

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR  
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE D'ALGER



DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE  
MÉMOIRE DE PROJET FIN D'ÉTUDE  
POUR L'OBTENTION DU DIPLÔME D'INGÉNIEUR D'ÉTAT EN GÉNIE  
MÉCANIQUE

---

**Contribution à la conception et la  
réalisation d'une profileuse de tôles à galets**

---

Réalisé par :

FEKKANE Walid

Sous direction de :

M. O. HAMRI

Maitre assistant -A- ENP, ALGER.

***Composition du Jury :***

Président : MR. M. TAZI

MA-A ENP, ALGER

Examineur : MR. B. GUERGUEB

MA-A ENP, ALGER

Promoteur : M. O. HAMRI

MA-A ENP, ALGER

ENP 2019



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR  
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE D'ALGER



DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE  
MÉMOIRE DE PROJET FIN D'ÉTUDE  
POUR L'OBTENTION DU DIPLÔME D'INGÉNIEUR D'ÉTAT EN GÉNIE  
MÉCANIQUE

---

**Contribution à la conception et la  
réalisation d'une profileuse de tôles à galets**

---

Réalisé par :

FEKKANE Walid

Sous direction de :

M. O. HAMRI

Maitre assistant -A- ENP, ALGER.

***Composition du Jury :***

**Président :** MR. M. TAZI

MA-A ENP, ALGER

**Examineur :** MR. B. GUERGUEB

MA-A ENP, ALGER

**Promoteur :** M. O. HAMRI

MA-A ENP, ALGER

ENP 2019

## ملخص

تكنولوجيا تصنيع تشكيل الأسطوانة هي واحدة من أهم الأساليب والتقنيات لتشكيل المعادن. تلعب الحاجة إلى الإنتاج الضخم والكفاءة ودور التكنولوجيا التقليدية دورًا مهمًا في احتياجات السوق. قدم هذا البحث تصميمًا للصفائح المعدنية المكونة للصفائح المعدنية في قناة محددة بشكل جيد تستخدم في التطبيقات المختلفة. تم تنفيذ تصميم الآلة عن طريق الحساب اليدوي والمحاكاة الحاسوبية. أظهرت النتائج أن التصميم موثوق به وعملي ومقاوم للارتداء. تصميم الجهاز لديه العديد من المزايا مثل؛ معدل الإنتاج المستمر، تحقيق منتجات متناظرة، منتجات ذات جودة عالية، أقل تكلفة، أقل وزنا، حجم أصغر، أقل تكلفة وأكثر أمانًا.

الكلمات الرئيسية: لفة تشكيل ، تصميم ، آلة الترميط ، بكرات

## Abstract

Roller profiling manufacturing technology is one of the most important methods and technologies of metal forming. The need for mass production and to devote and optimize old and conventional methods plays an important role in the needs of the market. This research provided a design of the sheet metal forming machine that transforms sheet metal into a well-defined shaped channel used in various applications. The design of the machine was carried out by manual calculation and computer simulation. The results show that the design is reliable, functional and resistant to wear. The design of the machine has many advantages such as ; the continuous production rate, achieve symmetrical products, high quality products, does not require skilled operator, less weight, small size, adjustable to a wide variety of products from the design of new pebble games, less expensive and more secure. Key words : roll forming, design, profiling machine, rollers.

## Résumé

La technologie de fabrication du profilage aux galets est l'une des méthodes et technologies les plus importantes du formage de métaux. Le besoin de production en série et de consacrer et optimiser les méthodes anciennes et conventionnelles joue un rôle important dans les besoins du marché. Cette recherche a fourni une conception de la machine de profilage de tôle qui transforme la tôle en un canal en forme bien définie utilisée dans diverses applications. La conception de la machine a été réalisée par le calcul manuel et la simulation par ordinateur. Les résultats montrent que la conception est fiable, fonctionnelle et résistante à l'usure. La conception de la machine présente de nombreux avantages tels que ; le taux de production continu, réaliser des produits symétriques, des produits de haute qualité, ne nécessite pas d'opérateur qualifié, moins de poids, de petite taille, ajustable à une grande variété de produits dès la conception de nouveaux jeux de galets, moins coûteuse et plus sécurisée.

Mots clés : profilage de tôles à galets, conception, machine de profilage, galets.

# Dédicaces

Je dédie ce travail à mes chers parents en signe de reconnaissance et de gratitude envers tous les efforts qu'ils ont fournis pour me voir réussir. Puisse Dieu les garder.

Je dédie aussi ce travail à toute ma famille qui m'a toujours encouragé et soutenu tout au long de mes études.

Finalement, j'aimerais dédier ce travail à mes amis qui, en plus de leurs encouragements, ont toujours pu me redonner confiance en moi et veiller à ma bonne humeur.

**Walid FEKKANE**

# Remerciements

En tout premier lieu, je remercie le bon Dieu, tout puissant, de m'avoir donné la force de survivre, ainsi que l'audace pour dépasser toutes les difficultés.

Le travail présenté dans ce mémoire a été réalisé au laboratoire du département de génie mécanique de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, sous la direction de Monsieur Okba HAMRI, ma plus grande gratitude va à mon encadreur, pour sa disponibilité et la confiance qu'il m'a accordé, pour son savoir et son savoir-faire dont j'ai pu bénéficier au cours de nombreuses discussions. J'aimerais aussi le remercier pour l'autonomie qu'il m'a accordée, et ses précieux conseils qui m'ont permis de mener à bien ce travail.

J'exprime toute ma reconnaissance à Monsieur Mohamed Tazi pour avoir bien voulu accepter de présider le jury de ce mémoire. Que Monsieur Brahim trouve ici l'expression de mes vifs remerciements pour avoir bien voulu juger ce travail. Que Monsieur Okba HAMRI trouve ici l'expression de mes vifs remerciements pour avoir bien voulu juger ce travail.

Je tiens à témoigner mes sincères remerciements à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce modeste travail. Enfin, je n'oserais oublier de remercier tout le corps professoral du département de génie mécanique de l'Ecole Nationale Polytechnique, pour le travail énorme qu'il effectue pour nous créer les conditions les plus favorables pour le déroulement de nos études

# Table des matières

Liste des tableaux

Tables des figures

Nomenclature

Introduction générale

<b>1 Généralités</b>	<b>14</b>
1.1 Préface . . . . .	14
1.2 Le profilage de tôle conventionnel . . . . .	15
1.2.1 Définition et classification du profilage de tôles . . . . .	15
1.2.2 Définition du profilage de tôles à gâlets . . . . .	17
1.2.3 Technologies du profilage de tôles . . . . .	17
1.3 Types de supports de profileuses . . . . .	19
1.3.1 Support standard . . . . .	19
1.3.2 Support en porte à faux . . . . .	20
1.3.3 Support à double hauteur . . . . .	21
1.3.4 Support côte à côte . . . . .	22
1.4 Composants de bases de la machine . . . . .	23
1.4.1 Les galets . . . . .	23
1.4.2 Les arbres . . . . .	24
1.4.3 Support et établi . . . . .	24
1.4.4 Les roulements . . . . .	27
1.4.5 Les engrenages . . . . .	28
1.5 Conclusion . . . . .	28
<b>2 Conception et calculs</b>	<b>29</b>
2.1 Préface . . . . .	29
2.2 Rayon de pliage rapporté à l'épaisseur . . . . .	30
2.3 Calcul de la largeur de bande . . . . .	31
2.3.1 Méthode de longueur d'arc constante . . . . .	33
2.3.2 Hauteur de retombé de bord . . . . .	35
2.4 Calcul du nombre de passes . . . . .	36
2.4.1 Première méthode . . . . .	36
2.4.2 Deuxième méthode . . . . .	37

2.5	Diagramme de fleurs . . . . .	38
2.6	Diamètre de l'arbre . . . . .	42
2.7	Calcul du moment fléchissant . . . . .	42
2.8	Calcul de la force mise en forme . . . . .	43
2.9	Puissance et vitesse d'entraînement des arbres . . . . .	44
2.10	Calcul de roulements . . . . .	45
	2.10.1 Calcul de la fiabilité du roulement . . . . .	46
2.11	Design des galets . . . . .	47
2.12	Conclusion . . . . .	51
<b>3</b>	<b>Simulation numérique</b>	<b>52</b>
3.1	Préface . . . . .	52
3.2	Simulation des forces sur les galets . . . . .	52
	3.2.1 Application du matériau . . . . .	53
	3.2.2 Définition des conditions de déplacements imposés . . . . .	53
	3.2.3 Application des charges externes . . . . .	53
	3.2.4 Choix du maillage . . . . .	54
	3.2.5 Résolution . . . . .	55
	3.2.6 Interprétation des résultats . . . . .	60
3.3	Simulation des forces sur la bande profilée . . . . .	61
	3.3.1 Application du matériau de la bande . . . . .	61
	3.3.2 Définition des conditions de déplacements imposés . . . . .	62
	3.3.3 Choix du maillage . . . . .	62
	3.3.4 Application des forces sur la bande . . . . .	63
	3.3.5 Résolution . . . . .	63
	3.3.6 Interprétation des résultats . . . . .	64
3.4	Conclusion . . . . .	65
	<b>Bibliographie</b>	<b>68</b>
	<b>Annexe A</b>	<b>69</b>
	<b>Annexe B</b>	<b>73</b>



# Liste des tableaux

2.1	Caractéristiques du matériau . . . . .	29
2.2	Rayon de courbure de chaque passe. . . . .	40
2.3	Dimensions des galets. . . . .	49
3.1	Caractéristique du matériau des galets . . . . .	53
3.2	Détails du maillage. . . . .	54
3.3	Détails du maillage de la bande . . . . .	63

# Table des figures

1.1	Procédé de forgeage d'un vilebrequin de voiture. . . . .	15
1.2	Exemple de profilés obtenus par extrusion. . . . .	16
1.3	Processus de dessin de câble (Wire drawing). . . . .	16
1.4	Processus de profilage de tôle[10]. . . . .	18
1.5	Support standard, avec arbres supportés des deux côtés. . . . .	19
1.6	Profileuse à support en porte à faux. . . . .	20
1.7	Une solution pour la déviation des arbres en porte-à-faux, en utilisant un connecteur sur les extrémités des arbres du côté de l'opérateur. . . . .	21
1.8	Support à double hauteur ; cette configuration utilise l'espace entre les stations pour installer un autre jeu de rouleaux. . . . .	22
1.9	Support côte à côte avec deux types de galets formant deux profils différents. . . . .	23
1.10	Exemple de galet complexe divisé en sections faciles à fabriquer et à manipuler [6]. . . . .	24
1.11	Arbres montés sur un support de formage, sans les galets. . . . .	24
1.12	Guide d'alignement de la bande. . . . .	25
1.13	Dispositif de réglage en hauteur des galets supérieurs. . . . .	26
1.14	Déformation dû à un mauvais alignement des galets. . . . .	27
2.1	Dimensions finales du profil. . . . .	30
2.2	Phénomène de retour élastique après pliage. . . . .	30
2.3	Approche théorique. . . . .	31
2.4	Rétrécissement actuel du coin de courbure. . . . .	32
2.5	Calcul de la longueur incurvée. . . . .	32
2.6	Méthode de rayon constant. . . . .	33
2.7	Illustration schématique du calcul de la largeur de bande. . . . .	34
2.8	Méthode de détermination du nombre de passe par Angel. . . . .	36
2.9	Distance horizontale entre chaque station. . . . .	37
2.10	Calcul du nombre de passes par George T. Halmos. . . . .	37
2.11	Plan de guidage localisé au milieu. . . . .	39
2.12	La formation de cette section peut commencer avec le cordon central (a) ou avec la lèvre extérieure (b) . . . . .	39
2.13	Diagramme de fleur généré par UBECO Profil en vue éclatée. . . . .	41
2.14	Diagramme de fleur généré par UBECO Profil. . . . .	41
2.15	Relation contrainte-déformation et b) Modèle analytique du rayon de bande formé pour la modélisation simplifiée de l'usure. . . . .	42
2.16	Calcul de la surface avec le logiciel SolidWorks. . . . .	44
2.17	Dimensions du roulement 4206 ATN9. . . . .	45

2.18	Données de calcul du roulement 4206 ATN9. . . . .	46
2.19	Relations géométriques de la bande. . . . .	48
2.20	Premier jeu de galets . . . . .	49
2.21	Deuxième jeu de galets . . . . .	49
2.22	Troisième jeu de galets . . . . .	50
2.23	Quatrième jeu de galets . . . . .	50
2.24	Cinquième jeu de galets . . . . .	50
2.25	Sixième jeu de galets . . . . .	51
2.26	Septième jeu de galets . . . . .	51
3.1	Application des déplacements imposés sur le galet supérieur de la première station (9°). . . . .	53
3.2	Application de forces à direction normale (13 kN) sur le galet supérieur de la première station (9°) . . . . .	54
3.3	Application de maillage triangulaire standard au galet supérieur de la première station (9°). . . . .	55
3.4	Le champ de simulation du galet inférieur de la première station (9°) soumis à une force de 13 kN (contraintes Von Mises). . . . .	55
3.5	Le champ de simulation du galet supérieur de la première station (9°) soumis à une force de 13 kN (contraintes Von Mises). . . . .	56
3.6	Le champ de simulation du galet supérieur de la première station (9°) soumis à une force de 13 kN (Déplacements). . . . .	56
3.7	Coefficient de sécurité : galets supérieur de la première station (9°) . . . . .	57
3.8	Le champ de simulation du galet inférieur de la quatrième station (36°) soumis à une force de 13 kN (contraintes Von Mises). . . . .	57
3.9	Le champ de simulation du galet supérieur de la quatrième station (36°) soumis à une force de 13 kN (contraintes Von Mises). . . . .	58
3.10	Le champ de simulation du galet supérieur de la quatrième station (36°) soumis à une force de 13 kN Coefficient de sécurité : galets supérieur de la quatrième station (36°) (déplacement). . . . .	58
3.11	Coefficient de sécurité : galets supérieur de la quatrième station (36°) . . . . .	59
3.12	Le champ de simulation du galet inférieur de la septième station (63°) soumis à une force de 13 kN (contraintes Von Mises). . . . .	59
3.13	Le champ de simulation du galet supérieur de la septième station (63°) soumis à une force de 13 kN (contraintes Von Mises). . . . .	60
3.14	Le champ de simulation du galet supérieur de la sixième station (63°) soumis à une force de 13 kN (déplacement). . . . .	60
3.15	Coefficient de sécurité : galets supérieur de la septième station (63°) . . . . .	61
3.16	Dimensions de la bande. . . . .	62
3.17	Conditions de déplacements imposés . . . . .	62
3.18	Maillage de la bande. . . . .	63
3.19	Forces appliquées sur la bande (13 kN) . . . . .	63
3.20	Le champ de simulation de la bande soumise à une force de 13 kN (contraintes Von Mises). . . . .	64
3.21	Le champ de simulation de la bande soumise à une force de 13 kN (Déplacement). . . . .	64

6.1	Caractéristiques mécanique du 42CD4 suivant la température de revenu . .	73
-----	--	----

# Nomenclature

$\alpha$	Angle expérimental	Degrés
$\nu$	Coefficient de poisson	—
$A$	Largeur des pâtes réelle	$mm$
$A_0$	Largeur des pâtes initiales	$mm$
$B$	Longueur droite réelle	$mm$
$B_0$	Longueur droite initiale	$mm$
$c$	Distance entre la première et la dernière station	$mm$
$C_0$	Charge dynamique de base	$N$
$CAO$	Conception Assistée par ordinateur	
$d$	Diamètre de l'arbre d'entraînement des galets	$mm$
$E$	Module de Young	$N/mm^2$
$F$	Force de mise en forme	$N$
$h$	Hauteur finale du profil	$mm$
$H_i$	Hauteur de bande dans la station actuelle	$mm$
$HD$	Distance horizontale entre stations	$mm$
$K$	Tolérance de courbure	—
$L_r$	Longueur d'arc	$mm$

$L_T$	Largeur de la bande totale	<i>mm</i>
$L_{10h}$	Durée de vie nominale en heures	<i>heures</i>
$L_{10}$	Durée de vie nominale en millions de tours	<i>millionsdetours</i>
$M_p$	Moment fléchissant	<i>N.m</i>
$N$	Vitesse de rotation du moteur	<i>Tr/min</i>
$n$	Nombre de passes	—
$P$	Puissance du moteur électrique	<i>kW</i>
$P_0$	Charge dynamique équivalente	<i>N</i>
$R_i$	Rayon de courbure intérieur	<i>mm</i>
$S$	Surface latérale de la bande	<i>mm<sup>2</sup></i>
$s$	Coefficient de sécurité	—
$S_0$	Facteur de sécurité statique	—
$t$	Épaisseur de la bande	<i>mm</i>
$U$	Résistance à la traction	<i>N/mm<sup>2</sup></i>
$v$	Vitesse de la bande	<i>m/s</i>
$X, Y$	Coefficients caractéristiques du roulement	—
$Y$	Limite d'élasticité	<i>N/mm<sup>2</sup></i>

# Introduction générale

## Préface

La technologie de fabrication est un moyen ou une méthode de fabrication d'un produit donné et chaque entreprise a son propre développement de technologie de fabrication et ces méthodes développées sont brevetées. Ce sont des méthodes très conventionnelles utilisées dans les entreprises algériennes et toutes les machines modernes sont importées d'autres pays industrialisés, ce qui coûte très cher, notre pays regorge de ressources, mais nécessite davantage de recherches et de conceptions pour développer une nouvelle technologie de fabrication de produits nouveaux et personnalisés. Cette recherche fournira une conception d'une machine de profilage de tôle à galets qui formera la tôle en canal de forme définie utilisée dans diverses applications, par simulation informatique, au lieu d'utiliser une méthode manuelle de fabrication de ce produit.

## Problème de la recherche

- Comment remplacer la méthode de profilage manuel de la tôle par une machine mécanique ?
- Comment concevoir des éléments de machine à partir d'un profil final ?
- Comment tester et analyser les éléments conçus de la machine ?

## Motivations de la recherche

Cette recherche fournit une solution de conception d'une machine de profilage de tôles à galets qui donne un coût bas, une qualité élevée, une cadence de production élevée, des produits symétriques, et le coût de la machine sera réduit en la fabriquant localement plutôt qu'en l'achetant à l'international. Ceci permettra aussi la commercialisation et la production de produits personnalisés de différentes dimensions et formes à travers différentes formes de galets qui seront conçues en fonction de la variété de produits dont la société pourra éventuellement nécessiter. Par ailleurs ceci donne l'occasion de mettre en œuvre les connaissances théoriques enseignées jusqu'à maintenant.

## Objectifs de la recherche

Les objectifs de cette recherche sont :

- Conception des éléments d'une machine de profilage de tôles à galets.
- Analyse et simulation des éléments de la machine à l'aide du logiciel CAO.
- Modélisation de la machine conçue à l'aide d'un logiciel de CAO.
- Réalisation des éléments de la machine.

## **Dispositions de recherche**

Après cette introduction, le deuxième chapitre sera un fond théorique sur les méthodes de formage des tôles et sur les éléments mécaniques utilisés dans le profilage de tôles à galets. Le troisième chapitre sera une représentation complète de la conception et des calculs mécaniques ainsi que des brouillons pour les éléments de machine. Le chapitre quatre mettra en avant des simulations et une analyse à l'aide d'un logiciel informatique pour les éléments importants des éléments de la machine, et montrera les expériences prises en compte pour obtenir les paramètres de conception, puis le chapitre cinq présentera les résultats et les recommandations pour le développement de cette machine.



# Chapitre 1

## Généralités

### 1.1 Préface

Les procédés de formage des métaux sont largement utilisés depuis longtemps. En commençant par marteler le fer pour fabriquer des outils, des équipements de guerre tels que des épées ou des lames, le formage du métal a une histoire immense. De nombreux avantages des procédés de formage des métaux sont énumérés :

- L'utilisation du métal est très élevée dans certains cas, 100 de la matière est utilisée directement comme produit final.
- La durée de vie en fatigue des produits formés est très comparable aux méthodes de production conventionnelles telles que le moulage ou le découpage.
- Le processus n'est pas affecté par la durée de vie réduite des outils de coupe et le risque de changement de dimensions en raison de l'abrasion ou de la casse utilisée dans les processus d'usinage.
- C'est un processus robuste qui peut donner les mêmes formes et dimensions finales pour des quantités de production élevées.
- Le temps de cycle de production est très faible par rapport à de nombreux procédés de coulée, car le moulage nécessite des températures plus élevées par rapport au formage à chaud dans le cas où le chauffage est très important dans le moulage. La technologie de formage des métaux est utilisée dans les domaines suivants ; Aérospatiale, électroménager, électroménager, construction, fabrication de matériel médical, militaire, fabrication de wagons et de composants de wagons et automobile.

