

## MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de :

MASTER

En Génie Mécanique

Option : Fabrication Mécanique et Productique

Présenté par :

LAKHNECHE Mouna

Thème

# CONTRIBUTION À L'ÉTUDE DE CONCEPTION D'UN DISPOSITIF DE PRODUCTION DE POTS EN FLUOTOURNAGE

Devant le jury composé de:

NOM et Prénom	Grade	Qualité
BENARIOUA Younes	MCB	Président
MAKRI Hocine	MCB	Encadrant
BELHOCINE Abdelghani	MCA	Examineur

Année Universitaire : 2024 / 2025

N° d'ordre : GM/...../2025

## Remerciements

الحمد لله كما ينبغي لجلال وجهه وعظيم سلطانه.

إلى من أحمل اسمه بكل فخر، ومن علّمني المسؤولية، أبي الغالي  
وإلى من غرست في قلبي حب العلم، وكانت دعوتها رفيقة دربي، أمي  
الحبّية.

وإلى إخوتي الأعزاء وأصدقائي، شكرًا على دعمكم

بامتنان عميق، أتقدم بالشكر إلى أستاذي المشرف مقري الحسين،  
الذي لم يبخل عليّ بوقته ولا بعلمه، وكان نعم الموجه والداعم

شكرًا من القلب، وأعتذر على كل ما بدر مني

كما أشكر كل أعضاء لجنة المناقشة، وأخص بالشكر كل أساتذة قسم

الهندسة الميكانيكية، وزملاء الطريق العلمي... شكرًا لكم

وإلى مهندسي وعمال ورشة الصيانة بمصنع لافارج بالمسيلة

وعلى رأسهم محمد سليبي... شكرًا جزيلاً

## **Résumé**

Ce travail s'inscrit dans le cadre d'une étude appliquée visant la conception et la réalisation d'un dispositif de production de pots en fluotournage, une technique de mise en forme à froid qui permet l'obtention de pièces cylindriques ou coniques à paroi mince avec une excellente précision dimensionnelle et un bon état de surface.

L'étude a débuté par une recherche approfondie sur les principes fondamentaux du fluotournage ainsi que sur la formabilité des matériaux métalliques. Les différents paramètres influents du procédé tels que l'angle d'attaque du galet, la vitesse de rotation, l'épaisseur initiale et finale, ont été analysés pour garantir un bon déroulement du processus de déformation plastique.

Par la suite, la conception du gabarit a été réalisée à l'aide du logiciel SolidWorks en tenant compte des contraintes géométriques du produit final (forme de vase). Une approche de calcul basée sur la conservation du volume a permis de déterminer les dimensions du brut à étirer. La fabrication du gabarit a été menée dans un environnement industriel, avec l'utilisation de moyens classiques de tournage et de fraisage.

L'ensemble du travail a permis de valider la faisabilité du procédé et d'illustrer la pertinence du fluotournage dans la fabrication de pièces à géométrie complexe, avec un minimum de pertes de matière. Ce projet ouvre également la voie à une optimisation future du processus à travers la simulation numérique et la modélisation des efforts.

## **Abstract**

This work is part of an applied study aimed at the design and fabrication of a production device for pots using the flow forming process — a cold forming technique that allows the manufacturing of cylindrical or conical thin-walled parts with excellent dimensional accuracy and surface finish.

The study began with an in-depth review of the fundamental principles of flow forming, as well as the formability of metallic materials. Various key process parameters — such as the roller attack angle, rotation speed, and initial and final thickness — were analyzed to ensure proper plastic deformation behavior.

Next, the mandrel was designed using SolidWorks software, taking into account the geometric constraints of the final product (vase shape). A calculation approach based on volume conservation was used to determine the dimensions of the preform to be formed. The mandrel was then manufactured in an industrial environment using conventional turning and milling machines.

The entire work confirmed the feasibility of the process and demonstrated the relevance of flow forming in the production of complex-shaped parts, with minimal material loss. This project also paves the way for future optimization through numerical simulation and modeling of forming forces.

## ملخص

يندرج هذا العمل ضمن دراسة تطبيقية تهدف إلى تصميم وإنجاز جهاز لإنتاج الفازات بطريقة الفلوتورناج، وهي تقنية للتشكيل على البارد تتيح الحصول على قطع أسطوانية أو مخروطية ذات جدران رقيقة بدقة أبعاد عالية وجودة سطح جيدة.

بدأت الدراسة ببحث معمق حول المبادئ الأساسية لعملية الفلوتورناج وكذا قابلية تشكيل المواد المعدنية. كما تم تحليل مختلف المعاملات المؤثرة في العملية مثل زاوية هجوم العجلة، سرعة الدوران، السمك الابتدائي والنهائي، لضمان سير جيد لعملية التشوه البلاستيكي.

مع مراعاة القيود الهندسية للمنتج النهائي SolidWorks بعد ذلك، تم تصميم القالب باستعمال برنامج (شكل الفازة). وتم اعتماد منهجية حسابية مبنية على مبدأ حفظ الحجم لتحديد أبعاد الخام الذي سيتم تشكيله. أما إنجاز القالب فقد تم في بيئة صناعية باستخدام وسائل تقليدية مثل المخرطة وآلة التفريز.

سمح هذا العمل بإثبات قابلية تطبيق هذه التقنية، وأبرز أهمية الفلوتورناج في تصنيع قطع ذات أشكال معقدة مع الحد الأدنى من ضياع المادة. كما يفتح هذا المشروع المجال نحو تحسين مستقبلي للعملية من خلال المحاكاة الرقمية ونمذجة القوى المؤثرة.

## Table des matières

Résumé .....	3
Abstract .....	3
ملخص .....	4
Table des matières .....	5
Liste des figures .....	8
Liste des tableaux .....	10
Liste des équations .....	11
Introduction générale.....	12
<b>I Chapitre I: Aperçu général sur le formage des matériaux .....</b>	<b>14</b>
<b>I.1 Introduction .....</b>	<b>14</b>
<b>I.2 Définitions .....</b>	<b>15</b>
<b>I.3 Domaines d'utilisation .....</b>	<b>16</b>
<b>I.4 Les différents types de procédés repoussage.....</b>	<b>16</b>
<b>I.4.1 Le repoussage conventionnel.....</b>	<b>17</b>
<b>I.4.2 Le fluotournage ou formage par cisaillement.....</b>	<b>18</b>
<b>I.5 Comparaison entre les procédés de refolement.....</b>	<b>19</b>
<b>I.6 Importance du fluotournage .....</b>	<b>20</b>
<b>I.7 Avantages par rapport aux autres procédés de formage de tôles.....</b>	<b>21</b>
<b>I.8 Outillage utilisé pour le fluotournage.....</b>	<b>22</b>
<b>I.8.1 Le Mandrin .....</b>	<b>22</b>
<b>I.8.2 L'Anneau de démoulage et anneau denté .....</b>	<b>23</b>
<b>I.8.3 Les Rouleaux.....</b>	<b>23</b>
<b>I.9 Les machines de fluotournage.....</b>	<b>24</b>
<b>Bibliographie du chapitre I. ....</b>	<b>26</b>
<b>II La formabilité des matériaux et paramètres du repoussage.....</b>	<b>28</b>
<b>II.1 Aptitude au formage .....</b>	<b>28</b>
<b>II.2 Méthodes d'évaluation de la formabilité.....</b>	<b>29</b>
<b>II.2.1 Essai de traction uniaxiale.....</b>	<b>30</b>
<b>II.2.2 Essai de mandrin semi-elliptique .....</b>	<b>31</b>
<b>II.2.3 Essai de réduction continue.....</b>	<b>32</b>
<b>II.2.4 Essai de réduction par étapes.....</b>	<b>32</b>
<b>II.2.5 Observation microscopique .....</b>	<b>33</b>
<b>II.3 Variables du procédé de repoussage.....</b>	<b>34</b>

<b>II.4</b>	<b>Configuration géométrique des rouleaux.....</b>	<b>34</b>
II.4.1	Forme du rouleau .....	34
II.4.2	Propriétés des matériaux .....	37
II.4.3	Effet de la dureté de la préforme. ....	37
II.4.4	Conditions initiales de la préforme.....	37
II.4.5	Paramètres de fonctionnement .....	37
II.4.5.a.	La vitesse du mandrin .....	37
II.4.5.b.	Taux d'avance.....	37
II.4.5.c.	L'avance axiale du rouleau. ....	38
II.4.5.d.	Effet de l'avance sur la Rugosité de surface .....	39
II.4.5.e.	Profondeur de formage ou réduction d'épaisseur.....	39
II.4.5.f.	Rapport de filage.....	40
II.4.5.g.	Trajectoire des rouleaux.....	40
II.4.5.h.	Forces .....	41
	Bibliographie du chapitre II.....	43
<b>III</b>	<b>Conception du gabarit de fluotournage .....</b>	<b>46</b>
III.1	Introduction:.....	46
III.2	Les besoins : .....	46
III.3	Les principes de conception : .....	47
III.4	Contraintes techniques : .....	47
III.5	Solutions adoptées :.....	48
III.6	Dessin des éléments composant le dispositif de repoussage : .....	48
III.6.1	Le gabarit :.....	48
III.6.2	Axe d'entraînement : .....	50
III.6.3	Les bagues de centrage : .....	52
III.7	Montage des éléments :.....	54
III.8	Conclusion.....	58
<b>IV</b>	<b>Fabrication du gabarit de fluotournage .....</b>	<b>60</b>
IV.1	Introduction:.....	60
IV.2	Gammes d'usinage : .....	61
IV.2.1	Gamme d'usinage du gabarit :.....	61
IV.2.1.a.	Dessin de définition du gabarit :.....	61
IV.2.1.b.	Repérage des surfaces usinées: .....	61
IV.2.2	Gamme d'usinage de l'axe d'entraînement :.....	64
IV.2.2.a.	Dessin de définition: .....	64

IV.2.2.b. Repérage des surfaces usines .....	64
IV.2.3 Gamme d'usinage de la bague de centrage amont :.....	66
IV.2.3.a. Dessin de définition:.....	66
IV.2.3.b. Repérage des surfaces usines de la bague amont :.....	66
IV.2.4 Gamme d'usinage de la bague de centrage aval : .....	68
IV.2.4.a. Dessin de définition :.....	68
IV.2.4.b. Repérage des surfaces usines:.....	69
IV.3 Calcul du brut à étirer :.....	71
IV.4 Conclusion.....	72
V. Conclusion générale: .....	74
VI. Perspectives .....	74

**ANNEXES**

## Liste des figures

Figure I.1: Principaux procédés de fabrication des matériaux métalliques. ....	15
Figure I.2 : Illustration du procédé de repoussage des métaux . ....	16
Figure I.3 : Configurations du repoussage : (a) conventionnel, (b) formage par cisaillement et (c) repoussage des tubes.....	17
Figure I.4 : . Principe du repoussage manuel ou conventionnel . ....	18
Figure I.5:Illustration du repoussage par cisaillement.....	19
Figure I.6:Fluotournage sens avant et sens arrière.....	19
Figure I.7:Mandrin de fluotournage, bague de démoulage et bague dentée. ....	22
Figure I.8:Coupe transversale d'un rouleau de fluotournage.....	23
Figure I.9:Machine et produits obtenues par repoussage conventionnel. ....	24
Figure I.10 : Machine et produits obtenues par repoussage conventionnel .....	25
Figure II.1:Sections d'échantillons fracturés provenant d'essais de filabilité indiquant le degré de réduction directe admissible pour (A) 2024-T4 AI, (B) 6061-T6 AI, (C) cuivre recuit, (D) acier doux. ....	28
Figure II.2:principe d'essai du mandrin semi-elliptique.....	31
Figure II.3:principe d'essai du mandrin semi-elliptique.....	31
Figure II.4:Essai de réduction continue ; a) repoussage vers l'avant, b) vers l'arrière...	32
Figure II.5:réduction par étapes durant le repoussage de tube.....	33
Figure II.6: Détails de la géométrie du rouleau et ses effets sur la zone de contact.....	34
Figure II.7:Différentes formes de rouleaux. ....	35
Figure II.8:Effet du rayon du rouleau sur l'ovalisation. ....	35
Figure II.9: Effet du rayon du rouleau sur le diamètre moyen.....	35
Figure II.10:Tubes fluotournés fabriqués à partir de différents rouleaux. ....	36
Figure II.11:Effet de la variation de dureté sur la variation d'épaisseur du tube. ....	37
Figure II.12:Effet de l'alimentation par rouleaux sur l'ovalisation. ....	39
Figure II.13:Effet de l'alimentation par rouleaux sur la rugosité de la surface.....	39
Figure II.14:Le défaut d'accumulation lors du filage des tubes et sa dépendance à divers paramètres du processus. ....	42
Figure III.1:Représentation 3D du pot à obtenir .....	46
Figure III.2:Représentation 3D du gabarit sans cotation.....	48
Figure III.3:Représentation 3D du gabarit avec cotation .....	49
Figure III.4:Représentation du drafting du gabarit avec cotation.....	49

<b>Figure III.5:Drafting du gabarit avec cotation.....</b>	<b>50</b>
<b>Figure III.6:Représentation 3D de L'axe d'entraînement sans cotation .....</b>	<b>50</b>
<b>Figure III.7:Représentation 3D de L'axe d'entraînement avec cotation .....</b>	<b>51</b>
<b>Figure III.8:Représentation du drafting de L'axe d'entraînement avec cotation.....</b>	<b>51</b>
<b>Figure III.9:Drafting de L'axe d'entraînement avec cotation .....</b>	<b>52</b>
<b>Figure III.10:Représentation 3D de la Bague amont de centrage sans cotation .....</b>	<b>52</b>
<b>Figure III.11:Représentation 3D de Bague amont de centrage avec cotation .....</b>	<b>53</b>
<b>Figure III.12:Représentation 3D de Bague aval de centrage sans cotation .....</b>	<b>53</b>
<b>Figure III.13:Représentation 3D de Bague aval de centrage avec cotation.....</b>	<b>54</b>
<b>Figure III.14:Regroupement des éléments a monter .....</b>	<b>54</b>
<b>Figure III.15:Application d'une contrainte aux éléments à monter.....</b>	<b>55</b>
<b>Figure III.16:Application de la deuxième contrainte aux éléments à monter .....</b>	<b>55</b>
<b>Figure III.17:Montage des bagues sur le gabarit .....</b>	<b>56</b>
<b>Figure III.18:Montage de l'axe sur le sous ensemble gabarit et bagues .....</b>	<b>56</b>
<b>Figure III.19: Présentation du drafting de l'ensemble gabarit - Axe et bagues.....</b>	<b>57</b>
<b>Figure III.20:Drafting de l'ensemble gabarit - Axe et bagues .....</b>	<b>57</b>
<b>Figure IV.1:Dessin de définition du gabarit .....</b>	<b>61</b>
<b>Figure IV.2:Dessin de repérage des surfaces usines du gabarit.....</b>	<b>61</b>
<b>Figure IV.3: Représentation en 3D de L'axe d'entraînement.....</b>	<b>64</b>
<b>Figure IV.4:Repérage des surfaces usines de l'axe d'entraînement.....</b>	<b>64</b>
<b>Figure IV.5:Dessin de définition de la bague amont de centrage .....</b>	<b>66</b>
<b>Figure IV.6:Repérage des surfaces usines de la bague amont de centrage.....</b>	<b>67</b>
<b>Figure IV.7:Dessin de définition de la bague aval de centrage .....</b>	<b>69</b>
<b>Figure IV.8:Repérage des surfaces usines de la bague aval de centrage .....</b>	<b>70</b>

## Liste des tableaux

<b>Tableau I.1:Comparatif relation brut-produit fini pour les différents procédés de refoulement .....</b>	<b>21</b>
<b>Tableau IV.1:Gamme d'usinage du gabarit .....</b>	<b>62</b>
<b>Tableau IV.2:Gamme d'usinage de l'axe .....</b>	<b>65</b>
<b>Tableau IV.3:Gamme d'usinage de la bague amont.....</b>	<b>67</b>
<b>Tableau IV.4:Gamme d'usinage de la bague aval.....</b>	<b>70</b>

## Liste des équations

Eq.I.1.....	15
Eq II.1.....	29
Eq II.2.....	29
Eq II.3.....	30
Eq II.4.....	30
Eq II.5.....	31
Eq II.6.....	38
Eq II.7.....	41
Eq II.8.....	41
Eq II.9.....	41

## **Introduction générale**

Avec l'évolution rapide du secteur de la fabrication mécanique, le besoin de techniques avancées permettant la production de pièces métalliques complexes et de haute qualité, tout en réduisant les pertes de matière, est devenu de plus en plus pressant. Parmi ces techniques, le fluotournage se distingue comme un procédé de formage plastique combinant précision et efficacité pour la fabrication de pièces à parois minces. Ce procédé présente un grand intérêt pour des secteurs exigeants tels que l'aéronautique ou l'ingénierie médicale.

C'est dans ce contexte que s'inscrit le présent travail, qui vise à concevoir et réaliser un dispositif de production de vases par fluotournage, en alliant connaissances théoriques et expérience pratique dans un environnement industriel réel.

Face à l'intérêt croissant pour la fabrication de pièces métalliques légères et précises, le travail débute par une vue d'ensemble des principes du formage plastique en général, en comparant le fluotournage à d'autres procédés comme l'emboutissage et le laminage, ce qui constitue l'objet du premier chapitre. Le deuxième chapitre aborde les propriétés des matériaux influençant le succès du procédé de repoussage, telles que la formabilité, les limites de déformation et l'impact des paramètres opératoires comme l'angle d'attaque ou la vitesse d'avance. Le troisième chapitre marque la transition vers l'application technique en modélisant un gabarit démontable dans l'environnement SolidWorks, en définissant les dimensions et les matériaux optimaux pour chaque composant. Enfin, le quatrième chapitre est consacré à la mise en œuvre pratique du gabarit : choix des procédés, des machines, des outils, ainsi qu'un test de fluotournage d'un vase en aluminium, permettant d'évaluer la précision dimensionnelle et la qualité de surface du produit final. Cette approche confirme l'efficacité de l'intégration entre compréhension théorique et application concrète dans les procédés de fluotournage.

---

# **CHAPITRE I : Aperçu général sur le formage des matériaux**

---

# I Chapitre I: Aperçu général sur le formage des matériaux

## I.1 Introduction

Le repoussage des métaux fait référence à un groupe de procédés de formage qui permettent la production de composants en tôle creux et axialement symétriques par déformation plastique sans enlèvement de matière. La figure I.1. Récapitule les principales classes de procédés utilisés.

Il existe trois voies principales de fabrication de pièces métalliques selon l'état de départ du matériau métallique :

- Le moulage à partir de l'état liquide.
- Le façonnage à partir d'une ou plusieurs pièces à l'état solide. Cette voie peut, elle-même, se scinder en formage (i.e mise en forme sans enlèvement de matière par déformation plastique), usinage (i.e mise en forme avec enlèvement de matière), et l'assemblage, où l'on solidarise deux ou plusieurs pièces selon les procédés.
- Le frittage à partir de poudres par disparition des vides intergranulaires à haute température et éventuellement sous pression hydrostatique (compaction isostatique) ou un état de contrainte plus général par forgeage, filage...

Dans le formage on distingue:

- Le travail des métaux à l'état massif, pratiqué essentiellement dans les industries métallurgiques: laminage, forgeage, filage, étirage, tréfilage.
- Le travail des métaux en feuilles, pratiqué comme l'usinage dans les industries mécaniques et dont le principal procédé est l'emboutissage des tôles.

Il ne faut pas oublier les autres voies permettant de modifier la forme d'un solide et très utiles dans diverses situations, notamment pour la réalisation ou la réparation d'outillages de mise en forme :

- Addition d'un matériau métallique solide à une pièce en le transformant temporairement en ions par électrolyse (électroformage), en liquide (rechargement par les techniques de soudage) ou en gaz (pulvérisation et condensation).
- Passage temporaire d'un alliage métallique par l'état semi-solide entre liquidus et solidus et injection dans un moule.

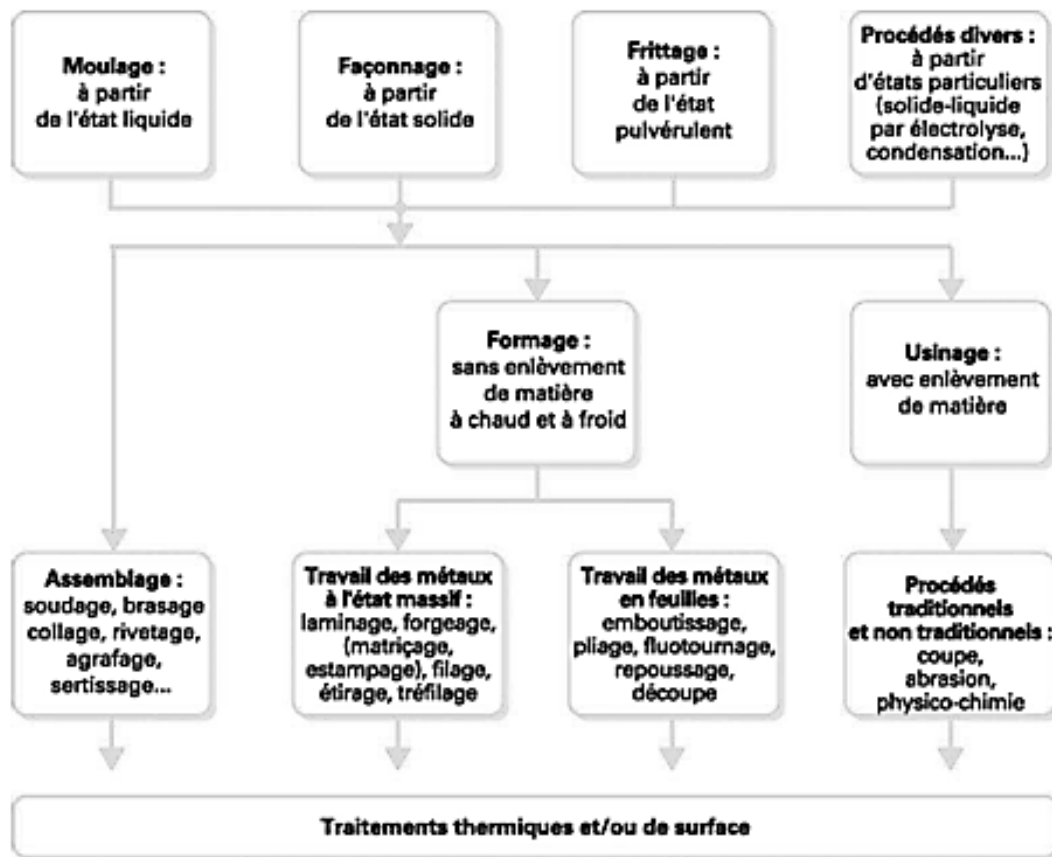


Figure I.1: Principaux procédés de fabrication des matériaux métalliques.

## I.2 Définitions

Le repoussage de tôle est communément connu comme un processus permettant de transformer une tôle plate en une forme creuse par un rouleau qui force la tôle sur un mandrin. [1]. La technique consiste à serrer une tôle brute contre un mandrin sur un tour de repoussage, et à former progressivement la tôle brute sur la surface du mandrin par un rouleau, soit en une seule étape, soit en une série d'étapes. (Figure I.2) [2].

Bien que le repoussage des métaux soit connu depuis des siècles, le procédé est toujours exploité par des artisans spécialisés qui utilisent leur expérience combinée à des essais et des erreurs lors de la mise en place d'une nouvelle pièce. Le processus de filage était souvent considéré comme un art plutôt qu'une science.

