

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOULOU D MAMMERI DE TIZI-OUZOU

FACULTE DE GENIE DE LA CONSTRUCTION

DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

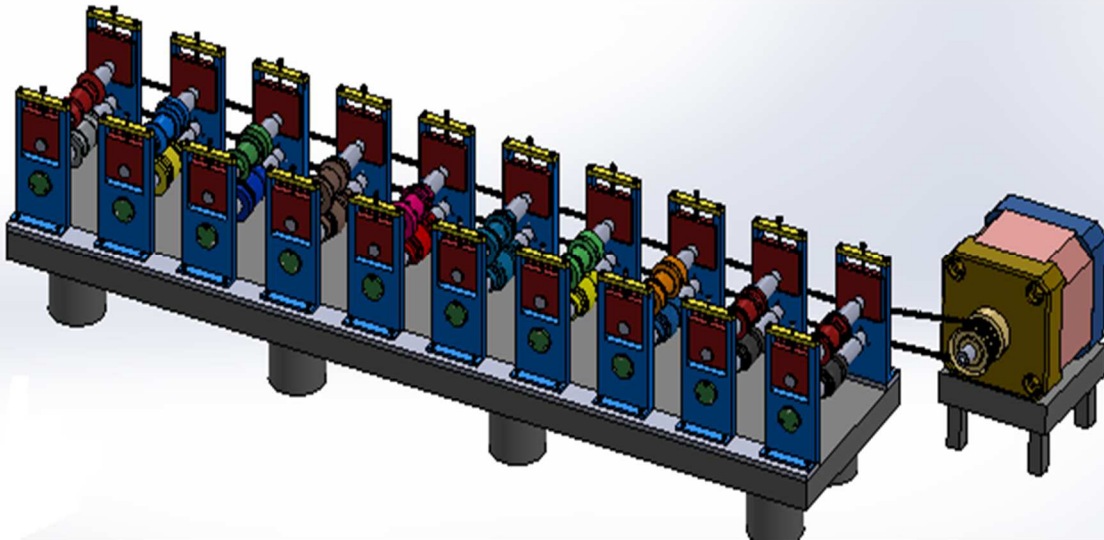
Master académique en Génie Mécanique

Spécialité : Construction Mécanique

Mémoire de fin d'études

Thème

Conception d'une profileuse et étude du procédé de profilage – Simulation
d'un galet soumis à la fatigue



Encadreur :

Mr. OULD OUALI Mohand

Co-Encadreur :

Mr. KHRIS Aghiles

Réalisé par :

Melle MEHANI Djamila

Melle TOUAT Amel

Promotion2019/2020

REMERCIEMENTS

Notre travail a été réalisé au sein de laboratoire d'Elaboration et Caractérisation des Matériaux et Modélisation (LEC2M), Université de Mouloud Mammeri TIZI-OUZOU

Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu tout puissant, de nous avoir armés de courage, de patience, et santé pour nous avoir permis de réaliser ce modeste travail.

Toute notre gratitude et remerciements pour notre encadreur Mr. OULD OUALI Mohand professeur à l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, d'avoir proposé ce thème fascinant, pour son expertise ainsi que tout le soutien et les conseils qu'il nous a fourni tout au long de ce travail.

Nous tenons particulièrement à remercier Mr. KHRIS Aghiles pour son aide, ses conseils et ses encouragements.

Nos remerciements également aux travailleurs de l'usine ALUMEF,

Et aussi les doctorants de laboratoire LEC2M.

Nous adressons nos vifs et sincères remerciements aux membres de jury pour avoir accepté de juger notre travail.

Enfin, nous remercions toutes les personnes, qui ont contribué de près ou de loin, directement ou indirectement à l'aboutissement de ce projet de fin d'étude.



DÉDICACE

Je dédie ce modeste travail à

Mes chers parents, merci pour tout le soutien et l'amour que vous m'avez donné depuis mon enfance, et J'espère que vos bénédictions m'accompagneront toujours, le Dieu leur accorde une longue vie.

Ma sœur pour l'inspiration qu'elle m'a donnée, je le souhaite tout le bonheur de monde.

Mes frères, mon grand père et notre petite Anaïs, que Dieu le tout puissant les protège et les gardes.

Une personne très chère à mon cœur, qui ma encouragée et soutenu dans les moments les plus durs.

Toute ma famille et mes amies qui m'ont accompagné et envoyé de la force.

Mon binôme avec laquelle j'ai partagé ce travail.

MEHANI Djamila



DÉDICACE

Je dédie ce modeste travail à

Mes chers parents, merci pour tout le soutien et l'amour que vous m'avez donné depuis mon enfance, et J'espère que vos bénédictions m'accompagneront toujours, le Dieu leur accorde une longue vie.

Mes sœurs, je les souhaite tout le bonheur de monde.

Mes frères, et notre petit Syphax, que Dieu le tout puissant les protège et les gardes.

Toute ma famille et mes amis qui m'ont accompagné et envoyé de la force.

Mon binôme avec laquelle j'ai partagé ce travail.

TOUAT Amel

Sommaire

Sommaire

Introduction générale	1
-----------------------------	---

Chapitre I : Bibliographique

I.1.Introduction.....	3
I.2. Les procédés de mise en forme.....	3
I-2-1-Mise en forme	3
I-2-2-Mise en forme par écrasement.....	3
I-2-3-Mise en forme par déformation	6
I-3-Profilage.....	8
I-3-1-Historique sur le profilage des tôles	8
I-3-2-Définition.....	9
I-3-3-Définition des profilées	10
I-3-4-Principe de profilage.....	10
I-3-5-Règle de conception des outillages.....	12
I-3-6-Les métiers du profilage	15
I-3-7-Types de profilés	16
I-3-8-Les capacités du profilage	17
I-3-9-Fabrication des profilés	18
I-3-10-Les profileuses.....	18
I-3-11-Pourquoi utiliser des accessoires en profilage.....	19
I-3-12-Comment choisir ses accessoires de profilage	20
I-3-13-Avantage et inconvénients du profilage	20
I-3-13-1-Avantage du profilage	20
I-3-13-2-Inconvénients du profilage	20
I-3-14-Etude et conception des Outillages de profilages.....	20
I-3-15-Qualité et contrôle des profilés.....	22
I-3-16-Différents types de profileuses présentes sur le marché	22
I-3-17-Technologie du profilage à froid	23
I-3-18-Profilage conventionnel et bidirectionnel.....	24
I-3-18-1-Profilage conventionnel.....	24

I-3-18-2-Profilage bidirectionnel	25
I-4-Mise en forme de tôles à froid	28
I-4-1-Défauts en mise en forme des tôles métalliques	28
I-5-Galets de profilage	28
I-5-1-Usinage des galets	33
I-5-2-Usinage des galets sur tour à commande numérique (CNC)	33
I-6-Retournez et produisez	33
I-7-Technologie des lignes de profilage	33
I-7-1- Généralités	33
I-7-2-Découpe à longueur avant ou après profilage_	33
I-8-Conclusion	34

Chapitre II : Conception d'une profileuse.

II-1-Introduction	35
II-2-Description de ligne de profilage à froid pour lames des rideaux, machine profileuse feuillard	35
II-3-Composants	35
II-4-Cahier de charges de la profileuse de tôles	35
II-5- Caractéristiques techniques de cette profileuse.....	36
II-6-Choix de matériaux	36
II-7-La transmission de mouvement.....	36
II-8-Calcule les paramètres de la conception.....	38
II-8-1-Calcule de la vitesse de rotation	38
II-8-2-La transmission de mouvement.....	39
II-8-3-Calcule du l'effort tangentiel T.....	39
II-8-4-Vérification du diamètre d'arbre.....	40

II-8-5-Découpage de la lame.....	45
II-9- Conception des composants de la profileuse.....	45
II-9-1- Conception des galets.....	45
II-9-2- Conception d'un arbre	52
II-9-3- Conception d'un support d'arbre.....	53
II-9-4- Conception d'une pièce d'insert.....	54
II-9-5- Conception d'une table de la profileuse.....	54
II-9-6- Conception d'une clavette.....	54
II-9-7- Conception du système moteur.....	55
II-9-8- Conception d'une table Moteur.....	58
II-9-9- Conception d'un boulon.....	58
II-9-10- Conception d'une vis de réglage.....	58
II-9-11- Conception d'écrou.....	59
II-9-12- Conception d'un circlips.....	59
II-9-13- Conception d'un engrenage.....	60
II-9-14- Conception d'une chaîne.....	60
II-9-15-Assemblage final de la profileuse.....	61
II-10-Conclusion	62

Chapitre III : Simulation numérique

III-1-Introduction.....	63
III-2-Généralité sur ABAQUS.....	63
III-3-Modélisation du profilage.....	64
III-4-Matériau.....	65
III-5-Le maillage.....	65
III-5-1-Le maillage des galets.....	65

III-5-2-Maillage de la tôle.....	71
III-6-Conditions aux limites.....	71
III-7-Résultats de la simulation.....	72
III-8-Interprétation des résultats.....	75
III-9-Conclusion.....	82

Chapitre IV : Etude en fatigue d'un galet

IV-1-Introduction.....	83
IV-2-Définition de la fatigue.....	83
IV-3- Présentation de logiciel Fe-Safe.....	84
IV-4-Interface utilisation.....	84
IV-5-Description du chargement appliqué.....	86
IV-6-Types de chargement.....	87
IV-7-Relations cycliques contrainte-déformation.....	88
IV-8-Critère de la déformation principale.....	93
IV-9-Critère de déformation maximale de cisaillement.....	94
IV-10-Critère de déformation combinée de Brown-Miller.....	94
IV-11-Contrainte équivalente de Von Mises.....	95
IV-12-Application des concentrations de contraintes.....	96
IV-13-Facteurs de concentrations de contraintes vraies et déformations vraies.....	99
IV-14-Analyse de la fatigue à l'aide de courbes contrainte-durée de vie (S-N).....	100
IV-14-1-Application des concentrations de contraintes.....	102
IV-14-2-Histoire de la charge complexe.....	103
IV-14-3-Effet de la contrainte moyenne.....	104
IV-14-4-Analyse des historiques de contrainte d'amplitude variable.....	106

IV-14-5-Calcul des facteurs de sécurité en fatigue.....	107
IV-15-Concentrations de contrainte.....	109
IV-16-Résultats.....	112
IV-16-1-Interprétation des résultats.....	114
IV-16-2-Interprétation des résultats de fatigue illimitée.....	117
IV-17Conclusion.....	118