## 1.2 Le profilage de tôle conventionnel

### 1.2.1 Définition et classification du profilage de tôles

Le profilage de tôle est un processus de fabrication par lequel la pièce atteint une forme spécifiée par des déformations permanentes dues aux forces appliquées et aux limites impulsives telles que les outils et les matrices. Les forces externes peuvent être sous forme de compression, de tension, de torsion, de cisaillement, de flexion, de tréfilage ou une combinaison des différentes forces. Habituellement, les lingots de formes simples sont formés à l'aide d'outils et de matrices. La mise en forme du bloc de métal signifie une déformation plastique dans ou sur certaines parties du bloc de matériau. La déformation plastique est la valeur de la déformation due aux contraintes supérieures à la limite élastique. La déformation plastique susmentionnée s'explique par les glissements qui se produisent entre les plans cristallographiques de la structure métallique.[1]

**Le forgeage** Le forgeage est l'ensemble des techniques permettant d'obtenir une pièce mécanique en appliquant une force importante sur une barre de métal, à froid ou à chaud, afin de la contraindre à épouser la forme voulue. Le forgeage implique un dispositif de frappe (marteau, masse, martinet ou marteau-pilon) et un support (enclume ou matrice).[13]



FIGURE 1.1 – Procédé de forgeage d'un vilebrequin de voiture.

**L'extrusion** L'extrusion est un procédé de fabrication (thermo)mécanique par lequel un matériau compressé est contraint de traverser une filière ayant la section de la pièce à obtenir. On forme en continu un produit long (tube, tuyau, profilé, fibre textile) et plat (plaque, feuille, film). Les cadences de production sont élevées.

L'extrusion donne des pièces aux formes encore plus précises que celles qui sont réalisées avec l'estampage ou le matriçage. De plus, les pièces présentent des états de surface

excellents, ce qui permet souvent de les utiliser sans usinage complémentaire. La masse moyenne des pièces extrudées est de l'ordre du kilogramme.[13]

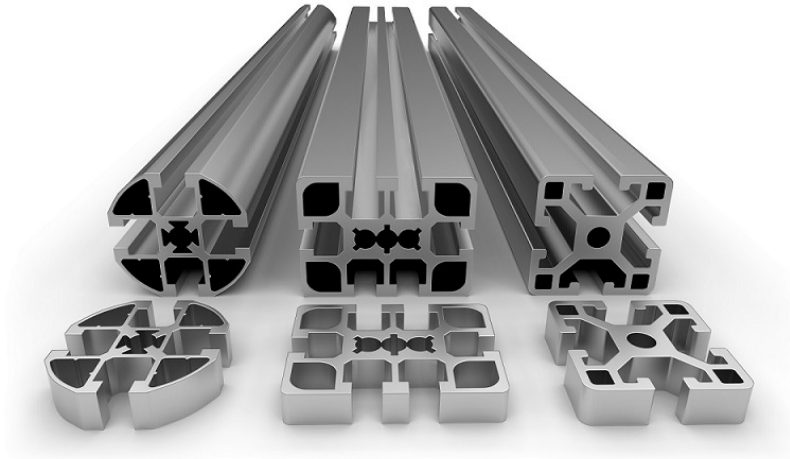


FIGURE 1.2 – Exemple de profilés obtenus par extrusion.

L'extrusion s'applique à divers produits tels les métaux, les matières plastiques, les caoutchoucs, les matériaux composites, mais aussi l'argile pour la fabrication des briques alvéolaires, les céramiques techniques, les pâtes alimentaires, et également à certaines matières pharmaceutiques pour la fabrication de médicaments. Contrairement au laminage et au profilage de bandes qui se limitent généralement à des formes simples, elle permet d'obtenir des formes très complexes et des profilés creux.

**Le dessin** Le dessin est un processus de travail des métaux qui utilise des forces de traction pour étirer le métal ou le verre. Au fur et à mesure que le métal est étiré, il devient plus mince, dans la forme et l'épaisseur souhaitées. Le dessin est classé en deux types : le dessin de tôle et le dessin de fil , de barre et de tube. La définition spécifique du dessin de tôle est qu'il implique une déformation plastique sur un axe incurvé. Pour le tréfilage de fils, de barres et de tubes, le matériau de départ est aspiré à travers une filière afin de réduire son diamètre et d'augmenter sa longueur. Le dessin est généralement effectué à température ambiante, donc classé comme processus de travail à froid, cependant il peut être effectué à des températures élevées pour travailler à chaud de gros fils, des tiges ou des sections creuses afin de réduire les efforts.

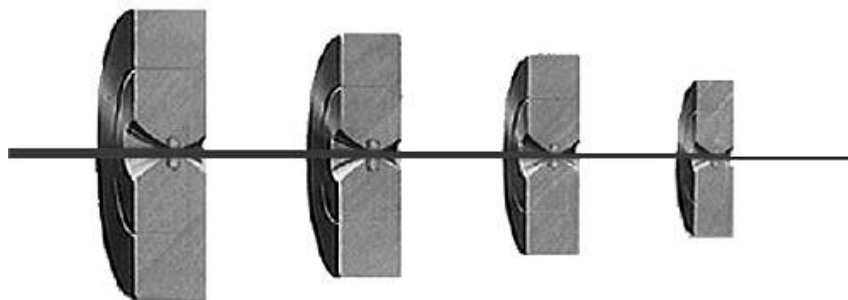


FIGURE 1.3 – Processus de dessin de câble (Wire drawing).

## 1.2.2 Définition du profilage de tôles à gâlets

Décrire ou expliquer le concept de profilage n'est pas une tâche simple. Une définition fréquemment utilisée démontre sa complexité :

Former une bande de tôle le long de lignes de pliage droites, longitudinales et parallèles avec plusieurs paires de galets profilés sans changer l'épaisseur du matériau à la température ambiante. Semblable à beaucoup d'autres définitions, celle ci-dessus a aussi des exceptions pour former une bande de tôle le long de lignes de pliage droites, longitudinales et parallèles :

- Les produits sortent souvent de la forme de rouleau courbe ou en spirale.
- Les produits peuvent avoir des lignes de pliage de  $90^\circ$  à la ligne de pliage longitudinale.
- Les lignes de pliage ne sont pas toujours parallèles (intentionnellement).
- Les lignes de pliage ne sont pas toujours droites (parfois involontairement).

L'utilisation de plusieurs paires de galets profilés peut engendrer des difficultés pour obtenir la forme désirée, les profileuses de tôles peuvent appliquer des patins en bronze, des guides en plastique. En pratique l'épaisseur du matériau ne reste pas inchangée, elle est presque toujours réduite aux lignes de pliage, dans les produits courbes minces, les fibres extérieures sont plus fines que celles intérieures, l'épaisseur du matériau est parfois réduite par des tiges pliées et fréquemment par les opérateurs.[6]

Le profilage est un processus flexible, dans lequel les règles fondamentales et les exceptions peuvent être utilisées. Il a été prouvé à plusieurs reprises que même des tâches apparemment impossibles de formage peuvent être accomplies, bien que cela puisse prendre plus de temps et plus d'argent. D'autre part, il a également été démontré que les projets de formes simples peuvent donner des résultats désastreux si les règles de base du formage ne sont pas suivies.

## 1.2.3 Technologies du profilage de tôles

Le profilage est un type de laminage impliquant le pliage continu d'une longue bande de tôle en une section transversale souhaitée. La bande passe à travers des jeux de galets montés sur des supports consécutifs, chaque jeu ne réalise qu'une partie incrémentielle du pli, jusqu'à ce que la section transversale souhaitée (profil) soit obtenue. Le profilage est idéal pour la fabrication de pièces à profil constant de grandes longueurs et en grande quantité.[9]

### Processus

Le processus de profilage est l'un des processus de fabrication les plus simples. Cela commence généralement par une grande bobine de tôle, entre 2,5 cm et 51 cm environ en largeur, et entre 0,10 mm et 3,2 mm d'épaisseur, appuyés sur une dérouleuse.

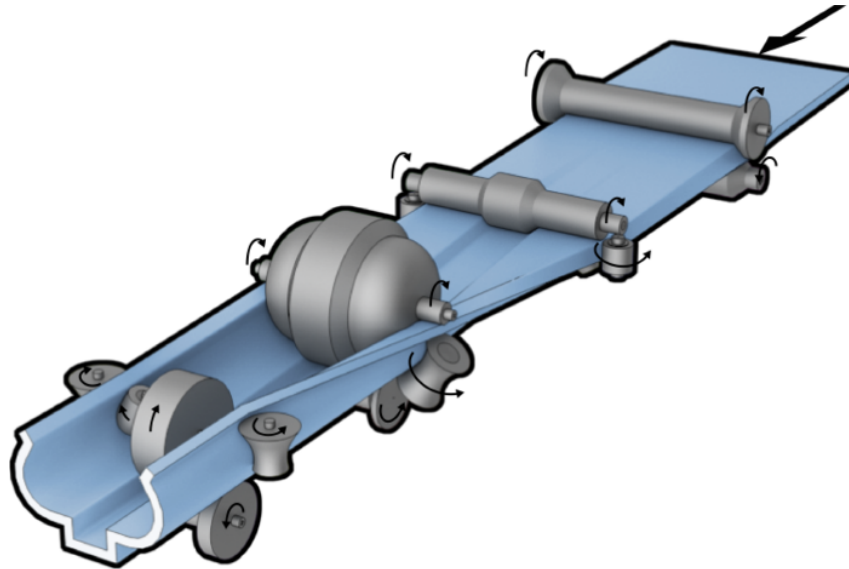


FIGURE 1.4 – Processus de profilage de tôle[10].

La bande passe dans un guide d'entrée pour aligner correctement le matériau lorsqu'il passe à travers les galets de la profileuse, chaque ensemble de galets formant un pli jusqu'à ce que le matériau atteigne la forme souhaitée. Les jeux de galets sont généralement montés les uns sur les autres sur une paire d'arbres parallèles horizontaux soutenus par un ou plusieurs supports. Les galets latéraux et les galets en grappes peuvent également être utilisés pour améliorer la précision et la flexibilité et pour limiter les contraintes sur le matériau. Les bandes profilées peuvent être coupées à la longueur devant un laminoir, entre des laminoirs ou à l'extrémité de la ligne de formage.

### Possibilité en géométrie

Les possibilités géométriques peuvent être très larges et même inclure des formes fermées tant que la section est identique. Les épaisseurs de feuilles typiques vont de 0,1 mm à 3,2 mm, mais elles peuvent dépasser cette valeur. La longueur n'est presque pas affectée par le processus de laminage. Les largeurs des pièces ne sont généralement pas inférieures à 2,5 cm, mais elles peuvent dépasser les 51 cm. La principale limite est la profondeur du profil, qui est généralement limitée à moins de 10 cm et rarement supérieure à 15 cm en raison des contraintes appliquées par les galets et des différences des vitesses de surface qui augmentent avec la profondeur.

Les tolérances peuvent généralement être maintenues à  $\pm 0,38$  mm pour la largeur de la forme transversale et à  $\pm 1,5$  mm pour sa profondeur.

### Taux de production

Le taux de production dépend grandement de l'épaisseur du matériau et du rayon de courbure ; il est également affecté par le nombre de stations ou d'étapes requises. Pour des rayons de courbure de 50 fois l'épaisseur d'un acier à faible teneur en carbone de 18 mm,

la vitesse de production peut aller de 26 m/min à huit stations à 17 m/min à 12 stations ou à 15 m/min par 22 stations [11].

Le temps pris pour qu'un produit prenne forme, peut être représenté par une simple fonction. La fonction est la suivante :  $T = \frac{L+n \times HD}{V}$ , où L est la longueur de la pièce en cours de formation, n le nombre de stations de formation, d la distance entre les stations de formation et V la vitesse de la bande à travers les galets [8].

En général, les lignes de profilage par galets peuvent aller de 1,5 à 152,4 m/min ou plus, en fonction de l'application. Dans certains cas, le facteur limitant est l'applications de poinçonnage ou de coupure [9].

### 1.3 Types de supports de profileuses

Un point important à prendre en compte lors de l'analyse de la flèche de l'outil est la manière dont les galets sont supportés dans la machine. Il est donc essentiel de connaître les différents types de supports et comment les galets sont montés pour déterminer la rigidité de la machine.

#### 1.3.1 Support standard

Le support standard pour le profilage à galets repose sur les arbres des deux côtés. Du côté de l'entraînement, l'arbre est couplé à un moteur qui entraîne les galets ; du côté de l'opérateur, le support qui supporte les arbres est amovible afin de permettre le changement d'outil. Il s'agit du type de support le plus utilisé pour le laminage de métaux [6]. Il a donc été choisi (et en raison de sa disponibilité) comme support à utiliser dans l'analyse expérimentale du présent travail. La figure 1.5 montre un dessin d'un support standard.

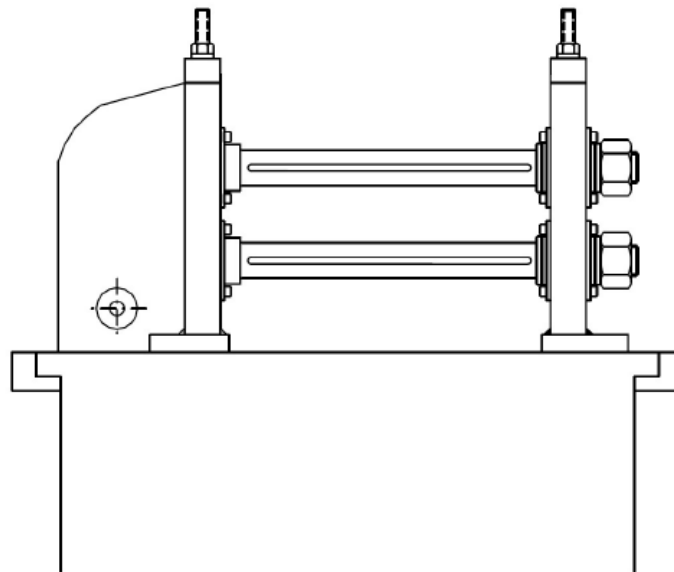


FIGURE 1.5 – Support standard, avec arbres supportés des deux côtés.

### 1.3.2 Support en porte à faux

Les supports en porte-à-faux ont les arbres soutenus d'un seul côté, du côté de l'entraînement. Ce sont des conceptions simples et peu coûteuses, qui ont été utilisées pour former des sections simples et étroites. La figure 1.6 montre une ligne de profilage en porte-à-faux en service. L'absence de support côté opérateur accélère les changements d'outils, améliorant ainsi la productivité de telles conceptions de machines.



FIGURE 1.6 – Profileuse à support en porte à faux.

Cependant, l'application de cette solution constructive dépend de l'analyse de la flèche de l'arbre pendant le formage. Comme l'arbre est uniquement supporté du côté entraînement, il se comporte comme une poutre en porte-à-faux lors du formage et la flèche totale est quatre fois supérieure à la flèche du modèle standard [6]. Une solution possible à ce problème peut être l'application d'un connecteur entre les extrémités des arbres du côté de l'opérateur (Figure 1.7).

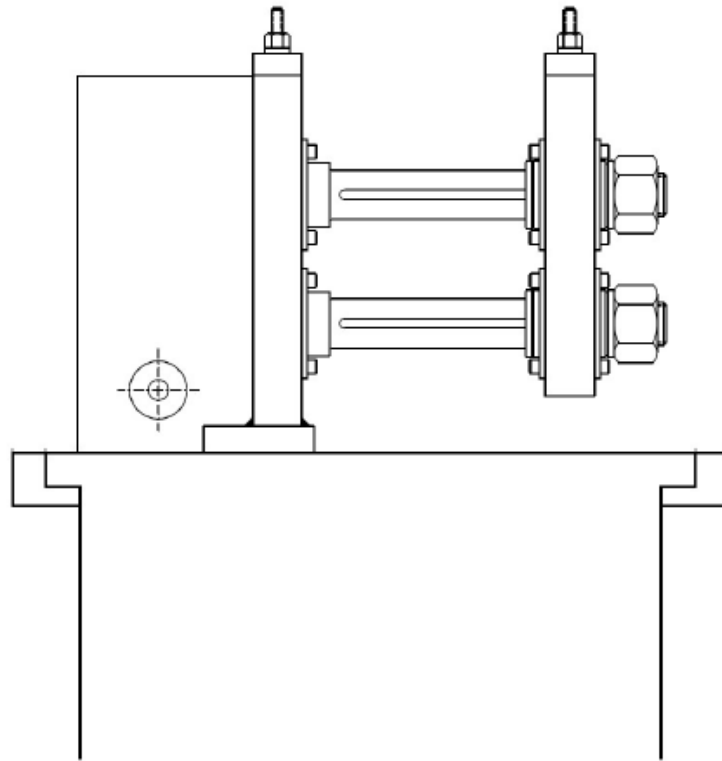


FIGURE 1.7 – Une solution pour la déviation des arbres en porte-à-faux, en utilisant un connecteur sur les extrémités des arbres du côté de l’opérateur.

### 1.3.3 Support à double hauteur

Ce type de support est similaire en construction au support standard, mais il maximise l’espace disponible en disposant de deux types de station, l’une supérieure et l’autre inférieure (Figure 1.8). Cela permet à une usine disposant d’un espace limité d’avoir deux types de profil en production dans la même machine. Les profils doivent être produits un à la fois, pas simultanément. Ainsi, le temps de basculement entre deux profils est court. Cependant, l’installation de galets latéraux est difficile en raison du manque d’espace disponible et l’inspection des conditions de formage n’est pas facile.



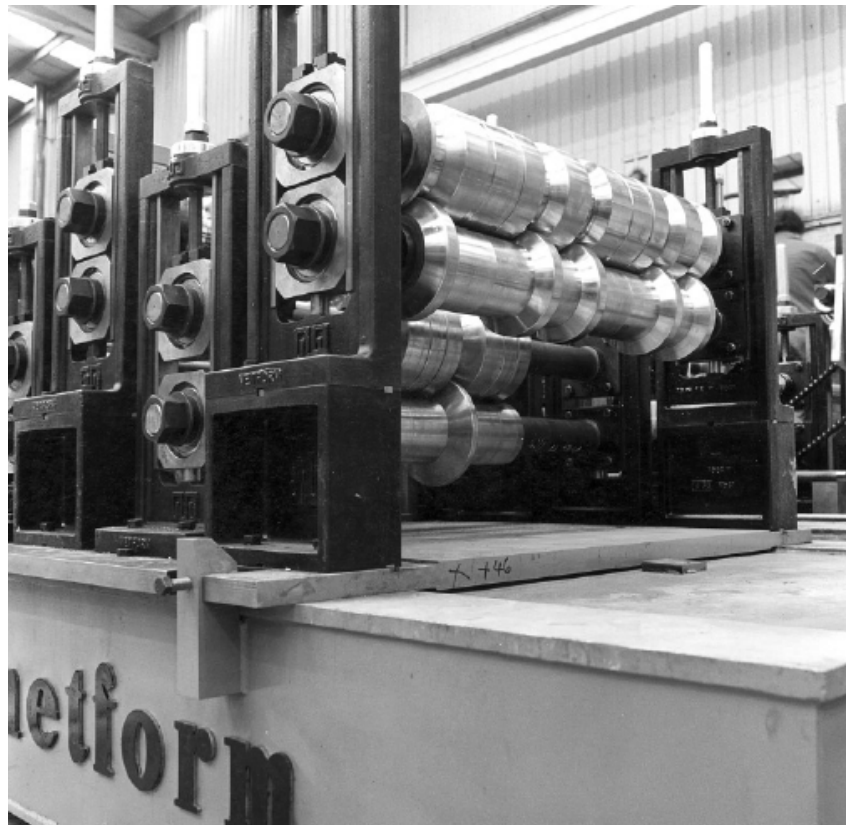


FIGURE 1.8 – Support à double hauteur; cette configuration utilise l'espace entre les stations pour installer un autre jeu de rouleaux.

### 1.3.4 Support côte à côte

Celles-ci consistent en un support standard avec un arbre plus long, pouvant accueillir deux voire trois jeux de galets (Figure 1.9). Cela réduit le temps de changement d'outils en permettant à deux profils d'être produits dans la même machine, mais pas au même moment ; c'est un peu comme le support à double hauteur. Cependant, l'arbre plus long et le nombre de galets sur chaque arbre posent des problèmes en termes de déviation de la machine : le poids des galets est plus important, ce qui entraîne un déplacement initial vers le bas, ce qui rend plus difficile le réglage de l'espacement des galets ; ensuite, lors du formage, les forces de formage entraînent un déplacement plus important en raison d'une rigidité d'assemblage plus faible [6].

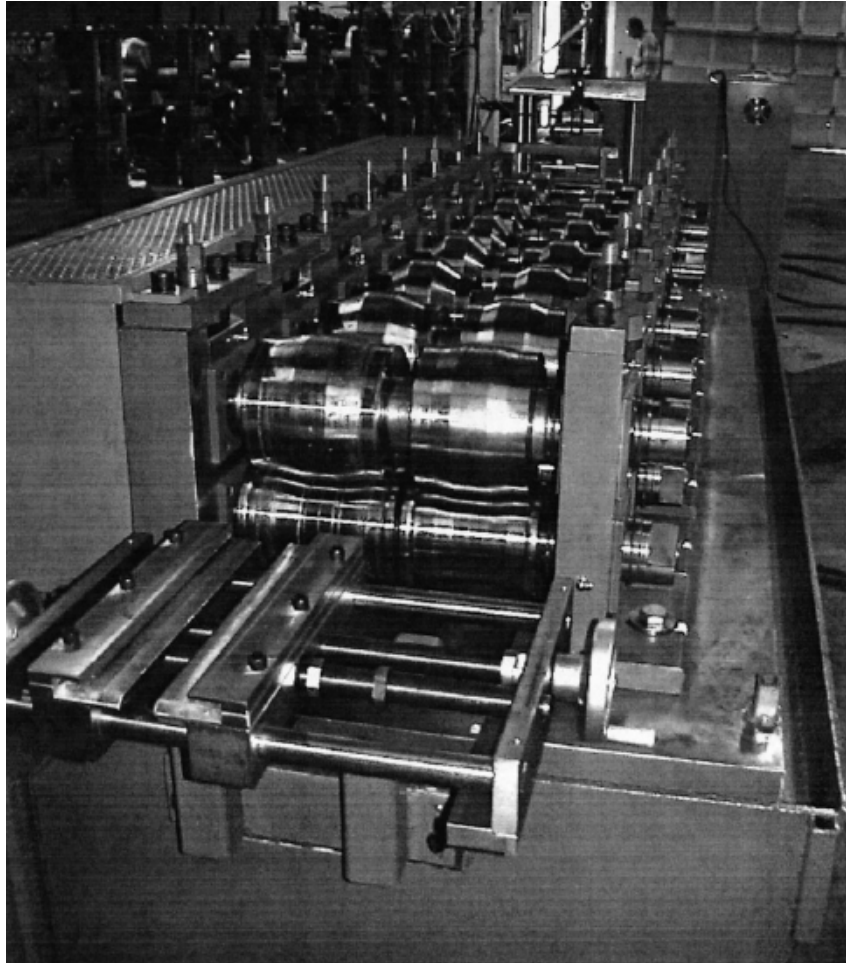


FIGURE 1.9 – Support côte à côte avec deux types de galets formant deux profils différents.