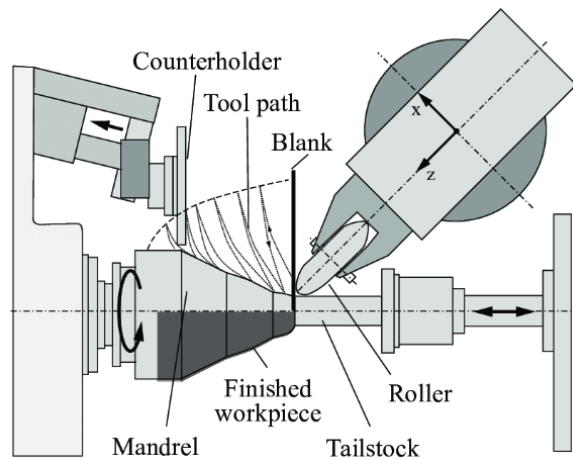


Figure I.2 : Illustration du procédé de repoussage des métaux [3].

### I.3 Domaines d'utilisation

Grâce aux avantages inhérents au procédé de repoussage, tels qu'une faible charge de formage, un outillage simple, un bon état de surface et de meilleures propriétés mécaniques des pièces repoussées, le repoussage des métaux est fréquemment utilisé ces dernières années pour la production d'instruments de musique (les cymbales), d'ustensiles de cuisine et de composants pour les secteurs de l'automobile, de l'aérospatiale, de la médecine, de la construction et de la défense. Parmi les exemples typiques, on peut citer les composants de moteurs et de turbines à réaction, les réflecteurs radars, les coiffes de satellite...etc. Le procédé est capable de former des composants de diamètres allant de 3 mm à 10 m et d'épaisseurs de 0,4 à 25 mm [4, 5].

### I.4 Les différents types de procédés repoussage

Le repoussage de tôles peut être divisé en deux catégories selon les configurations de repoussage (Figure I.3) : le repoussage conventionnel (conventionnel spinning) et le formage par cisaillement (shear forming), ce dernier peut être divisé en repoussage par cisaillement et repoussage par écoulement (repoussage en tube)

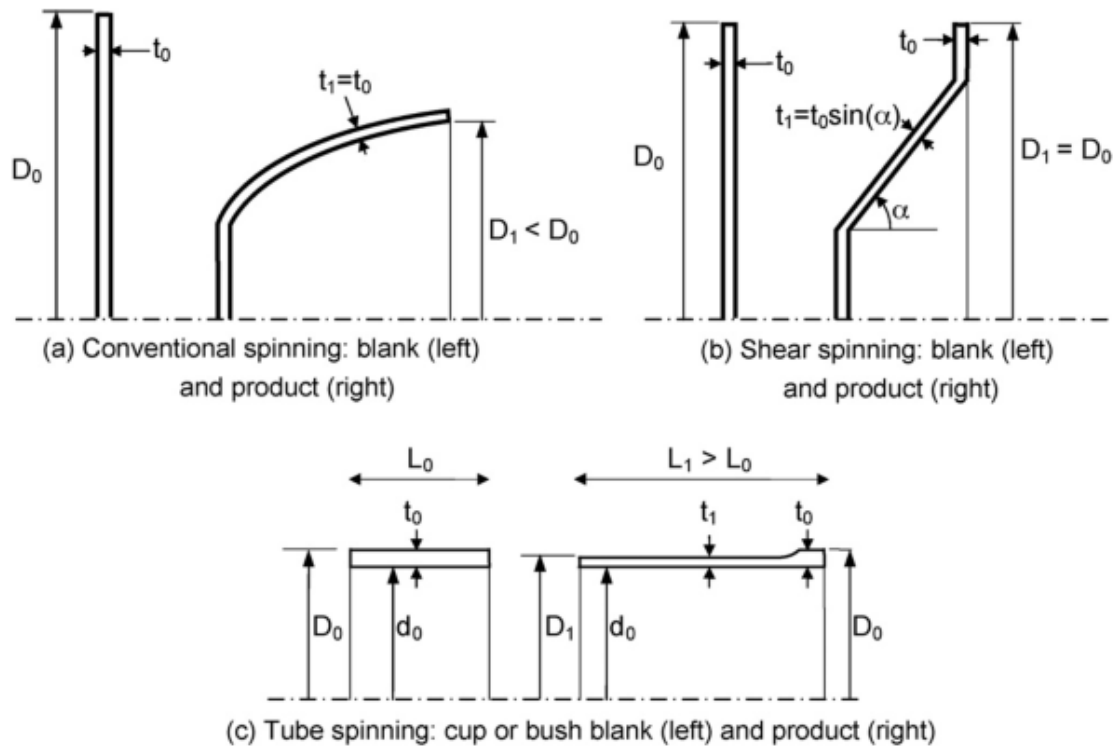


Figure I.3 : Configurations du repoussage : (a) conventionnel, (b) formage par cisaillement et (c) repoussage des tubes.

#### I.4.1 Le repoussage conventionnelle:

C'est le plus ancien des procédés (Figure I.4), une ébauche est façonnée à la forme souhaitée par plusieurs passages sans modifier son épaisseur, mais son diamètre est volontairement réduit. Il nécessite relativement peu d'énergie. La forme finale de la pièce est obtenue en déformant la matière première initiale pour lui donner la forme du mandrin en rotation, par l'application de forces ponctuelles. La réduction d'épaisseur de la matière première est involontaire dans ce procédé, et le diamètre de la pièce finale est toujours inférieur à celui de la matière première initiale.

Le repoussage présente de nombreux avantages par rapport aux méthodes similaires de fabrication. La déformation localisée du matériau sous le rouleau nécessite de faibles efforts de formage. De plus, un outillage simple et non dédié offre une grande flexibilité et permet un formage précis. Enfin, les pièces formées présentent un état de surface de haute qualité et une résistance mécanique améliorée.

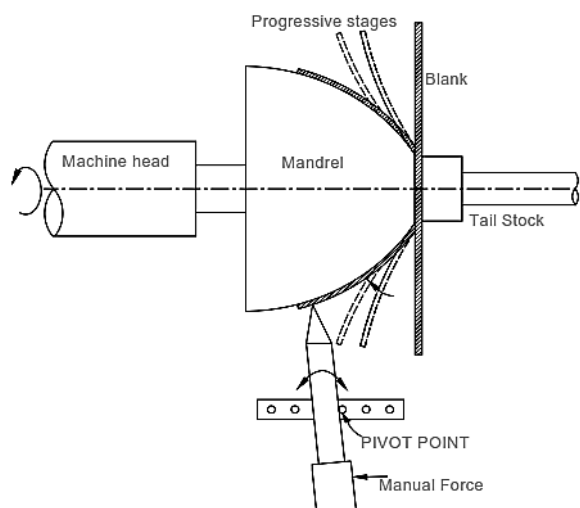
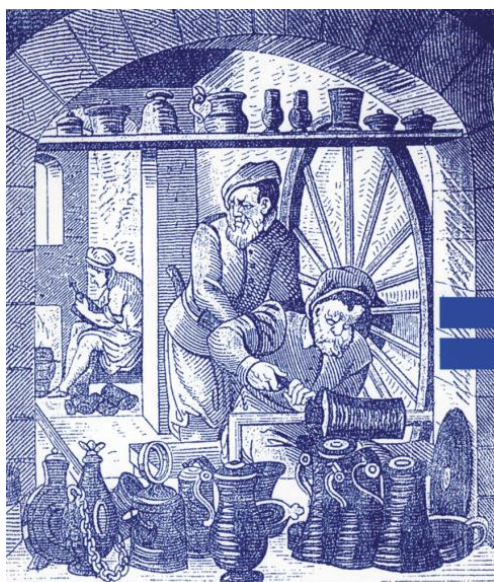


Figure I.4 : . Principe du repoussage manuel ou conventionnel [6].

#### I.4.2 Le fluotournage ou formage par cisaillement

C'est le processus dans lequel une plaque ronde plus épaisse est formée en différentes formes, à savoir conique, parabolique, ogive et sphérique sur un mandrin rotatif. À l'inverse du repoussage, le formage par cisaillement (Figure I.5) produit la forme souhaitée en un seul passage sur une ébauche, l'épaisseur étant volontairement réduite et le diamètre de l'ébauche restant constant tout au long du processus. Elle s'accompagne généralement de la formation de profils axisymétriques coniques ou à génératrice courbe induisant une déformation plastique continue et locale du matériau [7]. Dans ce processus, la réduction requise de l'épaisseur de paroi est obtenue en ajustant l'espace entre le rouleau et le mandrin, et l'épaisseur finale est régie par la « loi des sinus » :

$$S_f = S_i \cdot \sin(a) \quad \text{Eq.I.1}$$

L'épaisseur finale de la paroi ( $S_f$ ) est calculée à partir de l'épaisseur de la pièce de départ ( $S_i$ ) et de l'angle du demi-cône ( $a$ ) du mandrin

Selon le sens d'écoulement de la matière, Il existe deux types de repoussage : par cisaillement vers l'avant et vers l'arrière, dans la littérature ainsi que dans la pratique.

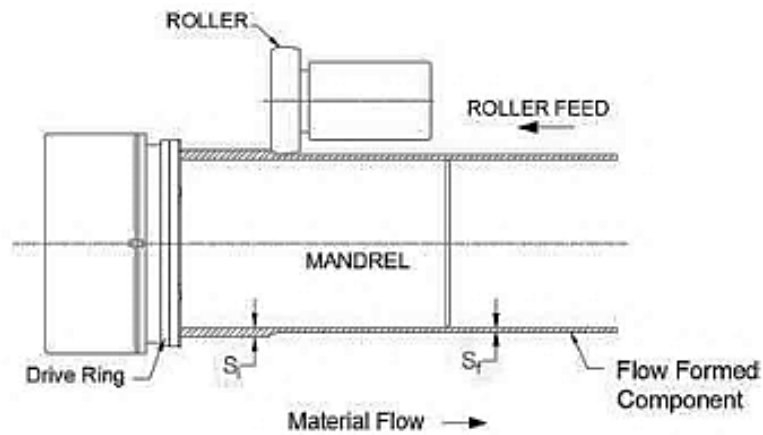


Figure I.5: Illustration du repoussage par cisaillement.

Dans le cas du fluotournage avant (figure I.6), une contre-pointe est utilisée pour positionner l'ébauche sur le mandrin, et l'allongement de la pièce s'effectue selon le mouvement axial des rouleaux [8]. Le mandrin supporte le tube fluotourné et sa longueur doit être supérieure à celle de la coque fluotournée. Ce type de fluotournage est particulièrement avantageux pour les composants dont une extrémité est partiellement ou totalement fermée. Dans le fluotournage inverse, une couronne dentée ou d'entraînement transmet le mouvement de rotation du mandrin à l'ébauche. L'allongement de la pièce s'effectue alors dans le sens inverse du mouvement axial des rouleaux. Comme le flux de matière s'effectue dans le sens inverse du mouvement axial des rouleaux, la longueur du mandrin peut être inférieure à celle de la dernière coquille. Généralement, lors de la dernière passe du procédé, une partie du tube formé sort du mandrin et reste sans support pendant le processus. Ce procédé est particulièrement connu pour les coquilles ouvertes aux deux extrémités.

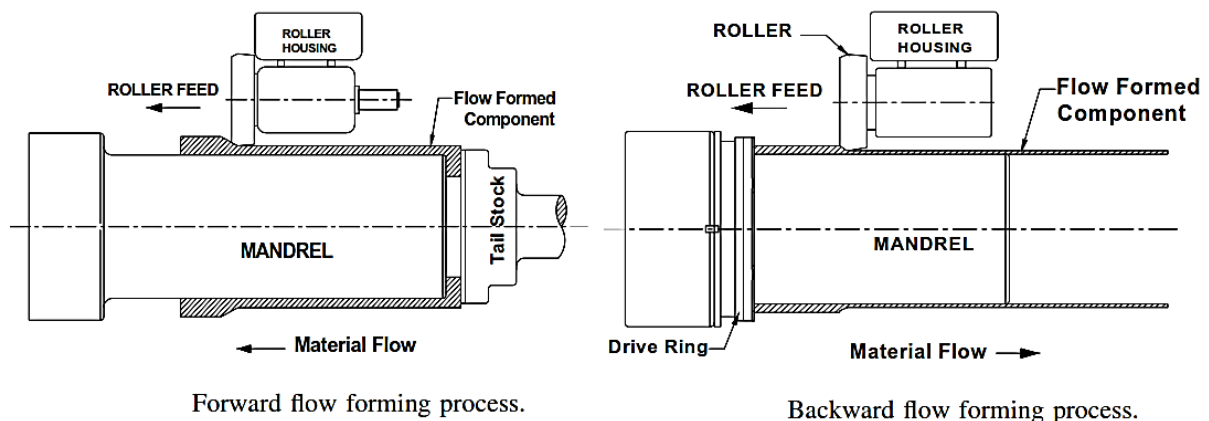


Figure I.6: Fluotournage sens avant et sens arrière.

## I.5 Comparaison entre les procédés de refoulement

La principale différence entre le repoussage conventionnel et le formage par cisaillement est que le fluotournage utilise un morceau de matériau de départ relativement plus fin et que le diamètre du produit final est toujours inférieur au diamètre de l'ébauche de

---

départ (voir tableau I.1). En revanche, dans le cas du repoussage conventionnel, aucune réduction de l'épaisseur de la paroi de la pièce n'est prévue, même si elle est difficile à contrôler. De plus, le fluotournage utilise des rouleaux à commande hydraulique ou électrique, dont les mouvements sont contrôlés automatiquement. Le mouvement programmé des rouleaux assure l'écoulement de la pièce dans les directions axiale et radiale sur le mandrin. Cela permet d'améliorer la précision et la flexibilité pour des variations d'épaisseur importantes.

De point de vue mécanique il y a une distinction claire entre les des deux processus. Yang [9] a observé expérimentalement que le mécanisme de déformation dans le formage par cisaillement n'est pas un cisaillement pur, mais une combinaison de cisaillement et de flexion; la déformation pour de grands angles de paroi est plus proche de la flexion pure par contre dans le formage par cisaillement, mais pour de petits angles, elle est plus proche du cisaillement pur. Sortais et al. [10] Soulignent également que la mécanique des deux procédés est similaire. Quigley et Monaghan [11] Démontrent que la première passe du repoussage conventionnel est en fait un procédé de formage par cisaillement, d'après des observations expérimentales et des modèles analytiques et numériques. Finalement, Kawai and Hayama [12] Soulignent que même dans le conventionnel, la géométrie du parcours d'outil influence l'épaisseur finale de la tôle.

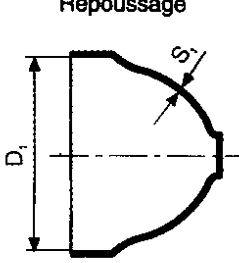
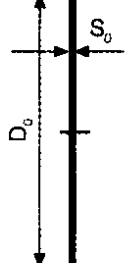
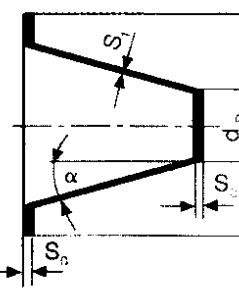
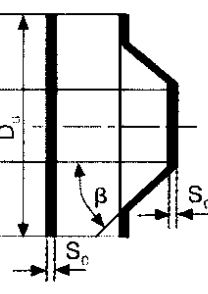
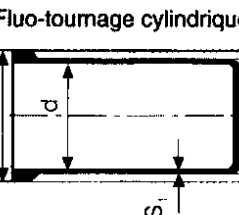
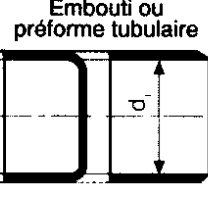
## **I.6 Importance du fluotournage**

Des alternatives au repoussage, comme le formage à la presse, sont également utilisées pour la production de pièces en tôle axisymétriques. Différents procédés de formage des métaux permettent de produire des pièces cylindriques. Parmi ces procédés, on trouve le laminage, l'extrusion, l'étirage, l'emboutissage profond... etc. Cependant, aucun d'entre eux ne permet la réalisation de coques de précision à parois minces, hormis le fluotournage. De plus, ce procédé permet de produire des pièces de forme quasi définitive avec des tolérances dimensionnelles et de forme rigoureuses. Il permet également de réaliser des tubes d'épaisseur variable et à brides externes intégrées. Le rapport longueur/diamètre des tubes fluotournés est illimité. Grâce à ces avantages, le fluotournage a gagné en importance, notamment dans les secteurs de l'aérospatiale, de la défense et de l'automobile.

Parmi les produits fabriqués par repoussage et fluotournage, on trouve des coques de moteurs de fusées, des pièces de turbines à gaz, des composants de cellules et des antennes paraboliques pour l'industrie aéronautique. Dans l'industrie automobile, des composants de groupes motopropulseurs et des jantes sont également fabriqués par fluotournage. Les bouteilles de gaz et les conteneurs cylindriques sont également fabriqués par cette méthode.

Bien que les machines de repoussage modernes soient capables de produire des forces de formage élevées, les machines de fluotournage sont beaucoup plus robustes. Elles peuvent générer des forces suffisamment élevées pour former le métal sur toute son épaisseur. Ces machines sont capables de traiter des matériaux plus résistants tels que les aciers à très haute résistance et les superalliages, etc.

Tableau I.1: Comparatif relation brut-produit fini pour les différents procédés de refoulement

Formage par traction/ compression DIN 8582	Repoussage – d'après DIN 8584, T4			Restant pratiquement constante: $S_1 = S_0$
	Formage par compression DIN 8582	Fluo-projection 	Flan ou préforme 	Au fond: $S_1 = S_0$ Dans la zone transformée: $S_1 = S_0 \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}$
	Fluo-tournage – d'après DIN 8583, T2	Fluo-tournage cylindrique 	Embouti ou préforme tubulaire 	Dans la zone transformée: $S_1 = \frac{1}{2} (D_1 - d)$

## I.7 Avantages par rapport aux autres procédés de formage de tôles

Grâce à son procédé de formage incrémental, le repoussage présente des avantages exclusifs par rapport aux autres procédés de formage de tôles. Parmi ceux-ci, on peut citer la flexibilité du procédé, l'absence d'outillage dédié, la faible charge de formage, un bon état de surface et de meilleures propriétés mécaniques de la pièce repoussée.

Voici quelques avantages du fluotournage par rapport au repoussage, à l'emboutissage profond, au laminage de tôles et au soudage. Ces avantages sont particulièrement marqués lorsque les composants sont produits en petites ou moyennes séries.

- Faible coût de production des composants

- 
- Fabrication quasi-finale
  - Finition de surface supérieure
  - Produits d'une excellente précision
  - Propriétés de résistance du matériau améliorées

## I.8 Outillage utilisé pour le fluotournage

Les outils nécessaires au fluotournage sont un mandrin, une bague de démoulage, une bague dentée (généralement appelée bague d'entraînement) et des rouleaux de formage.

### I.8.1 Le Mandrin

Le mandrin (figure I.7) est l'outil principal utilisé pour le fluotournage. Le diamètre extérieur du mandrin et le diamètre intérieur du composant fini sont identiques. Une légère conicité est prévue sur le mandrin pour faciliter le retrait de l'élément après le formage. La précision du composant dépendant largement de la précision du mandrin, ce dernier est conçu avec des tolérances dimensionnelles strictes. De plus, le mandrin est creux afin de minimiser son poids et sa déflexion. Ceci facilite également le refroidissement, nécessaire à l'évacuation de la chaleur causée par la déformation plastique rapide du matériau. Un état de surface N6 est requis sur le diamètre extérieur du mandrin, car il reflète le diamètre intérieur du tube fini. Le mandrin est en acier inoxydable AISI D2/D3 (appartient à la classe des aciers à outils pour le travail à froid relatif à la norme ASTM A681-1999 sur les matériaux en acier). La dureté du mandrin fini est contrôlée entre 58 et 62 HRc. Ceci est nécessaire du point de vue de la rigidité pour conserver la précision de forme du mandrin et pour protéger le mandrin des rayures pouvant résulter de l'opération de fluotournage, du chargement de la préforme et du retrait du composant fini [13].

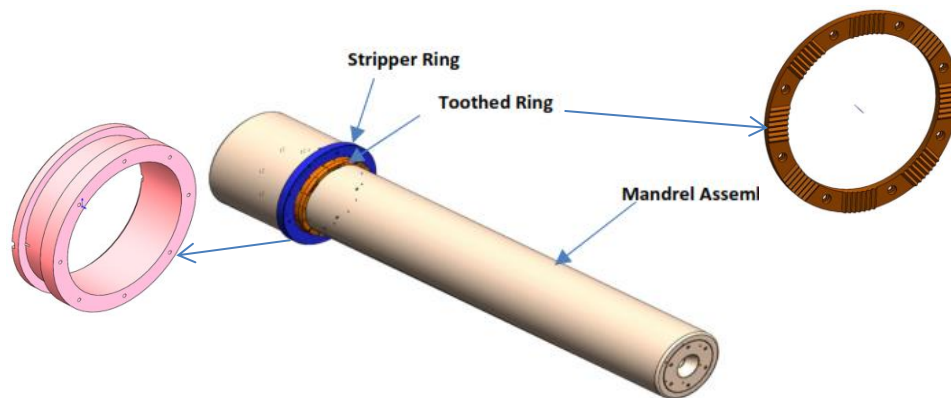


Figure I.7: Mandrin de fluotournage, bague de démoulage et bague dentée.

## I.8.2 L'Anneau de démoulage et anneau denté

L'anneau de démoulage (figure I.7) et le bloc d'anneaux dentés sont deux outils différents. Ils sont assemblés pendant le processus. Cet ensemble est fixé au mandrin de fluotournage par une clavette, placée au niveau de la rainure de clavette, qui imprime à l'anneau de démoulage et à l'anneau denté la même vitesse que celle du mandrin. L'anneau de démoulage est en acier bas carbone et facilite le retrait du tube fini. L'anneau denté assure la rotation de la préforme avec le mandrin. Il est fabriqué en acier AISI D2/D3 d'une dureté de 58 à 62 HRc.

## I.8.3 Les Rouleaux

La géométrie du rouleau est un facteur essentiel du fluotournage et il est soumis à des charges importantes pendant son fonctionnement. Les matériaux de tous les rouleaux (figure I.7) sont considérés comme de l'AISI D2/D3, d'une dureté de 58 à 62 HRc. Un état de surface N5 ou supérieur est préférable pour le profil extérieur des rouleaux. Les paramètres dimensionnels essentiels du rouleau sont le diamètre ( $D$ ), l'angle d'entrée ( $\alpha$ ), le rayon de pointe ( $R$ ) et l'angle de sortie ( $\beta$ ). Les rouleaux de fluotournage sont généralement désignés par  $\alpha/R/\beta$  (figure I.8). Le diamètre du rouleau est maintenu aussi proche que possible de celui du mandrin afin d'obtenir une surface de contact suffisante pour assurer une déformation uniforme. L'angle d'entrée et le rayon de la pointe déterminent l'acuité des rouleaux. Un angle d'entrée élevé et un rayon plus petit donnent un rouleau plus acuité. Des rouleaux plus acuités exercent une force de déformation plus importante par unité de surface, ce qui permet une réduction plus importante par passe et convient également au formage de matériaux à haute résistance. Dans le cas de rouleaux décalés axialement, le rouleau de tête forme le matériau relativement tendre, tandis que les rouleaux suivants prennent le matériau écroui. Des rouleaux plus acuités doivent être utilisés pour déformer le matériau écroui. L'angle de sortie n'a pas d'effet significatif sur le processus de fluotournage et est choisi entre 5 et 12 degrés pour tous les matériaux.