Liste des figures

Figure I-1 : procédé de laminage.	4
Figure I-2: procédé matriçage-estampage.....	4
Figure I-3 : procédé filage.....	5
Figure I-4 : Tréfilage-Etirage.....	5
Figure I-5 : procédé pliage.....	6
Figure I-6: procédé roulage.....	7
Figure I-7: procédé emboutissage.....	7
Figure I-8: schéma de principe du profilage.....	9
Figure I-9: profilés d'usage.....	10
Figure I-10: exemple simple d'une fleure de profilage	Erreur ! Signet non défini.
Figure I-11: retour élastique après pliage	Erreur ! Signet non défini.
Figure I-12 : différents types de profilés	Erreur ! Signet non défini.
Figure I-13 : une profileuse.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure I-14 : outillage de profilage	22
Figure I-15 : galets de profilage.....	29
Figure II-1: Découpe de la lame	41
Figure II-2 : Conception d'un galet inférieur 1.....	43
Figure II-3 : Conception d'un galet supérieur 1.....	43
Figure II-4 : Conception d'un galet inférieur 2.....	44
Figure II-5 : Conception d'un galet supérieur 2.....	44
Figure II-6 : Conception d'un galet inférieur 3.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure II-7 : Conception d'un galet supérieur 3	Erreur ! Signet non défini.
Figure II-8 : Conception d'un galet inférieur 4.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure II-9 : Conception d'un galet supérieur 4.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure II-10 : Conception d'un galet inférieur 5.....	47
Figure II-11 : Conception d'un galet supérieur 5.....	47

Figure II-12 : Conception d'un galet inferieur 6.....	48
Figure II-13 : Conception d'un galet supérieur 6.....	48
Figure II-14 : Conception d'un galet inferieur 7.....	49
Figure II-15 : Conception d'un galet supérieur 7.....	49
Figure II-16 : Conception d'un galet inferieur 8.....	50
Figure II-17 : Conception d'un galet supérieur 8.....	50
Figure II-18 : Conception d'un galet inferieur 9 et 10.....	51
Figure II-19 : Conception d'un galet supérieur 9 et 10.....	51
Figure II-20 : Conception d'un arbre inférieur.....	52
Figure II-21 : Conception d'un arbre supérieur.....	52
Figure II-22 : Conception d'un support arbre inférieur.....	53
Figure II-23 : Conception d'un support arbre supérieur.....	53
Figure II-24 : Conception d'une pièce d'insert.....	54
Figure II-25 : Conception d'une table de profileuse.....	54
Figure II-26 : Conception d'une clavette.....	54
Figure II-27 : Conception de la base.....	55
Figure II-28 : Conception de corps.....	55
Figure II-29 : Conception de la plaque arrière.....	56
Figure II-30 : Conception de la tige axiale.....	56
Figure II-31 : Conception de la poulie.....	57
Figure II-32 : Conception d'un moteur final.....	57
Figure II-33 : Modélisation d'une table Moteur.....	58
Figure II-34 : Conception d'un boulon.....	58
Figure II-35 : Conception d'une vis de réglage.....	58
Figure II-36 : Conception d'un écrou.....	59
Figure II-37 : Conception d'un circlips.....	59
Figure II-38 : Conception d'un engrenage.....	60
Figure II-39 : Conception d'une chaine.....	60
Figure II-40 : Assemblage final d'une profileuse.....	61
Figure III-1 : Conception du profilage.....	64
Figure III-2 : Maillage d'un galet supérieur 1.....	66
Figure III-3 : Maillage d'un galet inférieur 1.....	66
Figure III-4 : Maillage d'un galet supérieur 2.....	67

Figure III-5 : Maillage d'un galet inférieur 2.....	67
Figure III-6 : Maillage d'un galet supérieur 3.....	68
Figure III-7 : Maillage d'un galet inférieur 3.....	68
Figure III-8 : Maillage d'un galet supérieur 4	69
Figure III-9 : Maillage d'un galet inférieur 4.....	69
Figure III-10 : Maillage d'un galet supérieur 5.....	70
Figure III-11 : Maillage d'un galet inférieur 5.....	70
Figure III-12 : Maillage d'un galet supérieur 6.....	71
Figure III-13 : Maillage d'un galet inférieur 6.....	71
Figure III-14 : Simulation de profilage après 1 ^{er} jeu.....	72
Figure III-15 : Simulation de profilage après 3 ^{er} jeu.....	73
Figure III-16 : Simulation de profilage après dernier jeu.....	74
Figure III-17 : Courbe - force déplacement du 1 ^{er} jeu.....	76
Figure III-18 : Courbe - force déplacement du 2 ^{er} jeu.....	77
Figure III-19 : Courbe - force déplacement du 3 ^{er} jeu.....	78
Figure III-20 : Courbe - force déplacement du 4 ^{er} jeu.....	79
Figure III-21 : Courbe - force déplacement du 5 ^{er} jeu.....	80
Figure III-22 : Courbe - force déplacement du 6 ^{er} jeu.....	81
Figure III-23 : Courbe - force déplacement du profilage.....	82
Figure IV-1 : les trois étapes de l'échec de fatigue.....	84
Figure IV-2 : Interface utilisation.....	85
Figure IV-3 : Termes utilisés pour décrire le chargement de fatigue	86
Figure IV-4 : Chargement de fatigue à un rapport de charge $R = 0$ et $R = -1$	87
Figure IV-5 : Le chargement appliqué pour les analyses de méthodes basées sur les contraintes.....	88
Figure IV-6: Courbe contrainte-déformation cyclique à travers les pointes des boucles d'hystérésis.....	89
Figure IV-7 : Boucle d'hystérésis cyclique contrainte-déformation comme la somme des déformations élastiques et plastiques.....	90
Figure IV-8 : Relation entre la déformation élastique et l'endurance.	91
Figure IV-9 : Relation entre la déformation plastique et l'endurance.....	91
Figure IV-10 : Relation entre contrainte et durée de vie.....	92
Figure IV-11 : Relation entre la déformation et durée de vie.....	93

Figure IV-12 : Règle de Neuber..	96
Figure IV-13 : Méthode de Glinka.....	97
Figure IV-14 : Comparaison de la règle de Neuber et de la méthode de Glinka.....	98
Figure IV-15 : Facteurs de concentrations de contraintes vraies et déformations vraies	99
Figure IV-16 : Contrainte nominale dans un composant	100
Figure IV-17 : Courbe S-N tracée sur des axes	101
Figure IV-18 : Termes utilisés pour décrire la charge constante d'amplitude	101
Figure IV-19 : Concentration des contraintes au niveau d'un trou circulaire.	102
Figure IV-21 : Courbes S-N pour une éprouvette lisse et une éprouvette entaillée.	103
Figure IV-22 : Relation de Peterson entre l'endurance et la concentration de contrainte effective K_{tN} ($K_t = 3$).....	104
Figure IV-23 : Signaux d'essai à amplitude constante pour différentes contraintes moyennes.....	104
Figure IV-24 : Effet de la contrainte moyenne sur l'endurance	105
Figure IV-25 : Effet de la contrainte moyenne représenté sous la forme d'un diagramme de Haigh.....	105
Figure IV-26 : Chargement en bloc avec deux amplitudes de contrainte.....	106
Figure IV-27 : Endurance N pour les deux blocs de cycles.....	106
Figure IV-28 : Facteur de résistance (FOS) - Diagramme de Goodman.....	107
Figure IV-29 : Facteur de résistance sur l'amplitude de la contrainte pour une contrainte moyenne fixe.....	108
Figure IV-30 : Erreur dans le calcul des facteurs de sécurité basés sur la contrainte pour des antécédents de contrainte complexes.....	109
Figure IV-31 : Distribution de la contrainte moyenne au niveau d'un trou circulaire.....	109
Figure IV-32 : Distribution réelle des contraintes.....	111
Figure IV-33 : Effet de la géométrie sur la valeur du facteur de concentration des contraintes pour un trou circulaire dans une plaque mince.....	112
Figure IV-34 : Nombre de cycles prédit par chaque modèle.....	115
Figure IV-35 : Courbe de l'endommagement.....	115
Figure IV-36: courbe facteur de réserve.....	117

Liste des tableaux

Tableau I-1 : Composition chimique d'un acier Z 160 CVD 12.....	30
Tableau I-2 : Propriétés d'un acier Z 160 CVD 12.....	30
Tableau I-3: Traitement thermique d'un acier Z 160 CVD 12.....	30
Tableau I-4 : Composition chimique d'un acier Z 200 C 12.....	31
Tableau I-5 : Propriétés d'un acier Z 200 C 12.....	31
Tableau I-6: Traitement thermique d'un acier Z 200 C 12.....	31
Tableau II-1 : Caractéristique du matériau C 45(XC 48).....	36
Tableau II-2 : Caractéristiques du matériau 42CrMo4 (42CD4).....	37
Tableau II-3 : Caractéristiques du matériau Z200C12(X210CR12).....	37
Tableau II-4 : Caractéristiques du matériauZ7CN 18-9 (X5CrNi 18-10).....	37
Tableau IV-1 : Déformation normale – Morrow.....	113
Tableau IV-2 : Brown Miller – Morrow	113
Tableau IV-3: Déformation de cisaillement maximale – Morrow.....	114
Tableau IV-4 : Déformation normale – SWT.....	114
Tableau IV-5 : Déformation normale – Goodman.....	116
Tableau IV-6 : Brown Miller - Goodman	117

Introduction générale

Le profilage de tôle est un procédé de mise en forme qui consiste à plier une tôle selon des formes choisies, pour obtenir au final le profilé voulu.

Lors du profilage de la tôle qui est constituée de fibres intérieures, de fibres extérieures, de la fibre neutre, elle sera soumise aux phénomènes suivants :

- Les fibres intérieures seront soumises à la compression.
- Les fibres extérieures seront soumises à la traction.
- La fibre neutre ne subira aucune déformation.

On retrouve les produits du profilage dans des applications liées aux travaux publics (lames de rideaux, palplanches, glissières d'autoroutes), au bâtiment (éléments de structures, couvertures, planchers, bardages, plafonds, portes, échafaudages), à la mécanique en générale : systèmes de levage, machines outils...

Dans ce mémoire, on a fait l'étude et la conception d'une profileuse de tôles et l'étude du procédé de profilage en s'intéressant aux galets.

Le plan de ce manuscrit qui présente une démarche qu'illustre le processus technique à suivre pour la conception d'une profileuse de tôle et l'étude des galets de profilage, se décline comme suit

Le premier chapitre est dédié aux généralités sur le profilage des tôles, les règles de conception des outillages de profilage à savoir : l'alignement des galets, le rayon de pliage....etc.