## 1.4 Composants de bases de la machine

Pour façonner la tôle dans le profil souhaité, il faut faire attention aux composants entourant les galets et aux galets eux-mêmes. Une fabrication, une configuration et un réglage en ligne corrects de la machine sont essentiels pour obtenir les produits finis dans les tolérances souhaitées.

### 1.4.1 Les galets

Concrètement, la fabrication des galets doit être extrêmement précise. Des déviations de rotondité ou d'excentricité d'un ordre très faible (0,1 mm) peuvent avoir de grandes conséquences sur la qualité de la pièce. En effet, l'un des problèmes rencontrés dans la simulation des processus de profilage est l'influence de ces imperfections, qui n'est pas facilement mise en œuvre dans les modèles numériques. La qualité de la surface doit être extrêmement élevée en raison de problèmes de contact et de lubrification. Les galets sont souvent divisés en plusieurs sections pour faciliter la fabrication (Figure 1.10) ; en fait, il y a des cas où c'est la seule possibilité. Cela permet également une installation plus facile

[6].



FIGURE 1.10 – Exemple de galet complexe divisé en sections faciles à fabriquer et à manipuler [6].

L'écart de laminage doit être réglé avec précision et doit être uniforme sur tout le profil du galet. En fait, l'un des inconvénients de la formation de galets est le temps d'installation très long, car chaque paire de galets doit être ajustée individuellement.

### 1.4.2 Les arbres

Les arbres sur une ligne de formage de galets, qui supportent les galets et les relient aux béquilles latérales, doivent être très rigides afin d'assurer une bonne stabilité dimensionnelle de l'entrefer. Habituellement, l'épaisseur de ces pièces est d'environ 30 mm ; l'arbre aura une rainure de clavette sur toute sa longueur qui s'adaptera aux galets (Figure 2.11). L'arbre repose sur des roulements sur les deux supports. Du côté de l'entraînement, il aura une section de plus grand diamètre qui repose sur le roulement. Du côté de l'opérateur, il est fileté et comporte une entretoise qui s'insère dans le roulement et permet à l'opérateur de serrer l'ensemble avec l'écrou, indépendamment du support et des roulements. Les filetages sont généralement opposés (le fil supérieur est à droite et le fil inférieur est à gauche) afin d'éviter le desserrage involontaire des écrous pendant le fonctionnement. Du côté de l'entraînement, l'arbre a une extrémité d'arbre standard pour le montage d'un entraînement par bride, roue dentée ou chaîne [6].

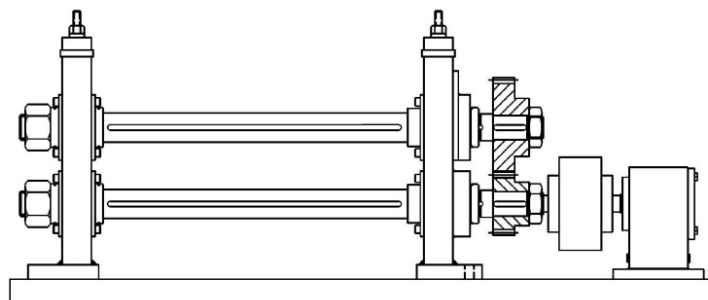


FIGURE 1.11 – Arbres montés sur un support de formage, sans les galets.

### 1.4.3 Support et établi

L'établi constitue le support de la machine, il doit comporter les fixations nécessaires pour garantir la stabilité des composants de la machine durant le processus de profilage, les vibrations peuvent affecter l'alignement des galets ou l'espace entre eux générant ainsi

des déformation sur la bande déroulée.

L'établi est constitué d'une table d'appuis principale fabriquée en acier rigide sur laquelle sont fixés les supports des arbres comportant les galets, l'arbre inférieur est fixe alors que l'arbre supérieur est maintenu avec un dispositif permettant d'accroître ou de réduire l'espacement entre le jeu de galets, ceci permet de garantir l'alignement des galets inférieur sur lesquels se déroule la bande.

**Alignement de la bande :** Lors de la conception et de la fabrication des galets, il est supposé que la ligne de base de tous les galets est exactement la même. Lors du contrôle des galets finis, ils sont placés sur une plaque de granit représentant cette ligne de base. L'écart entre les galets est soigneusement vérifié dans cette position. Si on imagine que cette plaque de granit avec les galets est tournée à  $90^\circ$  de sorte que la plaque de granit devienne verticale et les arbres horizontaux, alors dans cette position, la plaque de granit représente l'emplacement des supports de l'arbre contre lesquels les galets sont posés. Si, dans la machine, les supports des arbres ne sont pas alignés, les galets ne peuvent pas être correctement alignés. Malheureusement, c'est le cas dans une grande partie des usines actuellement en activité. Une pièce de guidage est ajoutée (figure 1.12) à l'entrée du premier jeu de galets pour garantir l'alignement de la bande.

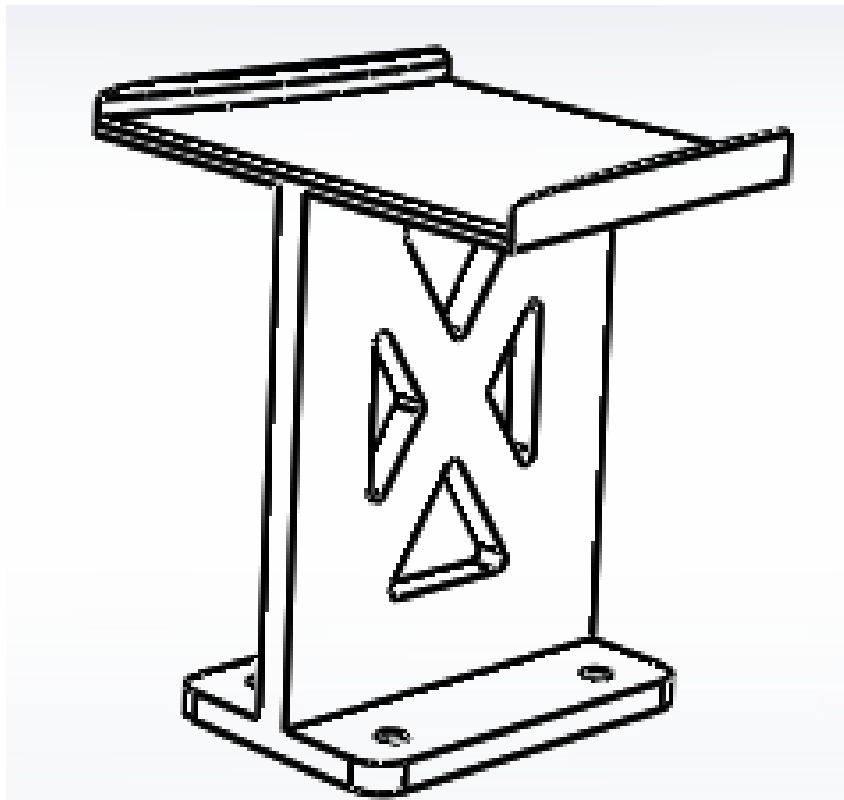


FIGURE 1.12 – Guide d'alignement de la bande.

**Réglage en hauteur des galets supérieurs :** Afin de garantir l'alignement de la ligne de base tout au long des stations de formage, il est nécessaire de mettre un dispositif pour permettre le réglage en hauteur des galets supérieurs. Le dispositif le plus commun

est celui d'une translation verticale à l'aide d'un système vis-écrous fixé à la plaque du support du galet supérieur (Figure 1.13).

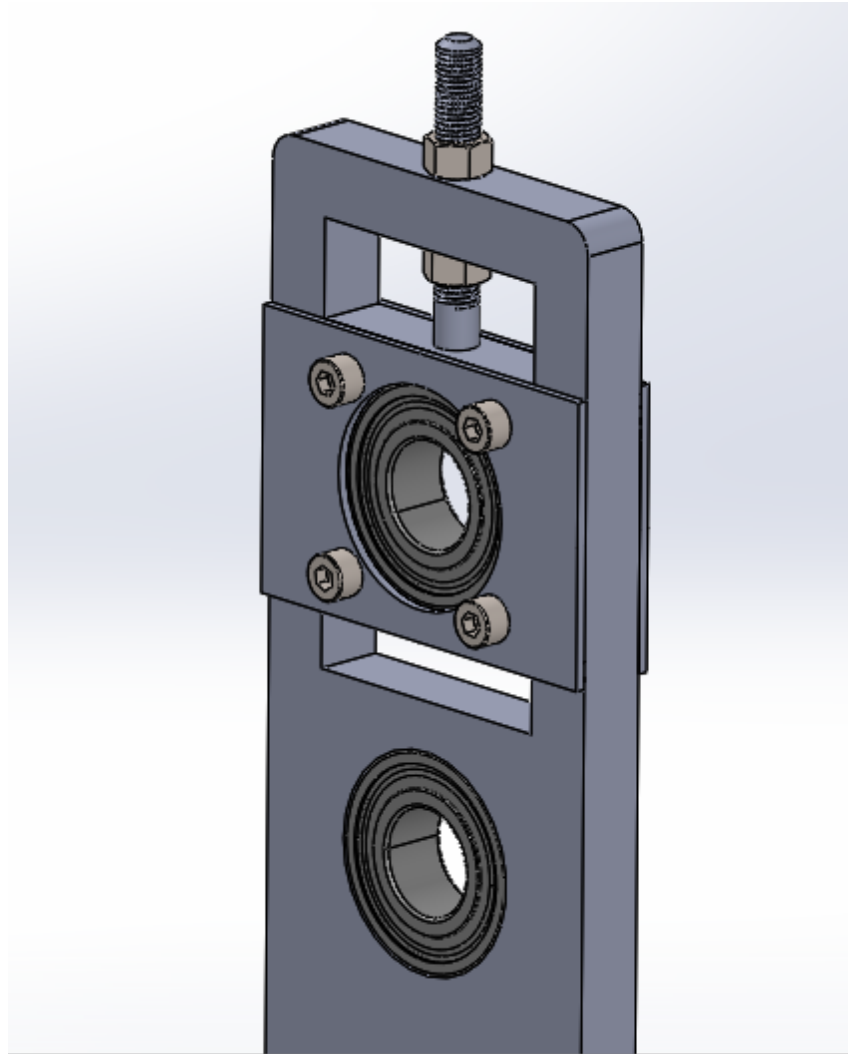


FIGURE 1.13 – Dispositif de réglage en hauteur des galets supérieurs.

Ce dispositif, même étant le plus commun, il comporte un désavantage majeur, en effet le système vis-écrous ne permet pas un réglage précis pour chaque jeu de galets mais aussi, chaque galet est réglé individuellement ce qui augmente le risque d'erreurs. Une simple erreur de réglage peut engendrer la déformation de la bande (Figure 1.14). Il est donc primordiale de bien régler l'alignement et le jeu entre les galets, dans une machine à grand nombre de passes, cette étape peut prendre des jours afin d'arrive à un résultat convainquant.

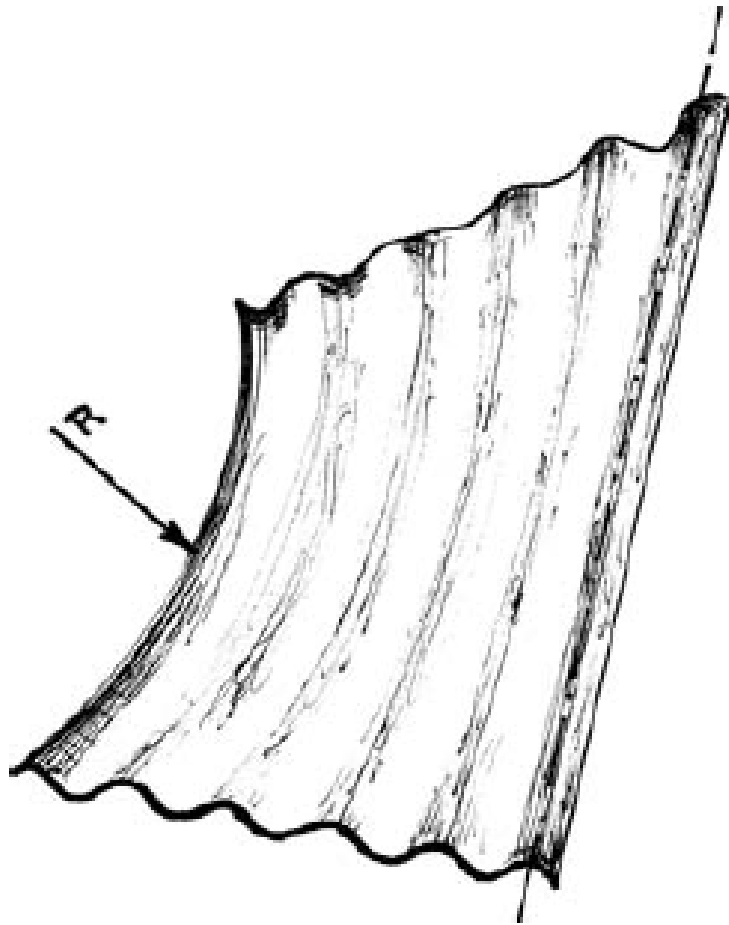


FIGURE 1.14 – Déformation dû à un mauvais alignement des galets.

#### 1.4.4 Les roulements

En mécanique, un roulement est un dispositif destiné à guider un assemblage en rotation, c'est-à-dire à permettre à une pièce de tourner par rapport à une autre selon un axe de rotation défini. Le roulement est donc un palier. Par rapport aux paliers lisses, le roulement permet d'avoir une très faible résistance au pivotement tout en supportant des efforts importants.

Le mécanisme considéré comporte deux sous-ensembles devant tourner l'un par rapport à l'autre ; nous sommes donc en présence d'une liaison pivot. La liaison se fait entre deux pièces cylindriques : une pièce mâle appelée « arbre » ; un logement appelé « moyeu ».

Les roulements s'interposent entre l'arbre et le moyeu. Les efforts du mécanisme ont tendance à faire bouger l'arbre par rapport au moyeu. On distingue :

Les charges radiales : ce sont des forces perpendiculaires à l'axe de rotation, donc orientées selon les rayons des cylindres ; Les charges axiales : ce sont des forces parallèles à l'axe de rotation.

### 1.4.5 Les engrenages

Les engrenages permettent de modifier le taux de rotation d'un arbre de machine. Ils peuvent également modifier la direction de l'axe de rotation et modifier le mouvement de rotation en mouvement linéaire.

Malheureusement, les ingénieurs mécaniciens craignent parfois l'utilisation d'engrenages et se fient à l'avènement des commandes électroniques et à la disponibilité des courroies crantées, car la conception d'engrenages robustes pour les machines à grande vitesse et/ou à haute puissance est souvent très complexe. Toutefois, pour les machines dédiées à grande vitesse telles que les transmissions automobiles, les engrenages constituent le moyen optimal pour une perte d'énergie faible, une précision élevée et un jeu faible [15].

## 1.5 Conclusion

Ce deuxième chapitre permet d'approfondir les connaissances sur le processus de profilage de tôles. Dans ce qui suit, la conception se portera sur une machine de profilage de tôles à support standard, entraînée par un moteur électrique et un système d'engrenages.

# Chapitre 2

## Conception et calculs

### 2.1 Préface

Ces recherches sont principalement basées sur la conception et la modélisation d'une machine de formage par laminage pour tôle afin de produire un canal en forme définie avec des dimensions spécifiées, comme indiqué dans la figure (3.1). Le matériau du produit est de l'acier galvanisé en continu Acier S235JR dont les caractéristiques sont définies dans le tableau ci-dessous, la machine produit un profil continu de sorte que la longueur du produit n'affecte pas la conception.

TABLE 2.1 – Caractéristiques du matériau

Module de Young	$E = 210 \text{ GPa}$
Résistance à la traction	$U = 340 \text{ MPa}$
Limite d'élasticité	$Y = 235 \text{ MPa}$
Coefficient de Poisson	$\nu = 0.3$

Le profil final de tôle souhaité est un profil symétrique en forme de « U » avec un angle de droiture de  $60^\circ$  et des pâtes latérales de 15mm, la hauteur de bande finale est de 30mm, les différentes dimensions finales sont représentées dans la figure 3.1 suivante :



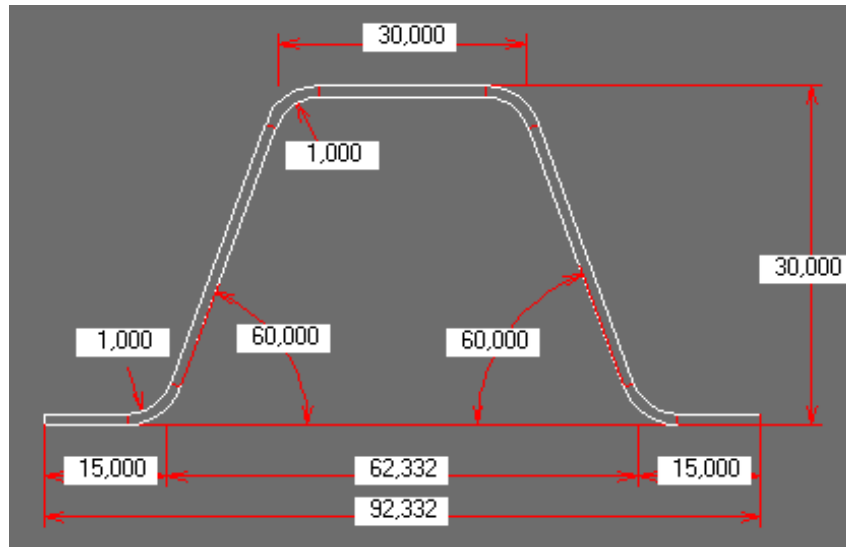


FIGURE 2.1 – Dimensions finales du profil.

## 2.2 Rayon de pliage rapporté à l'épaisseur

En règle générale, le rayon de pliage est imposé par la fonctionnalité du profilé. Cependant il y a lieu de prendre en considération les difficultés rencontrées lors du profilage. Celles-ci sont plus directement liées au rapport rayon sur épaisseur qui doit être maintenu dans une certaine fourchette.

Lorsque ce rapport devient trop grand, on se heurte au phénomène du retour élastique (figure 2.2), qui induit principalement des difficultés dans la maîtrise des angles. Ce phénomène est amplifié lorsqu'on utilise des aciers à faible limite d'élasticité.

Lorsque le rapport rayon sur épaisseur devient petit, le travail par allongement de l'acier et de ses revêtements de protection devient très sévère. Si cet allongement dépasse le seuil admissible par les matériaux, il se produit des casses ou des fissurations. Les fissurations des revêtements de protection conduisent généralement à l'accélération de la corrosion dans ces zones. [3]

Pour une limite d'élasticité de 235 MPa on considère le cas le plus standard, soit  $R_i : t = 1$ .

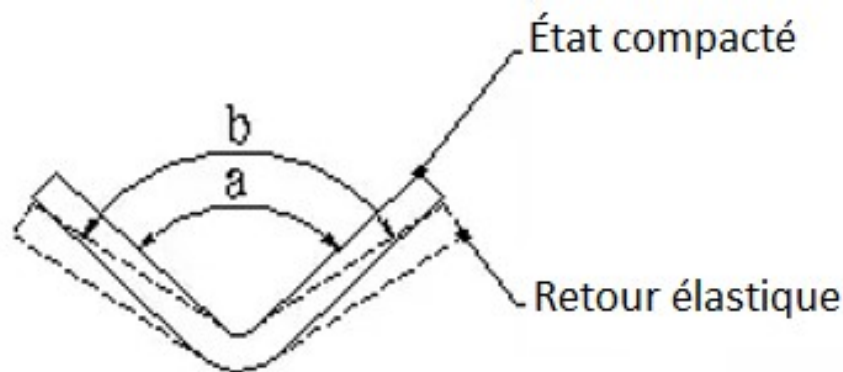


FIGURE 2.2 – Phénomène de retour élastique après pliage.