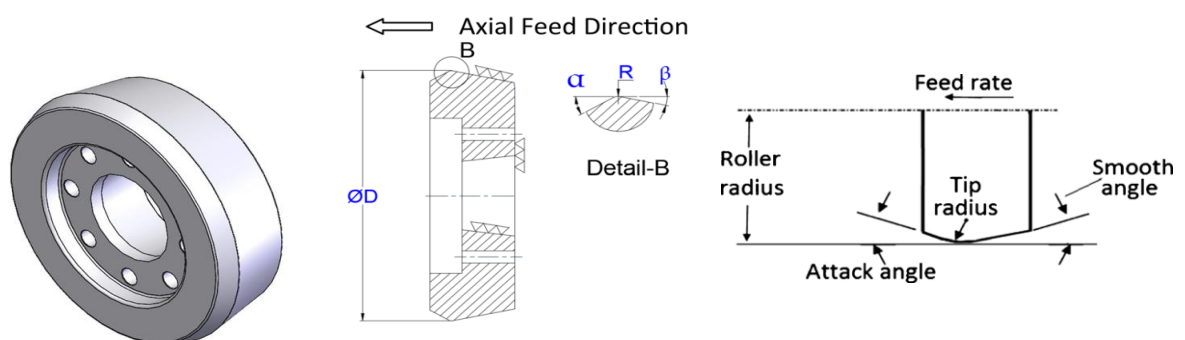


Figure I.8: Coupe transversale d'un rouleau de fluotournage

## I.9 Les machines de fluotournage

La pièce est formée plastiquement sur un mandrin rotatif lors du fluotournage à l'aide d'un ou plusieurs rouleaux. Ces rouleaux sont généralement à commande hydraulique ou électrique. Bien que la plupart des machines de fluotournage de production soient équipées de trois rouleaux (répartis uniformément de  $120^\circ$ ), des machines à six rouleaux ou à quatre rouleaux sont également disponibles sur le marché. Toutes ces machines sont équipées d'un système de décalage axial des rouleaux. Le décalage axial requis des rouleaux est réglé manuellement, en fonction de la réduction d'épaisseur et de la géométrie des rouleaux. Une brève spécification typique d'une machine de fluotournage CNC à trois rouleaux a été rapportée ailleurs. [13] Les machines de fluotournage (Figure I.9) sont beaucoup plus robustes que les machines de filage (Figure I.10). Ces machines peuvent générer des forces suffisamment élevées pour former le métal sur toute son épaisseur. Elles sont capables de traiter des matériaux plus résistants tels que les aciers à très haute résistance, les superalliages, etc. La puissance de la broche de la machine de formage par fluotournage et la capacité du rouleau à exercer des forces de formage déterminent la capacité de formage de toute machine.



Figure I.9: Machine et produits obtenus par repoussage non-conventionnel.

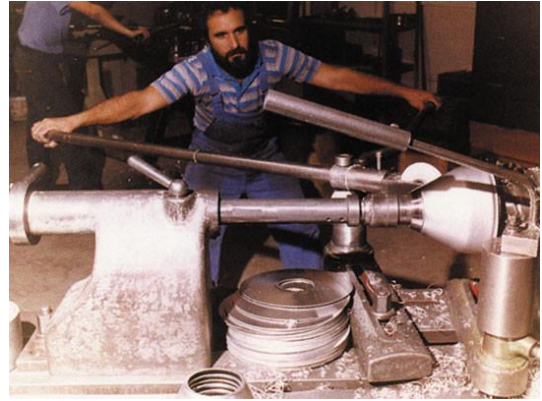


Figure I.10 : Machine et produits obtenues par repoussage conventionnel

---

## Bibliographie du chapitre I.

1. C. Wong, T. Dean, J. Lin. A review of spinning, shear forming and flow forming processes, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 43, (2003, )pp : 1419–1435.
2. O. Music, J.M. Allwood, K. Kawai. A review of the mechanics of metal spinning, *Journal of Materials Processing Technology*, 210, 2010, pp:3–23. doi:10.1016/j.jmatprotec.2009.08.021.
3. Lin Wang, Hui Long, Dave Ashley, Martyn Roberts, Peter White .Analysis of Single-Pass Conventional Spinning by Taguchi and Finite Element Methods. *steel research int.* 81, No. 9, 2010.
4. Brown, J. *Advanced Machining Technology Handbook*. 1998. McGraw-Hill.
5. Qinxiang Xia, Gangfeng Xiao, Hui Long, Xiuquan Cheng, Xiangfei Sheng. A review of process advancement of novel metal spinning. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. Volume 85, October 2014, Pages : 100-121. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2014.05.005>.
6. Antonio Nikolov, *Sheet-Metal Forming Processes with Local Plastic Deformation by using Conventional Spinning Methods – Introduction*. Proceedings of the Technical University of Sofia, vol. 73, no. 1, year 2023 ISSN: 2738-8549.
7. Mei Zhan, Xianxian Wang, Hui Long. Mechanism of grain refinement of aluminium alloy in shear spinning under different deviation ratios, *Materials & Design*. Volume 108, 15, 2016 , pp : 207-216.
8. Chang S C, Huang C A, Yu S A, Chang Y, Han W C, Shieh T S, Chung H C, Yao H T, Shyu G D, Hou H Y, Wang C C and Wang W S Tube spinnability of AA2024 and 7075aluminium. *J. Mater. Process. Technol.* 80–81, 1998, pp: 676–682.
9. B., Yang, C.T. Analysis of power spinning of cones. *Journal of Engineering for Industry–Transactions of the ASME (Series B)* 82, 1960, pp:231–245.
10. Sortais, H.C., Kobayashi, S., Thomsen, E.G. Mechanics of conventional spinning. *Journal of Engineering for Industry–Transactions of the ASME* 85 (Series B), 1963, pp:346–350.
11. Quigley, E., Monaghan, J. Using a finite element model to study plastic strains in metal spinning. In: *9th International Conference on Sheet Metal*, Leuven Belgium, 2001, Pp : 255–262.
12. Kawai, K., Hayama, M. Roller pass programming in conventional spinning by NC spinning machine. In: Lange, K. (Ed.), *Advanced Technology of Plasticity*, 2. Springer-Verlag, 1987, pp : 711–718.
13. BIKRAMJIT PODDER and NIRMAL BARAN HUI. Flow forming of thin-walled precision shells. *Sādhanā*. 2018, 43:208. <https://doi.org/10.1007/s12046-018-0979-7>

---

## **CHAPITRE II : La formabilité des matériaux et paramètres du repoussage**

---

## II La formabilité des matériaux et paramètres du repoussage

### II.1 Aptitude au formage

La qualité de formage est étroitement liée à son aptitude filage. Par conséquent, l'étude de cette aptitude est essentielle pour améliorer la qualité des produits repoussés [1, 2]. Auparavant, aucune méthode d'essai ne permettait de prédire l'aptitude au filage des matériaux métalliques. De nombreuses méthodes d'essais et d'erreurs étaient donc utilisées pour établir le procédé, ce qui était coûteux en temps et en argent. De ce fait, de nombreuses études ont été menées pour évaluer la filabilité du matériau. La première approche a été entreprise par Keeg qui a développé une méthode pour tester la filabilité de divers matériaux en effectuant une expérience de mandrin elliptique. Kalpakcioglu [3] a ensuite mené une étude analytique du problème pour expliquer les résultats expérimentaux obtenus dans les tests de filabilité de Keeg.[4] À partir de cette étude analytique, la « bonne » et la « mauvaise » aptitude au filage du métal ont été évaluées en fonction de la déformation à la rupture réelle (0,5) lors de l'essai de traction. De plus, il a proposé une méthode d'essai pour déterminer le taux d'amincissement maximal lors du filage direct du tube et a évalué la filabilité du matériau en fonction de la réduction de surface lors de l'essai de traction [5]

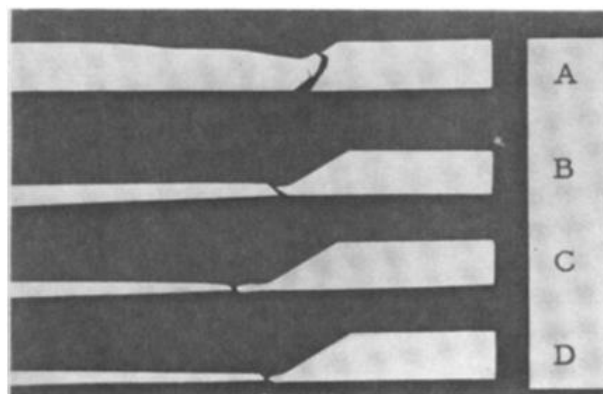


Figure II.1: Sections d'échantillons fracturés provenant d'essais de filabilité indiquant le degré de réduction directe admissible pour (A) 2024-T4 AI, (B) 6061-T6 AI, (C) cuivre recuit, (D) acier doux.

L'étude du modèle d'éléments finis pour examiner la filabilité a pris une place importante dans l'établissement du puissant processus de filage, et l'influence des paramètres du processus sur la filabilité par analyse de variance a également été prise en compte. Certains auteurs ont proposé un modèle pour évaluer la filabilité des matériaux lors du filage de tubes à l'envers en plusieurs passes. Ils l'ont intégré dans un logiciel d'éléments finis (ABAQUS) et ont simulé l'évolution des dommages en plusieurs passes de filage [6, 7, 8 et 9].

En général, dans le processus de déformation plastique du métal, la formabilité d'un matériau est définie comme le niveau (quantité de déformation) auquel un matériau peut être déformé avant qu'une fracture ne se produise [10]. Par conséquent, la formabilité du matériau est définie en fonction de la méthode de travail plastique. La filabilité est la capacité de la pièce à subir une déformation par filage sans fracture [3, 11]. Certains chercheurs ont indiqué que l'aptitude au filage dans le procédé de filage de tubes fait référence à la capacité d'un matériau donné à subir un filage sans fissuration, instabilité locale ni accumulation, etc. Étant donné les dimensions géométriques du rouleau, le matériau de l'ébauche et la vitesse d'avance, le taux d'amincissement maximal est utilisé pour exprimer l'aptitude au filage de la pièce cylindrique sans plissement ni fissuration à chaque passe de filage [12, 13]. Par conséquent, l'aptitude au filage est un facteur important qui caractérise la capacité de déformation plastique d'un matériau, indiquant que les caractéristiques de filage sont élevées ou faibles, et peut être exprimée par le taux d'amincissement maximal ( $\epsilon_{tmax}$ ) avant l'apparition de divers défauts [14].

$$\epsilon_{tmax} = \frac{t_0 - t_f}{t_0} \times 100\% \quad \text{Eq II.1}$$

Où  $t_0$  est l'épaisseur de paroi de la pièce brut et  $t_f$  est l'épaisseur de paroi du produit fini. Ainsi, des valeurs plus élevées de  $\epsilon_{tmax}$  signifient une meilleure filabilité du matériau lors d'un repoussage puissant.

Si l'épaisseur de paroi du produit est modifiée par la loi sinusoïdale pour le formage cisaillement, la formule III.1 est exprimée comme suit:

$$t_f = t_0 \sin \alpha/2, \quad \epsilon_{tmax} = (1 - \sin \alpha/2) \times 100\% \quad \text{Eq II.2}$$

Lorsque le repoussage est réalisé en plusieurs passes sans traitement thermique intermédiaire, l'aptitude au repoussage il faut considérer le taux d'amincissement total du moment que le taux d'amincissement maximal par passe est inférieur au taux total

On peut donc définir le taux d'amincissement ultime comme l'aptitude au repoussage est la capacité de déformation plastique ultime du matériau qui peut être filé (en cas de repoussage multipasse, sans traitement thermique intermédiaire) sans aucun défaut (fractures, fissures, flambage, plis, défauts microscopiques, etc.) dans la pièce dans les conditions de repoussage données (propriétés de la pièce, géométrie du rouleau, vitesse d'avance, méthode de filage, etc.) [1, 4, 11 et 15].

## II.2 Méthodes d'évaluation de la formabilité

L'objectif des tests de formabilité d'un matériau lors d'un procédé de déformation plastique métal est de déterminer, grâce à un nombre limité de tests, quel matériau réussira tel ou tel

---

procédé de formage [10]. Il consiste à tester la relation entre les propriétés du matériau à filer et le procédé de filage correspondant, c'est-à-dire de prédire à l'avance si la pièce peut être filée sans défaut dans des conditions de procédé données. Cela est important, car il joue un rôle essentiel dans la réduction du cycle de filage du produit, l'augmentation de la productivité et la réduction des coûts de production (diminution du rebut). On compte les essais suivants :

### II.2.1 Essai de traction uniaxiale

L'aptitude au repoussage d'un tube étant la propriété d'écoulement dépendant de la ductilité du matériau, cette aptitude peut être déterminée à l'aide de l'indice de matériau lié à la ductilité, tel que l'allongement, la réduction de section et la ténacité [3, 4, 5, 16 et 17].

Une étude de corrélation entre l'aptitude au repoussage en cisaillement du métal et la réduction de section en traction a montré que l'aptitude au filage peut être prédite en connaissant la réduction de section en traction du matériau [3, 18]. L'analyse expérimentale a démontré que l'aptitude au filage ne peut être évaluée par l'allongement moyen lors de l'essai de traction et a proposé une formule empirique permettant de déterminer l'aptitude au filage d'un matériau à partir de la relation entre le taux d'amincissement par filage et la réduction de section en traction :

$$\epsilon_{tmax} = \frac{R}{0.17 + \frac{R}{100}}, \% \quad \text{Eq II.3}$$

Où R est la réduction de la surface à la rupture lors de l'essai de traction.

Cette formule a été modifiée pour le cas du filage de la plaque en alliage d'aluminium [19] et utilisée pour l'évaluation de la filabilité comme dans l'équation III.4 qui suit :

$$\epsilon_{tmax} = K_t \frac{R}{0.17 + \frac{R}{100}}, \% \quad \text{Eq II.4}$$

Où  $K_t$  est un coefficient lié à l'épaisseur du matériau et compris entre 0,5 et 1.

Bien que les valeurs obtenues par l'essai de traction soient qualitatives pour évaluer l'aptitude au filage, elles présentent l'avantage de permettre une évaluation rapide de l'aptitude au filage du matériau. Cela ne peut être retenu comme critère de formabilité à cause des insuffisances suivantes :

- l'état de contrainte sous le rouleau pendant le filage sous pression étant complexe, les propriétés mécaniques obtenues par un simple essai de traction uniaxiale ne décrivent pas pleinement les caractéristiques plastiques.
- la relation entre les dimensions de l'éprouvette de traction et celles du produit n'étant pas clairement définie, les valeurs obtenues ne permettent pas d'évaluer avec précision l'aptitude au filage du matériau.

## II.2.2 Essai de mandrin semi-elliptique

La méthode d'essai consiste à évaluer l'aptitude au filage du métal utilisant un mandrin de filage semi-elliptique dont l'angle semi-conique passe de  $90^\circ$  à  $0^\circ$  [4]. Lorsque l'écart entre le rouleau et le mandrin devient sinusoidal, l'épaisseur de paroi de la pièce d'essai diminue progressivement par rapport à l'épaisseur initiale, et l'angle du demi-cône passe d'un grand angle à un petit angle. L'épaisseur de paroi et l'angle semi-conique évoluent jusqu'à la rupture du matériau d'essai (Figure. III.2). L'aptitude au filage est le taux d'amincissement ultime et est évaluée par l'équation III.5.

$$\varepsilon_{tmax} = \frac{t_f - t_0}{t_0} \times 100 = (1 - \sin \alpha_{min}/2) \times 100, \% \quad \text{Eq II.5}$$

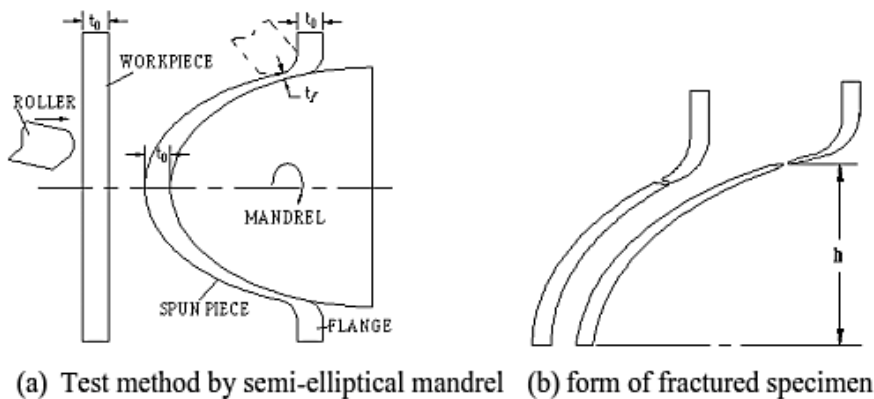


Figure II.2:principe d'essai du mandrin semi-elliptique

Cette méthode d'évaluation de l'aptitude au filage d'un matériau, présente un défaut c'est qu'un seul rouleau est instable, la position initiale du rouleau est déterminée par l'expérience et la réduction d'épaisseur finale du produit d'essai ne peut être déterminée avec précision [Zeng2015]. Une méthode d'essai améliorée pour déterminer l'aptitude au filage par un mandrin elliptique a été étudiée. Fig. II.3

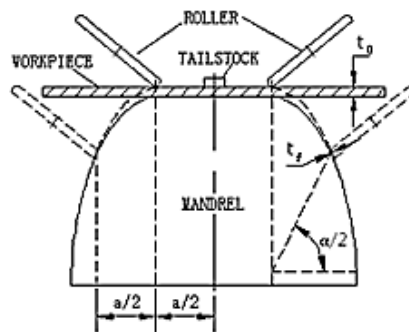


Figure II.3:principe d'essai du mandrin semi-elliptique

Où  $(\alpha_{min}/2)$  est l'angle minimum du demi-ellipsoïde.

Lors de ces tests, l'épaisseur de paroi est mesurée au point de rupture du produit testé et la filabilité du matériau est évaluée à l'aide de la formule. La précision de la mesure de l'épaisseur de paroi affecte le résultat de l'essai.

### II.2.3 Essai de réduction continue

L'évaluation par l'essai de réduction continue présentée dans la figure II.4, permet de tester l'aptitude au repoussage ou filabilité d'un matériau lors du repoussage progressif d'un tube [20, 4, 12 et 21].

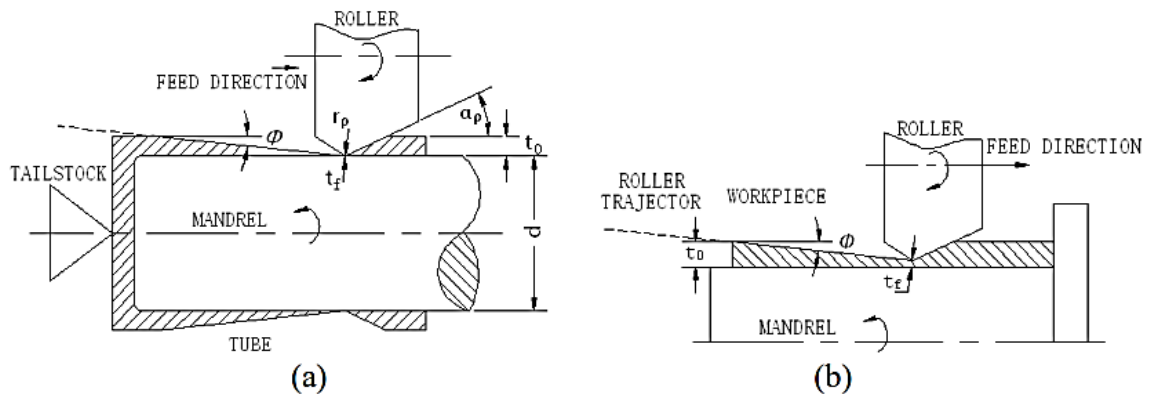


Figure II.4: Essai de réduction continue ; a) repoussage vers l'avant, b) vers l'arrière

La figure II.4 (a), présente une méthode d'essai d'évaluation de l'aptitude au filage pendant le repoussage en avant ou dit direct. Les caractéristiques du tube utilisé sont : diamètre intérieur ( $d=65$  mm) et l'épaisseur ( $t_0=5$  mm) tandis que ceux du rouleau sont : l'angle d'attaque ( $\alpha_p = 20^\circ$ ) et le rayon de congé ( $r_p = 6$  mm). Quant au mandrin il tourne à 100tr/min et les rouleaux se déplacent le long de la trajectoire à un angle faible  $\emptyset$  par rapport à la génératrice du mandrin, diminuant progressivement l'épaisseur de paroi du tube de l'épaisseur initiale à  $t_0$  à  $t_f$  (épaisseur de paroi à l'endroit de la rupture). Cet amincissement en une seule étape présente une limite : après quoi le matériau se rompt sous tension derrière le rouleau. Après avoir mesuré l'épaisseur au point de rupture, la détermination de la vitesse d'amincissement finale se fait à l'aide de l'équation II.1 [20, 5]. La figure II.4(b), illustre la méthode d'essai dans le processus de filage inverse, dans lequel le sens de déplacement du rouleau et de la pièce est opposé [21].

### II.2.4 Essai de réduction par étapes

Cet essai consiste en plusieurs passes successives et, à chaque passe, l'épaisseur est réduite d'une quantité optimale (ou supérieure) [16, 22].

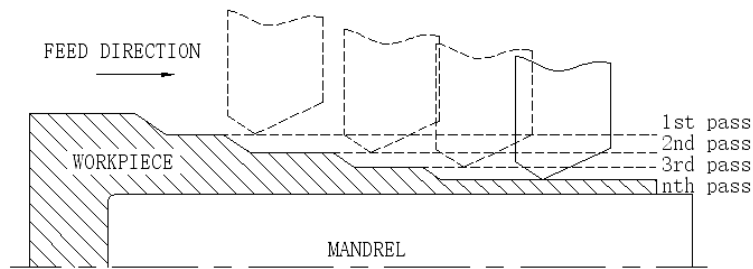


Figure II.5:réduction par étapes durant le repoussage de tube

À chaque déplacement des rouleaux tout au long de la préforme, chaque progression débute par un décalage axial formant une série d'étapes. Comparé aux essais précédents, cet essai nécessite davantage de passes, mais il a été conçu pour obtenir un niveau de triaxialité similaire à toutes les étapes de la déformation. Les résultats mesurés par la méthode de réduction par étapes peuvent généralement être supérieurs à ceux obtenus avec le filage en une seule passe, et les facteurs d'influence du processus de mesure sont relativement nombreux. De plus, l'aptitude au filage évaluée lors de l'essai de réduction par étapes est supérieure à celle obtenue lors de l'essai de réduction continue. Ainsi, on estime que la limite inférieure de l'aptitude au filage est obtenue lors de l'essai de réduction continue et la limite supérieure lors de l'essai de réduction par étapes [23].

### II.2.5 Observation microscopique

Durant les méthodes d'essai décrites précédemment l'aptitude au repoussage ou filage a été évaluée à la base de défauts visuels ou de défauts du matériau pendant le processus. Cependant, cette aptitude au filage (macro-filabilité) ne prend pas en compte les microfissures ou fractures à l'intérieur du produit filé. Par conséquent, elle est jugée supérieure à la micro-filabilité (micro-filabilité) considérée à l'échelle microscopique. Par conséquent, lors de l'évaluation de l'aptitude au filage de tubes de filage longs à parois minces utilisés dans des environnements de fatigue sévère ou corrosifs, la micro-filabilité devient plus importante que la macro-filabilité [22]. L'essai de filage par observation de la structure microscopique est une méthode d'évaluation de la micro-filabilité d'un matériau par microscope électronique optique (MO), microscope électronique à balayage (MEB) ou microscope électronique à transmission (MET). Il consiste à détecter et à analyser les microfissures et les micro-vides présents dans la couche superficielle et à l'intérieur de la pièce d'essai. Cette méthode est combinée à la méthode d'essai d'avance pas à pas [16].