Le deuxième chapitre est composé du cahier des charges de la profileuse de tôles à concevoir, les choix des matériaux, la conception des différentes parties de la profileuse, les dimensions ainsi qu'aux différents calculs des paramètres de notre conception.

Le troisième chapitre est une simulation numérique du profilage d'une tôle dans le but de former une barrière d'autoroute. Afin de réaliser la forme désirée, nous avons adopté six (06) eux de galets.

Le quatrième chapitre représente la dernière partie de notre projet de fin d'études qui traite la fatigue d'un galet de la profileuse. Pour réaliser ce travail nous avons utilisé le logiciel en fatigue Fe-Safe.

Enfin, nous terminons par une conclusion générale.

I-1- Introduction

Nous allons présenter dans ce qui suit des notions, concepts et définitions sur une technique de mise en forme des tôles qui est le procédé de profilage. Nous allons aussi aborder les différents modes de déformation à froid de la tôle et faire une représentation de la profileuse et ses diverses composantes. Le principe du profilage et les règles de conception des outillages de profilage seront donnés à la fin du chapitre. Ils nous seront utiles pour entamer notre étude sur la profileuse.

I-2-Les procédés de mise en forme

I-2-1-Mise en forme

La mise en forme peut se faire par écrasement ou déformation plastique de la matière, à chaud ou à froid. L'ébauche est appelée lopin et se façonne par choc ou par pression.

Les techniques de formage des pièces mécaniques utilisent la propriété de déformation plastique d'un matériau pour lui faire épouser une forme donnée, par un outillage approprié, sans rupture des fibres du métal.

I-2-2-Mise en forme par écrasement

❖ Laminage

Ce procédé consiste à façonner des produits de section constantes et de grande longueur (tôles, profilés), par écrasement entre deux cylindres cannelés radialement, à chaud ou à froid. Ce travail se fait à partir d'ébauches venant de la sidérurgie qui par passage successifs entre les cylindres de laminoir, arrivent progressivement aux dimensions de formes marchandes.

Le laminage conduit à deux types de produits

- Les semi-finis (brames, blooms, billettes,...)
- Les finis (ronds, carrés, hexagonaux, tôles, profilés,...)

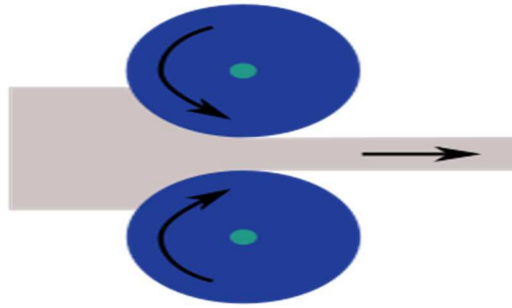


Figure I-1 : procédé de laminage. [12]

❖ Matricage-estampage

Ces deux termes sont aujourd'hui synonymes, mais la distinction matricage (pour métaux non ferreux) et estampage (pour des métaux ferreux) est encore utilisée dans certaines industries.

Cette technique consiste à former à chaud, une ébauche appelée lopin entre deux matrices, dans lesquelles des empreintes sont creusées par usinage conventionnel ou par électroérosion.

Les matrices peuvent avoir plusieurs empreintes qui correspondent à des passes successives de mise en forme du lopin.

Sous l'action de chocs répétés ou d'une pression, le lopin remplit les empreintes et l'excédent de matière constitue la bavure logée dans le plan de joint.

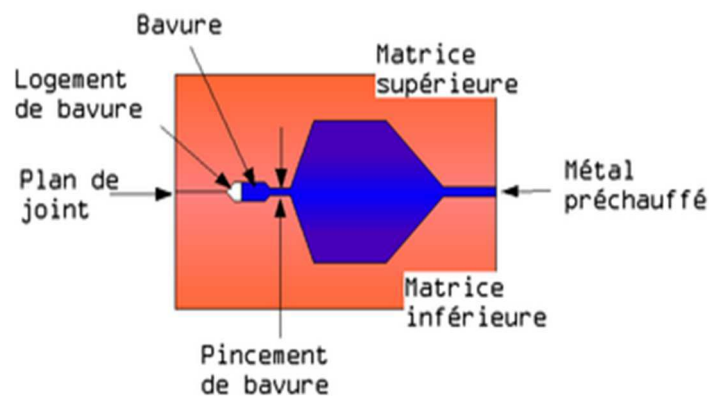


Figure I-2 : procédé matricage-estampage.

❖ Filage ou extrusion

Ce procédé consiste à forcer le métal d'un lopin, d'un flan ou d'une ébauche forgée à passer dans une filière ou entre une matrice et un poinçon par choc ou par pression. Selon la malléabilité de la matière, l'opération se fait à chaud ou à froid.

Cette méthode permet d'obtenir des produits longs qui peuvent être de formes simples (barres, tubes) ou plus compliquées (profilés pour l'aéronautique ou le bâtiment).

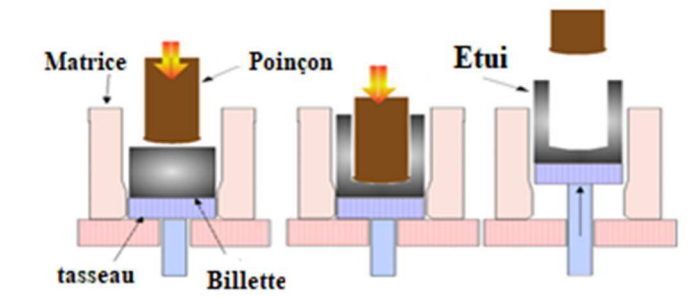


Figure I-3 : procédé filage.

Il existe deux types d'extrusion ou filage

Les pièces obtenues ont une qualité dimensionnelle de 7 à 11 et l'épaisseur des tubes filés est constante. Les caractéristiques mécaniques des aciers sont améliorées notablement et les pièces ont une faible rugosité.

Ce procédé à une faible rugosité ($Ra = 1 \text{ à } 4 \mu\text{m}$).

❖ **Tréfilage-Etirage**

Ce procédé consiste à étirer une ébauche, le plus souvent laminée, au travers d'une filière.

Généralement, cette opération se réalise à froid. La matière subite un écrouissage important qui augmente sa résistance élastique et sa résistance à la rupture par extension.

Suivant les sections obtenues on parle de

- Tréfilage pour les files calibrées.
- Etirage pour les profils quelconques.

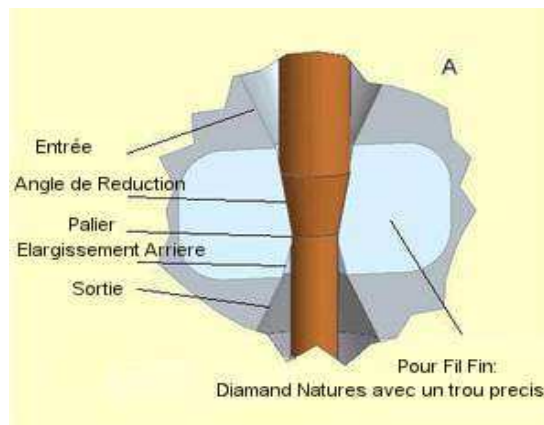


Figure I-4 : Tréfilage-Etirage.

I-2-3-Mise en forme par déformation**❖ Pliage**

Le pliage est une opération de déformation à froid qui consiste à déformer une tôle plane en changeant la direction de ses fibres de façon brusque suivant un angle.

Ci-dessous un poinçon applique une force F sur une tôle qui va s'enfoncer dans une matrice appelé Vé.

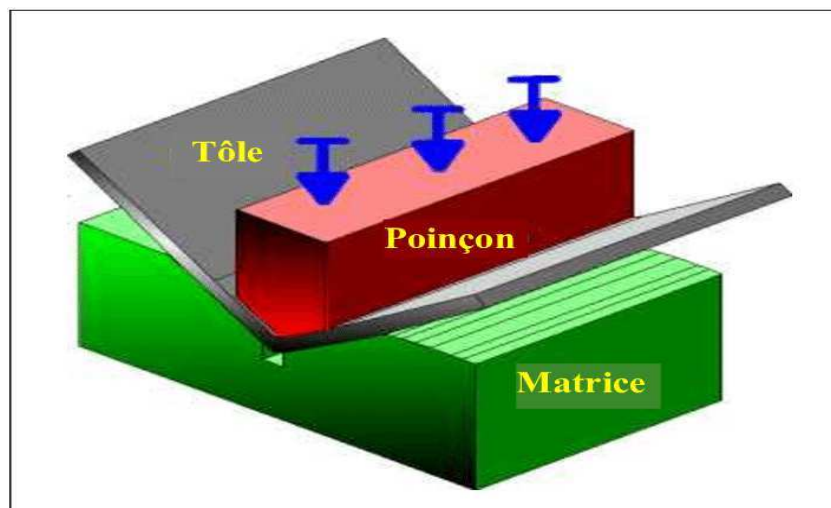


Figure I-5 : procédé pliage.

Il existe plusieurs techniques pour plier une pièce : pliage en l'air dans une presse-plier, pliage en frappe, pliage sur plieuse à sommier ou universelle.

❖ Roulage et cintrage

Le cintrage (roulage) consiste à cintrer une tôle plane. On déforme une feuille de métal pour arriver à une pièce de révolution conique ou cylindrique. Ceci est réalisé par des outils qui sont des cylindres comportant le même profil que la pièce à déformer en nombre et en disposition variés autour de la pièce.

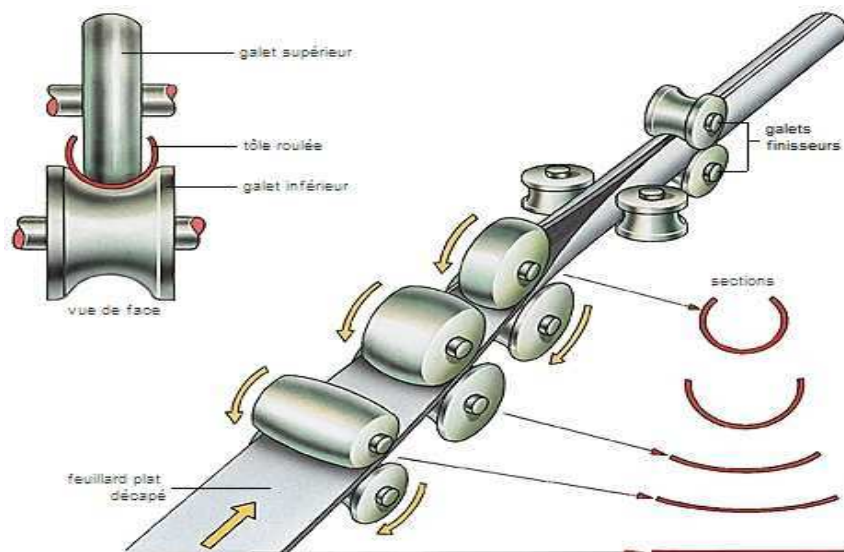


Figure I-6 : procédé roulage.