## 2.3 Calcule de la largeur de bande

Pour calculer la taille du flan, ou en d'autres termes, la largeur de la bande ou du rouleau, la section transversale finale est divisée en éléments droits et courbes. Pour le calcul de la taille des ébauches, il est supposé que les longueurs des éléments droits ne changent pas pendant le formage par laminage. Le calcul de la longueur d'un élément incurvé à l'aide de la longueur de son axe (axe neutre théorique) donne une largeur de départ incorrecte, supérieure à la largeur requise. Pour un calcul précis de la largeur de bande, il est supposé que l'axe neutre théorique de l'élément plié se déplace de la moitié de l'épaisseur vers l'intérieur (Figure 3.2a). Le nouvel emplacement de l'axe neutre «repositionné» est exprimé par la tolérance de courbure « $k$ ». Par exemple, le facteur « $k$ » pour un acier recuit à faible teneur en carbone ayant un rayon de courbure égal à l'épaisseur du matériau ( $R : t = 1$ ) est d'environ 0,33. Cela signifie que le nouvel axe neutre, utilisé pour calculer la taille de la découpe, sera égal à 0,33 fois la distance entre l'épaisseur du métal et la surface intérieure de l'élément plié au lieu de 0,5 fois.[6]

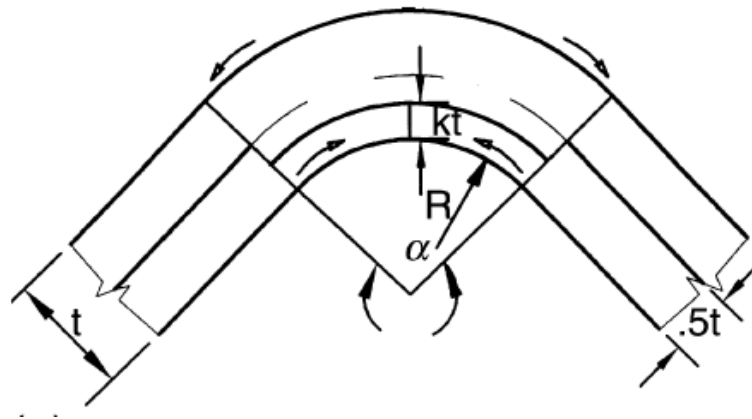


FIGURE 2.3 – Approche théorique.

Les principaux facteurs d'influence sur le facteur « $k$ » empirique sont le rayon intérieur, l'épaisseur du matériau et les propriétés mécaniques du métal. Plus le rapport  $R : t$  est grand, plus le « $k$ » est proche de 0,5. Plus la limite d'élasticité et la résistance à la traction sont grandes et plus l'allongement est faible, plus le « $k$ » est proche de 0,5.

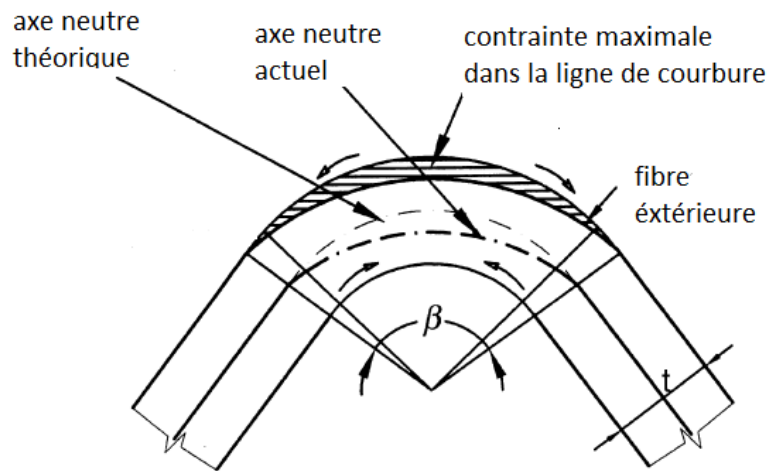


FIGURE 2.4 – Rétrécissement actuel du coin de courbure.

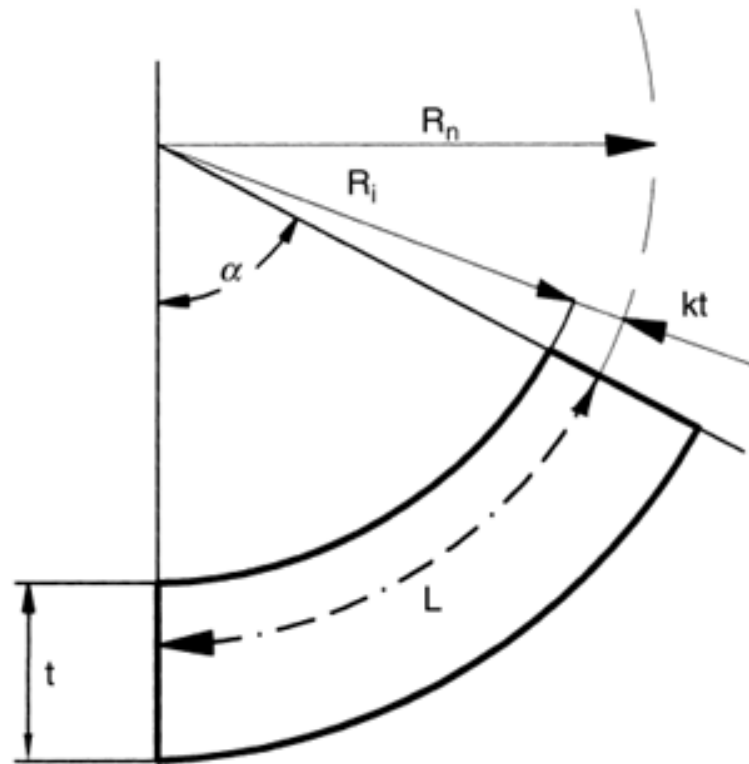


FIGURE 2.5 – Calcul de la longueur incurvée.

Une équation permettant d'établir le facteur «k» mis au point et utilisée dans le logiciel Roll Former's Guide est présentée dans l'équation (2.1) [6].

$$k = 0.567 \frac{\frac{R_i}{t} + 0.25}{1.2 \frac{R_i}{t} + 1} \times \left( 1 + \frac{Y^{2.5}}{250U^{1.41}} \right) \quad (2.1)$$

Avec :

$R_i$  = rayon de courbure intérieur (in.)  
 $t$  = épaisseur du métal (in.)  
 $Y$  = limite d'élasticité (ksi)  
 $U$  = résistance à la traction (ksi)

$$k = 0.567 \times \frac{1 + 0.25}{1.2 \times 1 + 1} \times \left(1 + \frac{(34.0839)^{2.5}}{250(49.3128)^{1.41}}\right)$$

$$k = 0.358$$

La section transversale des pièces formées en galets peut être divisée en éléments droits et incurvés. Les éléments incurvés de la position à plat d'origine peuvent être pliés de différentes manières. Ils peuvent être formés avec une longueur d'arc constante ou avec un rayon constant ou avec un mélange de longueur d'arc constante et de rayon constant. Pour ce qui suit, la méthode de de longueur d'arc constante est appliquée.

### 2.3.1 Méthode de longueur d'arc constante

La longueur totale de la conception LL de l'élément plié, conçue pour le pliage, est formée à chaque passage selon un rayon de plus en plus réduit. Une fois que le "L" est calculé, le rayon intérieur (Ri) à chaque passage peut être calculé à partir de l'angle total de la courbure à ce passage. Le segment à être plié peut être à une extrémité de l'élément incurvé, formant la pièce droite adjacente au rayon fini lors du passage suivant et ainsi de suite (Figure 2.6a). La flexion peut commencer aux deux extrémités de l'élément à plier, puis former les adjacentes et se terminer au centre (Figure 2.6b). Une autre possibilité est de former la partie centrale du rayon fini, en formant ensuite les segments adjacents au passage suivant, etc., jusqu'à ce que la flexion de l'élément à l'angle spécifié soit terminée (Figure 2.6c) ou que la séquence de flexion des éléments puisse être mélangée (Figure 2.6d).[6]

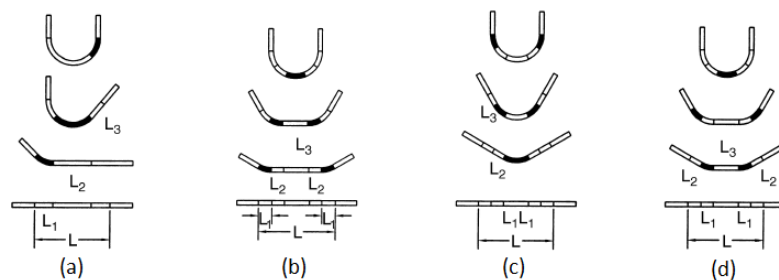


FIGURE 2.6 – Méthode de rayon constant.

Lors du calcul de la largeur de bande, il est supposé que les longueurs des éléments droits ne changent pas pendant le formage. Cependant, si les longueurs des éléments droits ne sont pas indiquées sur les dessins, elles doivent être calculées. Pour les longs calculs manuels, une section typique illustrée à la figure 2.7 et aux équations ci-dessous :

$$A = A_0 - (R_1 + t) \tan \frac{\alpha}{2} \quad (2.2)$$

$$B = B_0 - (R_2 + t) \tan \frac{\alpha}{2} \quad (2.3)$$

$$L = \frac{H}{\sin \alpha} - (2R + t) \tan \frac{\alpha}{2} \quad (2.4)$$

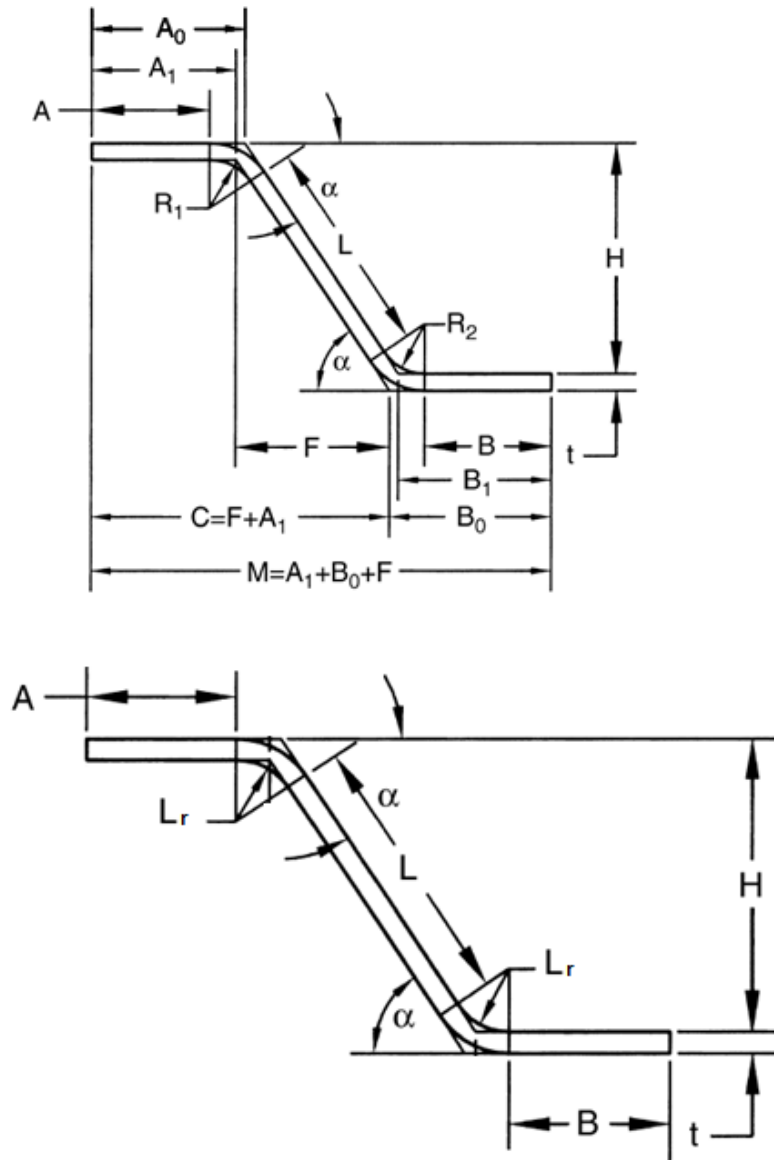


FIGURE 2.7 – Illustration schématique du calcul de la largeur de bande.

Or  $h$ ,  $A_0$  et  $B_0$  et  $\alpha$  sont choisis au préalable depuis les dimensions finales du produit :  
 $A_0 = B_0 = 15\text{mm}$ ,  $h = 30\text{mm}$  et  $R_1 = R_2 = R = t = 1\text{mm}$

On aura alors :

$$A = 13.8453mm$$

$$B = 13.8453mm$$

La méthode de rayon constant stipule que la longueur de l'arc de courbure soit donner par [6] :

$$L_r = 2(R_i + kt) \frac{\alpha}{360} \pi \quad (2.5)$$

$$L_r = 2(1 + 0,35) \frac{60}{360} \pi$$

$$L_r = 1.4221mm$$

Etant donné que le forme finale est symétrique et que le rayon de courbure intérieur est le même pour tous les arcs, on aura alors la même longueur d'arc partout :

$$L_r = 1.4221mm$$

Et

$$L = 30.5709mm$$

On aura finalement :

$$\frac{L_T}{2} = A + B + L + 2L_r \quad (2.6)$$

Soit :

$$L_T = 2A + 2B + 2L + 4L_r = 4A + 2L + 4L_r$$

Donc la valeur de largeur de bande totale est :

$$L_T = 122.0758mm$$

Cette valeur a été vérifiée par le logiciel UBECO Profil en utilisant la méthode de rayon constant.

### 2.3.2 Hauteur de retombé de bord

La hauteur de retombée de bord correspond à la distance entre le bord et le premier pli. La règle est que cette distance ne soit ni trop importante ni trop réduite. Si la hauteur de retombée de bord est trop importante, on obtient des ondulations de cette rive par le phénomène de flambage .Si l'on diminue trop la retombée de rive, on ne disposera pas d'assez de prise pour la former. Le minimum généralement admis est de six fois l'épaisseur [4].

## 2.4 Calcul du nombre de passes

L'une des questions les plus fréquemment posées dans l'industrie du profilage est le nombre de passes nécessaires pour former une section. Le nombre de passes requis est influencé par de nombreux facteurs, notamment les prix concurrentiels. Il n'existe pas de méthode standard pour calculer le nombre optimal de passages requis. Les résultats de la plupart des designers sont basés sur l'expérience.

### 2.4.1 Première méthode

Seules quelques études antérieures se sont concentrées sur le développement de routines spécifiques à chaque profil afin de déterminer le nombre optimal de passes de formage nécessaires. Angel [7] a introduit une méthodologie permettant de déterminer le nombre de passes nécessaires pour former un pli unique dans le processus de profilage. La séquence de formation a été déterminée comme indiqué sur la figure (2.8). Le nombre de passages a été déterminé par l'équation (2.7) où  $n$  est le nombre de passages,  $h$  la longueur de la bride,  $HD$  la distance entre les stations et  $\alpha$ , d'après l'expérience, est égal à 1.42 degrés. Selon ce modèle, le niveau de formation aux dernières étapes est toujours supérieur à celui des premières étapes et est censé réduire les défauts de forme. Les paramètres optimaux déterminés par le modèle ont été vérifiés expérimentalement [7].

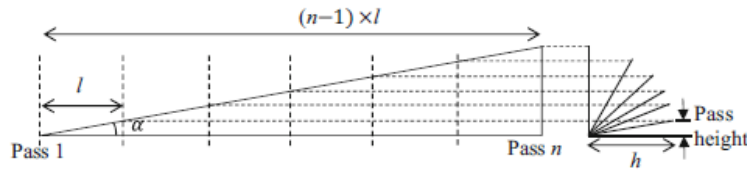


FIGURE 2.8 – Méthode de détermination du nombre de passe par Angel.

La méthode d'Angel utilise le diagramme illustré à la Figure (2.8) dans lequel l'incrément de hauteur vertical au bord augmente uniformément. Cela conduit à un incrément croissant de l'angle de courbure au cours du processus. L'angle  $\alpha$  de la figure (2.8) et le nombre de passages  $n$  sont déterminés à partir de l'équation (2.7) :

$$\cot \alpha = \frac{(n - 1) \times HD}{h} \quad (2.7)$$

$$n = \frac{h \times \cot \alpha}{HD} + 1 \quad (2.8)$$

$HD$  est la distance horizontale entre chaque passe (ou rouleau), cette distance est choisie par le concepteur, dans ce cas  $HD = 300mm$ .

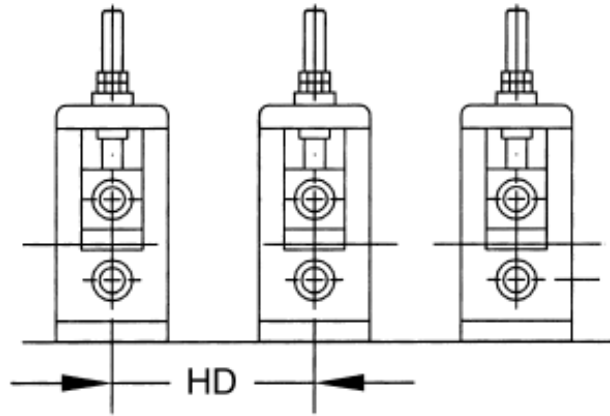


FIGURE 2.9 – Distance horizontale entre chaque station.

Soit :

$$n = \frac{30 \times c \cot \alpha}{300} + 1 = 5.49$$

on retient alors :

$$n = 6 \text{ passes}$$

## 2.4.2 Deuxième méthode

L'une des premières approches consistait à calculer la distance entre le bord de la bande et le bord du produit fini selon une configuration simple et droite (Figure 2.10). Si l'on divise cette distance par une tangente, ceci donne une indication de la longueur totale de la fraise requise pour le formage. En divisant les longueurs totales par l'espacement horizontal entre les passes, on obtient le nombre requis de stations de formage.[6]

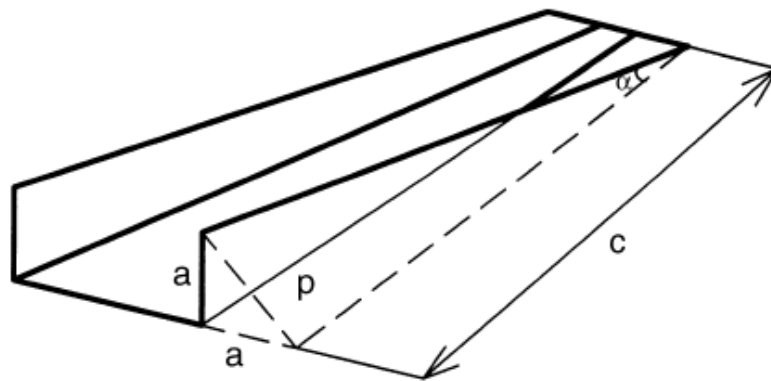


FIGURE 2.10 – Calcul du nombre de passes par George T. Halmos.

On a depuis la Figure (2.10) :

$$p = \sqrt{2a^2} = a\sqrt{2} \quad (2.9)$$



$$\tan \alpha = \frac{p}{c} \quad (2.10)$$

Soit :

$$c = \frac{p}{\tan \alpha} = \frac{a\sqrt{2}}{\tan \alpha} \quad (2.11)$$

Par ailleurs :

$$n = \frac{c}{HD} = \frac{\frac{a\sqrt{2}}{\tan \alpha}}{HD} \quad (2.12)$$

Avec  $a = h = 30mm$ ,  $\alpha = 1.42$  et  $HD = 300mm$   
Alors :

$$n = \frac{\frac{30\sqrt{2}}{\tan(1.42)}}{300}$$

$$n = 5.71$$

On retient  $n = 6passes$  On aboutit au même résultat avec les deux méthodes, soit 6 passes, on rajoute une passe supplémentaire pour de meilleurs résultats et avoir un nombre total de passes :

$$n = 7passes$$

## 2.5 Diagramme de fleurs

Une fois que l'orientation de la coupe a été sélectionnée et que le nombre de passes a été établi, la première étape consiste à localiser un plan de guidage vertical (souvent appelé guide). Un élément sélectionné de la section traversera les stations dans ce plan vertical.

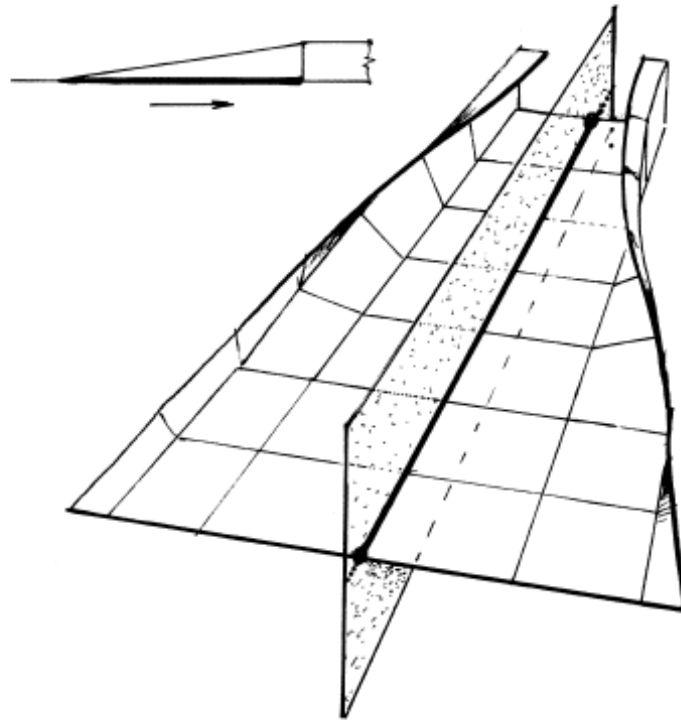


FIGURE 2.11 – Plan de guidage localisé au milieu.