---

## II.3 Variables du procédé de repoussage

Le fluotournage est influencé par de nombreux facteurs, tels que les paramètres de fonctionnement, les propriétés des matériaux et la configuration géométrique des rouleaux. Les variables de fonctionnement sont facilement contrôlables, tandis que les propriétés des matériaux et les paramètres géométriques des rouleaux sont plus complexes à gérer. En effet, les propriétés des matériaux peuvent varier d'un lot à l'autre et d'un lot à l'autre pour un même matériau. De plus, il est difficile de modifier expérimentalement la configuration des rouleaux, car plusieurs rouleaux consomment plus de matière, tout comme les pièces, ce qui augmente les coûts de matière et de stockage. Il est donc plus pratique d'utiliser un outil basé sur les éléments finis FEM pour analyser ce procédé en faisant varier les paramètres de fonctionnement afin de réduire le coût des matières premières pour la pièce et l'outillage.

## II.4 Configuration géométrique des rouleaux

### II.4.1 Forme du rouleau

La forme du rouleau peut affecter la forme du composant, l'épaisseur de la paroi et la précision dimensionnelle. Bien que le diamètre du rouleau ait peu d'impact sur la qualité du produit final, un rayon de nez de rouleau trop petit entraînera des contraintes plus élevées et, à terme, une mauvaise uniformité de l'épaisseur. Comme le montre la figure II.6, la géométrie des rouleaux influence directement la forme de la zone de contact de la pièce et a des conséquences importantes sur la rugosité des pièces formées. [24]. La figure II.7 présente des exemples de différentes formes de rouleaux [25].

Srinivasulu et al. Ont trouvé que le rayon du rouleau affecte les caractéristiques des tubes fluotournés, de manière que l'ovalisation du tube diminue avec le rayon du rouleau et qu'elle augmente avec celui-ci. Ils ont attribué cela au fait qu'un rayon plus petit produit des efforts de formage plus faibles et produit des tubes d'ovalisation plus faible

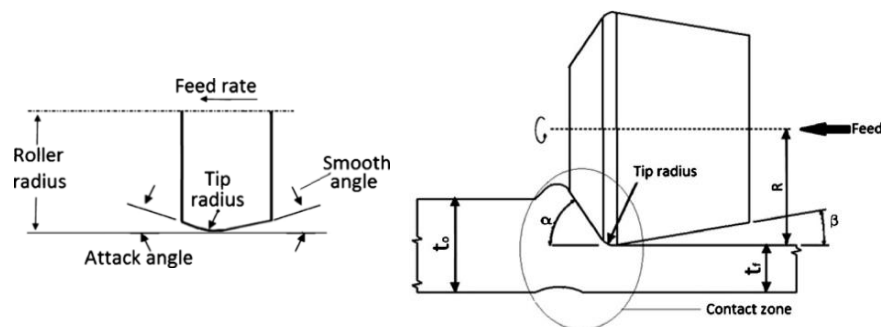


Figure II.6: Détails de la géométrie du rouleau et ses effets sur la zone de contact

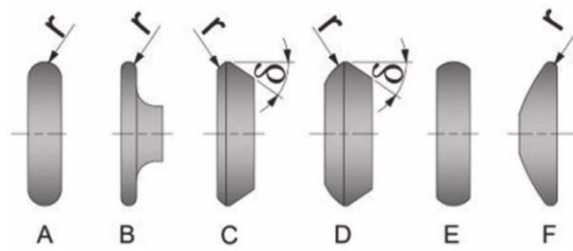


Figure II.7: Différentes formes de rouleaux.

L'effet du rayon du rouleau sur l'ovalité est illustré dans la figure II.8. Il a été constaté que le diamètre moyen du tube fluotourné augmentait avec le rayon du rouleau. La force radiale est proportionnelle au rayon du rouleau. Une augmentation du rayon du rouleau augmente la circonférence du tube en raison d'une force radiale plus élevée, ce qui entraîne un diamètre moyen plus grand. L'effet du rayon du rouleau sur le diamètre moyen est illustré à la figure II.9

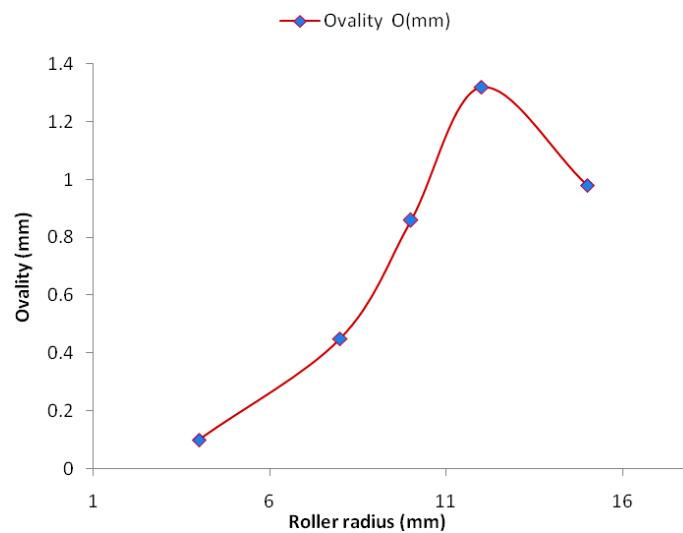


Figure II.8: Effet du rayon du rouleau sur l'ovalisation.

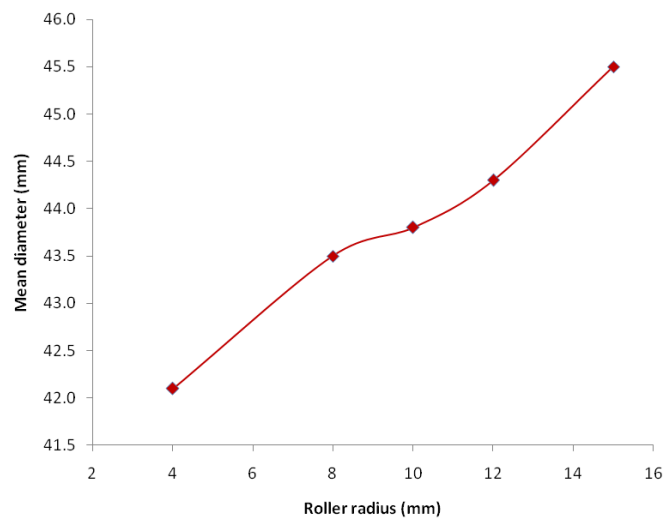


Figure II.9: Effet du rayon du rouleau sur le diamètre moyen.

---

Davidson et al. [26]. Ont montré que les angles des rouleaux ont eu un effet significatif sur la rugosité de surface. Dans leur travail expérimental, ils ont utilisé 4 rouleaux présentant des angles d'attaque différents ( $60^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $30^\circ$  et  $20^\circ$ ), et ont travaillé sur des préformes d'alliage AA6061 dont les principaux éléments d'alliage sont Al-1Mg-0,6Si-0,25Cu-0,2Cr. L'AA6061 présente une résistance mécanique modérée, une excellente résistance à la corrosion et une ténacité élevée à la rupture par déformation plane. Les préformes ont été fabriquées par forgeage à chaud, en laissant une surépaisseur d'usinage sur le diamètre extérieur, puis usinées pour s'adapter au mandrin. La préforme a ensuite été recuite à une température de  $416^\circ\text{C}$  et trempée à l'eau. Le mandrin de fluotournage est en acier à outils. La déformation maximale de la préforme pouvait être obtenue à une profondeur de coupe de 2 mm, une vitesse de mandrin de 250 tr/min et une avance de 50 mm/min. Les résultats sont illustrés à la figure II.10. Ils ont constaté que les tubes fabriqués à partir de rouleaux présentant l'angle d'attaque  $\alpha = 60^\circ$  présentent un défaut de type bride à la surface de la préforme, comme illustré à la figure II.10 (extrême droite). Ce rouleau ne convient donc pas au formage. Un rouleau dont l'angle d'attaque  $\alpha = 45^\circ$  produit un défaut de surface de type écailles de poisson figure II.10 (au milieu). Dans ces deux cas de formage, la préforme, en raison de l'angle d'attaque important, le métal s'est écoulé davantage dans le sens radial plutôt que dans le sens axial, ce qui a entraîné des défauts de type bride et des écailles de poisson. Cependant, pour des rouleaux avec  $\alpha = 30^\circ$  et  $\alpha = 20^\circ$  on obtient d'excellents tubes. Un état de surface de  $2\ \mu\text{m}$  a été mesuré sur le tube fabriqué avec le rouleau ayant un angle de  $20^\circ$ . Le rouleau avec  $\alpha = 30^\circ$  a produit un état de surface de  $1,4\ \mu\text{m}$ .



Figure II.10:Tubes fluotournés fabriqués à partir de différents rouleaux.

---

## II.4.2 Propriétés des matériaux

### II.4.3 Effet de la dureté de la préforme.

Pour des tubes préformes présentant des variations de dureté comprises entre 5 et 20 HB, il a été montré qu'une forte variation de dureté de la préforme produisait des tubes présentant une variation d'épaisseur plus importante. La variation d'épaisseur en fonction de la dureté de la préforme est illustrée à la figure II.11. (BHN : Brinell Hardness Number)

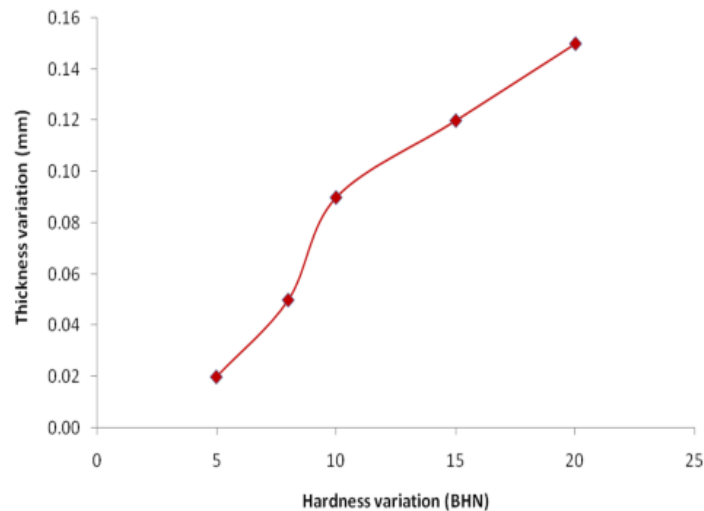


Figure II.11: Effet de la variation de dureté sur la variation d'épaisseur du tube.

### II.4.4 Conditions initiales de la préforme.

Des expériences sont menées pour déterminer l'effet du temps et de la température de recuit sur la formation de tubes présentant une bonne déformation et aucun dommage de surface. Des tubes fluotournés présentant des défauts d'écaillage et des fissures sont produits après un recuit de 45 à 60 minutes. Un recuit de 90 à 130 minutes a produit de bonnes qualités de surface et une déformation adéquate.

### II.4.5 Paramètres de fonctionnement

#### II.4.5.a. La vitesse du mandrin

La vitesse du mandrin est un facteur important affectant le procédé de fluotournage. Une vitesse de mandrin plus faible produit des rayures sur la surface des tubes. À mesure que la vitesse augmente, les défauts de surface sont masqués et la finition est lisse. À une vitesse plus élevée, la finition est excellente jusqu'à une certaine limite, mais elle se dégrade avec l'augmentation de la vitesse en raison des vibrations à vitesse élevée.

#### II.4.5.b. Taux d'avance

Le taux d'avance est défini comme le rapport entre la vitesse d'avance des rouleaux et la vitesse de rotation de la broche. Kalpakjian et al [12]. ont défini le rapport d'avance comme la

---

distance parcourue par le rouleau par rotation du mandrin. Hayama et al [18], ont décrit ce rapport à l'aide de l'équation [27] :

$$F = V/N /nR \quad \text{Eq II.6}$$

Où;  $v$ (mm/s): avance axiale du rouleau,  $N$ (tr/min): vitesse de rotation du mandrin et  $nR$ : nombre de rouleaux utilisés dans le processus.

Tant que ce rapport reste constant, l'avance des rouleaux et la vitesse de la broche peuvent être modifiées sans impact significatif sur la qualité du produit [28]. Il est essentiel de maintenir un taux d'avance acceptable, car des taux d'avance élevés génèrent des forces plus importantes susceptibles de provoquer des fissures. À l'inverse, un taux d'avance trop faible entraînera un écoulement excessif de la matière vers l'extérieur, ce qui réduira inutilement l'ouvrabilité et amincira excessivement la paroi [29]. Wang et al. Ont démontré qu'une augmentation de la vitesse de la broche entraînerait deux effets : une augmentation de l'effort de filage due à la vitesse de déformation élevée ; et une diminution probable de l'énergie de déformation requise par tour, car la vitesse d'avance est inversement proportionnelle à la vitesse de la broche (mm/tr) [30].

#### II.4.5.c. L'avance axiale du rouleau.

L'avance du rouleau affecte la forme du tube formé de manière à ce qu'une petite déformation plastique axiale (bosse) se forme en amont du rouleau créant une ovalité du tube. Srinivasulu et al. En faisant varier les vitesses d'avance entre 25 et 150 mm/min ont remarqué que l'ovalisation progresse avec l'avance du rouleau. Selon ses travaux, l'effet de l'avance du rouleau sur l'ovalisation est présenté à la figure II.12. Des vitesses d'avance plus faibles produisent des tubes de diamètre intérieur plus important. Ceci est dû au retard de la déformation plastique axiale, le rouleau se déplaçant lentement à faible vitesse d'avance. Par conséquent, le matériau se déforme radialement plutôt qu'axialement, et le diamètre du tube s'ouvre. Ils ont constaté également que l'ovalisation des tubes fluotournés augmente d'abord, puis diminue avec l'avance. Des vitesses d'avance plus faibles produisent une déformation radiale, ce qui entraîne une ovalisation plus importante. Lorsque l'avance augmente, la déformation plastique est ralentie par le mouvement rapide du rouleau dans le tube et produit une ovalisation plus importante. Les vitesses d'avance plus élevées, combinées à des réductions d'épaisseur plus faibles, produisent des tubes présentant une ovalisation plus importante.

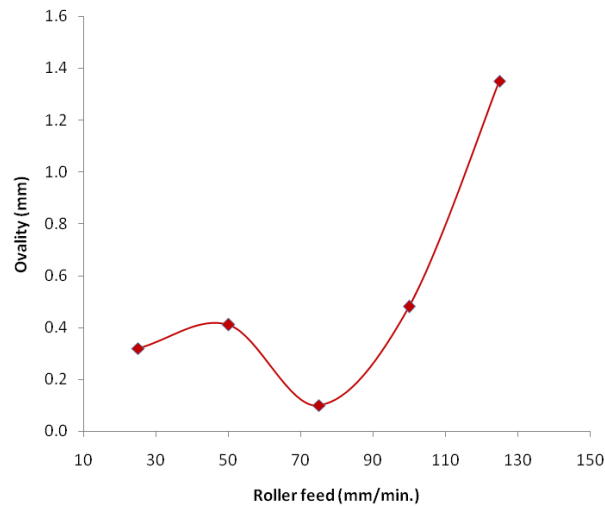


Figure II.12: Effet de l'alimentation par rouleaux sur l'ovalisation.

#### II.4.5.d. Effet de l'avance sur la Rugosité de surface

La variation de la rugosité de surface du tube en fonction de la vitesse d'avance est présentée dans la figure II.13. Des vitesses d'avance élevées (supérieures à 90 mm/min) ont permis de former des tubes présentant des marques de galets. Lorsque le galet traverse rapidement le mandrin, la déformation plastique est retardée. Des vitesses d'avance plus faibles ont permis d'obtenir des tubes présentant un bon état de surface. La rugosité de surface du tube a augmenté avec l'avance. On a observé qu'une vitesse élevée combinée à une vitesse d'avance plus faible permettait d'obtenir des tubes présentant de bonnes caractéristiques de surface.

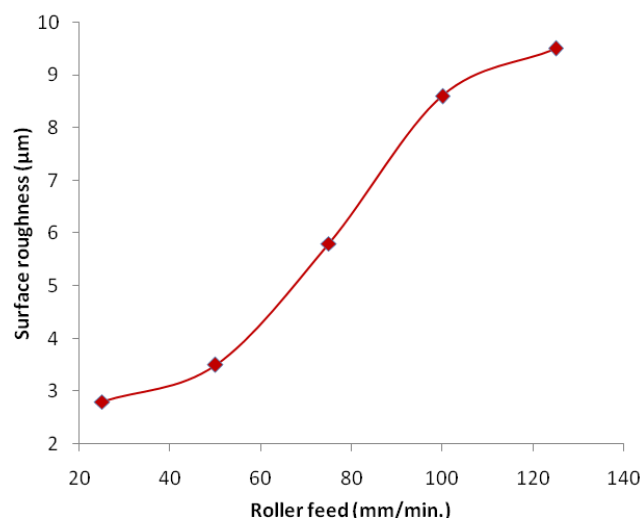


Figure II.13: Effet de l'alimentation par rouleaux sur la rugosité de la surface

#### II.4.5.e. Profondeur de formage ou réduction d'épaisseur.

Selon des travaux expérimentaux de Srinivasulu et al [31]. Sur des réductions d'épaisseur de 25 à 75 %. Des réductions d'épaisseur plus faibles produisent des marques de calamine en

---

surface des tubes et des fissures sur la face interne et la surface du tube. Ceci est dû à l'écrouissage et à la déformation plastique non uniforme entre les zones de contact. A des réductions d'épaisseur plus importantes, l'apparition de marques de galets à la surface du tube est signalée. Une réduction d'épaisseur de 30 à 35 % s'est avérée optimale pour fabriquer des tubes présentant de bonnes qualités dimensionnelles et de surface.

#### II.4.5.f. **Rapport de filage**

Le rapport de filage est défini comme le rapport entre le diamètre de l'ébauche et le diamètre du mandrin. Plus le rapport de filage est élevé, plus le filage est difficile. Un écartement optimal est donc nécessaire entre la préforme et le mandrin pour fabriquer des tubes fluotournés présentant une ovalisation réduite et de bonnes caractéristiques de surface. Un écartement plus important entraîne une déformation radiale et produit des tubes dont la croissance diamétrale entraîne une ovalisation plus importante. Un écartement plus faible entraîne une surface rugueuse et des marques de calamine sur la face interne du tube, dues à l'adhérence de la préforme au mandrin, rendant le retrait du mandrin difficile. Un écartement de 1 à 2 mm s'est avéré approprié pour obtenir de bonnes qualités de surface et faciliter le retrait du mandrin.

#### II.4.5.g. **Trajectoire des rouleaux**

La trajectoire des rouleaux est particulièrement importante pour la qualité d'une pièce filée. Différents tracés, linéaires, concaves, convexes, développantes et quadratiques par rapport à la pièce, influencent sur la déformation de l'ébauche. La tendance au flambage, aux plis et aux fissures peut être évitée en utilisant une trajectoire adaptée.

Une trajectoire concave est la plus répandue en filage conventionnel. Le taux d'amincissement lors de la conception d'une trajectoire de premier passage doit être pris en compte, car il joue un rôle déterminant dans l'épaisseur finale de la paroi [32]. Liu et al. [33] ont établi un modèle FEM élastoplastique pour analyser la distribution des contraintes et des déformations lors de la première passe de filage conventionnel avec différents tracés, linéaires, développantes et quadratiques, afin de convertir la forme de l'ébauche en celle du mandrin. Ils ont constaté que les contraintes et déformations radiales et tangentielles sont les plus faibles pour la courbe développante. Ils ont conclu qu'une comparaison de la distribution des contraintes et des déformations selon les trois chemins différents pourrait fournir une base théorique pour sélectionner un chemin de rouleau approprié dans le filage conventionnel.

---

#### II.4.5.h. Forces

En raison de leur pertinence pour la conception des équipements et composants de filage, les trois principales composantes de force de ce procédé ont été largement étudiées analytiquement et expérimentalement. Kalpakjian, S et al [12] ont reporté les résultats de divers travaux sur le sujet. Il semble que, dans la plupart des études, les données expérimentales obtenues sur les forces aient été comparées aux paramètres du procédé. En ce qui concerne le Filage externe, ils présentent les formules suivantes pour le filage direct des tubes :

➤ Force Tangentielle :  $F_t = \sigma (\Delta t) f$  **Eq II.7**

➤ Force Axiale :  $F_a = \sigma (\Delta t) [rf. \tan \alpha]^{1/2}$  **Eq II.8**

➤ Force Radiale :  $F_r = \sigma (\Delta t) [rf. \cot \alpha]^{1/2}$  **Eq II.9**

Où,  $\sigma$  : contrainte d'écoulement moyenne de la pièce,  $\Delta t$  : morsure, c'est-à-dire ( $t_o - b$ ), où  $t_o$  : épaisseur d'origine et  $t_f$  : épaisseur finale,  $r = (DMDR)/(DM + DR)$  où  $DM$  et  $Dg$  désignent respectivement le diamètre du mandrin et du rouleau,  $f$  : vitesse d'avance du rouleau et  $\alpha$  : angle du rouleau.

les auteurs ont mené un travail expérimental compréhensif en vue de découvrir les mécanismes de base sous-jacents au processus de production de tubes Comme le montre la figure II.14, ils ont conclu que l'accumulation augmente avec la réduction, l'angle du rouleau et l'avance. Elle diminue avec l'augmentation de l'angle d'inclinaison et du rayon du nez du rouleau. et qu'il n'y a pas de différence notable d'accumulation entre le repoussage direct et le repoussage inverse dans des conditions de traitement par ailleurs similaires.

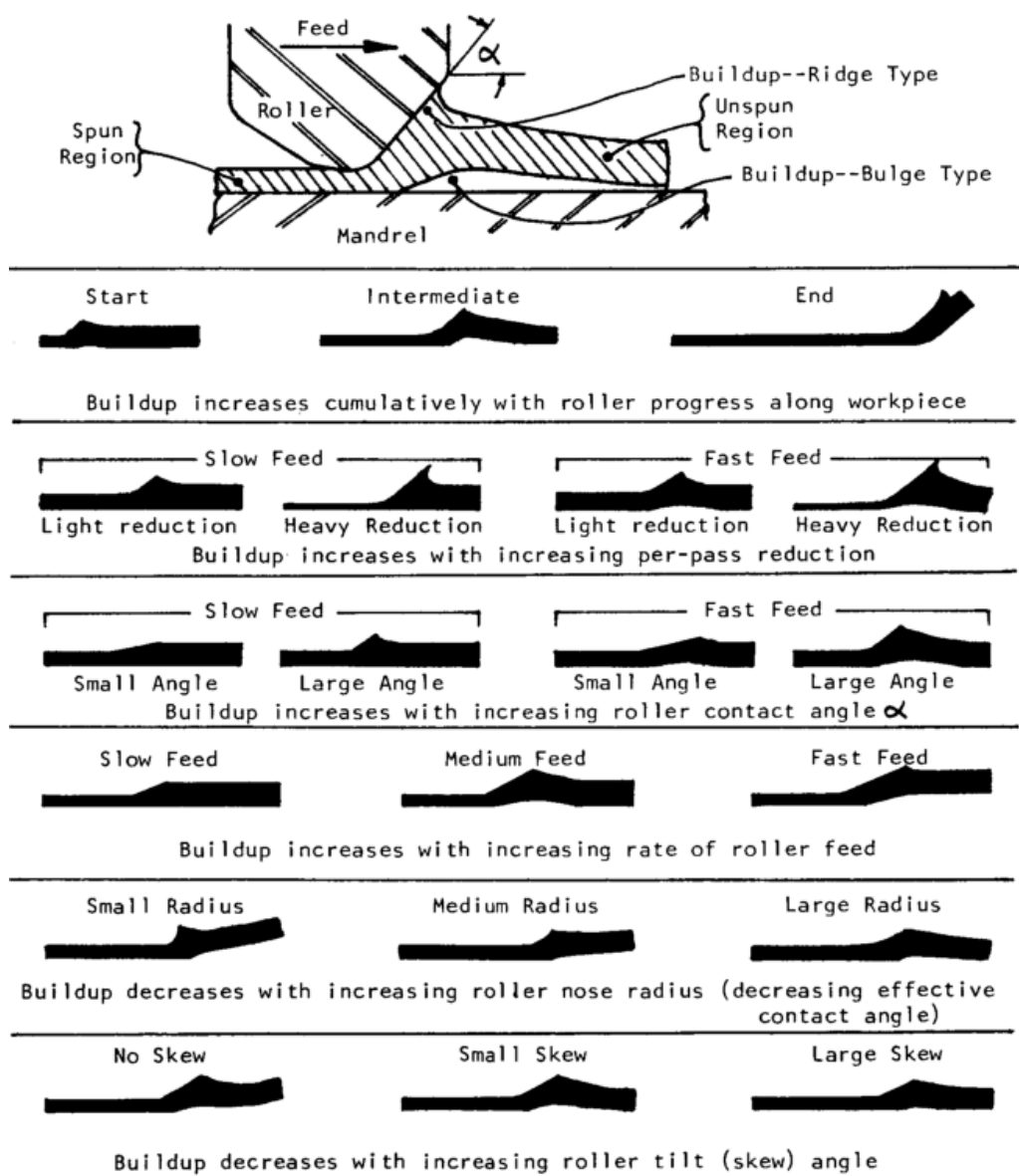


Figure II.14: Le défaut d'accumulation lors du filage des tubes et sa dépendance à divers paramètres du processus.