❖ **Emboutissage**

L'emboutissage produit des formes creuse peu profondes par compression entre matrices et poinçons au cout assez élevé ; ce procédé ne convient donc qu'à de grandes productions. Il est rapide et permet d'obtenir des formes précises sans modification significative de l'épaisseur de matière.

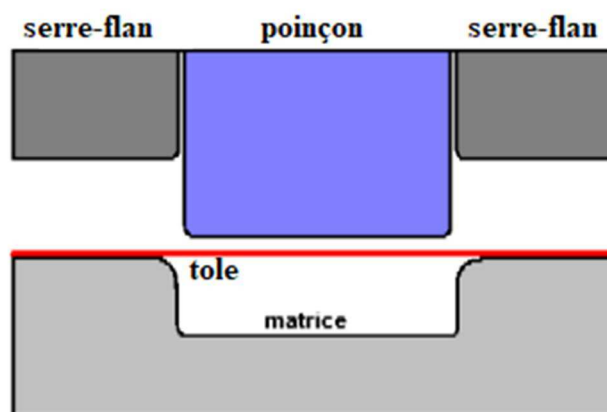


Figure I-7 : procédé emboutissage.

I-3-Profilage

I-3-1-Historique sur le profilage des tôles

Au milieu du XIXe siècle, la production de masse par tôle est devenue une réalité avec l'avènement des procédés de formage d'aciers en feuille étamés pour l'industrie de la conserve. Par la suite, deux grands secteurs commerciaux ont donné le ton aux progrès du formage de feuilles, à savoir l'industrie automobile, qui a débuté vers le début du 20ième siècle, et l'industrie de l'électroménager après la Première Guerre Mondiale. Ces deux industries ont requis de grandes quantités de tôles d'acier à faible teneur en carbone. Ces besoins ont été satisfaits par le développement du laminage en tandem, une technologie pionnière dans l'industrie du papier et adoptée par la suite par l'American Rolling Mill Company (Armco) et d'autres dans l'industrie sidérurgique.

Au cours de la seconde moitié du 20ième siècle, il a stimulé le développement de différentes qualités d'aciers à haute résistance en plus des aciers à faible teneur en carbone et ultraléger avec une formabilité améliorée, depuis la nécessité de réduire le poids des automobiles pour améliorer l'économie du carburant. Ces développements ont été facilités par une connaissance accrue de l'effet des pratiques d'alliage, de laminage et de recuit sur la ductilité, l'anisotropie plastique, et donc les performances d'emboutissage ainsi que sur les propriétés post formées.

La transition du verre vers des conteneurs métalliques pour les boissons a également entraîné un boom dans les industries du laminage et du formage des tôles, d'abord pour l'acier puis pour l'aluminium.

Plus récemment, des techniques de formage chaudes et superplastiques pour les alliages de feuilles d'aluminium et de magnésium ont été développées et mises en œuvre dans l'industrie automobile et dans d'autres industries.

De plus, le formage classique et superplastique de titane, de nickel et d'alliages réfractaires est devenu monnaie courante dans les applications aérospatiales. Ces développements ont été facilités par des connaissances accrues sur la formabilité, l'effet du traitement préalable sur la microstructure et l'évolution de la texture dans les matériaux en feuille, et la réponse constitutive des métaux pendant le formage. [1]

I-3-2-Définition

Le profilage est un procédé de formage à froid en continu de matériaux en feuilles. Il permet de réaliser des pièces appelées profilés, tubes ou panneaux nervuré, en général nettement plus longues que larges.

La caractéristique principale d'un profilé est que sa section reste constante longitudinalement.

La bande de métal se trouve entraînée entre des paires de rouleaux successives qui la forment progressivement jusqu'à la forme finale. Pour l'essentiel on peut dire que le profilage effectue une opération de pliage en continu.

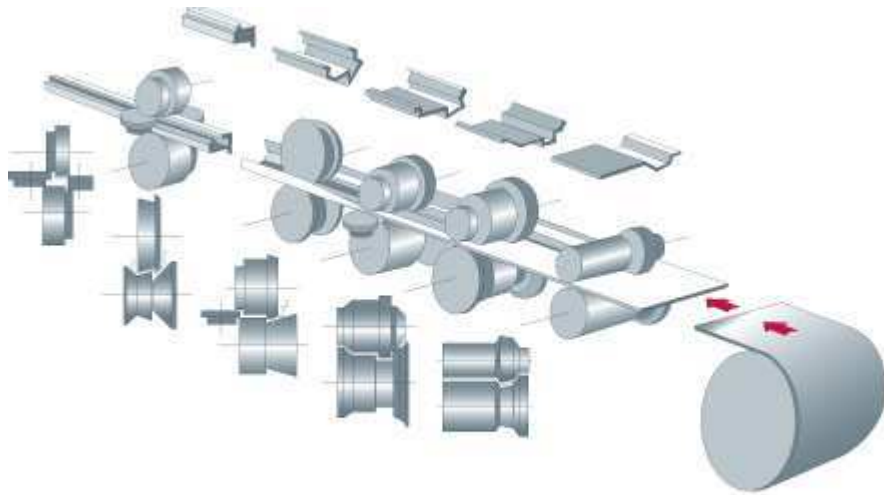


Figure I-8 : schéma de principe du profilage. [4]

L'ensemble appelé ligne de profilage, se compose principalement de dévidoir à l'entrée, outils de poinçonnage, un redresseur, un guide d'entrée de la profileuse qui peut être soit à cassettes (permet un changement rapide de l'outillage), à barillettes, duplex, ou à réglage des arbres inférieurs et supérieurs.....

Les principaux profils d'usage courant sont représentés par les formes suivantes :

Cornière L, profilé C, profilé oméga, profilé Z, profilé circulaire à bords joints, profilé rectangulaire à bords joints.



Figure I-9 : profils d'usage.

I-3-3-Définition des profilées

Les profilés sont des produits pliés en continu, ils ont une section constante sur toute la longueur.

La section d'un profilé doit être continue et sans interruption.

Les profilés peuvent être divisés en trois grandes familles

1. **Les profilés larges**: il s'agit de produits de grande largeur de 600 à 1500mm comportant plusieurs ondes de forme équivalente ou similaires, la limite élastique ne dépasse pas les 400 MPa et l'épaisseur moyenne est de $1.5 \text{ mm} \pm 0.5 \text{ mm}$. Comme par exemple les profilés de couverture.
2. **Les tubes**; il s'agit de produits à section fermée réalisés par profilage avec une soudure en continu.
3. **Les profilés étroits**; il s'agit de produits de section ouverte ou fermée sans soudure ne comportant pas de répétition d'une forme d'onde. Par exemple on y retrouve les chemins de câbles ou les glissières de sécurité d'autoroute, ...etc.

I-3-4-Principe de profilage

Les galets de profilage sont entraînés en rotation. Ils sont réglés pour une mise en contact simple, sans serrage, avec la tôle.

Au moment où la tôle est introduite dans une station de profilage (station n) elle est immédiatement entraînée en translation par les galets, pour se diriger vers les stations de profilage suivantes (station n+1, n+2,...).

La tôle est pliée progressivement par chacune des têtes, jusqu'à obtenir les angles et la forme souhaités. Chaque jeu de galets appelé tête de profilage. La forme que prend la tôle d'acier revêtu métallique à chacune des tôles ou passes de profilage constitue la fleur de profilage. Il s'agit d'une caractéristique majeure, car elle définit l'ordre de réalisation des plis ainsi que les valeurs de pliage des angles. Plus généralement, le profilage d'un produit sur une machine définie est essentiellement caractérisé par:

- La fleur de profilage ;
- Le nombre de passes ou de têtes utilisées ;
- La distance du plan de profilage ;
- La position verticale de la tôle dans la profileuse ;
- Le jeu entre les galets ;
- La lubrification.

➤ **Les éléments d'une ligne de profilage**

Une ligne de profilage se compose d'un groupe d'appareils permettant l'alimentation de la machine, le déroulage des bobines, le planage, le rabotage, le guidage, et principalement, le profilage puis le dressage, le débitage, l'empilage des produits.

Le principe de profilage c'est le passage d'une tôle entre les galets (inférieurs et supérieurs) à partir d'une force de formage nécessaire qu'on applique sur cette dernière on essaye à faire former la tôle pour obtenir la forme voulue, le nombre de passes dépend de la complexité de la forme et de la précision voulue.

➤ **Nombre et disposition des têtes**

Les machines à profiler peuvent avoir plus ou moins de têtes. Les machines les plus simples en ont 4 et les plus compliquées en contiennent 30 ou plus.

La distance entre deux têtes consécutives varie en fonction de la puissance de la machine pour des raisons de construction, mais cette distance est aussi fonction de la hauteur maximale du profil que la machine considérée peut fabriquer. Plus la hauteur est élevée, plus la distance entre deux têtes est grande.

➤ **Réglage des arbres en hauteur**

Dans la machine, l'arbre inférieur est toujours fixe tandis que l'arbre supérieur est ajusté en fonction de la hauteur de la tôle.

Cependant, dans certains cas, il est possible que les deux arbres soient fixes ou réglables, ou l'arbre inférieur réglable.

➤ **Vitesse d'entraînement**

Les machines simples sont prévues avec des vitesses de rotation d'arbre identiques, alors que les machines plus avancées ont généralement des vitesses de rotation différentes pour les arbres supérieurs et inférieurs. Il existe enfin des machines pour lesquelles chaque arbre est équipé d'un moteur à courant continu.

Certaines machines ont une seule vitesse de travail, d'autres sont totalement réglables en vitesse. L'augmentation de la vitesse de travail (jusqu'à 120 m/min) ne présente pas d'intérêt majeur. [3]

I-3-5-Règle de conception des outillages

➤ **Nombre de passes et écartement entre têtes**

Pour créer un nouveau profilé, on détermine le nombre de passes nécessaires pour la fabrication dans les conditions appropriées pour le produit concerné.