Une fois le plan de guidage localisé, l'étape suivante consiste à décider de la séquence et de l'ampleur de la flexion de chaque élément incurvé à chaque passage. La courbure peut commencer aux bords (comme illustré à la Figure 2.12b) ou au centre (Figure 2.12a), ou toutes les courbes peuvent être formées en même temps. Après que les angles de flexion ont été établis et la section transversale à chaque passage dessinée, le concepteur examine l'accès aux lignes de pliage (ouvert ou caché), les exigences de sur-plier (overbend) pour contrecarrer le retour élastique et la manière dont les angles de formage seront ajustés par les opérateurs en déplaçant les galets supérieurs ou inférieurs.

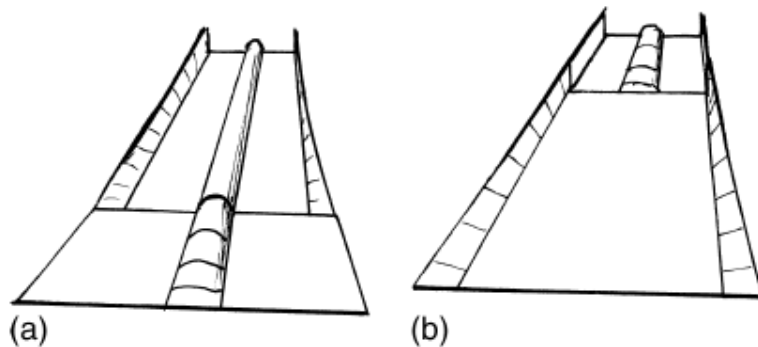


FIGURE 2.12 – La formation de cette section peut commencer avec le cordon central (a) ou avec la lèvre extérieure (b)

On choisi un incrément d'angle de  $9^\circ$  entre chaque station pour ainsi avoir un angle de sur-piage de  $+3^\circ$  (pour une limite élastique de 235 Mpa), ce sur-piage est nécessaire pour surmonter l'effet de retour élastique. [5].

Le tableau ci-dessous décrit où la formation a lieu. Les angles indiqués correspondent au nombre de formages effectués à chaque passage :

TABLE 2.2 – Rayon de courbure de chaque passe.

	$B_i$	$R_i(mm)$
1	$9^\circ$	8.6354
2	$18^\circ$	4.1687
3	$27^\circ$	2.6598
4	$36^\circ$	1.9053
5	$45^\circ$	1.4527
6	$54^\circ$	1.1509
7	$63^\circ$	0.9353

En utilisant les données du tableau ci-dessus et à l'aide du logiciel de « roll forming » UBECO Profil, on obtient le diagramme de fleur suivant (Figure 2.13 et 2.14) :

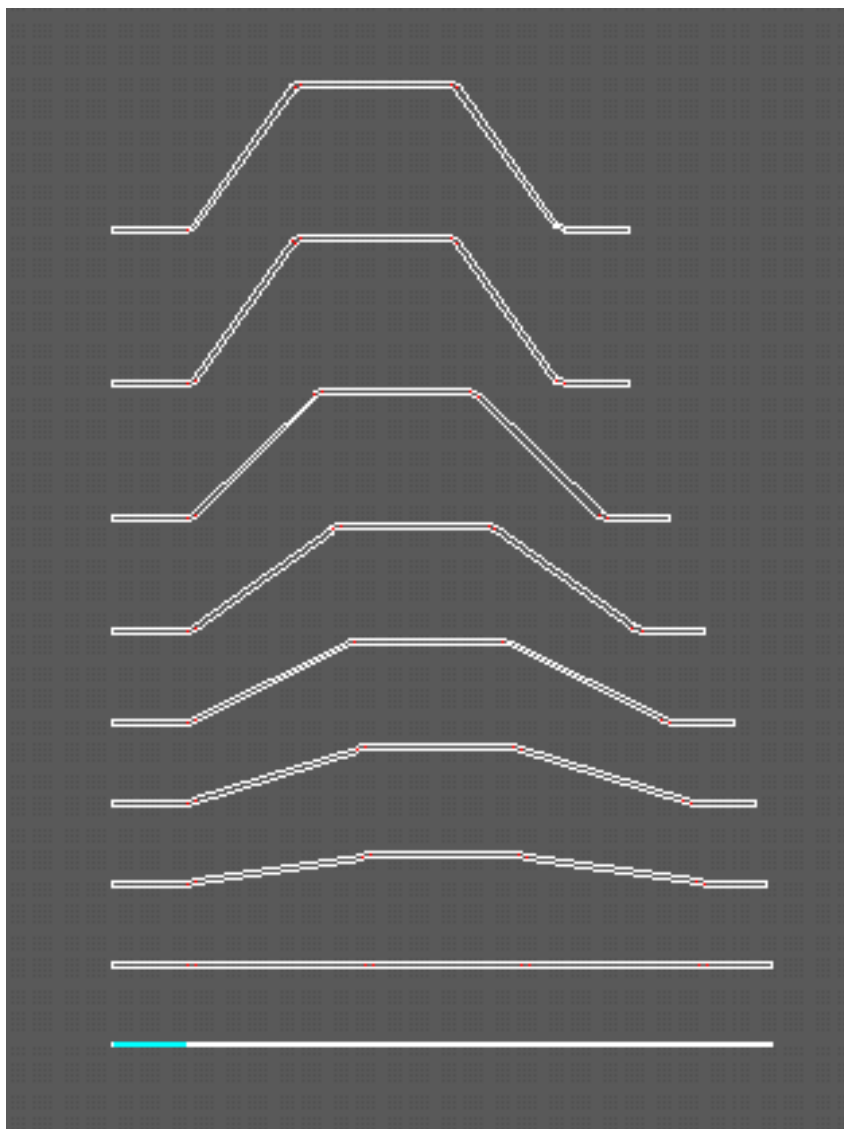


FIGURE 2.13 – Diagramme de fleur généré par UBECO Profil en vue éclatée.

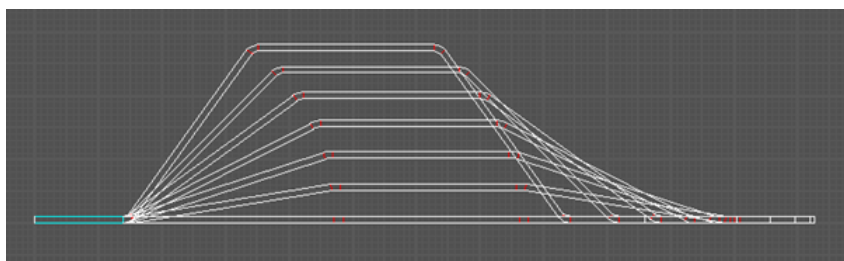


FIGURE 2.14 – Diagramme de fleur généré par UBECO Profil.

## 2.6 Diamètre de l'arbre

Le diamètre de l'arbre est établi par le concepteur, en tenant compte de l'épaisseur maximale, de la résistance maximale et de la largeur maximale du matériau. Il incombe au concepteur de galets d'indiquer avant le début de la conception si, à son avis, le diamètre de l'arbre ne suffit pas à former le produit.[6]

Les diamètres d'arbre, choisis pour les applications spécifiées, dépendent de l'épaisseur et des propriétés mécaniques du matériau à former, de l'espace de roulement (longueur de l'arbre entre supports), ainsi que du type et du nombre de coudes réalisés à chaque passe. Les sélections de diamètres d'arbre ont été presque exclusivement basées sur l'expérience passée. L'équation (2.13) est une tentative faite par George T. Halmos pour calculer les diamètres d'arbre appropriés :

$$d = 1.46 \left[ 0.173 \sqrt[3]{L} + 0.47 + 0.7\sqrt{t} \times \sqrt[6]{\frac{Y}{50}} \right]^4 \quad (2.13)$$

où  $d$  est le diamètre de l'arbre,  $L$  la longueur de l'arbre,  $t$  l'épaisseur du matériau et  $Y$  la limite élastique du matériau. Après calcul on trouve :

$$d = 27.39mm$$

On prendra une valeur supérieur pour une meilleur résistance :

$$d = 30mm.$$

## 2.7 Calcul du moment fléchissant

La pression de contact du galet avec la bande est calculée par la force de formage appliquée au galet de formage. La force de formage nécessaire à la flexion plastique de la bande est calculée à partir du principe de travail virtuel. La relation contrainte-déformation choisie pour le matériau en bande est supposée être du plastique rigide pur montré à la figure (2.15a) Le modèle analytique simplifié de la flexion des bandes en plastique de rayon  $r$  est illustré à la figure (2.15b) Les hypothèses de Kirchhoff – Love's sont supposées pour le modèle de pliage analytique simplifié sélectionné.[2]

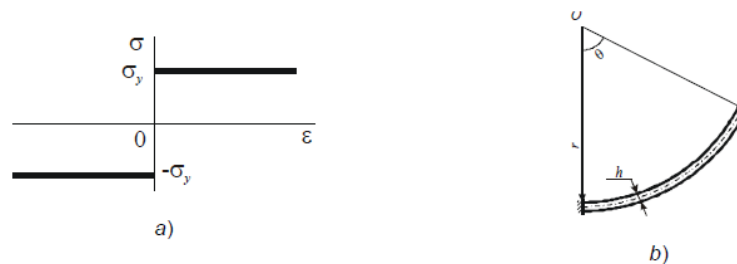


FIGURE 2.15 – Relation contrainte-déformation et b) Modèle analytique du rayon de bande formé pour la modélisation simplifiée de l'usure.

Le moment de flexion pour la déformation plastique rigide pure de la bande est calculé par l'équation (2.14) [2] :

$$M_p = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \sigma_y \times z dz = \int_0^{\frac{h}{2}} \sigma_y \times z dz - \int_{-\frac{h}{2}}^0 \sigma_y \times z dz = \frac{1}{2} \times z^2 \times \sigma_y \Big|_0^{\frac{h}{2}} - \frac{1}{2} \times z^2 \times \sigma_y \Big|_{-\frac{h}{2}}^0 = \frac{h^2}{4} \times \sigma_y \quad (2.14)$$

$$M_p = \frac{30^2}{4} \times 235 = 58.75N \quad (2.15)$$

L'incrément  $\theta$  de l'angle de formation de la bande (voir Figure 2.15b) est calculé en tant que différence entre les angles de courbure de la bande avant et après la zone de contact du ruban.  $\sigma_y$  représente la limite d'élasticité du matériau.

## 2.8 Calcul de la force mise en forme

La force  $F$  requise pour permettre une courbure d'un angle de  $60^\circ$  de la bande est donnée par la formule suivante [1] :

$$F \succ Y \times S \quad (2.16)$$

Avec  $S$  la surface de la bande sur laquelle s'exerce la force et  $Y$  la limite élastique du matériau. La surface  $S$  est déterminée à l'aide du logiciel de CAO SolidWorks.

$$S = 121.68mm^2 \text{ et } Y = 235MPa$$

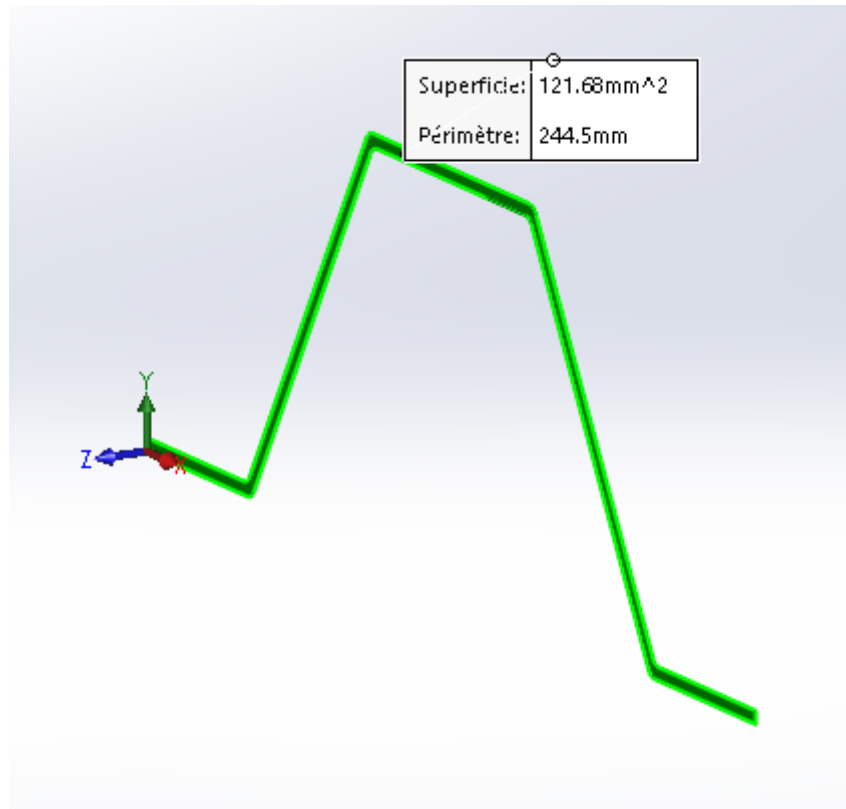


FIGURE 2.16 – Calcul de la surface avec le logiciel SolidWorks.

Donc :

$$F = 121.68 \times 10^{-6} \times 235 \times 10^6$$

$$F = 28.5948kN$$

Ceci est la force nécessaire pour former le métal à  $60^\circ$ , pour obtenir la force nécessaire dans chaque station, on divise par le nombre de passe :

$$F_p = \frac{F}{n} = \frac{28.5948}{7}$$

$$F_p = 4.085kN$$

On prendra un coefficient de sécurité  $s = 3$  :

$$4.085 \times 3 = 12.255kN \approx 13kN$$

## 2.9 Puissance et vitesse d'entraînement des arbres

La plupart des anciens types de profileuses étaient équipées d'un moteur à courant alternatif à une vitesse. Le groupe motopropulseur consistait généralement en un entraînement par courroie en «V» allant du moteur aux galets et à des réducteurs de vitesse individuels pour chaque support. Dans les modèles à faible coût, des combinaisons de chaînes ou d'engrenages ont été utilisées pour la réduction de vitesse et le transfert de

puissance. La vitesse d'entraînement des arbres pour le profilage de tôles à galets est généralement de  $8m/min$  soit environ  $0.13m/s$ .

La puissance du moteur peut être calculée avec la formule suivante [1] :

$$P = F \times v \tag{2.17}$$

Soit :

$$P = 13 \times 0.13 = 1.69kW \approx 1.8kW$$

Le profilage de tôle par galets nécessite une très faible vitesse pour presser et donner un bon produit aux spécifications demandées. Et le taux de production commun tel qu'il est pratiqué dans l'entreprise de fabrication de tuyaux Giad ne dépasse pas 7,5 à 15 mètres par minute. [12]

Le nombre de tour par minute du moteur est donné par la relation suivante [1] :

$$N_{(tr/min)} = \frac{60}{2\pi \times r} v_{(m.s^{-1})} \tag{2.18}$$

Soit :

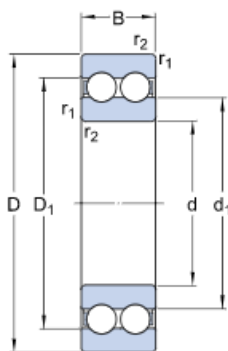
$$N_{(tr/min)} = \frac{60}{2\pi \times 0.126} 0.13$$

Donc :

$$N_{(tr/min)} \approx 20tr/min$$

## 2.10 Calcul de roulements

Le choix du roulement peut être effectué depuis les bibliothèques de roulements de plusieurs constructeurs dans le monde. Le première critère est celui du diamètre de l'arbre. Depuis la bibliothèque du constructeur SKF, pour un diamètre d'arbre de 30mm, le choix s'est porté sur le roulement 4206ATN9 dont les caractéristiques sont résumé dans les figures suivantes [16] :



d	30	mm
D	62	mm
B	20	mm
d <sub>1</sub>	≈ 40.9	mm
D <sub>1</sub>	≈ 51.1	mm
r <sub>1,2</sub>	min. 1	mm

FIGURE 2.17 – Dimensions du roulement 4206 ATN9.



Données de calcul			
Charge dynamique de base	C	26	kN
Charge statique de base	C <sub>0</sub>	20.8	kN
Limite de charge de fatigue	P <sub>u</sub>	0,88	kN
Vitesse de référence		17000	r / min
Vitesse limite		9500	r / min
Facteur de calcul	k <sub>r</sub>	0,05	
Facteur de calcul	f <sub>0</sub>	14.3	

FIGURE 2.18 – Données de calcul du roulement 4206 ATN9.

Le roulement choisi devra être fiable pour le bon fonctionnement de la machine.

### 2.10.1 Calcul de la fiabilité du roulement

On a une puissance de moteur de  $1.8kW$  avec une vitesse de rotation de  $20tr/min$  soit une vitesse angulaire  $\omega = 2.09rad/s$ .

Effort tangentiel :

$$F_t = \frac{2P}{\omega d} = 16098N \quad (2.19)$$

Effort de flexion :

$$F_f = F_t = 16098N \quad (2.20)$$

Effort radial :

$$F_r = F_t \operatorname{tg}(\alpha) = 5859,2N \quad (2.21)$$

Effort axial :

$$F_a = 0 \quad (2.22)$$

Les paliers sont soumis à des charges radiales seulement donc :

$$X = 1; Y = 0$$

La charge dynamique équivalente est donnée par l'équation (2.23) [17] :

$$\begin{aligned}
 P_0 &= X \cdot \sqrt{\left(\frac{\ell_1}{\ell_1 + \ell_r} F_r\right)^2 + \left(\frac{\ell_1}{\ell_1 + \ell_2} F_t\right)^2} \\
 &= 8565,57N
 \end{aligned} \quad (2.23)$$

Avec  $\ell_1$  et  $\ell_2$  les distances séparant les extrémités de l'arbre du centre d'application de la force;  $\ell_1 = \ell_2 = 89mm$

Le facteur de sécurité statique est donnée par :

$$S_0 = \frac{C_0}{P_0} = \frac{20800}{8565,57} \approx 2.43 \succ 2 \quad (2.24)$$

$$S_0 \succ 2$$

Calcul de la durée de vie du roulement :

l'expression de la durée de vie du roulement est donnée par l'équation (3.) suivante [17] :

$$L_{10} = \left( \frac{C}{P} \right)^n = \left( \frac{26000}{8565,57} \right)^3 \quad (2.25)$$

$$L_{10} = 27.97 \text{ Millionsdetours}$$

La durée de vie nominale en heure est donnée par [17] :

$$L_{10h} = \frac{10^6 L_{10}}{60N} \quad (2.26)$$

$$L_{10h} = \frac{10^6 27.97}{60 \times 20} = 23306.1 \text{ heures}$$

Puisque  $S_0 \succ 2$  et la durée de vie du roulement est très importante, on peut dire que le roulement est fiable en vu de la tâche à accomplir.

## 2.11 Design des galets

Les dimensions des galets dépendent de la forme du produit, du nombre de passes et de la conception de l'arbre pour donner le diamètre intérieur. A partir de la forme du produit à chaque étape, la forme des galets peut être conçue en calculant les dimensions de la bande entre chaque jeu de galet. En calculant à chaque fois les longueurs droites et les hauteurs de bande en considérant la longueur de l'arc de courbure reste constante en utilisant les relations suivantes depuis la figure 2.17 [5] :

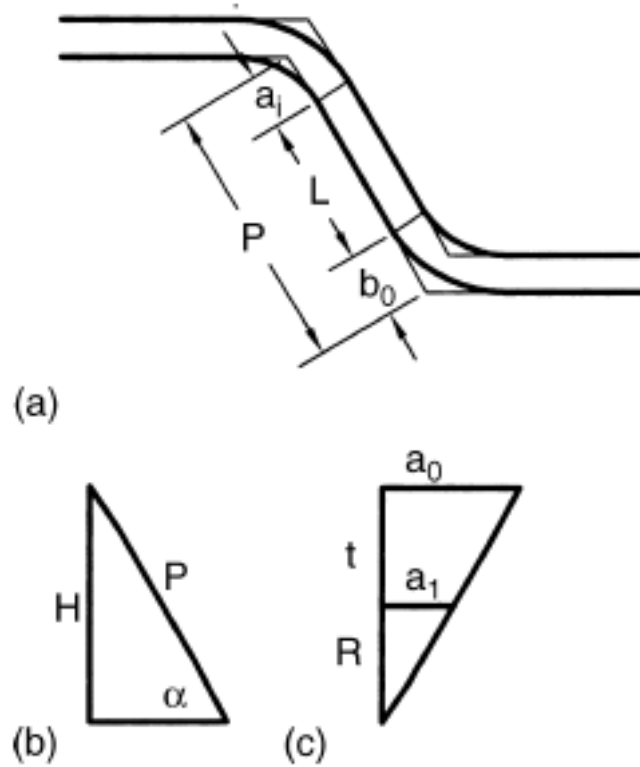


FIGURE 2.19 – Relations géométriques de la bande.

$$L_r = \frac{(R_i + K) \times \alpha}{\frac{180}{\pi}} \quad (2.27)$$

Où  $\alpha$  représente l'angle de formage finale.

$$L_r = \frac{(1 + 0.358) \times 60}{\frac{180}{\pi}} = 1.4221mm.$$

$$H_i = P \sin \alpha_i \quad (2.28)$$

$$L_i = P - (2R_i + t) \tan \frac{\alpha_i}{2} \quad (2.29)$$

$$A = A_0 - (R_i + t) \tan \frac{\alpha_i}{2} \quad (2.30)$$

$$L_{Ti} = 4A_i + 2L_i + 4L_r \quad (2.31)$$

Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau suivant :

TABLE 2.3 – Dimensions des galets.