---

## Bibliographie du chapitre II

1. O. Music, J.M. , K. Kawai, Allwood A review of the mechanics of metal spinning. *Journal of Materials Processing Technology* 210, 2010, pp 3–23.
2. Un Chol Ri, Kwang Myong Kye, Myong Chol Pak, On the evaluation of spinnability of metallic materials in the powerful spinning process: a review. *cond-mat.mtrl-sci.(2020)* arXiv:2012.01357.
3. KALPAKCIOGLU S A Study of Shear-Spinnability of Metals. *Transactions of the ASME E:478484*, 1961, doi:10.1115/1.3664570.
4. KEGG RL A New Test Method for Determination of Spinnability of Metals. *Journal of Engineering for Industry*, 1961 pp 119-125. doi:10.1115/1.3664438.
5. Kalpakcioglu, S. Maximum reduction in power spinning of tubes. *Journal of Engineering for Industry–Transactions of the ASME (Series B)* 86, 1964, pp 49–54.
6. H. PM, A. PAM, Nili AM. Flow-forming and flow formability simulation. *Int J Adv Manuf Technol* 42, 2009, pp 463–473. doi:10.1007/s00170-008-1624-0.
7. Wu H, Xu W, Shan D, Jin BC. An extended GTN model for low stress triaxiality and application in spinning forming. *Journal of Materials Processing Technology*.263, 2019, pp112-128. doi:10.1016/j.jmatprotec.2018.07.032.
8. Zhan M, Gu C, Jiang Z, Hu L, Yang H. Application of ductile fracture criteria in spin-forming and tube-bending processes. *Computational Materials Science* 47 (2), 2009 , pp 353-365. doi:10.1016/j.commatsci.2009.08.011.
9. Zeng R, Ma F, Huang L, Li J. Investigation on spinnability of profiled power spinning of aluminum alloy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 80 (1-4), 2015 pp 535-548. doi:10.1007/s00170-015-7025-2.
10. Emmens. WC (2011) Formability\_ A Review of Parameters and Processes that Control, Limit or Enhance the Formability of Sheet Metal. *SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology*:1-123. doi:10.1007/978-3-642-21904-7.
11. C.C. Wong, T.A. Dean, J. Lin. A review of spinning, shear forming and flow forming processes. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 43, 2003, pp :1419–1435.
12. S. KALPAKJIAN and S. RAJAGOPAL. Spinning of Tubes: A Review. *J. APPLIED METALWORKING. VOL. 2, NO. 3, JULY 1982* pp211-213.
13. M. H. Parsa & A. M. A. Pazooki & M. Nili Ahmadabadi , Flow-forming and flow formability simulation, *Int J Adv Manuf Technol* 42, (2009), pp:463–473. doi 10.1007/s00170-008-1624-0.
14. R. Y. Zhang, S.W. Yu, K.H.Zhang, F.C.Wang. Spinnability of Semi-continuous Casting 7A09 Aluminum Alloy. *Advanced Materials Research Vols. 97-101*, 2010, pp 361-364. doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.97-101.361
15. H. PM et Semiatin SL. *Metalworking \_ Bulk Forming. Asm Handbook 14A*, 2009, pp1-816
16. Olga I. Bylyaa, Timur Khismatullin , Paul Blackwellb, Rudolf A. Vasinc. *Journal of Materials Processing Technology, Volume 252*, 2018, Pp : 34-44.
17. Ma, H., Xu, W., Jin, B. C., Shan, D., & Nutt, S. R.. Damage evaluation in tube spinnability test with ductile fracture criteria. *International Journal of Mechanical Sciences* Volume 100, September 2015, pp : 99-111.
18. Hayama M Study on Spinnability of Aluminum and its Alloys. *Japanese Society of Mechanical Engineers* 45, 1979, pp:1415-1425.
19. SUN ZF, WANG SH Finite element numerical simulation of tube spinning. *Forging & Stamping Technology* 37, 2012, pp :171-176. doi:1000-3940 (2012) 05-0171-05.
20. Hao Ma, Wenchen Xu, Bo Cheng Jin, Debin Shan, Steven R. Nutt. Damage evaluation in tube spinnability test with ductile fracture criteria. *International Journal of Mechanical Sciences* 100, 2015, pp:99–111.

- 
21. Shi L, Xiao H, Xu DK. Spinnability Investigation of High Strength Steel in Draw-spinning and Flow-spinning. *Journal of Physics: Conference Series* 896, 2017. doi:10.1088/1742-6596/896/1/012119.
  22. Chang SC, Huang CA, Yu SY, Chang Y, Han WC, Shieh TS, Chung HC, Yao HT, Shyu GD, Hou HY, Wang CC, Wang WS. Tube spinnability of AA 2024 and 7075 aluminum alloys. *Journal of Materials Processing Technology* 80-81. 1998, pp :676-682. doi:10.1016/s0924-0136(98)00174-5.
  23. Wu H, Xu W, Shan D, Jin BC. Mechanism of increasing spinnability by multi-pass spinning forming – Analysis of damage evolution using a modified GTN model. *International Journal of Mechanical Sciences* 159, 2019, pp :1-19. doi:10.1016/j.ijmecsci.2019.05.030.
  24. Amin Abedini & Samrand Rash Ahmadi & Ali Doniavi . Roughness optimization of flow-formed tubes using the Taguchi method. *Int J Adv Manuf Technol* 72, 2014, pp 1009–1019. DOI 10.1007/s00170-014-5732-8].
  25. Klocke F. *Manufacturing Processes 4 Forming*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg; 2013. doi:10.1007/978-3-642-36772-4.
  26. M. Joseph Davidson, K. Balasubramanian, G.R.N. Tagore. Surface roughness prediction of flow-formed AA6061 alloy by design of experiments. *journal of materials processing technology* 202, 2008, pp 41–46.
  27. Amir Hossein Formation of cylindrical tube networks: advanced modelling. *Derakhshanfard International Journal of Modern Achievement in Science, Engineering and Technology (IJSET)* 2(1), 2025, pp :105-114. doi: 10.63053/ijset.68.
  28. K. L. MOTGHAREA, C. C. HANDAB, RAKESH L.HIMTEC, Spinning and Flow Forming Processes in Manufacturing Industries: A Review. *International Journal of Mechanical And Production Engineering*, Volume- 5, Issue-11, Nov.-2017.
  29. Wong CC, Dean TA, Lin J. Incremental forming of solid cylindrical components using flow forming principles. *J Mater Process Technol*. 2004 pp :153–154. Doi:10.1016/j.jmatprotec.2004.04.102.
  30. Wang, Lin. *Analysis of Material Deformation and Wrinkling Failure in Conventional Metal Spinning Process*, theses, Durham University., 2012. Available at Durham E-Theses Online: <http://etheses.dur.ac.uk/3537/>.
  31. M. Srinivasulu, M. Komaraiah and C. S. Krishna Prasada Rao. Experimental studies on the characteristics of AA6082 flow formed tubes. *Journal of Mechanical Engineering Research* Vol. 4(6), 2012, pp:192-198, doi: 10.5897/JMER11.063.
  32. Qin-Xiang XIA, Ling-Yan SUN, Xiu-quan C, Bang-Yan YE. Analysis of the forming defects of the trapezoidal inner-gear spinning. *IEEM 2009 - IEEE Int Conf Ind Eng Eng Manag 2009*: pp2333–7. doi:10.1109/IEEM.2009.5373016.
  33. Sun LY, Ye BY, Xia QX, Cheng XQ. Analysis on Forming Characteristics of Cup-Shaped Thin-Walled Inner Gear Spinning. *Key Eng Mater* 455, 2010 pp:544–7. doi:10.4028/www.scientific.net/kem.455.544.

---

# **CHAPITRE III : Conception du gabarit de fluotournage**

### III Conception du gabarit de fluotournage

#### III.1 Introduction:

Les bases de la conception de machines et de systèmes en mécanique, sont essentielles pour créer des produits fonctionnels, fiables et durables. Ces principes guident l'ingénieur concepteur dans la conception, le développement et la réalisation de produits mécaniques, en tenant compte des contraintes et des objectifs spécifiques du projet.

Le fluotournage, un procédé de formage à froid, utilise un mandrin et des molettes pour déformer plastiquement un métal, généralement en réduisant son épaisseur. Le gabarit, ou mandrin, doit donc être conçu pour supporter la pièce et résister aux forces exercées par les molettes pendant ce processus

#### III.2 Les besoins :

La conception du mandrin de fluotournage ou gabarit de fluotournage est motivé par la nécessité de supporter la pièce pendant le processus de fluotournage, en assurant précision et stabilité. Cela implique un choix de matériaux appropriés, une conception solide et une attention particulière à la fixation de la pièce.

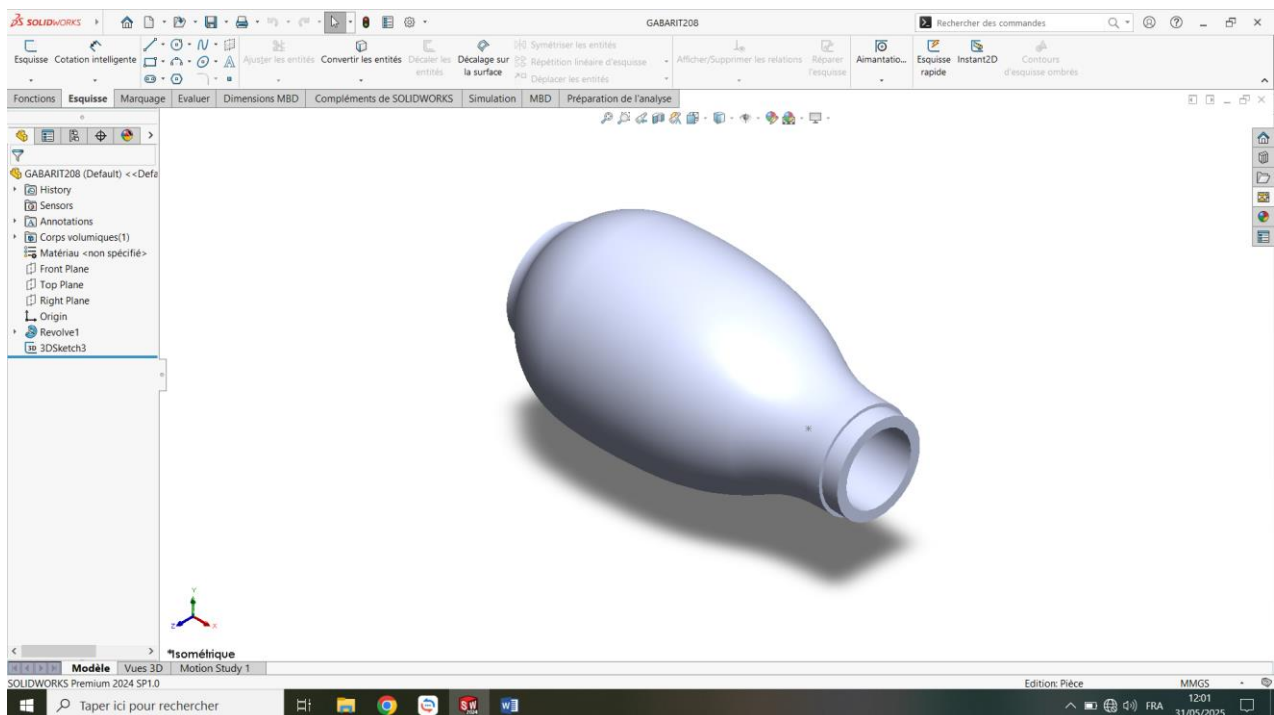


Figure III.1:Représentation 3D du pot à obtenir

---

### III.3 Les principes de conception :

On doit s'appliquer à la conception tout en observant les points suivants :

- a) Le gabarit, ou mandrin, doit donc supporter la pièce et résister aux forces exercées par les molettes pendant ce processus.
- b) Les Matériaux utilisés pour le gabarit doivent être rigides et résister à l'usure, aux contraintes et aux vibrations. Des matériaux tels que l'acier ou des alliages spéciaux peuvent être utilisés, selon les exigences du processus de fluotournage.
- c) Rigidité et stabilité: le gabarit doit être suffisamment rigide pour résister aux forces de fluotournage et assurer la précision de la pièce. La répartition des forces et la minimisation des déflexions sont des aspects importants de cette conception.
- d) Fixation de la pièce: Le gabarit doit permettre une fixation solide de la pièce à ébaucher, afin de garantir sa stabilité pendant le processus. La fixation est choisie en fonction de la géométrie de la pièce et des contraintes du processus.
- e) Prise en compte de la forme de la pièce: Le gabarit doit être adapté à la forme de la pièce à fluotourner, permettant une déformation uniforme et précise. Pour les pièces à forme complexe, la conception du gabarit peut être plus sophistiquée, afin d'assurer la bonne adaptation de la pièce.
- f) Facilité d'utilisation: Le gabarit doit être facile à mettre en place et à retirer, afin de faciliter le processus de fluotournage.

### III.4 Contraintes techniques :

- a) Le dispositif à concevoir est un gabarit dont la forme et les dimensions sont une réplique vraie grandeur du pot à obtenir,
- b) Le gabarit doit être fragmenté en plusieurs morceaux pour faciliter son extraction du pot après exécution du repoussage,
- c) Le gabarit est centré et ajusté sur un axe porteur qui assure son entraînement,
- d) Les morceaux formant le gabarit doivent demeurer immobiles par rapport à l'axe qui les entraîne durant l'opération de repoussage,
- e) Une fois l'opération de fluotournage terminée il va falloir dégager les parties du gabarit de l'intérieur du pot fabriqué avec aisance.

### III.5 Solutions adoptées :

L'objectif poursuivi dans ce travail est la conception d'un gabarit destiné à supporter une tôle au cours de l'étirage par fluotournage. Compte tenu de l'indisponibilité d'une machine CNC dédié à ce type de travaux, nous avons opté pour le repoussage sur tour parallèle. En conséquence, nous présentons ici le gabarit de repoussage.

- Le gabarit à la forme du pot à produire à quelque mm près il est creux et doté de deux alésages aux extrémités.
- Il est fragmenté en 6 morceaux ou arcs.
- L'axe d'entraînement s'ajuste aux alésages du gabarit aux deux extrémités
- Deux bagues; une en amont et l'autre en aval assurent le montage du gabarit sur l'axe ainsi que le verrouillage de façon qu'il ne puisse pas s'éclater en morceaux lors de l'entraînement en rotation.
- Deux arcs de dimension réduites par rapport aux autres appelés clefs sont prévus pour faciliter l'extraction du gabarit de l'intérieur du pot après exécution du repoussage une fois l'axe dégagé.