Pour déterminer ce nombre de passes, on procède à la conception de la « fleur de profilage » Cela consiste à dessiner le produit dans sa section terminale, puis de dessiner successivement les passes précédentes afin de réduire progressivement la forme du profil à la section linéaire de la bande d'origine.

Si le concepteur souhaite obtenir un produit final de qualité après avoir fait des choix parmi les nombreuses possibilités qui s'offrent à lui, il doit respecter un certain nombre de règles. Ces règles ont parfois pour conséquence d'accroître le nombre de têtes et la longueur de la profileuse.

Donc, la nécessité de réduire les phénomènes de vrillage et les différences de chemins longitudinaux des fibres. Ils risquent en effet de provoquer des allongements longitudinaux, dans le domaine plastique, hétérogènes sur la largeur de la bande, sources de défauts divers.

Pour limiter les phénomènes parasites, il faut choisir une progression de l'angle de pliage d'une tête à l'autre suffisamment faible. Une autre solution consiste à accroître la distance entre les têtes. [4]

Le nombre de passes peut varier de façon importante selon que l'on forme les plis séquentiellement ou simultanément. Dans la mesure du possible on prévoit, tout d'abord, une déformation de la partie centrale de la bande, puis des déformations relatives aux parties latérales de celle-ci. Nous allons choisir le minimum de passes. En effet nous avons contenté dans cette application de trois passes.

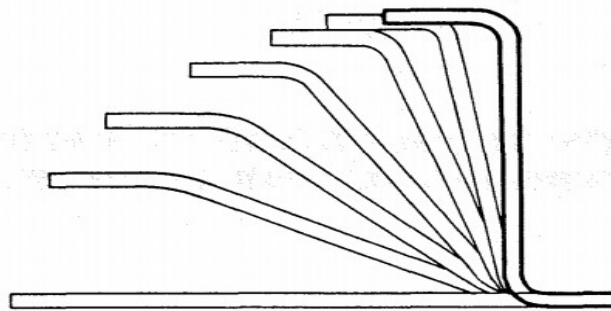


Figure I-10 : exemple simple d'une fleure de profilage.

➤ **Rayon de pliage rapporté à l'épaisseur**

Le rayon de pliage est imposé par la fonctionnalité du profilé. Cependant il doit prendre en compte les difficultés rencontrées dans le processus de 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, qui induit principalement des difficultés dans la maîtrise des angles. Ce phénomène est amplifié lorsqu'on utilise des aciers à faible limite d'élasticité.

Le travail d'allongement de l'acier et de ses revêtements de protection devient très intense lorsque le rapport de rayon devient de faible épaisseur. 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.

Pour les matériaux durs comme l'acier inox, il est recommandé d'avoir un rapport $R_i/e=1$, nous considérons le cas le plus défavorable $R_i=e=1\text{mm}$. [3]

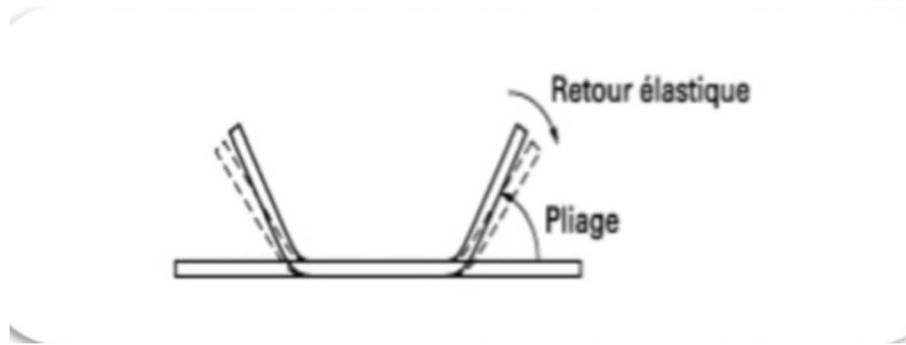


Figure I-11 : retour élastique après pliage. [3]

➤ **Alignement des galets**

Il est important que les points de pliage coïncident parfaitement d'une passe à l'autre. Dans le cas contraire, les zones déjà pliées sont redressées, tandis que le rayon n'est plus régulier le long du pli. Il s'ensuit une modification du retour élastique et de l'angle résultant en sortie de profileuse. [3]

Lorsque la conception des galets ne permet pas une adaptation facile de leur position latérale, il est alors nécessaire de tenir compte dans l'établissement des plans du léger allongement transversal, dit de membrane (ou encore de la fibre moyenne), qui se produit dans les plis et qui décale ceux-ci latéralement. Ainsi, la largeur finale du profilé développé est un peu plus importante que la largeur de la bobine de départ. Cet allongement doit, en général, être estimé par l'expérience.

➤ **Hauteur de retombée de bord**

La hauteur d'un bord tombant est 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 d'un bord est trop élevée, les ondulations de cette rive sont obtenues par le phénomène de flambage

Si la retombée de rive est trop réduite, on ne disposera pas d'assez de prise pour la former.

Généralement, le minimum acceptable est de six fois l'épaisseur.

➤ **Largeur des plages non formées**

Avoir une grande largeur entre deux plis ne pose pas de difficulté particulière pour le profilage, mais il existe un risque d'apparition des défauts de planéité.

L'origine physique du problème se situe une fois encore dans l'apparition d'allongements plastiques intempestifs, avant ou pendant le profilage, conduisant à des contraintes de compression, d'où flambage une fois le seuil atteint. Ce dernier décroît comme l'inverse du carré de la largeur b non formée et croît comme le carré de l'épaisseur e :

Pour réduire ou éliminer ce type de défauts, il existe deux solutions : la première est d'être peinte ou galvanisée, ce qui suffit pour réduire la largeur des zones indéterminées et cela se fait par l'ajout de petits noyaux intermédiaires. La deuxième solution est masquer le défaut en travaillant sur l'aspect de la surface.

➤ **Phénomènes de frottement**

L'existence des différentiels de vitesse entre la feuille d'acier et les galets en leurs différents points de contact est à l'origine de problèmes de frottement.

I-3-6-Les métiers du profilage

Deux visions différentes du profilage

1. L'industriel n'est pas profileur

La profileuse est dédiée à un produit ou une famille de produits.

Si un nouveau produit doit être réalisé, l'industriel fait appel à un outilleur qui concevra, fabriquera et mettra au point l'outillage pour lui.

Il n'y a pas à proprement parler de compétence profilage dans l'entreprise.

2. L'industriel est profileur

Il conçoit ses outillages, fait la mise au point. Ce sont de véritables experts.

Les profileuses sont des couteaux suisses.

Le nombre de station supérieur à 15.

Parachèvement amont et aval.

Système de correction des défauts.

Changement rapide d'outillage.

Changement rapide de bobine.

Machines très automatisées.

I-3-7-Types de profilés

Les profilés peuvent être de matière différentes soit :

Acier – Acier galvanisé – Acier pré laqué - Acier inox – Cuivre – Laiton - Aluminium - Titanium ... ils peuvent être protégés d'un film plastique pour les profilés d'aspects difficiles, protection contre les rayures.

Ils seront d'épaisseurs différentes de 0.2 à 12 mm, et largeur différentes.

Ils sont utilisés dans des secteurs divers, dans des applications liées à l'automobile (joint de portière, longeron de portière), aux travaux publics, au bâtiment, à l'équipement intérieur, au stockage, aux transports, à l'agriculture.....etc.

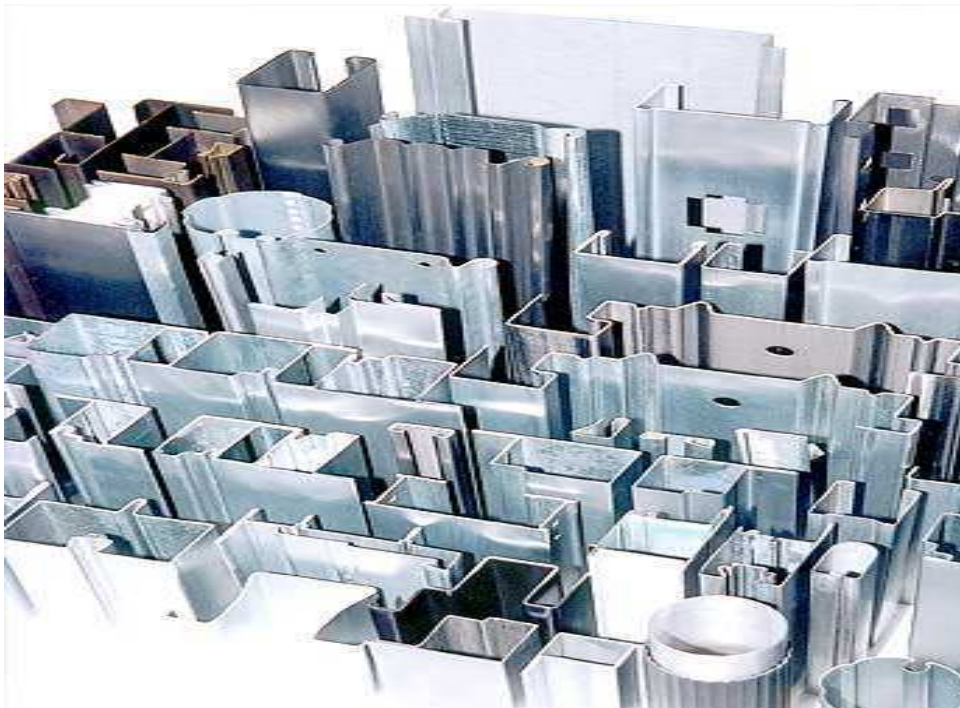


Figure I-12 : différents types de profilés.

I-3-8-Les capacités du profilage

Le profilage permet de traiter des produits laminés et de les mettre en forme avec les caractéristiques finales suivantes:

- ❖ **Épaisseurs:** elles peuvent varier entre **0.15 mm** à **12mm**.
- ❖ **Largeurs:** il n'y a pas de valeur minimale du fait des capacités de refendage des bobines. Pour la valeur maximale, la borne est en réalité due au format réalisable des bobines.
- ❖ **Longueurs:** il n'existe pas de maximum pour la longueur des profilés si ce n'est celui qui existe pour la manutention, le transport.....
- ❖ **Nuances:** les nuances très ductiles avec une faible limite d'élasticité peuvent être utilisées (environs **150MP_a**), ainsi que celle très dures avec limites d'élasticité de **1000MP_a** et plus. Avec une technologie adaptée, il est tout à fait possible de réaliser des profilés de qualité dans toutes les nuances existantes :

Du type du produit de base : le profilage est relativement sensible au type du produit de base. Le produit doit avoir une forme constante dans sa longueur, ce qui n'exclut pas les produits courbes.