$\alpha^\circ$	$R_i(mm)$	$L_i(mm)$	$A_i(mm)$	$H_i(mm)$	$L_{Ti}(mm)$
9°	8.6954	30.8826	14.2370	5.0575	124.3736
18°	4.1687	30.8511	14.1814	9.9905	124.1162
27°	2.6598	30.8128	14.1214	14.6775	123.7996
36°	1.9053	30.7669	14.0560	19.0031	123.4462
45°	1.4527	30.7123	13.9841	22.8607	123.0994
54°	1.1509	30.6477	13.9041	27.1555	122.6002
63°	0.9353	30.5709	13.8141	29.9807	122.0758

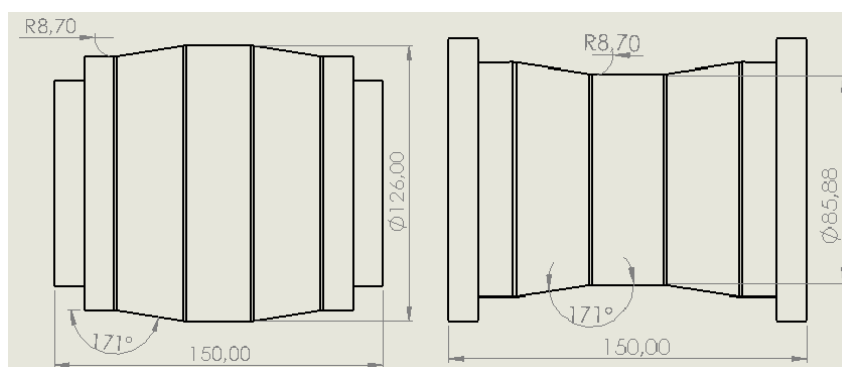


FIGURE 2.20 – Premier jeu de galets

### Première station

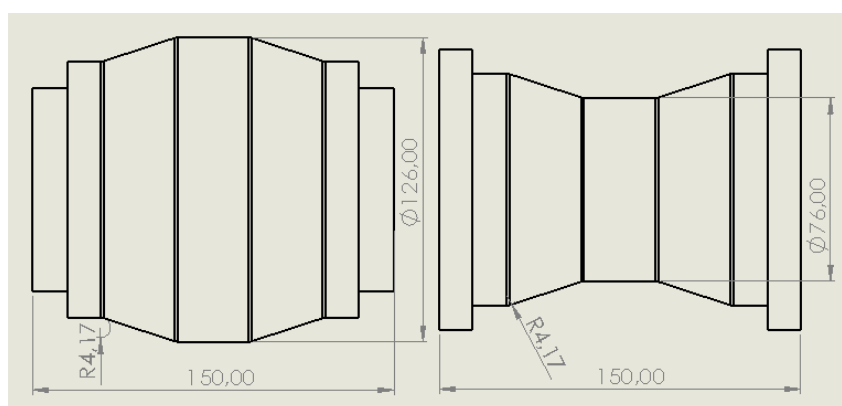


FIGURE 2.21 – Deuxième jeu de galets

### Deuxième station

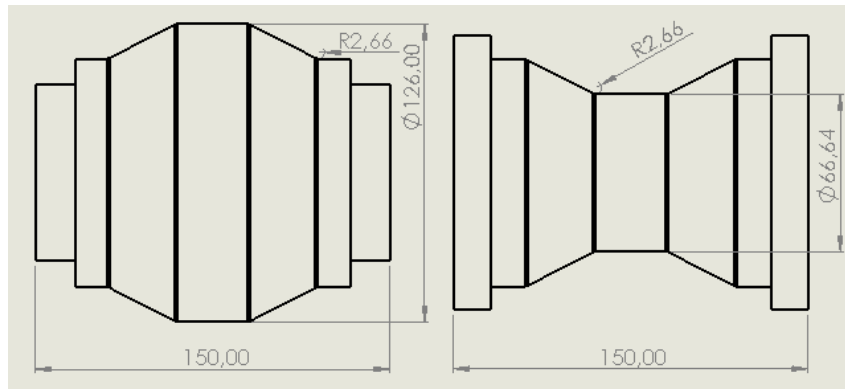


FIGURE 2.22 – Troisième jeu de galets

### Troisième station

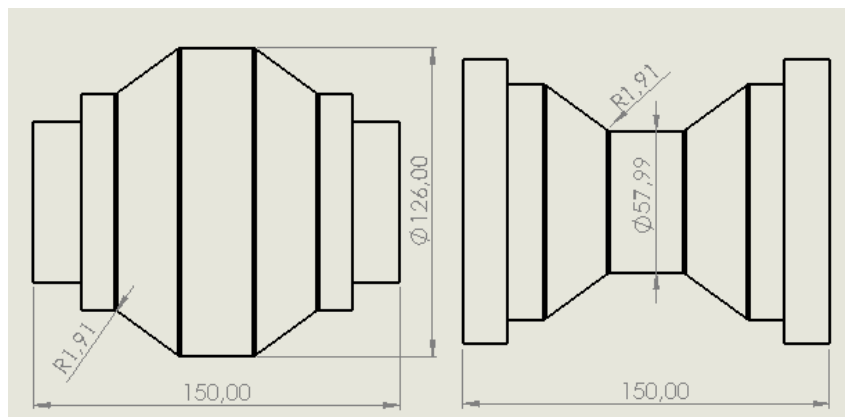


FIGURE 2.23 – Quatrième jeu de galets

### Quatrième station

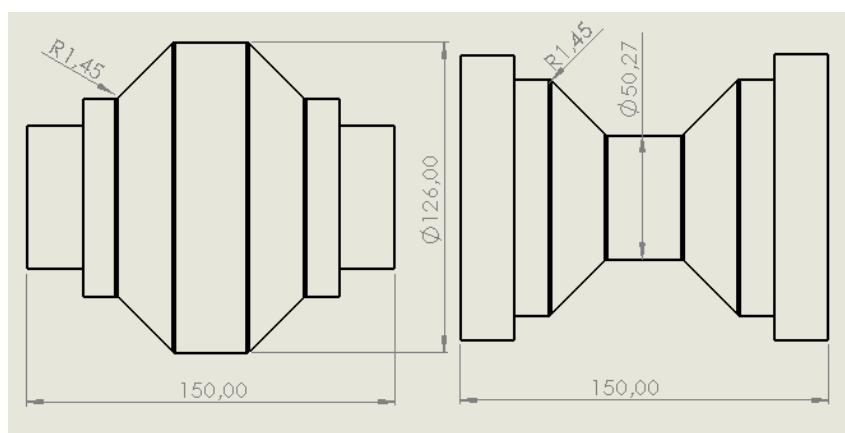


FIGURE 2.24 – cinquième jeu de galets

### Cinquième station

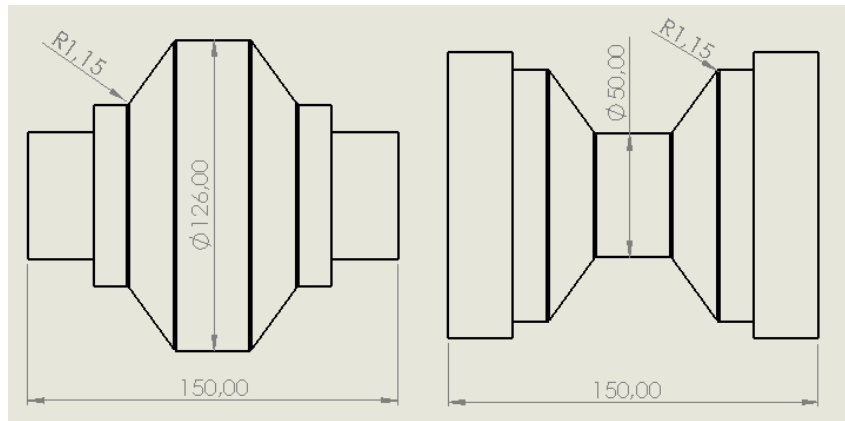


FIGURE 2.25 – Sixième jeu de galets

### Sixième station

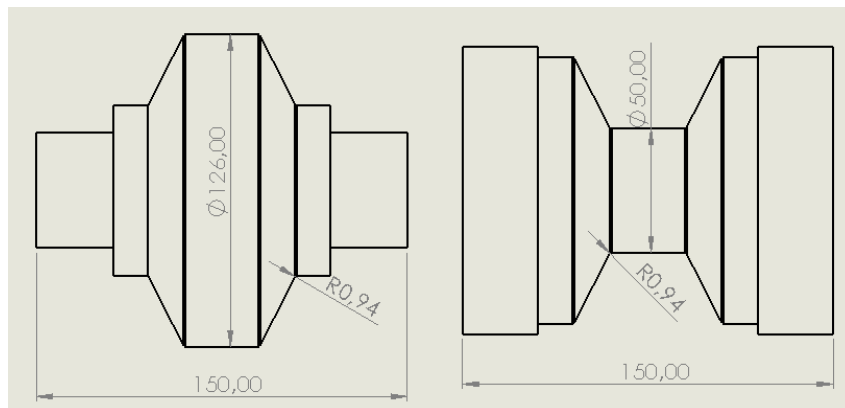


FIGURE 2.26 – Septième jeu de galets

### Septième station

## 2.12 Conclusion

Dans ce chapitre, différentes méthodes de calcul ont été utilisées, ceci permet de comprendre et d'entamer la réalisation des éléments internes de la machine, cette partie permet aussi de réaliser des tests numériques avec les logiciels de simulation 3D tels que SolidWorks.

# Chapitre 3

## Simulation numérique

### 3.1 Préface

La simulation numérique a fait des progrès considérables durant ces dernières années, grâce à l'augmentation de la capacité de calcul sur ordinateur et de stockage des données. La simulation numérique par la méthode des éléments finis est la plus répandue. Elle permet de traiter des problèmes non linéaires associés au comportement du matériau, à la géométrie et au frottement.

La méthode des éléments finis est une méthode numérique largement employée en raison des avantages qu'elle présente : elle est une méthode générale qui permet d'aborder une large gamme de problèmes, elle utilise des programmes qui offrent la possibilité d'effectuer des calculs jusqu'au niveau de précision voulu. Les simulations par la méthode des éléments finis ont été développées en grand nombre au cours des 20 dernières années pour analyser et étudier le comportement des matériaux dans les procédés industriels de formage par déformation plastique.

Du point de vue de l'utilisateur, la simulation numérique des processus de déformation plastique utilise une modélisation des éléments impliqués dans le processus de formage : semi-produit, éléments du système technologique, et des conditions aux limites appliquées ; cette étape est suivie par la simulation numérique, au cours de laquelle on obtient l'évolution pendant le processus de diverses grandeurs : les contraintes et les déformations du corps déformé, l'écoulement du matériau, la forme et les dimensions finales du produit.

### 3.2 Simulation des forces sur les galets

On procède à la simulation numérique sur les galets en utilisant le logiciel de conception et de simulation 3D SolidWorks. Les étapes de la simulation sont :

- L'application du matériau.
- La définition des conditions limites.
- L'application des charges externes.

- Le choix du maillage.
- La résolution avec la méthode des éléments finis.

### 3.2.1 Application du matériau

Le matériau utilisé pour la fabrication des galets est l'AFNOR 42CD4. C'est un acier de traitement pour de multiples applications avec une grande résistance mécanique et une haute ténacité, fortement sollicité, il est souvent utilisé pour les composants automobiles et la construction mécanique à l'état traité, après avoir subi un traitement thermique de trempe et de revenu à, respectivement,  $840^{\circ}C$  et  $200^{\circ}C$ , il peut atteindre une limite d'élasticité de 1500MPa. Le tableau suivant résume les caractéristiques du matériau utilisé :

TABLE 3.1 – Caractéristique du matériau des galets

Résistance à la traction	1900 MPa
Limite d'élasticité	1500 MPa
Allongement	7 %
Masse volumique	$7800 \text{ kg/m}^3$

### 3.2.2 Définition des conditions de déplacements imposés

Les conditions limites appliquées aux galets suggèrent que la partie alésage du galet (logement de l'arbre) soit fixée (Figure 3.1).

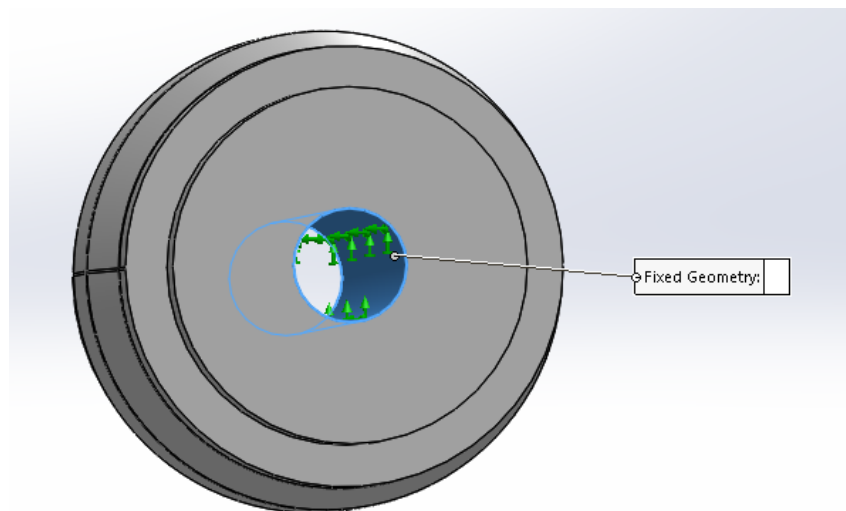


FIGURE 3.1 – Application des déplacements imposés sur le galet supérieur de la première station ( $9^{\circ}$ ).

### 3.2.3 Application des charges externes

Le contact entre le galet et la bande de profil est supposé linéaire, les forces appliquées sont alors réparties sur une ligne le long de la partie active du galet (Figure 3.2). Une



force de 13 kN a été jugée suffisante pour permettre la déformation plastique de la bande.

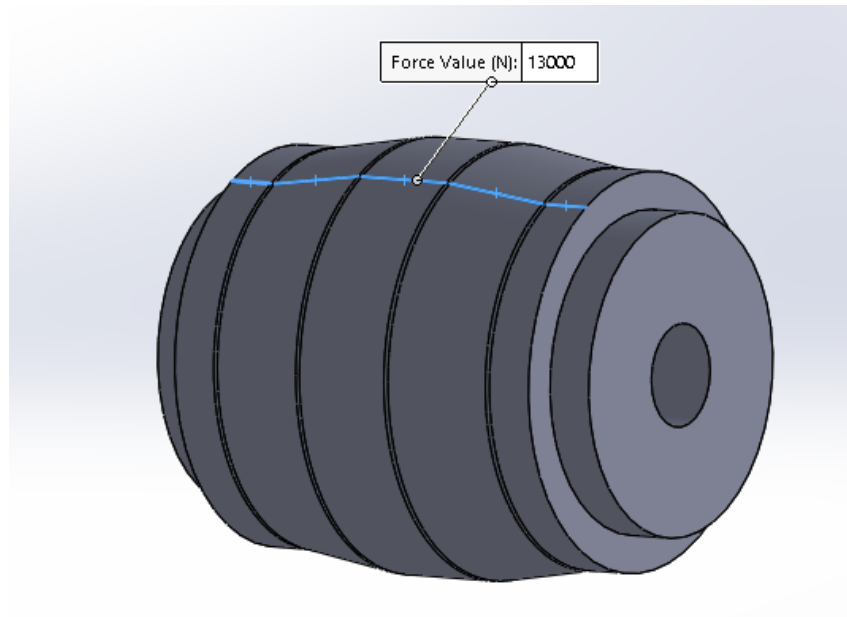


FIGURE 3.2 – Application de forces à direction normale (13 kN) sur le galet supérieur de la première station (9°)

### 3.2.4 Choix du maillage

Le maillage sert à subdiviser les surfaces compliquées à des éléments géométriques faciles à étudier. Il existe trois types de maillage : carré, cube et triangle. Dans ce cas, le maillage triangulaire est utilisé. Le tableau suivant indique les détails de la pièce étudiée : nombre de nœuds, nombre d'éléments et homogénéité du maillage type standard triangulaire.

TABLE 3.2 – Détails du maillage.

Type de maillage	Triangulaire standard
Nombre de nœuds	76865
Nombre d'éléments	53377
Homogénéité	98.3%

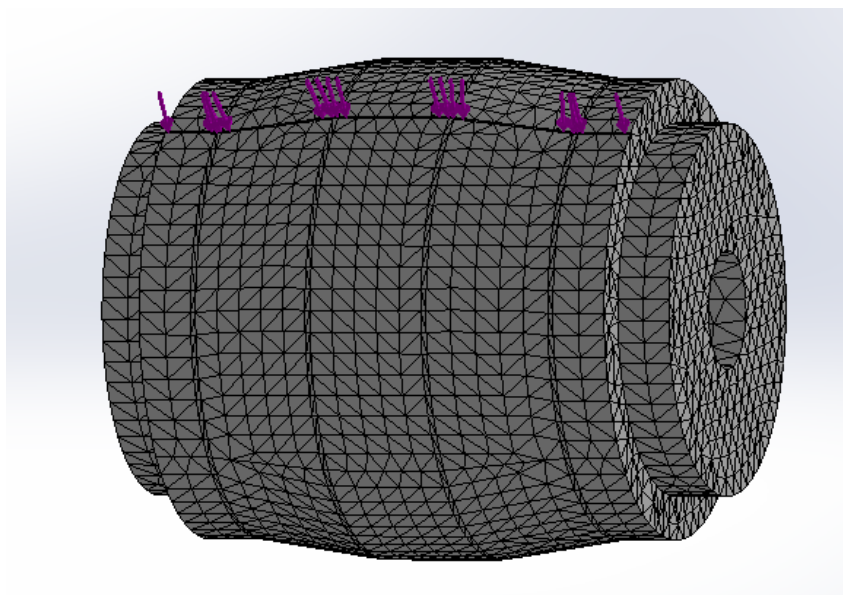


FIGURE 3.3 – Application de maillage triangulaire standard au galet supérieur de la première station (9°).

### 3.2.5 Résolution

L'application des étapes précédentes sur les galets des sept stations montre que le matériau choisi pour la fabrication des galets convient aux types de sollicitations qu'il peut subir. Les figures suivantes montrent quelques résultats obtenus sur les stations : 1, 4 et 7. Les résultats sur les autres stations sont tout aussi concluants.

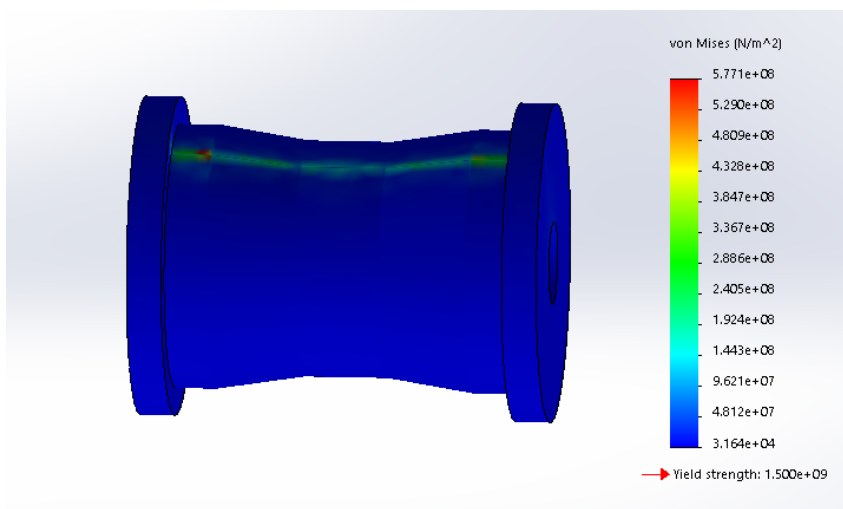


FIGURE 3.4 – Le champ de simulation du galet inférieur de la première station (9°) soumis à une force de 13 kN (contraintes Von Mises).

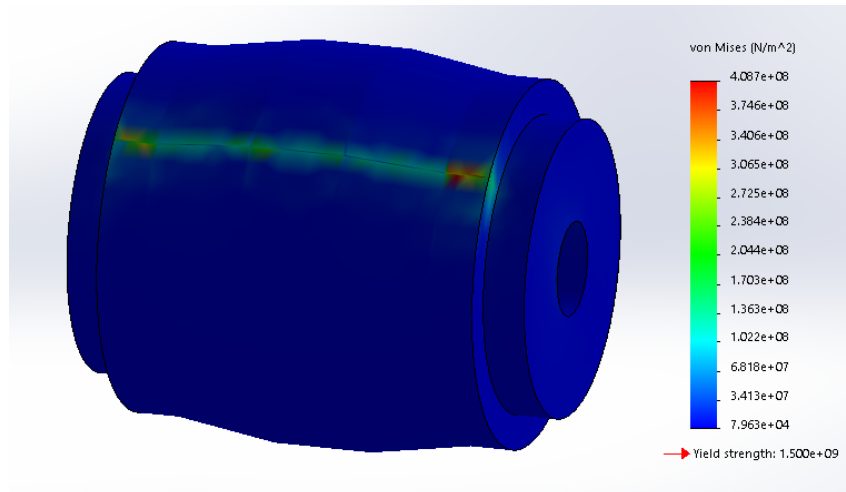


FIGURE 3.5 – Le champ de simulation du galet supérieur de la première station (9°) soumis à une force de 13 kN (contraintes Von Mises).

