANOFF A. (1961). *pompes centrifuges et pompes hélices*. Paris.
- THUMA A. (1990). *Machines hydrauliques*. Ed. O.P.U. Ben Aknoun, Alger.
- wikipedia. Récupéré sur [http://fr.wikipedia.org/wiki/Arbre\\_\(m%C3%A9canique\)](http://fr.wikipedia.org/wiki/Arbre_(m%C3%A9canique)).
- Site des cours de GC. Récupéré sur [http://www.azprocede.fr/Cours\\_GC/pompe\\_centrifuge\\_chargeaspi.html](http://www.azprocede.fr/Cours_GC/pompe_centrifuge_chargeaspi.html) .
- Site des cours de S8. Récupéré sur [http://www.academia.edu/8399010/CoursdeS8\\_MachinesM%C3%A9caniqueset\\_Turbomachines](http://www.academia.edu/8399010/CoursdeS8_MachinesM%C3%A9caniqueset_Turbomachines).
- Site pour des mémoires. (09 07 2012). Récupéré sur <http://www.memoireonline.com/Predetermination-des-performances-dune-pompe-centrifuge-a-partir-de-ses-donnees-geometriques-E.html>.