### III.6 Dessin des éléments composant le dispositif de repoussage :

#### III.6.1 Le gabarit :

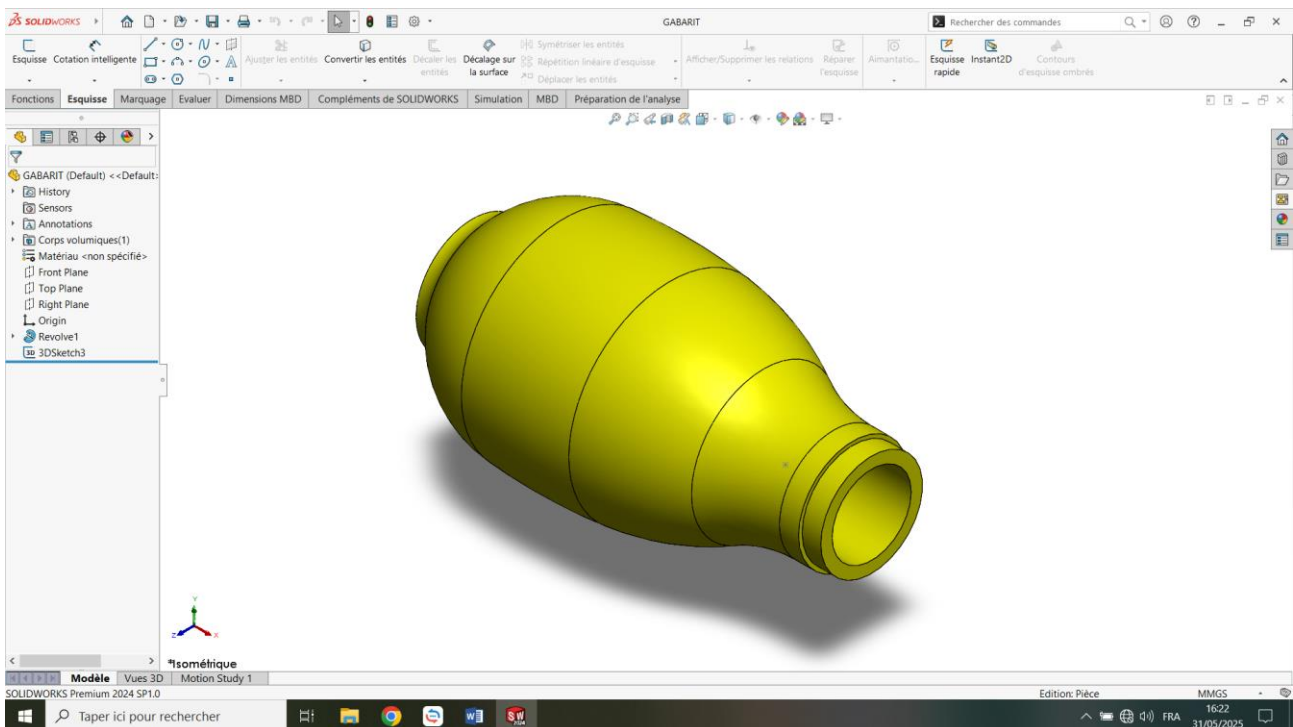


Figure III.2:Représentation 3D du gabarit sans cotation

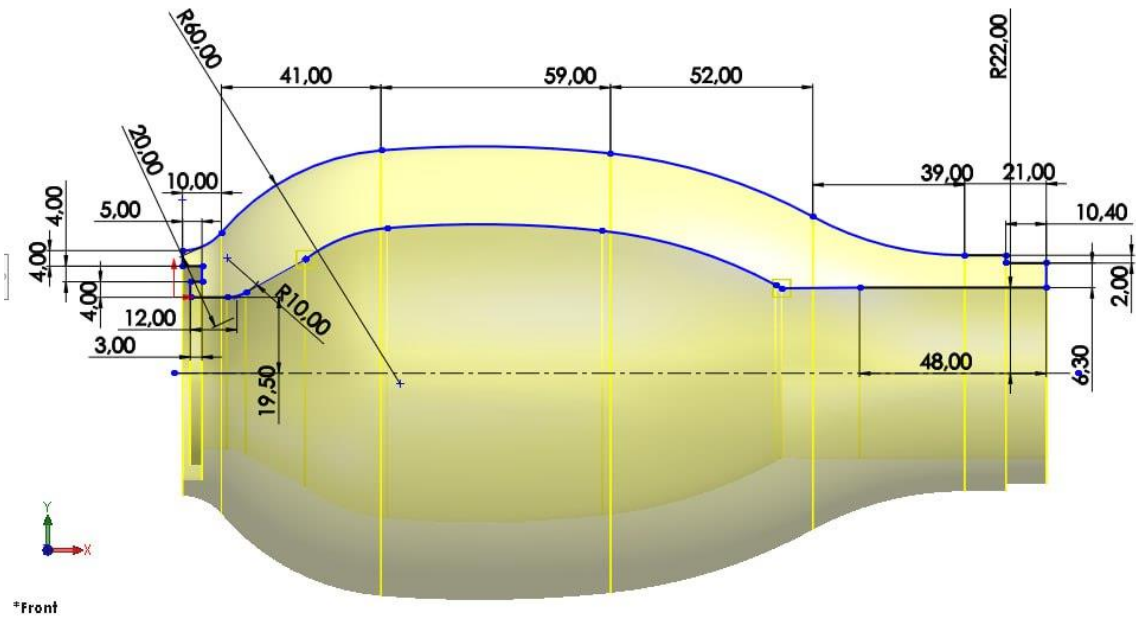


Figure III.3: Représentation 3D du gabarit avec cotation

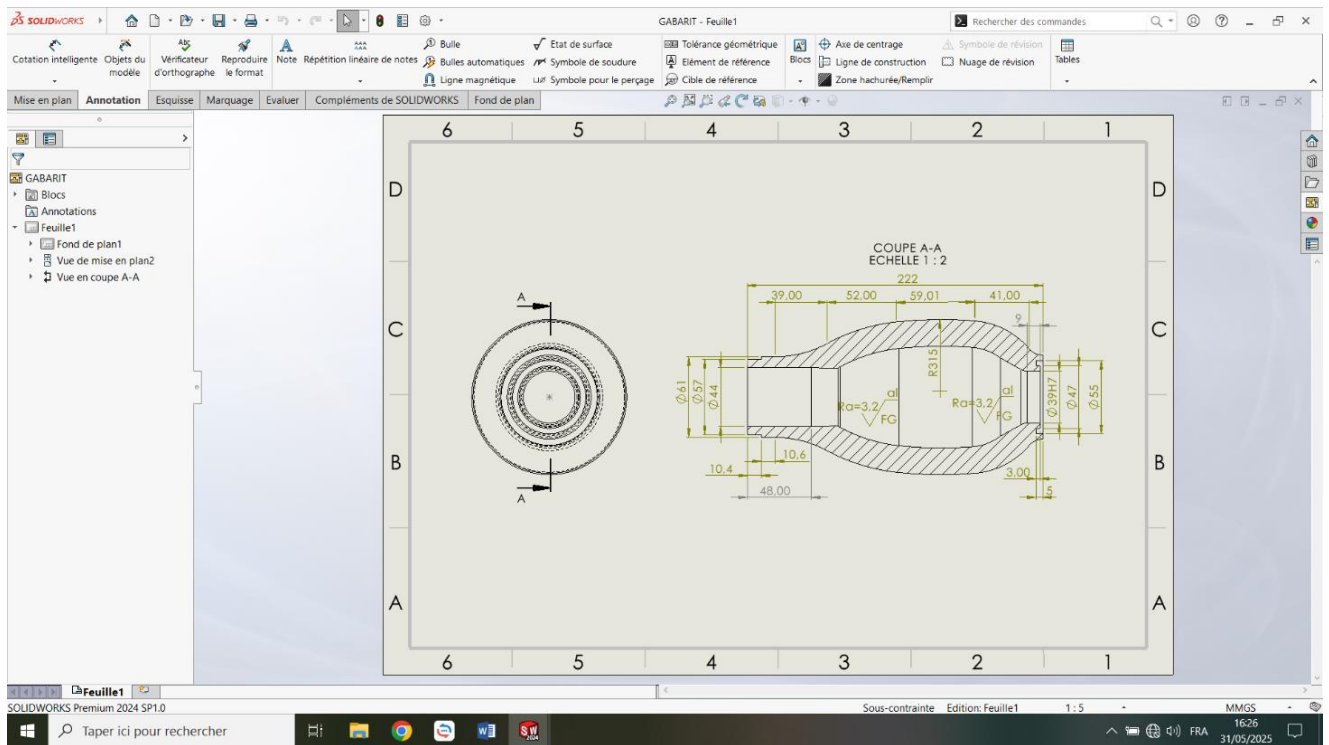


Figure III.4: Représentation du drafting du gabarit avec cotation

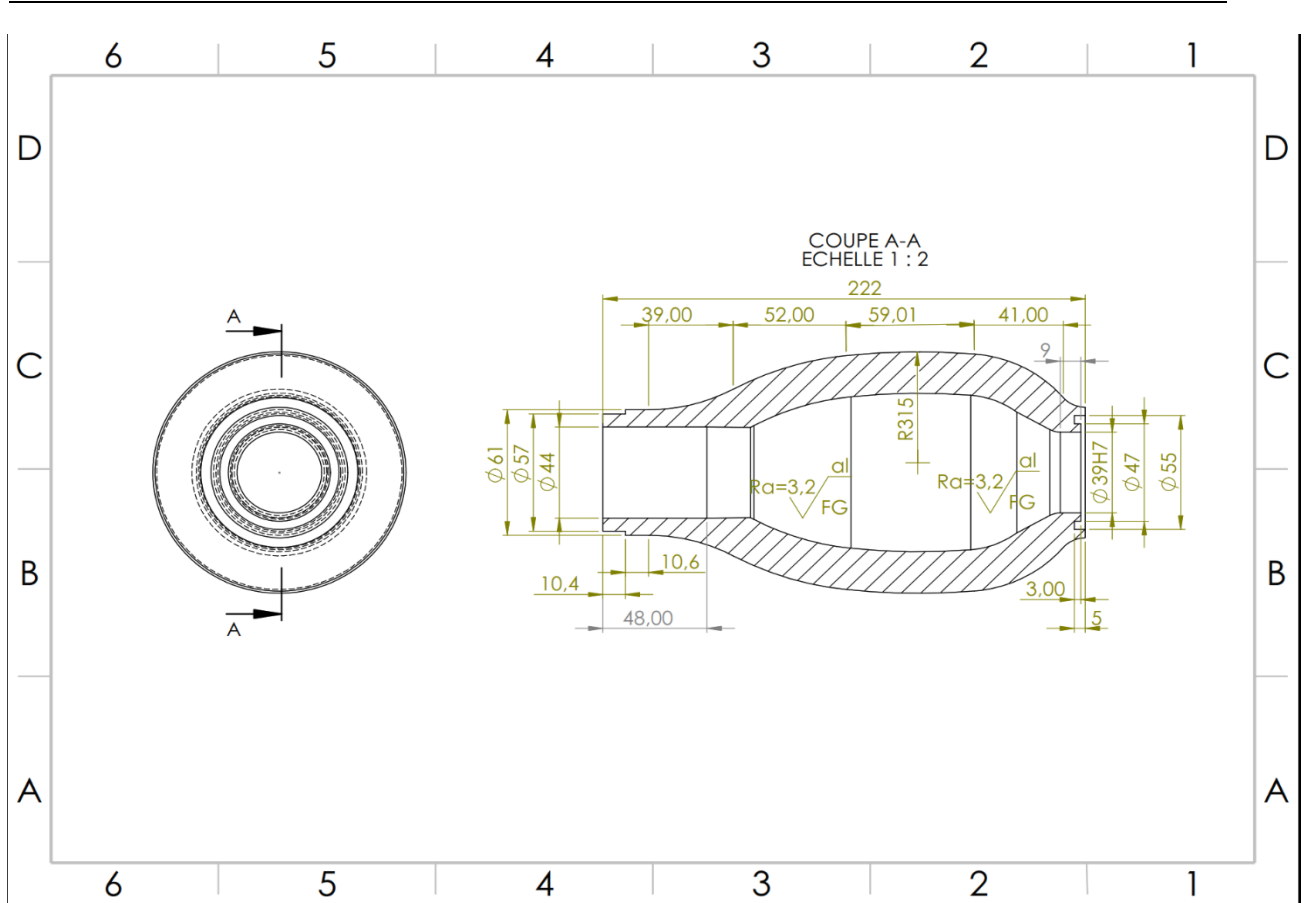


Figure III.5:Drafting du gabarit avec cotation

### III.6.2 Axe d'entrainement :

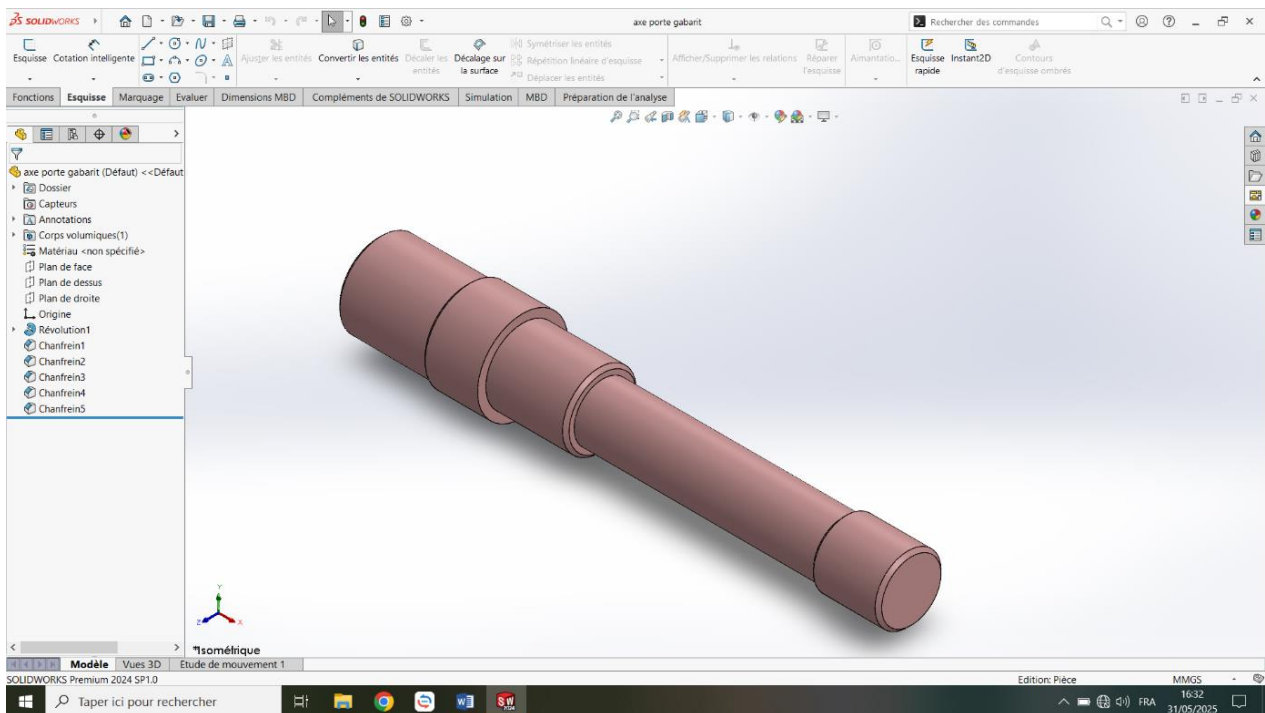


Figure III.6:Représentation 3D de L'axe d'entrainement sans cotation



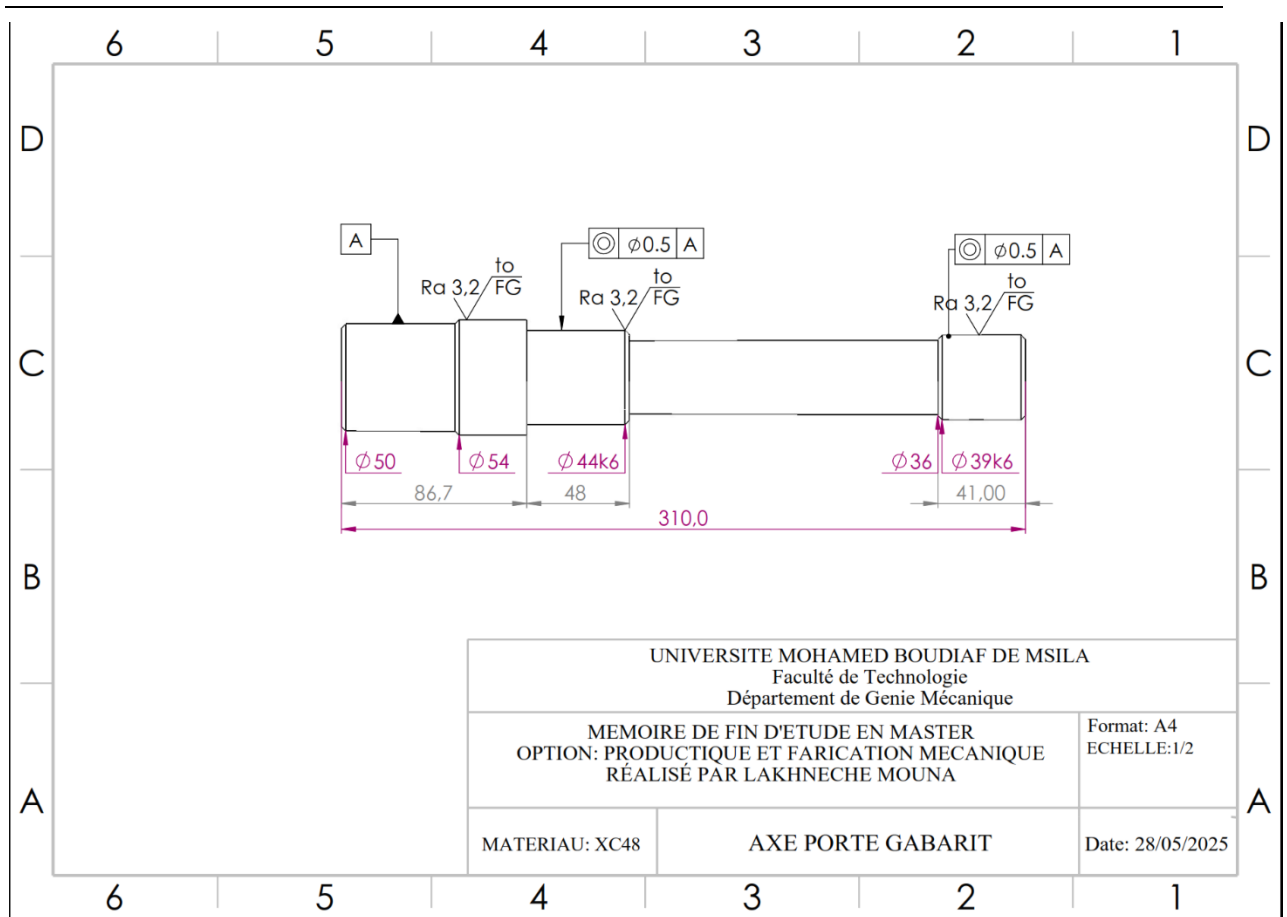


Figure III.9:Drafting de L'axe d'entrainement avec cotation

### III.6.3 Les bagues de centrage :

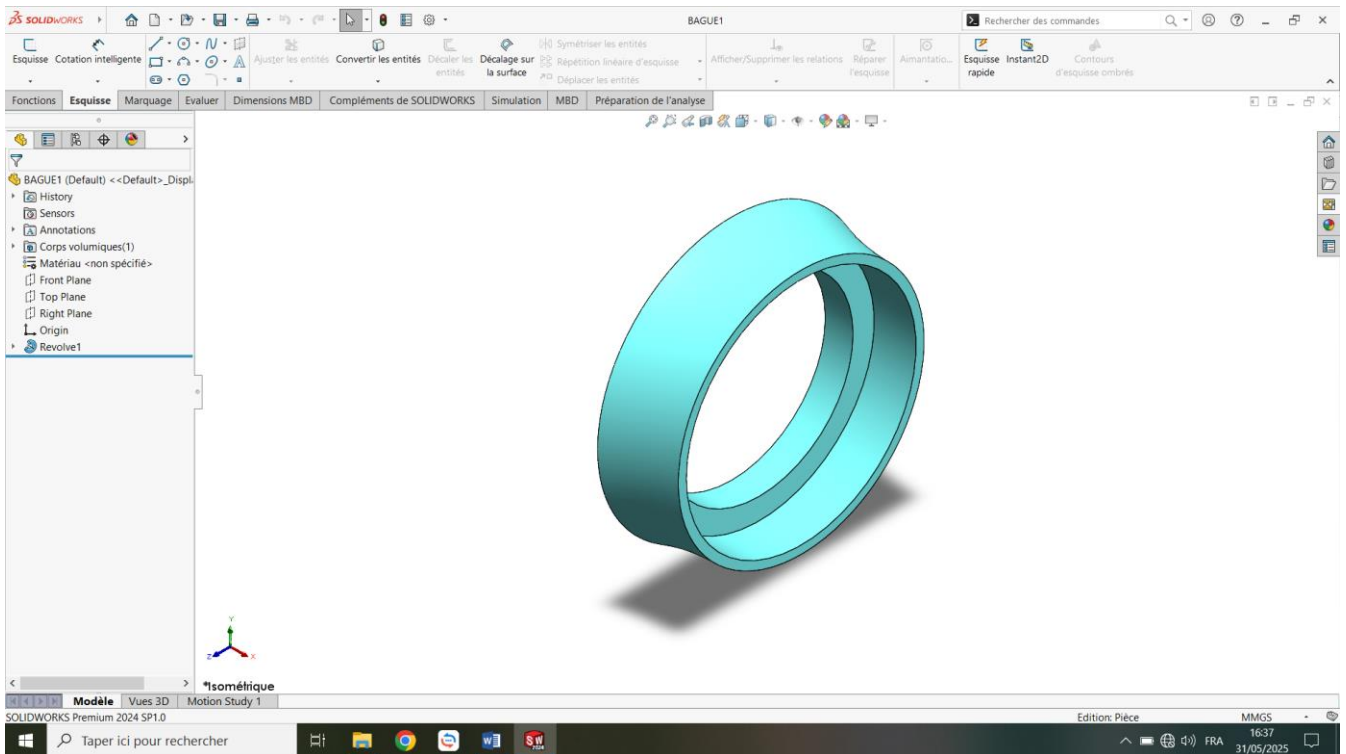


Figure III.10:Représentation 3D de la Bague amont de centrage sans cotation

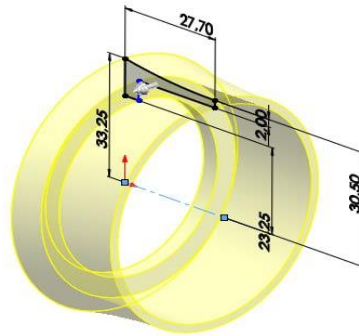


Figure III.11: Représentation 3D de Bague amont de centrage avec cotation

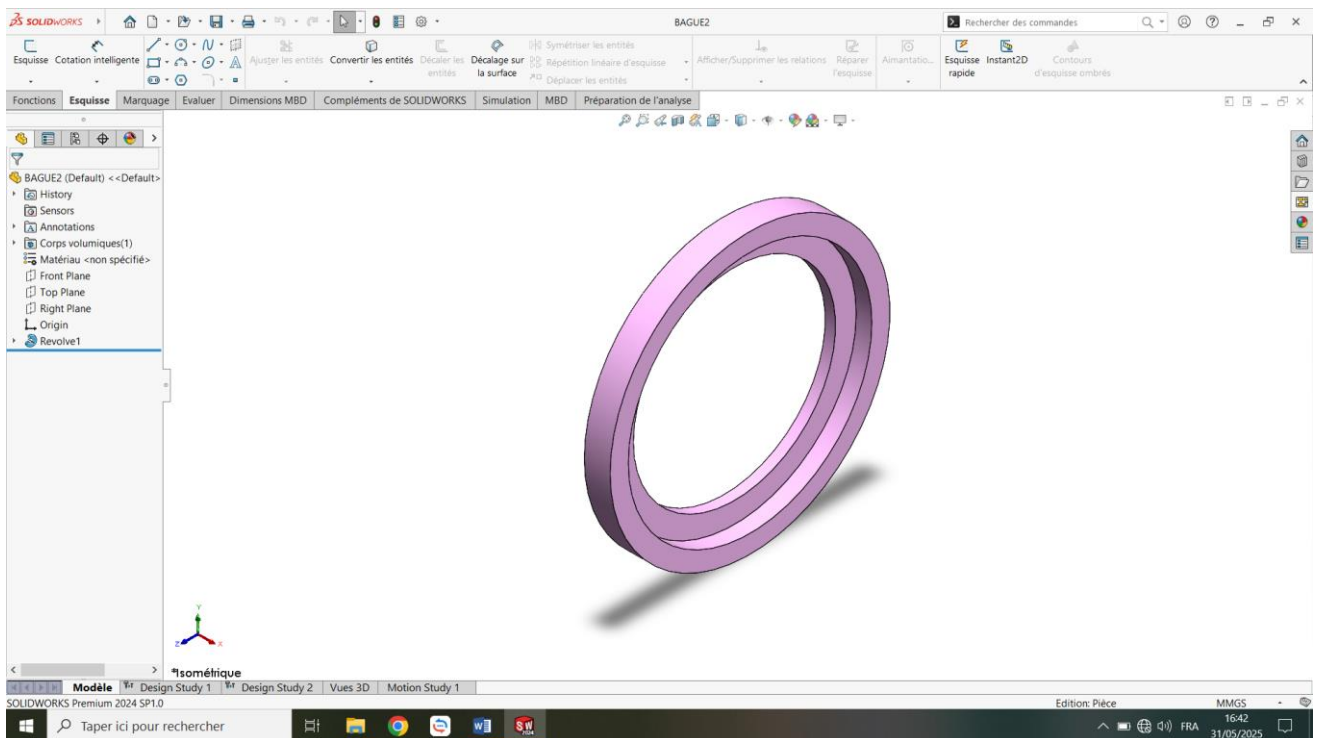


Figure III.12: Représentation 3D de Bague aval de centrage sans cotation

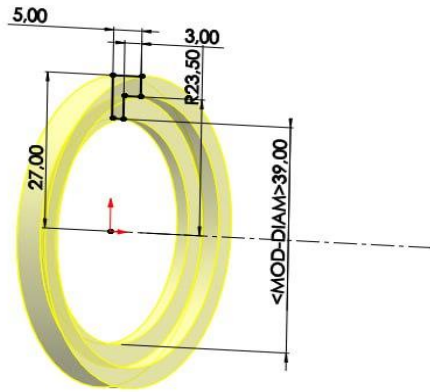


Figure III.13:Représentation 3D de Bague aval de centrage avec cotation

### III.7 Montage des éléments :

Le montage des éléments se fait en important les pièces une à une dans le plan de travail en utilisant l’outil insérer composant dans la barre des menus :

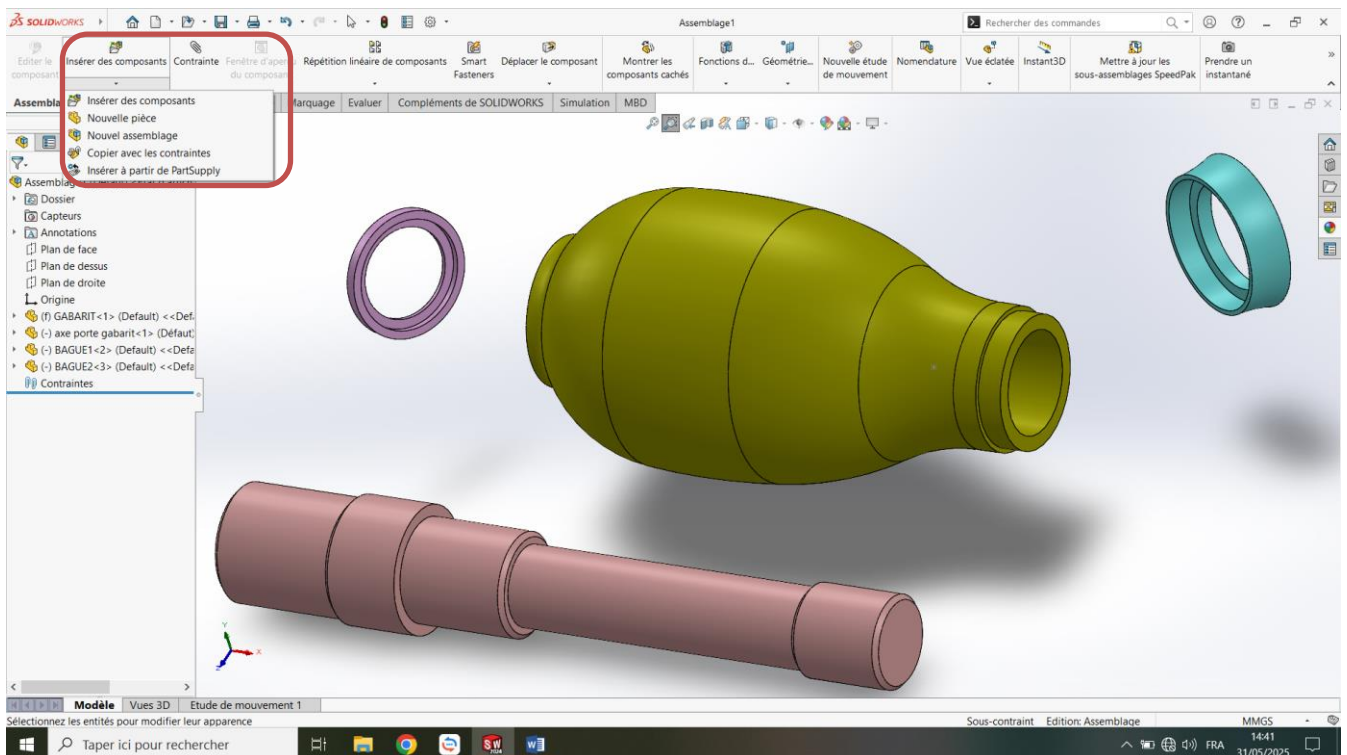


Figure III.14:Regroupement des éléments a monter

On procède au montage en appliquant des contraintes entre chaque deux élément



On procède de la même façon avec les autres éléments du montage jusque au regroupement de tous les composants en un ensemble.