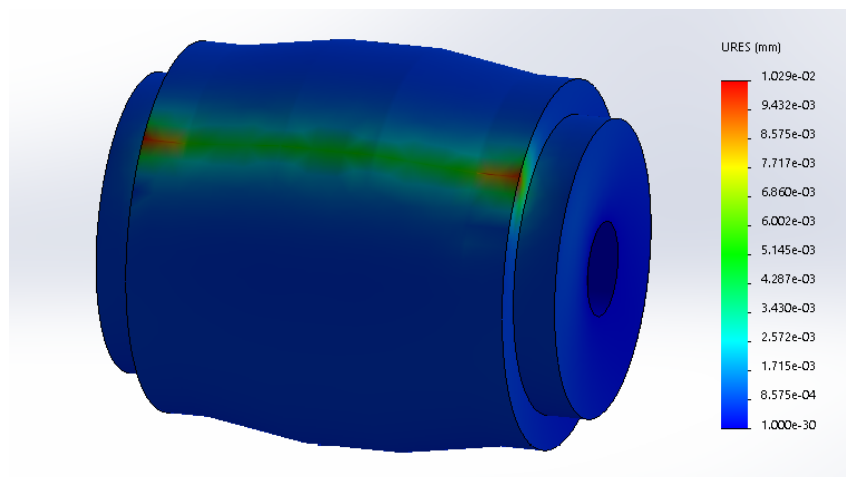


FIGURE 3.6 – Le champ de simulation du galet supérieur de la première station (9°) soumis à une force de 13 kN (Déplacements).

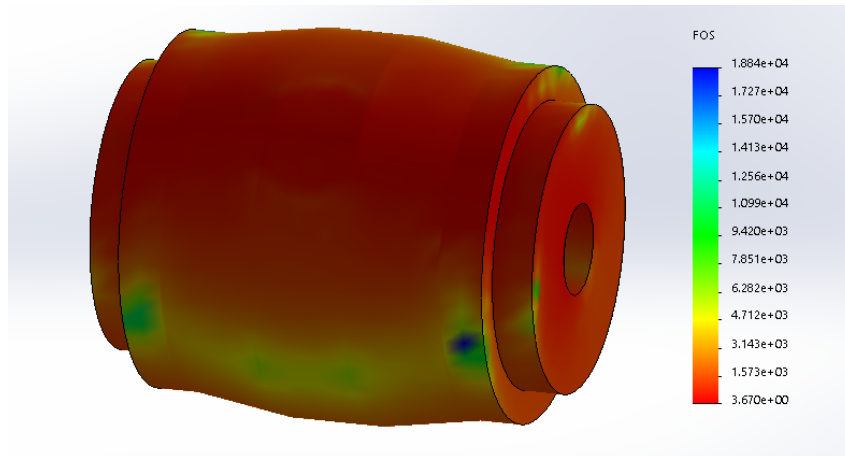


FIGURE 3.7 – Coefficient de sécurité : galets supérieur de la première station (9°)

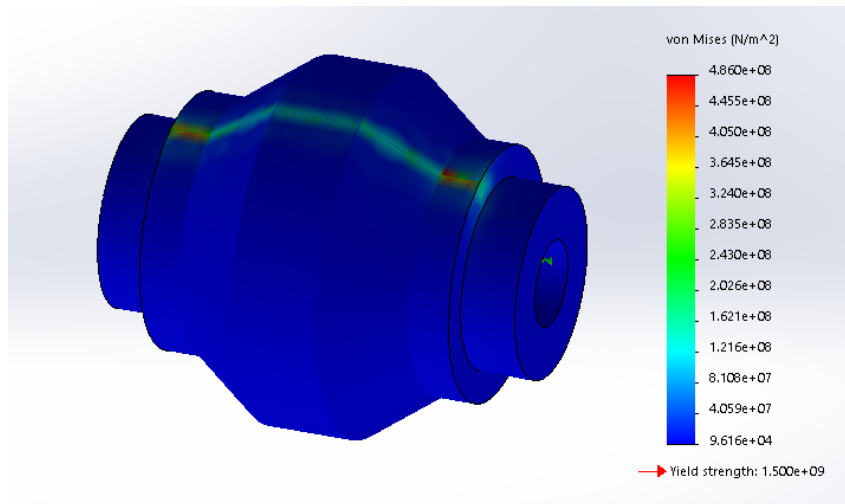


FIGURE 3.8 – Le champ de simulation du galet inférieur de la quatrième station (36°) soumis à une force de 13 kN (contraintes Von Mises).

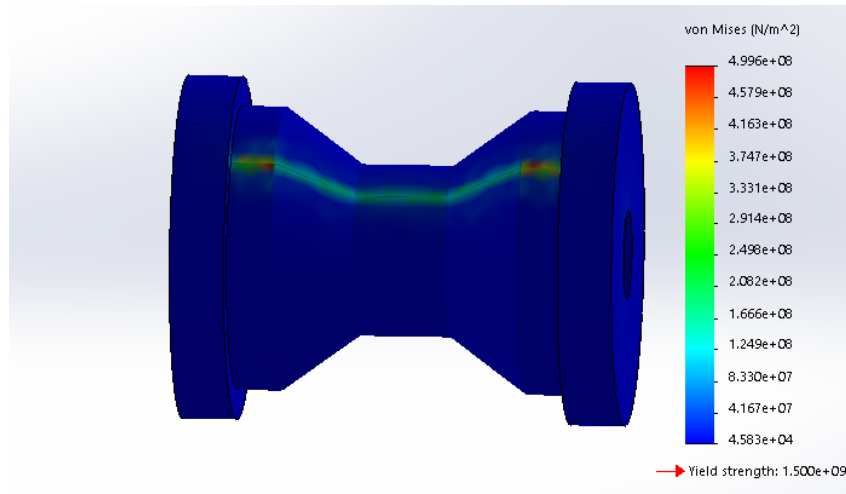


FIGURE 3.9 – Le champ de simulation du galet supérieur de la quatrième station (36°) soumis à une force de 13 kN (contraintes Von Mises).

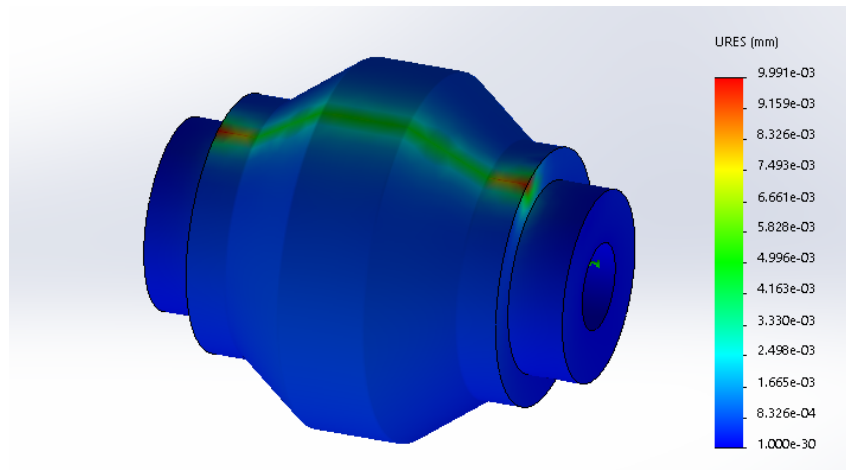


FIGURE 3.10 – Le champ de simulation du galet supérieur de la quatrième station (36°) soumis à une force de 13 kN Coefficient de sécurité : galets supérieur de la quatrième station (36°) (déplacement).

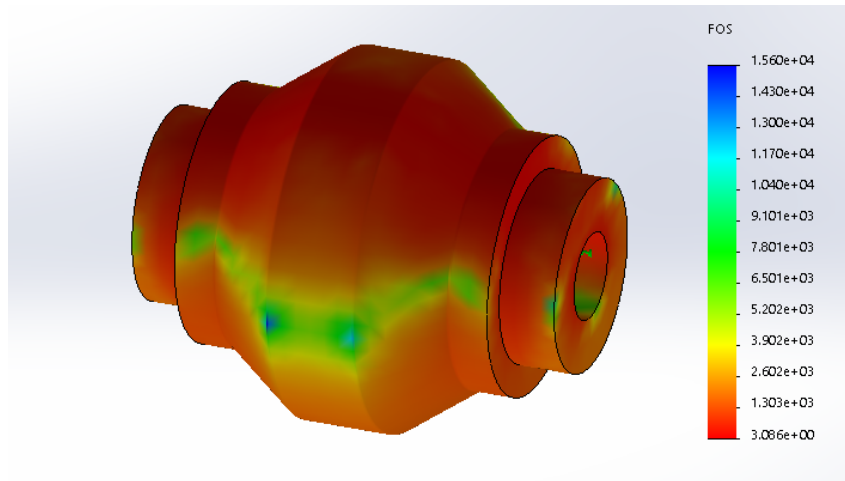


FIGURE 3.11 – Coefficient de sécurité : galets supérieur de la quatrième station (36°)

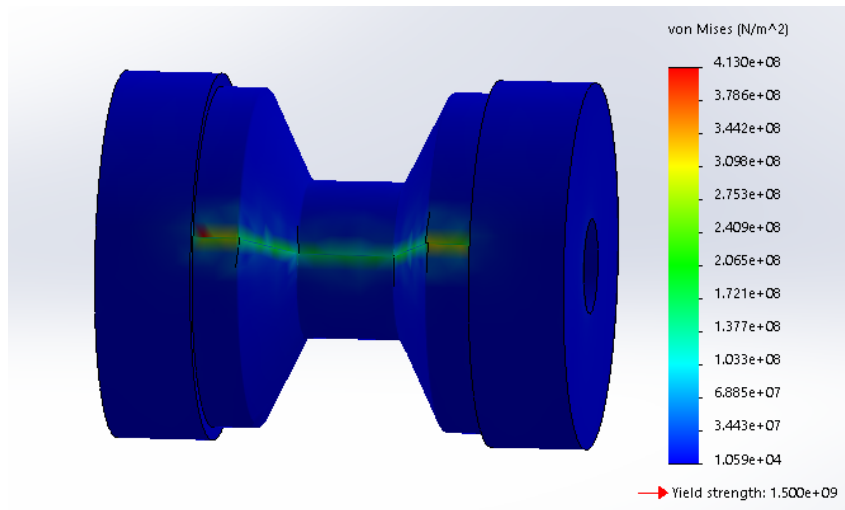


FIGURE 3.12 – Le champ de simulation du galet inférieur de la septième station (63°) soumis à une force de 13 kN (contraintes Von Mises).

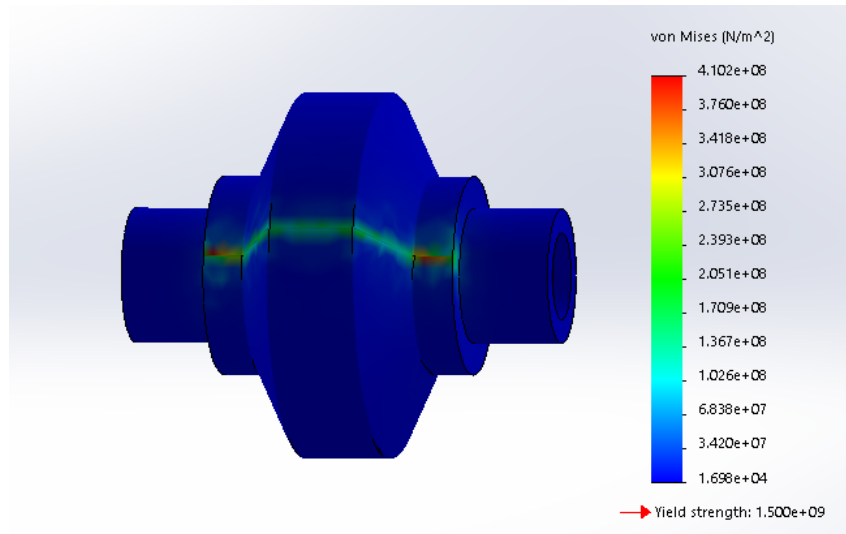


FIGURE 3.13 – Le champ de simulation du galet supérieur de la septième station (63°) soumis à une force de 13 kN (contraintes Von Mises).

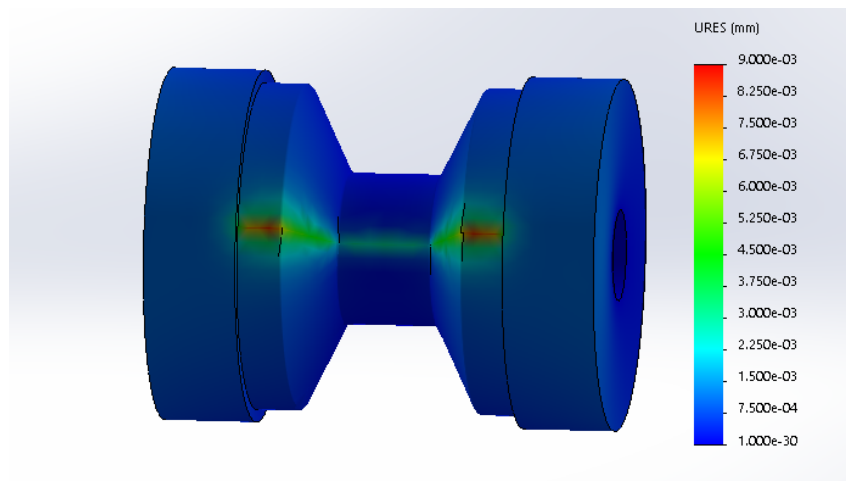


FIGURE 3.14 – Le champ de simulation du galet supérieur de la sixième station (63°) soumis à une force de 13 kN (déplacement).

### 3.2.6 Interprétation des résultats

D'après les résultats obtenus on remarque que la contrainte Max sur l'ensemble des galets est très petite par rapport à la limite élastique ce qui signifie qu'il est loin du domaine plastique et on constate que pour atteindre cette limite d'élasticité il faut appliquer au moins 3 fois (moyenne sur les coefficients de sécurité de tous les galets) l'effort appliquée, cette constante est un coefficient de sécurité supplémentaire. Le déplacement quant à lui est de l'ordre  $10^{-4}mm$  ça reste tolérée sachant que c'est une machine destinée au travail du métal.

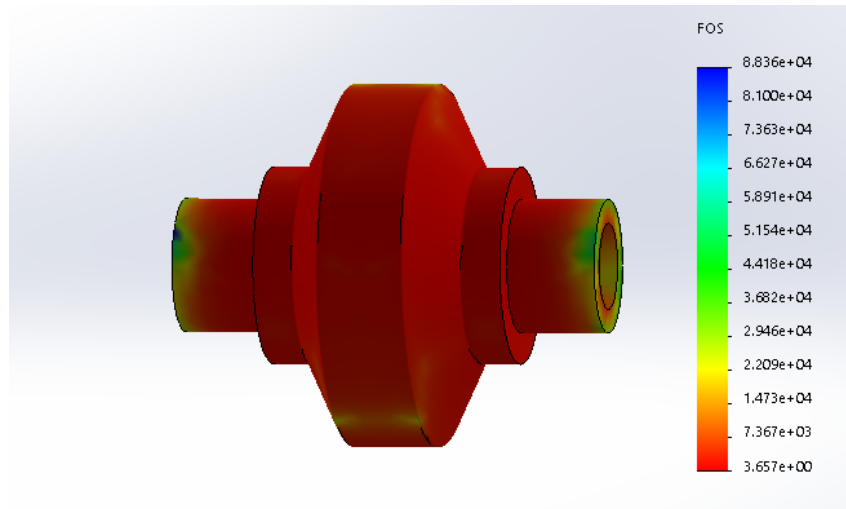


FIGURE 3.15 – Coefficient de sécurité : galets supérieur de la septième station (63°)

### 3.3 Simulation des forces sur la bande profilée

On procède de la même façon que sur les galets en utilisant le logiciel de conception et de simulation 3D SolidWorks. Les étapes de la simulation sont :

- L'application de matériau.
- La définition des conditions limites.
- L'application des charges externes.
- Le choix du maillage.
- La résolution avec la méthode des éléments finis.

#### 3.3.1 Application du matériau de la bande

Les caractéristiques du matériau de la bande ont été cités dans le chapitre précédent, on appliquera notamment une limite d'élasticité de 235 MPa et une résistance à la traction de 340 MPa.



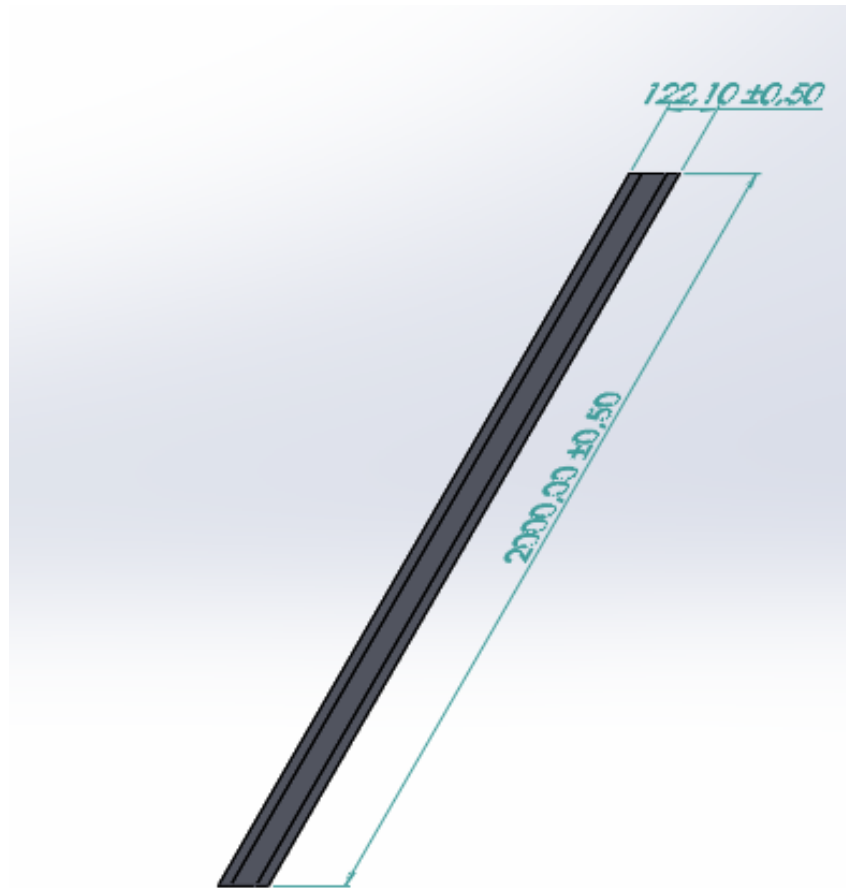


FIGURE 3.16 – Dimensions de la bande.

### 3.3.2 Définition des conditions de déplacements imposés

La bande est fixé au milieu et les force sont appliquées sur les cotés de la bande, ces cotés formeront les pâtes latérales du profil final.

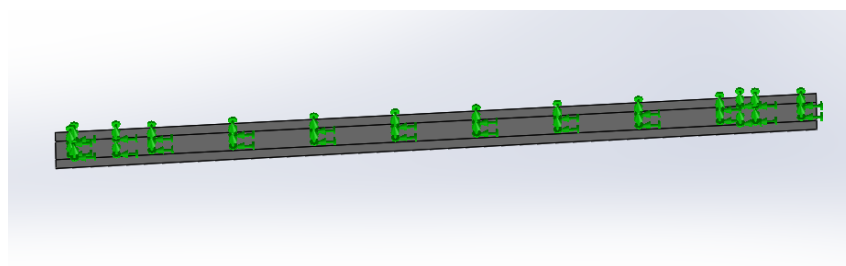


FIGURE 3.17 – Conditions de déplacements imposés

### 3.3.3 Choix du maillage

Un maillage triangulaire est utilisé. Le tableau suivant indique les détails de la pièce étudiée : nombre de nœuds, nombre d'éléments et homogénéité du maillage type standard triangulaire.

TABLE 3.3 – Détails du maillage de la bande

Type de maillage	Triangulaire standard
Nombre de noeuds	38627
Nombre d'éléments	18629
Homogénéité	98%

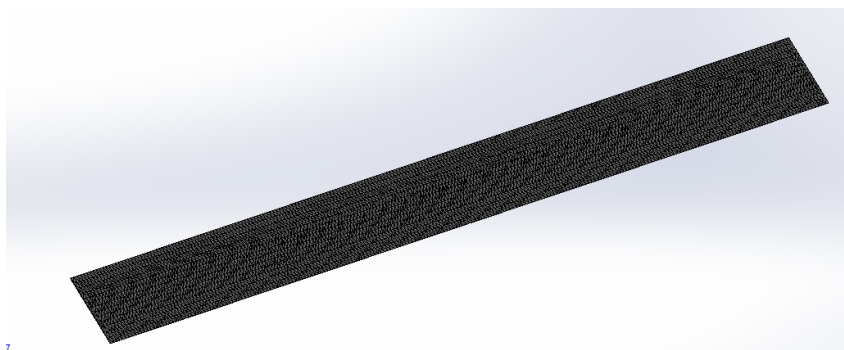


FIGURE 3.18 – Maillage de la bande.