Les règles de base : il est nécessaire de respecter quelques règles de base. Elles sont liées aux différents phénomènes impliquées dans le processus.

Les déformations transversales : il est nécessaire de créer des plis pour obtenir un profil à partir d'une feuille plane. Le niveau de ces déformations plastiques est principalement lié à la géométrie du produit souhaité. Elles peuvent être approximées par la formule suivante :

$$\varepsilon = \frac{e}{2R} \quad \text{Formule du rayon de pliage par profilage à froid.}$$

Avec :

e = l'épaisseur du matériau.

R = rayon de pliage.

Les déformations longitudinales : la principale difficulté dans le profilage est de gérer correctement les zones vrillées de la tôle dans la profileuse. Il est impossible d'éliminer les distorsions mais de les réduire et dans certains cas de les répartir correctement. Il faut que les

déformations longitudinales engendrées par le vrillage de la tôle dans la profileuse restent dans le domaine élastique du matériau. Si ce n'est pas le cas, le matériau va se plastifier. La tôle va localement s'allonger de façon irréversible dans son sens longitudinal et se vriller à la sortie de la profileuse.

I-3-9-Fabrication des profilés

La fabrication de profilés est réalisée sur des machines à plier la tôle à froid, appelée profileuse ou ligne de profilage à froid.

Afin de réaliser la production, il faudra une bobine de feuillard (importe quels types) qui après passage dans la profileuse ou ligne de profilage, va devenir un profilé après formage successive dans les têtes de profilage.

Les formes des profilés peuvent être soit des formes simples ou très complexes. Plus la forme est complexe il faudra un nombre important d'opération de formage pour obtenir la forme définitif du produit. Comme ils peuvent subir des opérations de poinçonnage, de marquage, de cintrage, pour ces formes complexe.

I-3-10-Les profileuses

Une profileuse de tôles est une machine qui sert à profiler des tôles (feuillards) pour avoir une forme souhaitée (un profilé). Ces machines possédant diverses têtes de profilage (galets supérieur et inférieur) de 6 à 30 têtes environ suivant les cas.

Cette machine se compose :

- D'un dérouleur simple ou bien automatisé : Les dérouleurs servent à emmener la tôle dans la première tête de la ligne de profilage ou profileuse pour la réalisation des profilés. Ils sont conçus soit pour des charges légères ou bien pour des charges lourdes, avec motorisation ;
- D'une table d'entrée pour le feuillard : pour accueillir la matière à travailler, la tôle et/ou le feuillard ;
- des têtes de profilage (axe supérieur, axe inférieur, support des galets) : pour dessiner les différentes formes de profilage souhaitées ;
- Du dévriller, est généralement fixé après la dernière opération du train de galets de l'outillage de la ligne de profilage. Il permet de supporter la filière de dévrillage, et peut avoir **2,3** ou **5 axes** ;

- Boite de sortie ;
- Table de récupération du profil ;
- De l'armoire électrique, électronique de la profileuse, commande motorisation, avance de la profileuse (vitesse de **20 à 120 mètres minutes**) suivant les modèles de profileuses et de leur utilisation.

Le profilage ne permet de réaliser que des formes à sections constantes cependant les possibilités sont nombreuses.

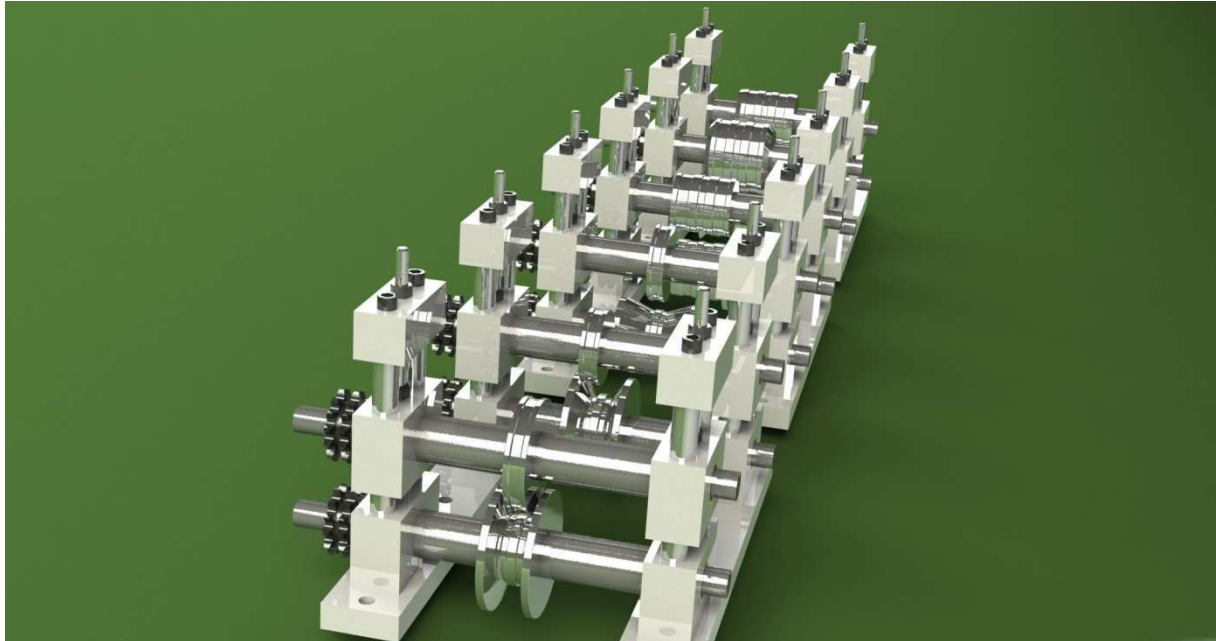


Figure I-13 : une profileuse.

I-3-11-Pourquoi utiliser des accessoires en profilage

- **Précision et efficacité**

Les accessoires de profilage donnent une forme précise et des dimensions exactes à une tôle plane. Il n'y a aucune restriction, ni en matière de forme ni de dimensions. Les profilés peuvent être de n'importe quelle longueur, et tous types de métaux peuvent y passer.

- **Rapidité**

Le profilage avec les accessoires de profilage permet de gagner du temps. Une profileuse peut atteindre la vitesse de 200 mètres de tôle formée par minute.

- **Confort d'utilisation et sécurité**

Les accessoires de profilage favorisent un meilleur confort d'utilisation d'une profileuse. Ils en garantissent également un usage en sécurité.

I-3-12-Comment choisir ses accessoires de profilage

Le choix des bons accessoires de profilage dépend de certains critères, à savoir :

- **La taille de la profileuse** : pour déterminer les formats d'accessoires correspondants ;
- **L'utilisation des accessoires** : pour une profileuse en atelier ou sur chantier de construction ;
- **La vitesse de profilage de la profileuse** : pour définir les accessoires adaptés à la vitesse de production ;
- **Les différentes formes de profilage proposées** : en fonction des têtes de profilage ;
- **Le fonctionnement** : pour une profileuse manuelle ou automatisé.

I-3-13-Avantage et inconvénients du profilage

I-3-13-1-Avantage du profilage

- Une grande diversité de formes réalisables
- Le respect des caractéristiques des aciers employés et l'amélioration de leur élasticité
La transformation directe et rapide de produits laqués ou plastifiés
- La réalisation de produits façonnés aux besoins du client comme la perforation, le marquage ou le grugeage
- Les profilés peuvent être de n'importe quelle longueur.
- Procédé rapide.
- Epaisseur de **0.15 à 12mm**.
- Ajouter des fonctions de manière économique sur la longueur de la section.

I-3-13-2-Inconvénients du profilage

- Encombrement important de la profileuse.
- Economique seulement avec une production importante.
- Le profilé aura toujours une forme constante sur toute sa longueur.

I-3-14-Etude et conception des Outillages de profilages

L'étude d'un outillage de profilage est la première opération à réaliser, pour la réalisation d'un outillage de profilage. Elle permet de savoir la longueur du profil ainsi que le nombre d'opération nécessaire à la réalisation du profil. De faire les plans qui seront nécessaires à la fabrication des galets.

Une mauvaise étude peut être désastreuse sur l'obtention du profil

- **Tôles galvanisées** : émission de particules de zinc conduisant à l'encrassement des galets et à la détérioration de l'état de surface du produit.
- **Tôles en acier inoxydable** : grippage des surfaces entraînant des rayures sur le produit.
- **Tôles pré laquées** : rayures et marquage de la tôle.

Pour tenter de résoudre ces problèmes, le cetim a engagé une action concernant les traitements de surface utilisables pour supprimer le grippage et réduire l'usure, avec une préférence pour le travail à sec.

Les essais réalisés ont pour objet de définir des règles de choix des matériaux et traitements de surface, en fonction de l'opération et de la matière travaillée.

Les problèmes de grippage dus à la vitesse différentielle ente tôle et galet sont habituellement résolus en jouant sur l'état de surface du galet, sa géométrie, ou sur les pressions de contact, les vitesses de glissement et la lubrification.

Un matériau, **L'AMPCO 25** permet de supprimer le grippage. La durée de vie des galets est cependant réduite et le cout de l'outillage est de 1.5 à 1.8 fois celui d'un galet en acier. [8]

Des revêtements **TiN** et **TiCN** sur acier ont été testés pour le formage de l'acier inoxydable. Les essais se sont révélés peu concluants.

Le **TiCN** est un produit à base de **TiN**. Il améliore les performances des outils en acier et ce revêtement se caractérise par une dureté élevée et une résistance à la fissuration, car il possède d'excellentes propriétés de glissement et antiadhésives.



Figure I-14 : outillage de profilage.

I-3-15-Qualité et contrôle des profilés

Les profilés peuvent être utilisés pour de nombreuses activités différentes, la qualité de ces profiles varie en fonction de l'utilisation.

L'outillage de profilage constitué de galets, pièces qui serve à formé progressivement la tôle dans les diverses opérations de la ligne de profilage, par conséquent, ces pièces doivent avoir des tolérances de fabrication bien précises, de l'ordre du centième, lors de la fabrication des éléments constituant cette outillage.

I-3-16-Différents types de profileuses présentes sur le marché

Il existe plusieurs types de profileuses, qui différent selon leur type de commande (manuelle ou automatique). Les machines à profiler se caractérisent par leur dimension, leur hauteur de travail, leur alimentation, et leur avancement.