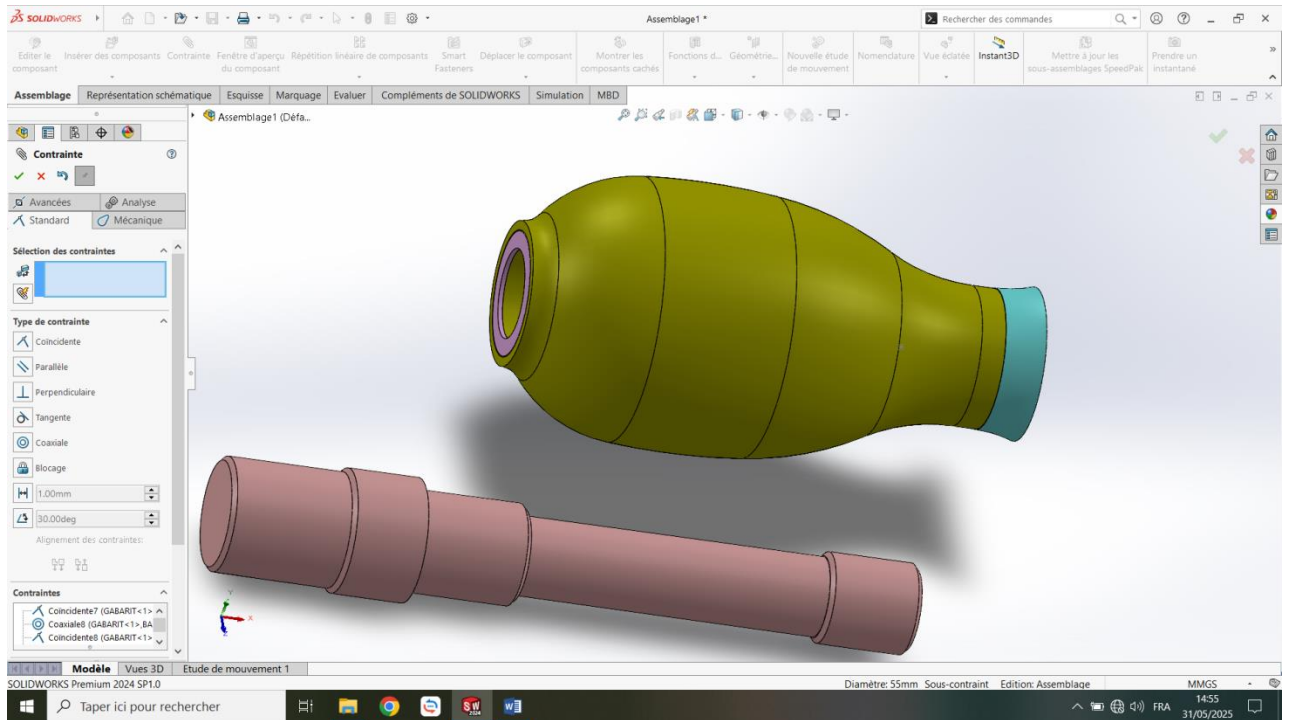


Figure III.17:Montage des bagues sur le gabarit

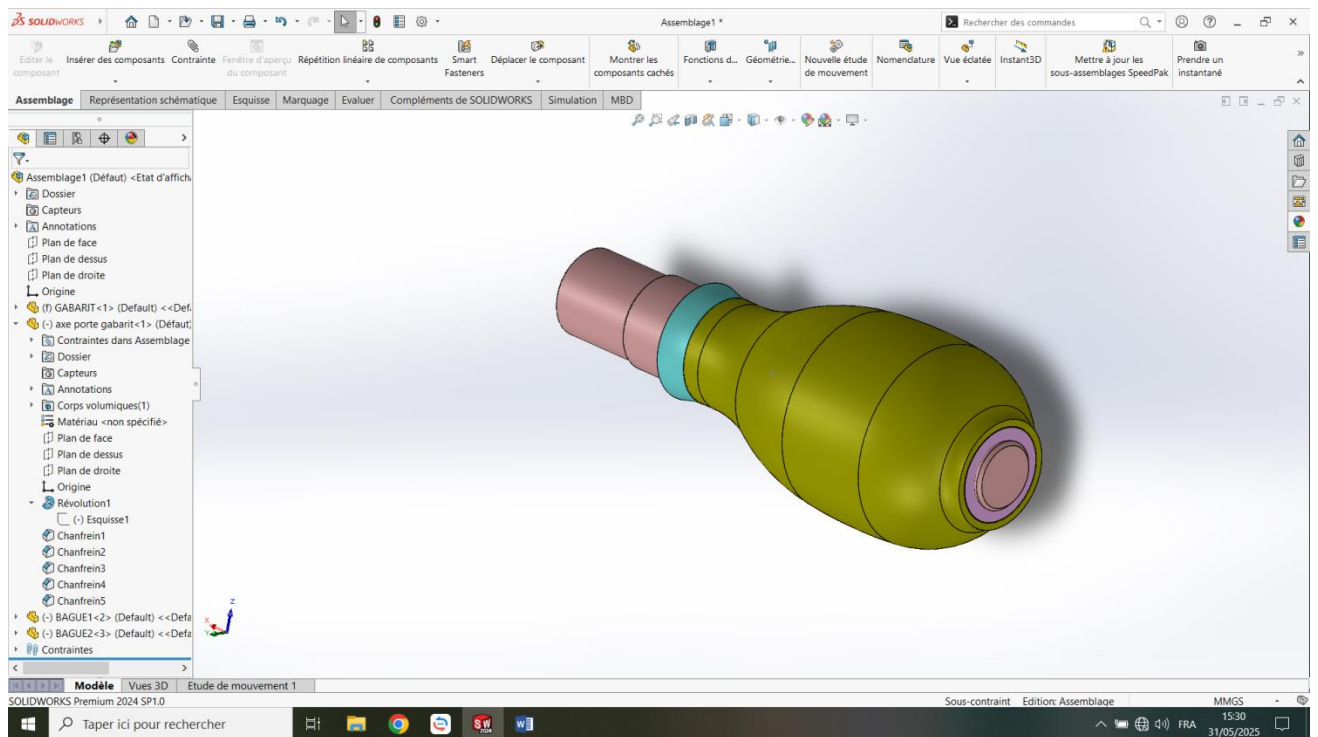


Figure III.18:Montage de l'axe sur le sous ensemble gabarit et bagues

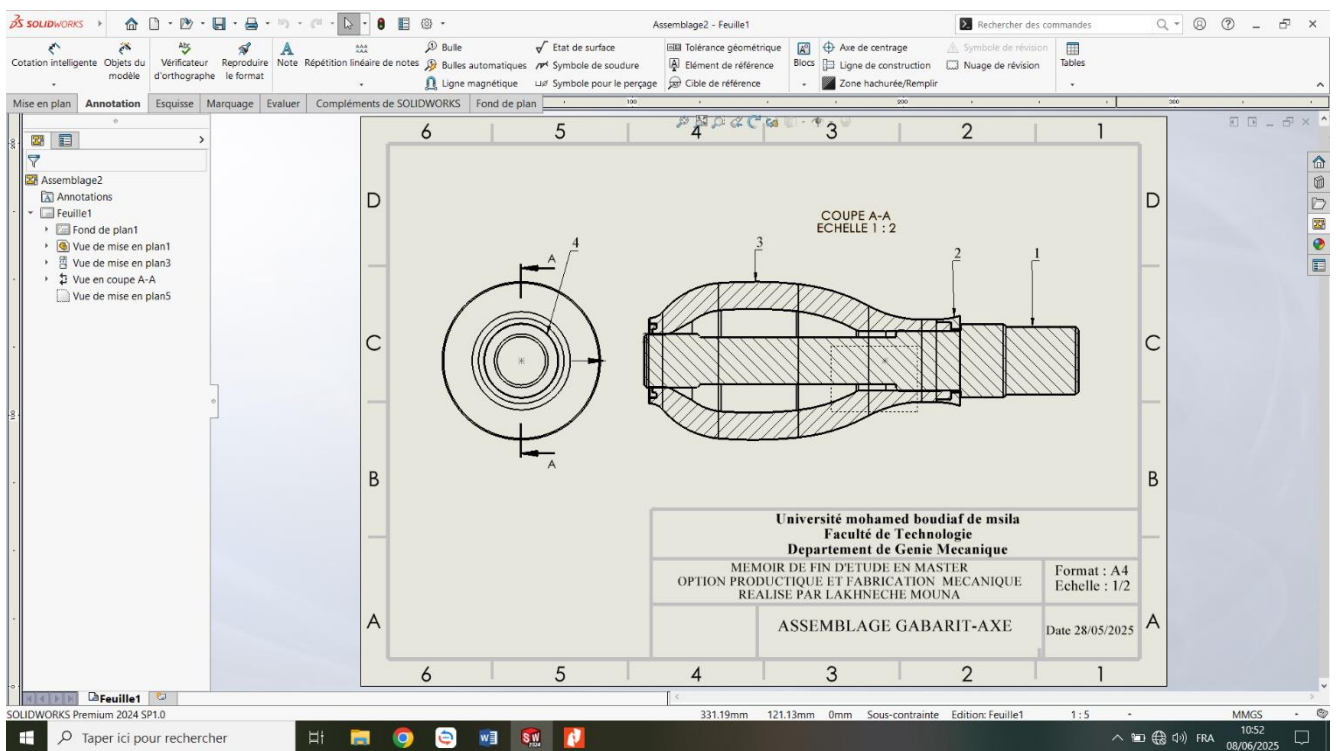


Figure III.19: Présentation du drafting de l'ensemble gabarit - Axe et bagues

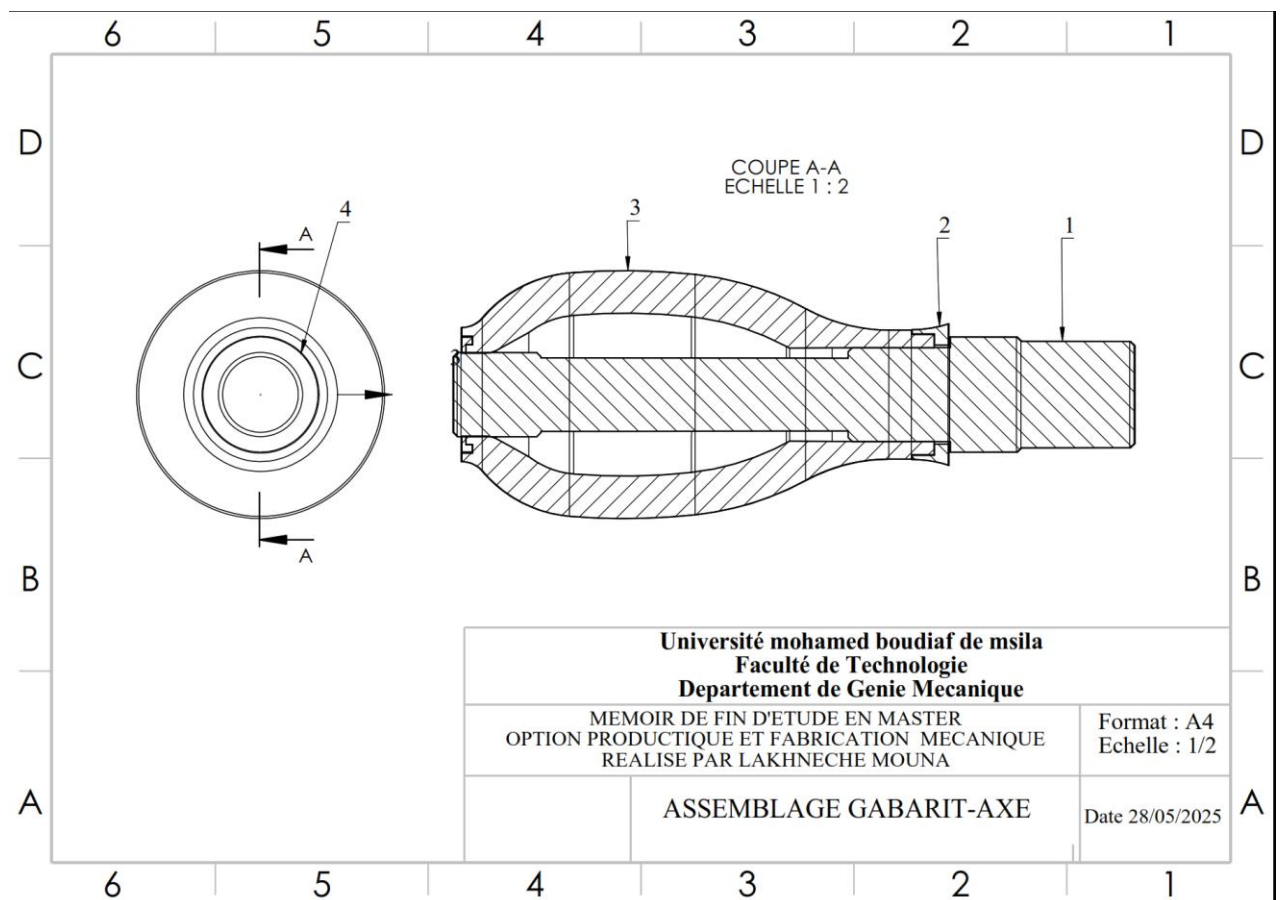


Figure III.20: Drafting de l'ensemble gabarit - Axe et bagues

---

### **III.8 Conclusion**

Ce chapitre présente la description géométrique des composants du gabarit utilisé dans le procédé de fluotournage, leurs dessins techniques ainsi que de le modèle d'assemblage réalisé sur SolidWorks. L'ensemble permet d'illustrer l'organisation structurelle du dispositif et de valider l'interaction entre les différentes pièces.

---

# **CHAPITRE IV : Fabrication du gabarit de fluotournage**

---

## IV Fabrication du gabarit de fluotournage

### IV.1 Introduction:

L'analyse d'usinage comporte trois aspects essentiels pour la préparation du travail :

- L'étude de fabrication
- L'élaboration des gammes
- L'analyse des phases

La gamme d'usinage est un ensemble d'informations qui décrit l'ensemble des opérations d'usinage nécessaires pour réaliser une pièce. C'est en fait un document qui détaille l'ordre chronologique des opérations nécessaires pour usiner une pièce, depuis sa conception jusqu'à sa fabrication. Elle sert de feuille de route pour les opérateurs et permet de suivre la progression de la fabrication.

La gamme d'usinage est un outil essentiel pour la fabrication d'une pièce, car elle permet de garantir la qualité du produit, de réduire les coûts et de respecter les délais.

La gamme d'usinage permet de :

- Identifier la pièce à usiner.
- Décrire clairement la succession des opérations d'usinage.
- Réduire les coûts de fabrication, respecter les délais et améliorer la qualité du produit.

Informations contenues dans une gamme d'usinage :

- L'identification de la pièce : Nom de la pièce, numéro de référence, etc.
- La succession des phases : Ordre chronologique des opérations d'usinage.
- Les moyens d'usinage : Machines-outils, outils de coupe, etc.
- Les paramètres d'usinage : Vitesses de coupe, avances, etc. (dans un document annexe appelé contrat de phase qui vient détailler chaque phase)

Dans ce qui suit nous présentons la gamme de fabrication du gabarit et des pièces annexes

## IV.2 Gammes d'usinage :

### IV.2.1 Gamme d'usinage du gabarit :

#### IV.2.1.a. Dessin de définition du gabarit :

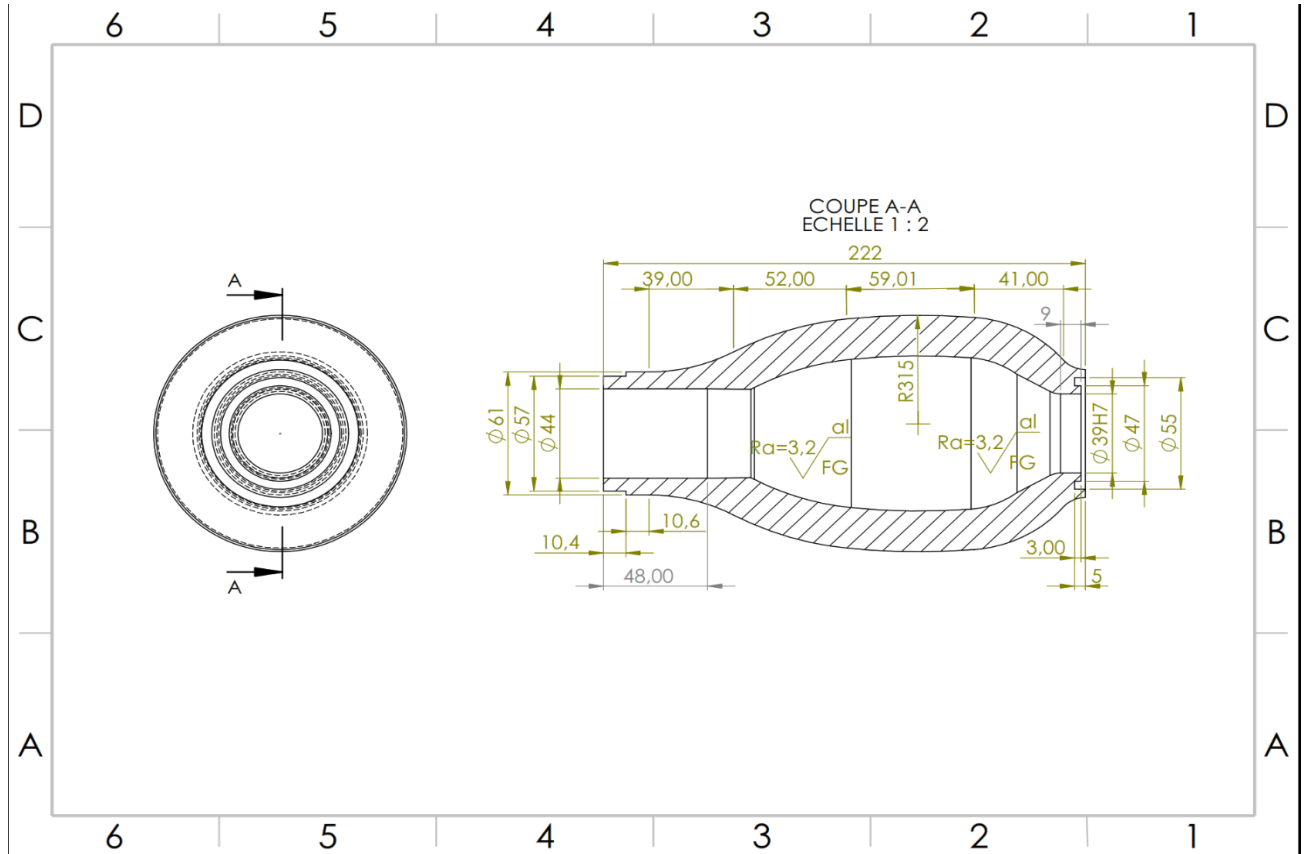


Figure IV.1: Dessin de définition du gabarit

#### IV.2.1.b. Repérage des surfaces usinées:

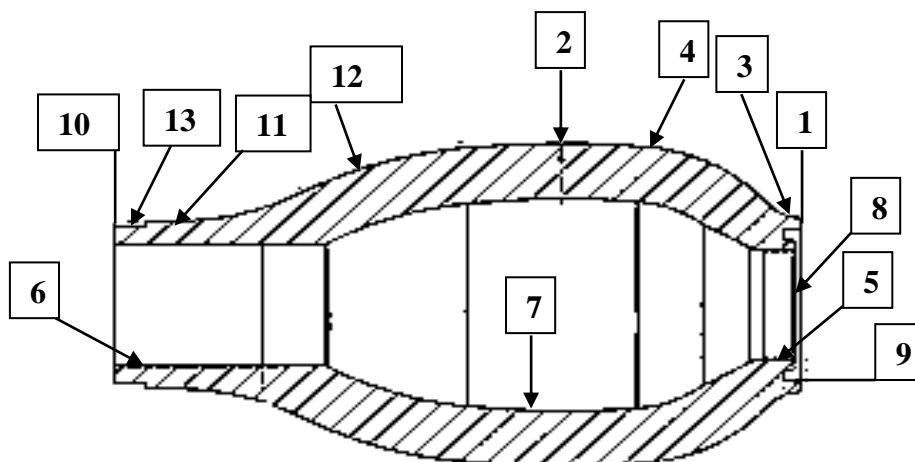

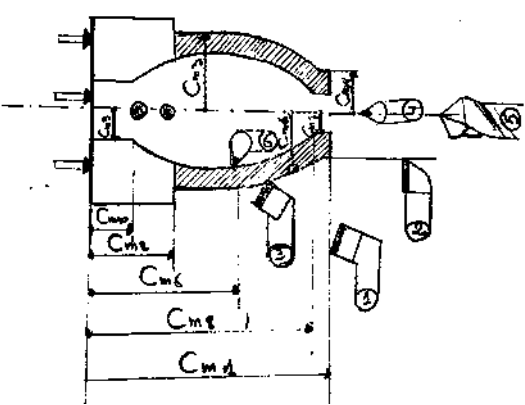
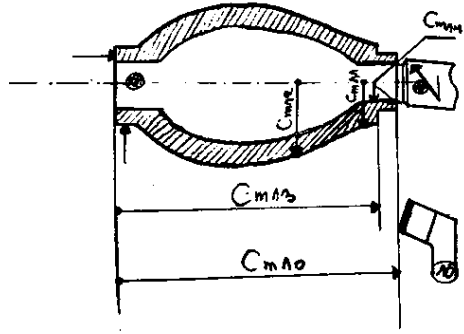
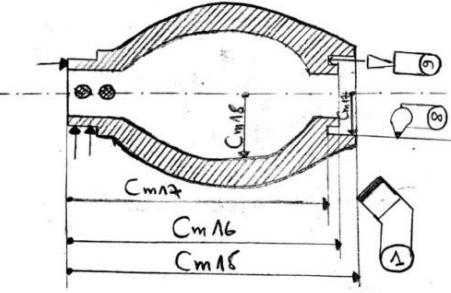
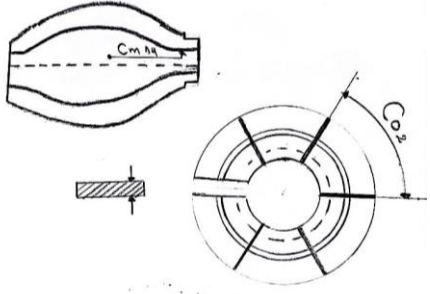


Figure IV.2: Dessin de repérage des surfaces usinées du gabarit

Tableau IV.1: Gamme d'usinage du gabarit

Ph N°	Désignation	Machines /outils	Croquis
100	<p><b>Débitage et contrôle du brut</b></p> <p><b>Brut découpé dans un lingot d'extrusion en acier ordinaire</b></p>	<p>-pied à coulisse</p> <p>-scie mécanique</p>	
200	<p><b>Tournage</b></p> <p>210 : dressage 1F Obtention : Cm<sub>1</sub>=224±<sup>0.2</sup> Ra= 3,2</p> <p>211 : chariotage 2E+2F Obtention Cm<sub>2</sub> =124±<sup>0.2</sup> Cm<sub>3</sub>=112±<sup>0.2</sup> Ra=3,2</p> <p>212 : chariotage 3F Obtention Cm<sub>4</sub> =Ø68<sup>+0,03</sup><sub>0</sub> Ra=3,2</p> <p>213: chariotage forme 4 4E+4F obtention Cm<sub>5</sub>=184±<sup>0.2</sup> Cm<sub>6</sub>=58<sup>+0,03</sup><sub>0</sub> Ra=3,2</p> <p>214 : perçage Obtention Ø 12=</p> <p>215 : Alésage 5E+5F Obtention Cm<sub>7</sub>= 39<sup>+0,025</sup><sub>0</sub> Cm<sub>8</sub>=203±<sup>0.2</sup> Ra=3,2</p> <p>6E+6F Obtention Cm<sub>8</sub>=202±<sup>0.2</sup> Cm<sub>9</sub>=Ø44<sup>+0,025</sup><sub>0</sub> Ra=3,2</p> <p>216 : chambrage</p>	<p>tour parallèle</p> <p>-outil à dresser coudé 45°</p> <p>-outil à charioter</p> <p>-forêt Ø4, 6, 8,12</p> <p>-outil à chambrer coudé</p> <p>-Pied à coulisse</p>	