### 3.3.4 Application des forces sur la bande

Le bord médian est fixé (voir figure 3.19) la force agissant sur les deux bords de la tôle 13 KN.

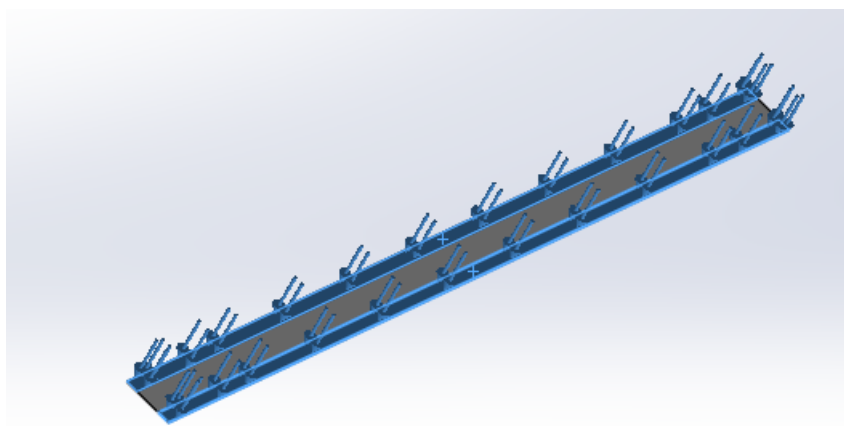


FIGURE 3.19 – Forces appliquées sur la bande (13 kN)

### 3.3.5 Résolution

Les résultats obtenus sont représentés sur la figure suivante :

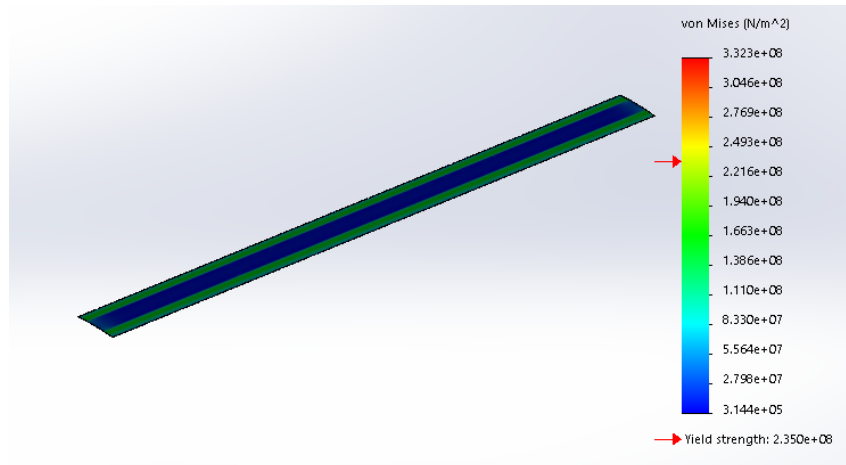


FIGURE 3.20 – Le champ de simulation de la bande soumise à une force de 13 kN (contraintes Von Mises).

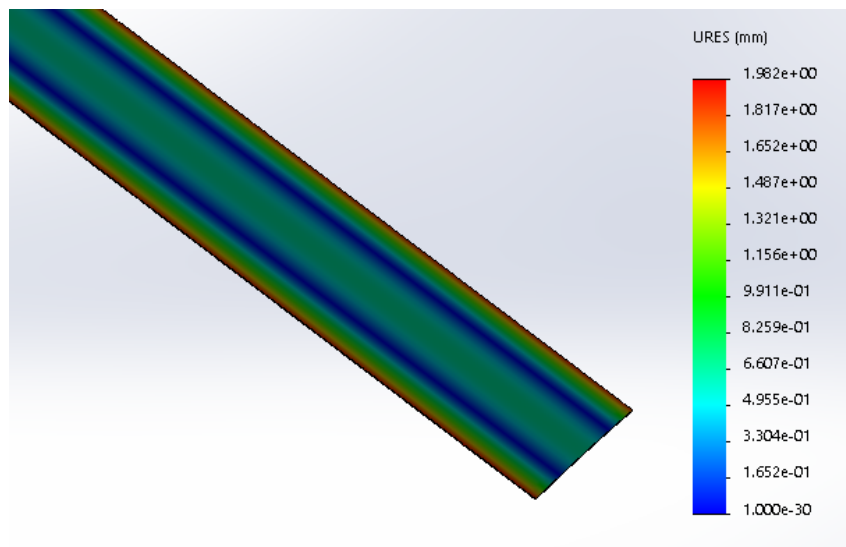


FIGURE 3.21 – Le champ de simulation de la bande soumise à une force de 13 kN (Déplacement).

### 3.3.6 Interprétation des résultats

D'après les résultats obtenus on remarque que la contrainte Max sur la bande dépasse la limite d'élasticité du matériau utilisé sans pour autant atteindre la le seuil de rupture, ceci permet donc une déformation permanente de la bande, étape essentielle lors de chaque passage dans les stations. Le déplacement est de l'ordre 1 à 2mm, des valeurs expliquées par la déformation plastique du matériau.

## 3.4 Conclusion

Dans ce chapitre la notion de simulation par éléments finis a été abordée, cette technique constitue une étape cruciale pour toute conception de pièces mécaniques. L'utilisation de l'outil informatique permet de se familiariser avec les différents logiciels qui peuvent être la raison d'un gain de temps précieux.

# Conclusion générale

Au terme de ce projet de fin d'études, une brève rétrospective permet de dresser le bilan du travail effectué avec ses difficultés, ses contraintes, mais surtout le supplément de formation si riche dont j'ai eu la chance de bénéficier. La conception a été faite de manière à développer la machine avec les avantages suivants : cadence de production continue, des produits symétriques, de haute qualité, sans opérateur qualifié, moins de poids, petite taille, ajustable à une variété de produits dès la conception de nouveaux jeux galets, moins de coûts et plus de sécurité. Les éléments de la machine ont été conçus, simulés, analysés et modélisés.

En effet, il fallait avoir un aperçu général mais aussi assez exhaustif sur le fonctionnement d'une profileuse de tôles à galets, ses différents éléments en l'occurrence le domaine du formage de métaux. En effet, j'ai réussi dans un premier temps à identifier tous critères fonctionnels critiques de la machine de profilage. J'ai utilisé beaucoup des méthodes pour la résolution de ce problème en adoptant la démarche suivante : j'ai commencé par l'analyse fonctionnelle pour étudier les fonctionnalités de la future machine de profilage en générant à la fin des solutions techniques sous forme d'un groupe de concept, après j'ai fait un calcul conceptuel pour trouver les paramètres mécaniques comme les efforts appliqués sur la bande du profilé, le diamètre de l'arbre..., par la suite, et suivant des méthode de calculs précises j'ai pu aboutir à un dimensionnement acceptable de la machine, j'ai ensuite concrétiser ce dernier à l'aide de logiciel de CAO SolidWorks pour les différents éléments énoncés dans la matrice morphologique comme ( les galets, les arbres, les roulements, les clavettes, le moteur. . . .).

A la fin de cette conclusion, je tiens à remercier encore une fois les personnes qui m'ont aider dans la réalisation de ce modeste travail de près ou de loin.

# Bibliographie

- [1] Hammam Abbas Elshiekh. Projet de fin d'étude : Design and modeling study of roll forming machine for a U-Shape channel products. Mémoire
- [2] Alexander S. Galakhar<sup>1</sup>, Paul A. Meehan<sup>1</sup>, William J.T. Daniell<sup>1</sup>, and Shi Chao Ding. A method of approximate tool wear analysis in cold roll forming
- [3] Suzuki, H., et al., Experimental Investigation on Cold-Roll-Forming Process II
- [4] Makhloufi lydia. Projet de in d'étude : Conception d'une profileuse de tôles.
- [5] <https://www.roll-kraft.com/>
- [6] Halmos, G.T., Roll Forming Handbook, ed. G.T. Halmos. 2006.
- [7] Angel RT (1949) Designing tools for cold roll forming. Iron Age.
- [8] Dr. Sadhu Singh,"Machine design "latest edition.
- [9] Schuler : Metal Forming Handbook.
- [10] <https://www.manufacturingguide.com/en/roll-forming>
- [11] Cain, E. 1976. A basic approach to coldroll-forming. FMA 1976.
- [12] <http://www.giad.com/>
- [13] <https://en.wikipedia.org/wiki/Rollforming>
- [14] D.VHutton, Fundamentals of Finite Element Analysis, McGraw-Hill Companies.
- [15] Monid, V.A., Podyminogin. Characteristics of the roll pass design for cold bending
- [16] <https://www.skf.com/>
- [17] Pr. M. BOUAZIZ. Cour de construction mécanique : Guidage en rotation (Roulement).

# Annexe A

4 3 2 1

F

F

E

E

D

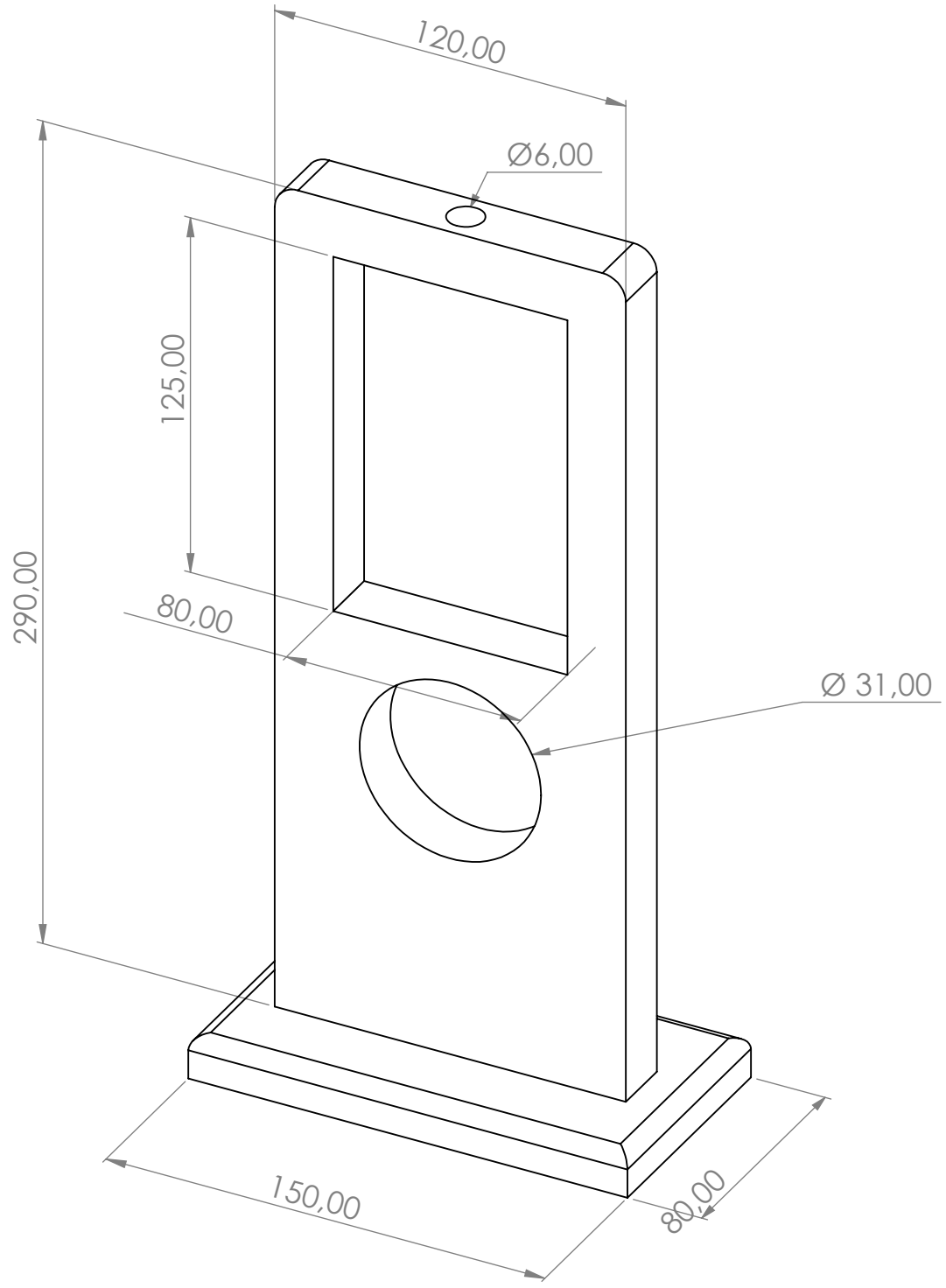
D

C

C

B

B



Ecole Nationale Polytechnique

Echelle : 1:2

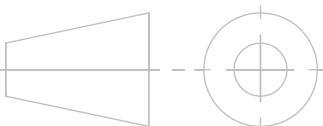
06/07/2019

Support galet

PFE

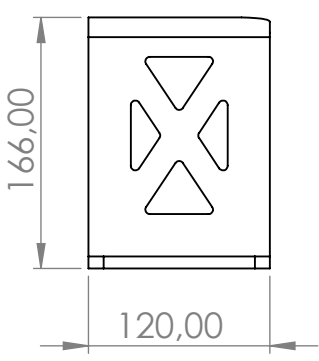
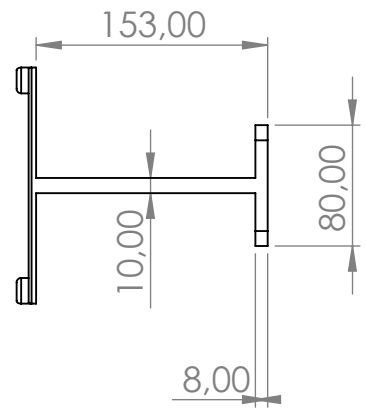
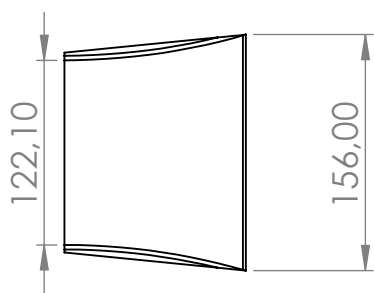
Walid FEKKANE

Génie mécanique



4 3 2 1





Ecole Nationale Polytechnique

Echelle : 1:5

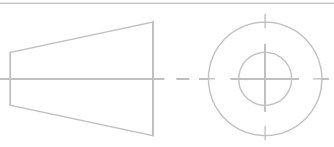
**Guide d'entrée**

PFE

06/07/2019

Walid FEKKANE

Génie mécanique



4 3 2 1

F

F

E

E

D

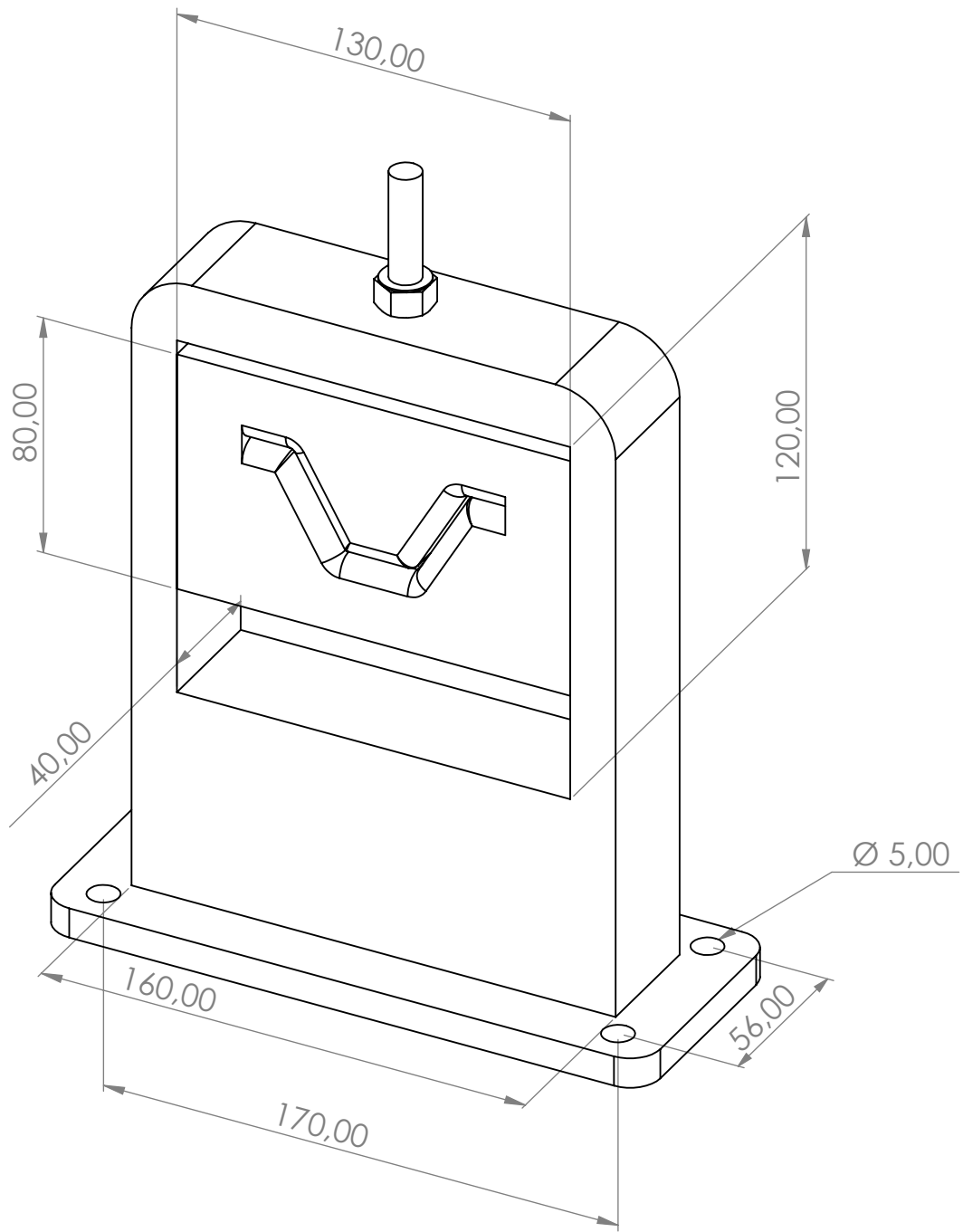
D

C

C

B

B



Ecole Nationale Polytechnique

Echelle : 1:2

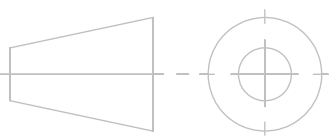
Ajusteur de bande

PFE

06/07/2019

Walid FEKKANE

Génie mécanique



4 3 2 1

A

A

# Annexe B

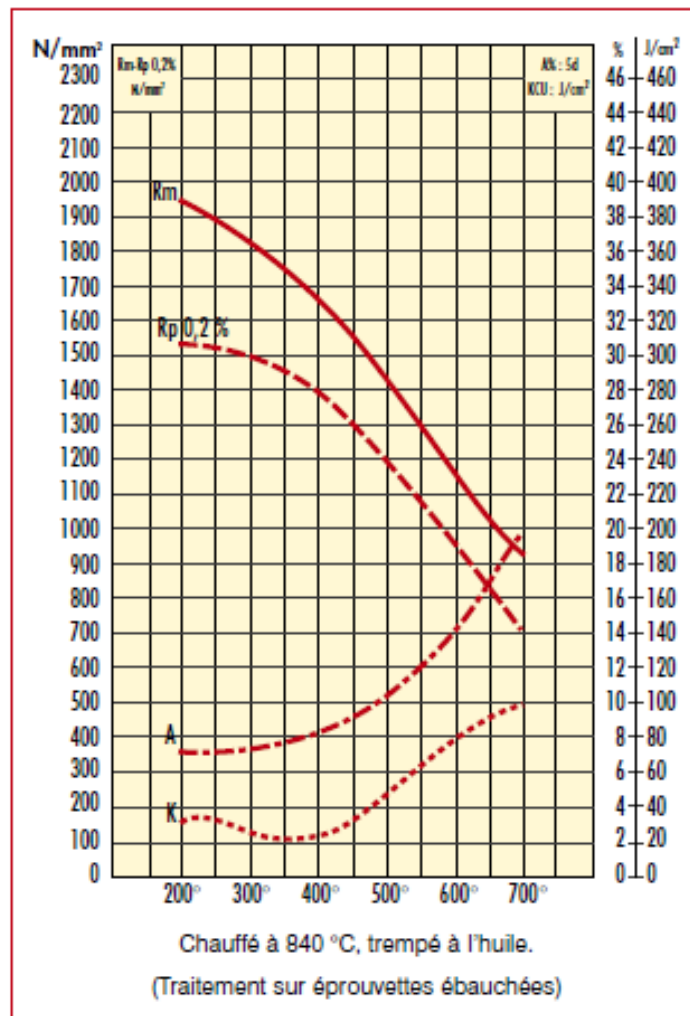


FIGURE 6.1 – Caractéristiques mécaniques du 42CD4 suivant la température de revenu