Parmi ces profileuses, nous avons: les profileuses de gouttière, les profileuses à cardans, les profileuses à couverture, les profileuses à pince. Et notamment il y a divers

marques de profileuses tels que : CBM Machines, CHERNGJI, COMESOR, DALLAN, DIMECO, DIMOS, PROFICAL, DREISTERN, EURO PROFIL FRANCE, GASPARINI, FICEP, JIDET, JOUANEL.

I-3-17-Technologie du profilage à froid

Initialement le procédé consiste à dérouler la bande d'une bobine de métal, de sorte que sa largeur corresponde au profil final développé. Ensuite cette bande (feuillard) est liée à plat, en une série de plusieurs cylindres appel galets, dont les formes et le nombre diffèrent selon la complexité du profil en acier requis.

Cette succession de galets se décompose en un certain nombre d'opérations. A chaque opération correspond une tête de profilage.

Chaque tête est analogue à une petite cage de laminoir dont deux arbres, l'un supérieur, et l'autre inférieur, supportent les galets à profils conjugués, usinés pour correspondre au formage qu'ils doivent réaliser et entre lesquels passe la bande de métal.

Ces galets sont en acier à haute résistance. L'ensemble de ces galets, appelé train de galets, est défini par notre bureau d'étude qui détermine la fleur de profilage.

Il s'agit du nombre d'opérations nécessaire pour la fabrication d'un profilé en métal. Une tête représente une opération de déformation partielle de la bande à plat en acier. La bande passe dans une tête, puis dans une autre et ainsi de suite successivement jusqu'au résultat final souhaité.

Ce passage successif de la bande dans les têtes de profilage transforme progressivement la bande de métal vers sa forme finale.

Ce procédé respecte ainsi les contraintes mécaniques et caractéristiques du métal et permet donc l'utilisation de multiples nuances d'aciers du S235 aux aciers multiphasés.

En effet, les deux arbres de chaque tête sont commandés par le moteur de la machine, ce qui assure un entraînement régulier de la bande.

Le formage du profilé étant réalisé très progressivement, on n'a pas à redouter les criques ni même les cassures qui se produisent dans le pliage à froid à la presse ou en emboutissage. Enfin, bien qu'il ne s'agisse pas d'un laminage, l'opération produit un certain écrouissage superficiel connu sous le nom d'effet de peau. La fabrication, limitée aux débuts

aux profilés en bande d'acier laminé à chaud et à froid, s'est peu à peu étendue aux profilés en acier inoxydable et en alliages d'aluminium et de cuivre.

Lors du profilage des opérations de façonnage telles que poinçonnage, grugeages, emboutissages, peuvent être réalisées en ligne. Le profilé en métal est ensuite découpé en bout de ligne à la longueur désirée. Les opérations de profilage sont réalisées à froid, car effectuées à température ambiante, elles ne nécessitent ni la chauffe ni la fusion du métal pour la fabrication d'un profil.

L'opération de profilage n'apporte aucune modification sensible au produit plat mis en œuvre concernant son épaisseur et ses caractéristiques mécaniques. [11]

I-3-18-Profilage conventionnel et bidirectionnel

I-3-18-1-Profilage conventionnel

✓ Principe

La tôle passe successivement entre plusieurs couples de galets formes complémentaires régulièrement espacés qui provoquent une flexion transversale.

Le nombre de couple de galets dépend essentiellement de la complexité du profil. Il faut, en effet, tenir compte des allongements relatifs de la fibre longitudinale axiale et de la fibre longitudinale constituant la rive de la tôle. La tôle ne subit pas de modification d'épaisseur. [8]

✓ Matière

Tous alliages métalliques dont la ductilité le permet.

✓ Dimension

$0.3 < e < 8$; $10 < l_{développée} < 1500$; L limitée seulement par la possibilité de manutention; $l_{courante}$: 6000. [8]

✓ Tolérances

La norme A 50-821 définit l'intervalle de tolérance pour une certaine gamme de produits. [8]

✓ Etat de surface

On peut profiler des tôles comportant des revêtements métalliques ou plastiques.

I-3-18-2-Profilage bidirectionnel

✓ Principe

Trois couples de galets de formes complémentaires permettent d'obtenir trois courbures différentes. Le passage de la tôle peut s'effectuer suivant deux directions perpendiculaires ce qui permet d'obtenir une surface quelconque. [8]

✓ Applications courantes

Des exemples de produits roulés à froid : panneaux muraux et de toiture, cotés de camions, châssis de trains et d'automobiles, pièces structurelles d'aéronautique, aménagements de magasins, poutres structurelles de bâtiment, équerres et tôle de gros électroménager. [8]

✓ Procédés connexes

Extrusion, pliage sous presse et laminage peuvent réaliser le même type d'opération que le profilage. Les pièces courtes, coupées à longueur pendant le profilage, peuvent aussi être formées par emboutissage. [6]

Le profilage est limité aux pièces d'épaisseur constante, tandis que l'extrusion et le laminage forment des profils d'épaisseurs variables et des éléments irréalisables par cintrage d'une simple feuille, tel IPN. [6]

Comme le profilage, le pliage sous presse peut former des profils longs. Toutefois, chaque pli est une opération supplémentaire, tandis que le profilage est un procédé en continu et donc beaucoup plus rapide. [6]

✓ Qualités

Plier une tôle augmente sa résistance, le profilage associe la ductilité et la solidité du métal pour produire des pièces à la fois plus rigides et légères.

Le travail à froid de l'acier améliore la structure des grains, donc la rigidité de la matière. Les galets de la profileuse ne modifient pas l'aspect de la surface du métal travaillé et les angles sont précis au degré près et entre **0.125** et **0.25 mm**. [6]

✓ Intérêts pour le design

Le profilage permet de réaliser des produits standards et sur mesure. Il existe de nombreuses formes de galets, éliminant la contrainte du coût d'outillage et du volume de production minimum. Les profilés nouveaux et originaux peuvent être conçus et analysés avec un logiciel d'analyse par élément finis. L'investissement en outillage est alors compensé par le volume de production.

Ce procédé peut servir à produire une gamme de profilés, depuis des panneaux striés à des gouttières et sections rectangulaires. Les tubes et sections rectangulaires creuses sont refermés par soudage à la molette. [6]

Les pièces complexes avec des dépouilles, courbes serrées et joint, sont formées par plusieurs profilages consécutifs.

Ce procédé continu permet de réaliser des pièces de toutes longueurs, mais la limite est généralement à 20 mètres pour rester manutentionnable. Le profilé est coupé à longueur pendant le profilage et il est possible de produire des pièces d'une longueur minimale de 2 mm à pleine vitesse. [6]

✓ Paramètres pour le design

L'outillage et le montage de chaîne de profilage sont coûteux, ce procédé ne convient donc que pour des productions supérieures à 1500 mètres linéaires. Le point le plus important à prendre en compte est que les pliages sont toujours parallèles au sens de production. Leur rayon est égal ou supérieur à l'épaisseur du métal.

La profondeur du profil influe sur le coût de l'outillage. Les pièces sont généralement conçues telles que leur profondeur ne dépasse pas l'ouverture de la machine afin de garantir la précision et la qualité des courbes obtenues.

La largeur maximale de la bande de métal dépend de la capacité de la machine et du fabricant. La limite est couramment de 0.5 m environ. Les galets multiples côte à côte peuvent former des bandes plus larges, mais leur utilisation plus spécialisée est coûteuse. [6]

✓ Profilage d'un angle

Ce simple profilage produit une cornière à partir d'une bande de métal. Le rouleau est chargé sur la machine et poussé dans une série successive de 8 paires de galets afin d'obtenir un seul pli. Les galets sont actionnés par moteurs électriques et tournent tous exactement à la même vitesse. La tension est maintenue par pression sur le rouleau de métal. La pièce finale traverse une filière à l'extrémité de la ligne de production assurant la constance du profil obtenu. Les pièces finies sont ensuite coupées à longueur puis empilées.

Différents niveaux de complexité, tels que replis, profils rentrants ou asymétriques sont réalisables en profilage sur les pièces de faible épaisseur.

L'épaisseur de la bande à profiler est généralement de **0.5 à 5 mm**. Pour être réalisables, les plis doivent être à une distance du bord au moins 3 fois supérieure à l'épaisseur du métal. [6]

✓ Matières compatibles

Presque tous les métaux sont profilables. Toutefois, cette technique est surtout utilisée pour les métaux non extrudables tels que l'acier inox, l'acier au carbone et l'acier galvanisé. [6]

✓ Coûts

L'outillage spécialisé augmente considérablement le prix, mais il dépend de la taille et de la complexité du profil, le coût d'outillage est généralement équivalent à celui de l'emboutissage.

La durée du cycle dépend de la complexité du profil, l'épaisseur du métal et la longueur des sections. Les profilés simples peuvent être produits jusqu'à **4500vm/heure**. [6]

✓ Impact environnemental

Le profilage utilise efficacement l'énergie et la matière et ne produit aucun déchet. Cependant, il peut y en avoir dans les usinages ou opérations de finitions subséquentes. [6]

I-4-Mise en forme de tôles à froid

Nous parlons ici de la mise en forme à partir des produits plats et minces, appelés flans, par déformation plastique de pièces à température ambiante. Les principaux avantages de ce type de procédés sont la faible perte de matière, la réalisation de formes complexes et les bonnes propriétés mécaniques. Les difficultés sont liées à la prise en compte du retour élastique lors de l'étape de mise en forme mais également la prédiction de l'apparition de défauts tels que les plis, la striction, la rupture. [7]

I-4-1-Défauts en mise en forme des tôles métalliques

Divers défauts peuvent apparaître lors de la formation des tôles, qui peuvent être classés en deux catégories : les défauts globaux et les défauts locaux, que nous définissons comme suit :

- Un défaut global concerne la géométrie finale de la pièce. A l'issue de l'opération de mise en forme d'une tôle, par exemple par pliage, la géométrie finale obtenue après peut ne pas correspondre exactement à la forme recherchée. Deux phénomènes sont essentiellement à l'origine de ces défauts: le retour élastique et le plissement.
- Un défaut local concerne des zones plus ou moins réduites de la pièce, où une diminution nette de l'épaisseur, voire rupture, peut apparaître. La striction localisée en est un exemple. D'autres phénomènes plus rares, comme la rupture différée en est un autre. [7]

I-5-Galets de profilage

Les galets de profilage sont utilisés dans le pliage de la tôle par formage à froid. Peuvent être soit : en **acier Z 160 CDV 12, Z 200 C 12, AMPCO 25, métal** ou en **acier prétraité**

Ils sont soit monobloc, ou assemblés par vis, les galets peuvent être en plusieurs parties, d'ailleurs de plus en plus les moyens de production moderne CNC, ils sont coupés, afin de faciliter l'usinage sur la machine outil.