	<p><b>220 sous phase :</b></p> <p>221 : dressage 10 10E+10F Obtention <math>C_{m10} = 224 \pm 0.2</math></p> <p>222 : chariotage 11 11F <math>C_{m11} = \varnothing 78 \begin{smallmatrix} +0,03 \\ 0 \end{smallmatrix}</math> Ra=3,2</p> <p>223: chariotage 12 12F <math>C_{m12} = \varnothing 52 \begin{smallmatrix} +0,03 \\ 0 \end{smallmatrix}</math></p> <p>224 : chariotage 13 13E+13F <math>C_{m13} = 206 \pm 0.2</math> <math>C_{m14} = 4 \pm 0.1</math> Ra=3,2</p>	<p>outil coudé</p> <p>-outil à charioter</p> <p>-pied à coulisse</p>	
	<p><b>230 Sous phase :</b></p> <p>231 : dressage 1 1E+1F <math>C_{m15} = 222 \pm 0.1</math></p> <p>232 : Alésage 8 : 8E +8F Obtention <math>C_{m16} = 218 \pm 0.1</math> <math>C_{m17} = 216 \pm 0.1</math></p> <p>233 : Rainurage intérieure : 9E+ 9F <math>C_{m18} = 72 \pm 0.1</math> Ra=3,2</p>	<p>outils alésoir</p> <p>-outil chambre coudé 45°</p> <p>-pied à coulisse</p> <p>-outil sciage</p>	
300	<p><b>Fraisage :</b></p> <p>Découpage en morceaux obtention <math>C_{m14} = 60 \pm 0.1</math></p> <p><math>C_{\alpha 2} = 60^\circ</math></p>	<p>-Fraise scie <math>\varnothing</math></p> <p>-fraiseuse universelle</p> <p>-diviseur universelle</p>	
400	<p>Contrôle dimensionnel et la rugosité</p>		

## IV.2.2 Gamme d'usinage de l'axe d'entrainement :

### IV.2.2.a. Dessin de définition:

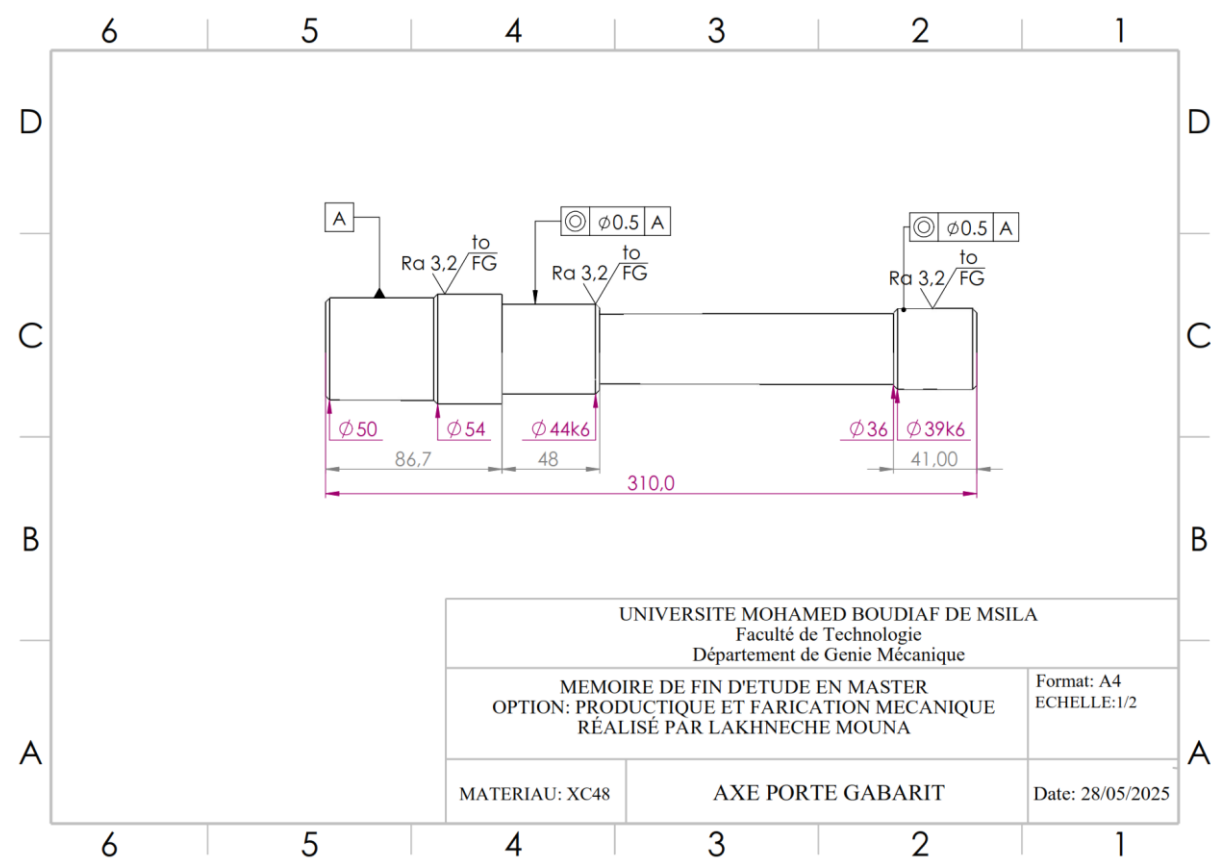


Figure IV.3: Représentation en 3D de L'axe d'entrainement

### IV.2.2.b. Repérage des surfaces usinées

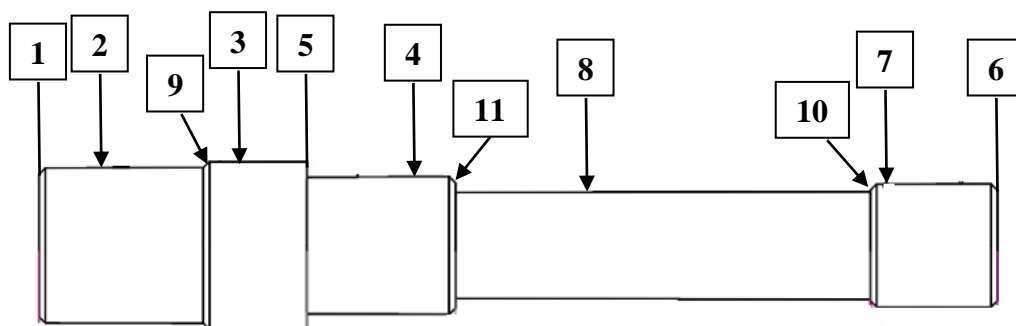
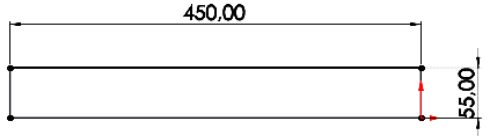
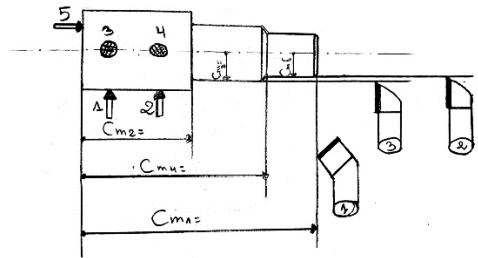
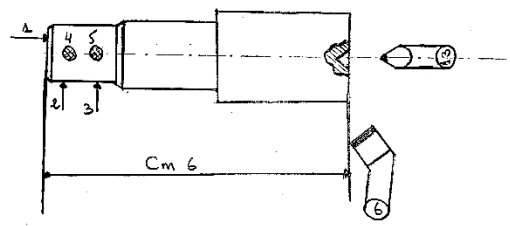
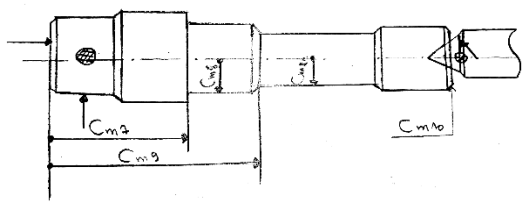


Figure IV.4: Repérage des surfaces usinées de l'axe d'entrainement

Tableau IV.2: Gamme d'usinage de l'axe

<b>Produit : gabarit</b> <b>Elément : l'axe porteur</b>		<b>Matière : XC48</b> <b>Nombre : 01</b> <b>Brut : lingot d'extrusion</b>	<b>Réalisé par :</b> <b>LAKHNECHE MOUNA</b>
N°PH	Désignation	Machines / o utils /poste	croquis
100	Obtention et contrôle de brute	Pied à coulisse	
200	<u>Tournage :</u> 210 : dressage1 1F Ra=3.2 Cm1=320±0.2 212 : chariotage 3 3F Cm2= 243±0.2 +0,021 Cm 3 =Ø54+0,002 Ra=3.2 213=chariotage 2 Cm4= 273±0.2 +0,021 Cm5= Ø50+0,002 Ra=3.2 214 : chan freinage 8et9 2*45°	-outil coudé  -outil a charioté droit  Pied à coulisse	
	<u>220 sous phase :</u> 220 : dressage6 6F Cm6= 310±0.2 Ra=3.2 222 : centrage 13	-outil coudé -Outil à center	
	<u>230 sous phase :</u> 231 : chariotage 4et5 5E +5F Cm7=86±0.1 +0,018 Cm8= Ø44+0,002 232 : chariotage 7 7E+7F	-outil à charioter droit  -outil coudé 45°	

	<b>Cm9=134<math>\pm</math>0.2</b> <b>Cm11= Ø39<math>\pm</math>0.002</b> <b>234 : chan freinage</b> <b>14</b> <b>10, 11,12</b>		
<b>300</b>	<b>Contrôle de qualité</b>	<b>Pied à coulisse</b>	

#### IV.2.3 Gamme d'usinage de la bague de centrage amont :

##### IV.2.3.a. Dessin de définition:

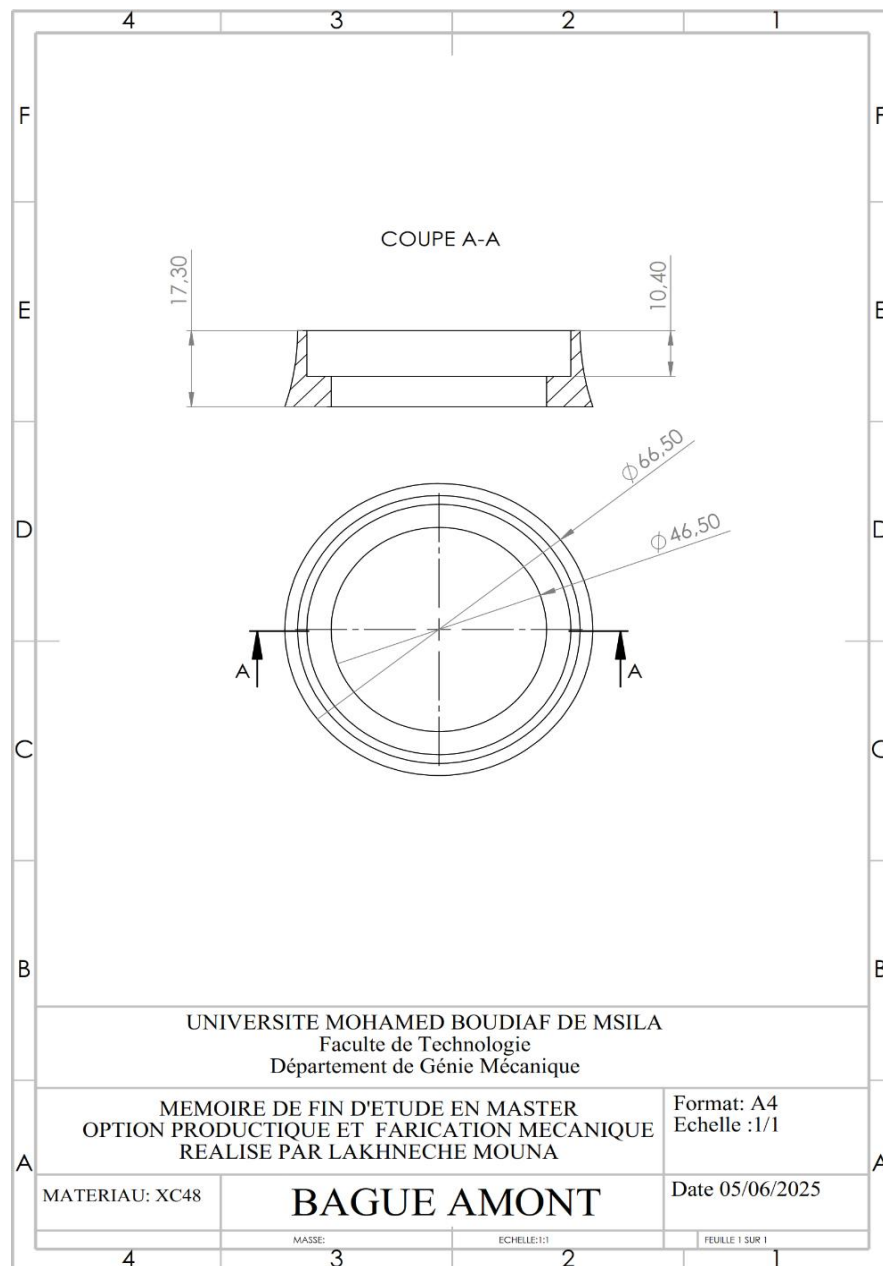


Figure IV.5:Dessin de définition de la bague amont de centrage

##### IV.2.3.b.

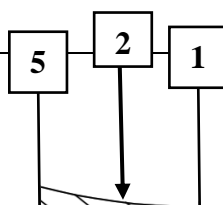
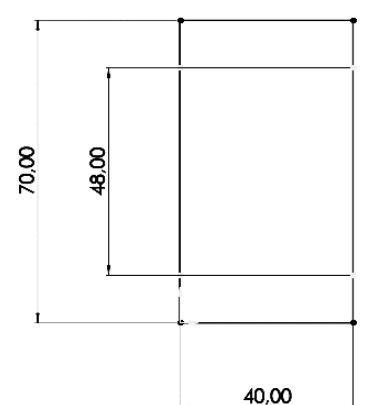
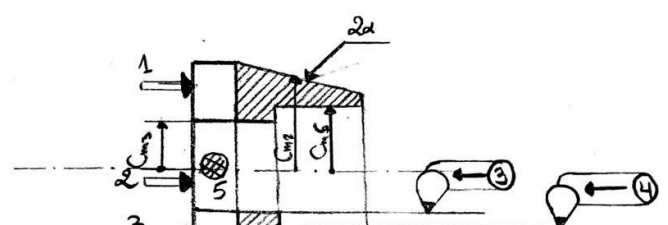


Figure IV.6:Repérage des surfaces usines de la bague amont de centrage

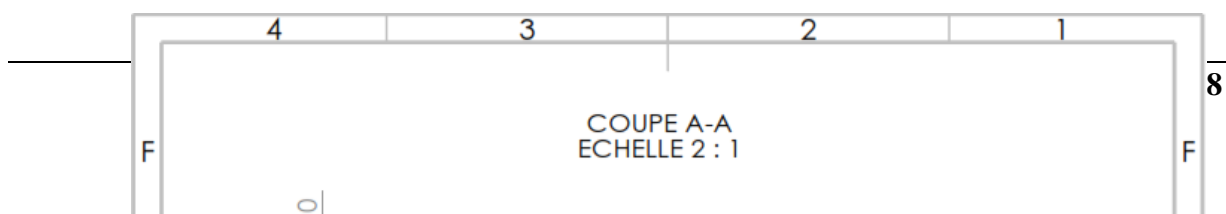
Tableau IV.3:Gamme d'usinage de la bague amont

<b>Produit : gabarit</b>		<b>Matière : XC48</b>		<b>Réalisé par :</b>	
<b>Elément : bague amont</b>		<b>Nombre : 01</b>		<b>LAKHNECHE MOUNA</b>	
		<b>Brut : lingot d'extrusion</b>			
<b>N°</b>	<b>Désignation</b>	<b>Machines /outils /poste</b>	<b>Croquis</b>		
<b>100</b>	<b>Débitage : le brut est découpé dans un laminé à la longueur 48 mm de Ø 70 Ø 48</b>  <b>Contrôle dimensionnel</b>	<b>Pied à coulisse</b>			
<b>200</b>	<b>Tournage :</b> <b>210 : dressage1</b> <b>1E+1F</b> <b>obtention :</b> <b>Cm1=37±0.2</b> <b>Ra=3.2</b> <b>211: chariotage2</b> <b>2E+2F</b> <b>obtention</b> <b>Cm2=56±0.1</b>	<b>-tour parallèle</b> <b>-outil coudé 45°</b> <b>-outil droit</b>  <b>-outil à aléser</b> <b>-pied à</b>			

	<b>R=10mm</b> <b>212 : Alésage 3</b> <b>3F obtention</b> <b>Cm3=</b> $+0,018$ $\text{Ø}44^{+0,002}$ <b>Ra=3,2</b> <b>213=Alésage 4</b> <b>4E+4F</b> <b>obtention</b> <b>Cm4=17<math>\pm</math>0.1</b> <b>Cm5=51<math>\pm</math>0.1</b> <b>Ra=</b> <b>214 : tournage 5</b> <b>5F</b>	<b>coulisse</b>	
<b>300</b>	<b>Contrôle de qualité</b> <b>Contrôle dimensionnel</b> <b>Contrôle d'état de surface</b>	<b>-Pied à coulisse</b> <b>-les talons de rugosité</b>	

#### IV.2.4 Gamme d'usinage de la bague de centrage aval :

##### IV.2.4.a. Dessin de définition :



---

Figure IV.7:Dessin de définition de la bague aval de centrage

IV.2.4.b. **Repérage des surfaces usinées:**

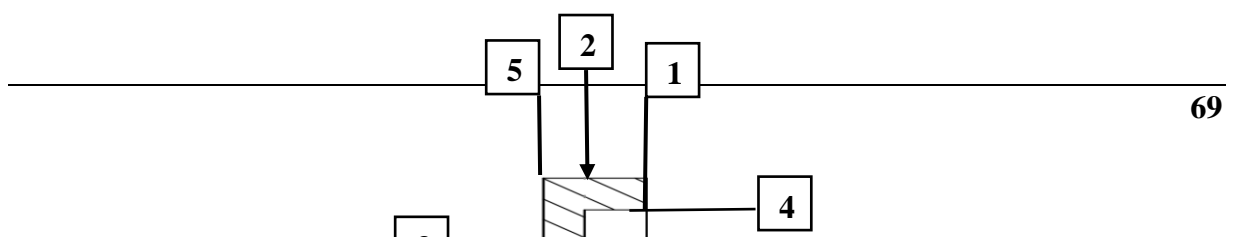
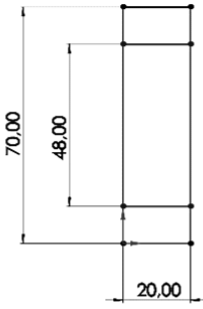
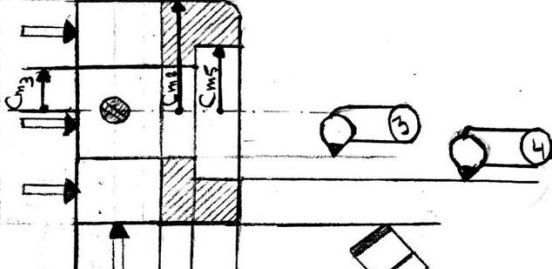


Figure IV.8: Repérage des surfaces usinées de la bague aval de centrage

Tableau IV.4: Gamme d'usinage de la bague aval

<b>Produit : Gabarit</b> <b>Elément : bague aval</b>		<b>Matière : XC48</b> <b>Nombre : 01</b> <b>Brut : lingot d'extrusion</b>	<b>Réalisé par :</b> <b>LAKHNECHE MOUNA</b>
<b>N°</b>	<b>Désignation</b>	<b>Machines /outils /poste</b>	<b>Croquis</b>
<b>100</b>	<b>Débitage : le brut est découpé dans un laminé à la longueur 20mm de Ø70</b> <b>Ø48</b> <b>Contrôle dimensionnel</b>	<b>Pied à coulisse</b>	
<b>200</b>	<b>Tournage :</b> <b>210 : dressage1</b> <b>1E+1F</b> <b>obtention :</b> <b>Cm1=15±0.1</b> <b>Ra=3.2</b> <b>211 :</b> <b>chariotage 2</b> <b>2E+2F</b> <b>obtention</b>	<b>-tour parallèle</b> <b>-outil coudé 45°</b>  <b>-outil droit</b>	



---

$\pi$  : est la constante mathématique (3.1416).

$e'$  : l'épaisseur finale atteinte après étirage

**Sgabarit** : La superficie totale du gabarit

Le brut est une tôle  $e = 5/10 = 0.5\text{mm}$

On estime la réduction d'épaisseur de  $2/10$  donc  $e' = 0.3$

De la formule  $e \cdot (\pi D^2/4) = e' \cdot \text{Sgabarit} \rightarrow D^2 = 4 e' \text{ Sgabarit} / (\pi e)$

$$D = \sqrt{4 e' \text{ Sgabarit} / (\pi \cdot e)}$$

**AN :**

$$\text{Sgabarit} = 1849.27 + 2018.03 + 8593.92 + 1720.01 + 2366.02 + 14692.33 + 21449.71 + 3115.66 = \text{Sgabarit} = 117328.295\text{mm}^2$$

$$D = \sqrt{4 \cdot 0,3 \cdot 117328,295 / (3,14 \cdot 0,5)} = 299,46\text{mm}$$

#### IV.4 Conclusion

Ce chapitre présente la description géométrique des composants du gabarit utilisé dans le procédé de fluotournage réalisé sur SolidWorks, Ainsi que la gamme d'usinage détaille les étapes de fabrication selon une logique technique, en précisant les séquences, les outils et les machines à employer. En complément, le calcul du brut à étirer repose sur l'hypothèse de

---

conservation du volume, afin de déterminer les dimensions initiales de la matière à mettre en forme.

L'ensemble des éléments développés constitue une base technique indispensable pour assurer la conformité fonctionnelle et dimensionnelle du produit final dans le cadre du procédé de fluotournage

---

## **V. Conclusion générale:**

Ce travail constitue une tentative sérieuse de concilier les aspects théoriques du formage plastique avec leur application pratique dans un contexte industriel réel. À travers l'étude du fluotournage appliqué à la fabrication d'un vase, nous avons abordé différentes étapes, allant des principes fondamentaux du procédé, à l'analyse des paramètres influents, jusqu'à la conception, la réalisation et l'essai d'un gabarit démontable adapté à la forme souhaitée.

Cette approche nous a permis de mieux comprendre le comportement du matériau sous l'effet de la déformation, d'analyser les forces mises en jeu, et d'évaluer la précision dimensionnelle et la qualité de surface de la pièce finale. La modélisation 3D de l'ensemble du gabarit sur SolidWorks a également facilité la visualisation et la planification des étapes de fabrication.

## **VI. Perspectives**

Dans la continuité de ce travail, plusieurs perspectives peuvent être envisagées : l'intégration d'outils de simulation numérique permettrait d'optimiser le processus de formage en anticipant les défauts potentiels et en ajustant les paramètres de manière plus précise. Par ailleurs, l'étude de nouveaux matériaux ou alliages étendrait les possibilités d'application à des domaines exigeants tels que l'aéronautique ou le médical. Enfin, l'automatisation du procédé pourrait représenter une avancée vers une production plus efficace, répétable et conforme aux standards industriels modernes.

---

# ANNEXES

---

## REALISATION DES OPERATIONS D'USINAGE



Figure V.1. Debitage du brut



Figure V.2. Centrage et Dressage



Figure V.3. Ebauche de la forme du gabarit Par Chariotage extérieur



---

Figure V.4. Perçage du gabarit



Figure V.5. Obtention de la forme extérieure du gabarit en ébauche



Figure V.6. Obtention de la forme extérieure du gabarit



Figure V.7. Obtention de la forme intérieure du gabarit par alésage



---

Figure V.8. Découpage du gabarit en morceaux par fraise scie montage sur diviseur



Figure V.9. Gabarit en morceaux



Figure V.10. Gabarit assemblé sur un axe avant polissage



---

Figure V.11. Tentative de réalisation d'un pot