Les galets peuvent être de petite taille, quelque kilos, à de très gros galets une centaine de kilos.

Dans certains cas les galets peuvent être réusinés, pour la réalisation d'une nouvelle forme dans le galet, afin de réduire le cout de revient de l'outillage de profilage, qui va produire le nouveau profilé sur la ligne de profilage.

Les galets sont montés sur des têtes de profilage, la liaison est assurée par un rainurage dans le galet, et une clavette montée sur l'arbre. Le passage de la tôle dans la tête de profilage donnera un profilé, après passage dans les diverses têtes de la ligne de profilage à froid.



Figure I-15 : galets de profilage.

- **Acier Z 160 CVD 12**

- **Composition chimique**

Tableau I-1 : Composition chimique d'un acier Z 160 CVD 12.

Carbone C	1.55%
Chrome Cr	11.80%
Molybdène Mo	0.75%
Vanadium V	0.90%

- **Propriétés**

Tableau I-2 : Propriétés d'un acier Z 160 CVD 12.

Densité	7.85
Module d'élasticité	207.103 MP _a
Conductibilité thermique à 20°C	16.5 W _m °k-1.
Coefficient de dilatation thermique par °c de +20 à 200°C	11.2 x 10-6.

- **Traitement thermique**

Tableau I-3 : Traitement thermique d'un acier Z 160 CVD 12.

Trempe	préchauffage.
	Chauffage à 1020-1040°C
	Refroidissement gaz, huile, bain de sels.
Aptitude	Acier à 12% de chrome qui présente à l'état trempé une dureté élevée et une bonne ténacité.
	Bonne résistance à l'usure

- **Acier Z 200 C 12**

- **Composition chimique**

Tableau I-4 : Composition chimique d'un acier Z 200 C 12.

carbone C	2.10
chrome Cr	12
Tungstène W	0.70
Manganese Mn	0.3

- **Propriétés**

- **Tableau I-5 :** Propriétés d'un acier Z 200 C 12.

Propriétés	Valeur
Densité	7.7
Module d'élasticité	210000 N/mm ²
Module de cisaillement	76923.0 N/mm ²
Coefficient de poisson	0.3
Masse volumique	8000 Kg/m ³
Limite de la traction	1000 N/mm ²
Limite d'élasticité	850 N/mm ²
Conductivité thermique	0.46 W/(m.k)

- **Traitement**

- **Tableau I-6:** Traitement thermique d'un acier Z 200 C 12.

Trempe	Temperature : 950-980 °C
	Milieu de trempe: huile à 80°C, air, vide ou bain chaud 500-550°C

	Dureté après trempe : 64 HRC
Recuit	Température : 800-840°C
	Refroidissement : lent au four.
	Dureté maxi : 250 HB

- **AMPCO 25**

Alliages spéciaux pour la déformation à froid. Ils ont une microstructure unique qui garantit une parfaite fiabilité en utilisation.

L'AMPCO 25 est un alliage breveté dont les caractéristiques mécaniques sont tout à fait remarquables. Son extrême dureté alliée à une excellente résistance à la compression et à l'usure, avec des propriétés de frottement très bonnes, en fait l'idéal pour les matrices à emboutir et à former. Etant donné l'allongement quasi nul de l'alliage, les sections fines sont à proscrire et L'AMPCO 25 doit toujours être encastré. Il supprime tout problème de grippage ou de marquage du métal travaillé.

➤ **Utilisation**

Outillage d'emboutissage (en particulier de l'acier inoxydable), galets de formage, molettes de repoussage, barrettes de rectifieuses Centerless, outillage de redressage de profilés spéciaux, etc.

Cet alliage donne également d'excellents résultats dans toute application sous fortes charges en compression, telles plaques d'usure ou frottement. [8]

➤ **Domaines d'application**

Outils de découpage à rendement très élevé pour la découpe de tôles au silicium jusqu'à 1mm d'épaisseur, et de tôles douces jusqu'à 4mm.

Outils d'ébavurage ou de renfendage jusqu'à 4 mm d'épaisseur. Outils de coupe pour le papier et les matières plastiques, filières et boulets d'étirage, peignes à rouler les filets, cisailles droites et circulaires pour tôle jusqu'à 2 mm d'épaisseur, outils d'emboutissage, outils pour le travail du bois, outils à presser les matières abrasives comme, par exemple, la porcelaine. Glissières et moules à matières plastiques. Galets de profilage. [8]

I-5-1-Usinage des galets

L'usinage se fait sur une machine appelé tour, ou sur des tours parallèles équipés d'un projecteur de profil permettant de grossir le galet à usiner grossissement de (x10-x20) suivant les cas.

I-5-2-Usinage des galets sur tour à commande numérique (CNC)

Les galets pour les outillages de profilage à froid sont de plus en plus usinés sur des machines CNC. En généralement la matière utilisée pour la fabrication du galet est de l'acier Z 160 CDV 12, qui subira ensuite un traitement thermique après le premier usinage, il sera trempé à environ 58 à 60 Hrc.

Ensuite, après trempe le galet sera de nouveau usiné sur cette machine, pour la réalisation de la forme définitive du galet.

I-6-Retournez et produisez

La préparation et le chargement des bobines s'effectuent parallèlement au processus d'usinage. A la fin de la bande, le dérouleur est tourné en position ce qui remplace l'opération de chargement. Le retournement dure 30 secondes. Et la deuxième bobine de feuillard est donc opérationnelle pour la production du profilé sur la ligne de profilage à froid.

I-7-Technologie des lignes de profilage

I-7-1- Généralités

La ligne de profilage se compose d'un groupe d'appareils qui permettant l'alimentation de la machine, le déroulage des bobines, le planage, le raboutage, le guidage, et principalement, le profilage puis le dressage, le débitage, l'empilage des produits

I-7-2-Découpe à longueur avant ou après profilage

Deux grandes techniques de profilage différentes sont utilisées :

- 1) **le profilage en feuille à feuille** : est utilisé pour la fabrication des profils de bardage, de couverture et de plancher de faible profondeur d'onde.
- 2) **le profilage en continu** : est utilisé pour la fabrication des profils de bardage, de couverture et de plancher de grande profondeur d'onde. Aussi pour les profilés épais ou quand la section est complexe.

Selon la technique choisie, la coupe à longueur intervient avant ou après profilage.

- 1) **La coupe avant profilage** : nécessite un système d'accumulation et une cisaille à guillotine classique. Un système efficace de guidage de la feuille en entrée de profileuse est également nécessaire.
- 2) **La coupe après profilage** : est plus complexe :
 - Le système le plus simple consiste à arrêter la machine lors de chaque coupe, celle-ci pouvant s'effectuer soit à la cisaille, soit avec des disques de tronçonnage ;
 - Une deuxième solution consiste à faire de grandes barres, à les couper à l'arrêt de la machine et ensuite à les redébiter aux longueurs du commerce ;

I-8-Conclusion

Dans ce chapitre nous nous sommes intéressés à la présentation du profilage et quelques généralités sur les matériaux et galets. Cela nous a permis de nous familiariser avec ce procédé particulier. Dans le chapitre suivant, nous passerons à la conception et étude d'une profileuse.

II-1-Introduction

Ce chapitre présente l'étude et la conception d'une profileuse. Nous avons commencé notre étude par la présentation d'un cahier de charges de cette profileuse, puis nous avons décrit le choix des matériaux et enfin la conception proprement dite des différentes parties de cette profileuse à savoir : les galets, les engrenages, les arbres,.....Pour clore le chapitre, nous présentons la conception et calculs de certains éléments judicieusement choisis.

La profileuse est composée de plusieurs galets qui sont conçues de telle sorte à ce que la mise en forme de la tôle se fasse progressivement. Plusieurs problèmes peuvent donc en découler pour sa conception à savoir la transmission du mouvement à tous les galets, les formes des galets ainsi que la découpe de la tôle pour avoir la longueur souhaitée.

II-2-Solidworks

La conception de la profileuse a été réalisée en utilisant le logiciel de CAO 3D SolidWorks, c'est tout naturellement que nous le présentons. SolidWorks est destiné à l'esquisse des idées rapidement et avec précision. Le logiciel offre des outils de modélisation volumique pour la conception assistée par ordinateur mais aussi des fonctionnalités spécialement développées pour l'ingénierie assisté par ordinateur (IAO).

II-3-Description de ligne de profilage à froid pour lames des rideaux

Les produits de la ligne de profilage pour lames des rideaux peuvent être utilisés pour la porte des rideaux. Et ils peuvent aussi être des portes d'entrepôt ou de maison de plaisance.

II-4-Composants

La ligne de profilage complète se compose de 6 parties.

1. Dérouleuse hydraulique ;
2. Système de poinçonnage ;
3. Profileuse ;
4. PLC armoire de contrôle ;
5. Découpage hydraulique (arrêt/poursuite) ;
6. Table de réception.

II-5-Caractéristiques techniques de cette profileuse

- 10 jeux de 2 galets (supérieur et inférieur) de 60 mm de diamètre ;
- Moteur d'une puissance de 7.5 kw, munis d'une boîte de vitesses et protégés par un boîtier métallique/coffre de protection ;
- Couple Moteur : 170 N.m

II-6-Cahier de charges de la profileuse de tôles

Une profileuse à **20 galets**, de diamètre intérieur $D_{int} = 60 \text{ mm}$, elle est de longueur $L = 4500 \text{ mm}$, et largeur $b = 700 \text{ mm}$, pour profiler une tôle d'épaisseur $e = 0.8 \text{ mm}$, de la longueur $L = 700 \text{ mm}$, de largeur $b = 180 \text{ mm}$

II-7-Choix de matériaux

Pour chaque composante de la profileuse de tôles, on a associé un matériau convenable suivant différents caractéristiques.

- **Les engrenages** : on a pris comme matériaux l'acier C 45 (XC48) pour les raisons suivantes

Tableau II-1 : Caractéristique du matériau C 45(XC 48).

Propriétés	Valeur	Unité
Module d'élasticité	210000	N/mm ²
Coefficient de poisson	0,28	
Module de cisaillement	79000	N/mm ²
Masse volumique	7800	Kg/ m ³
Limite de la traction	750	N/mm ²
Limite d'élasticité	580	N/mm ²
Conductivité thermique	14	W/(m.k)
Chaleur spécifique	440	J/(Kg.k)

Ajoutant à ça le matériau C 45 a les propriétés suivantes

- ✓ Bonne usinabilité ;
- ✓ Bonne résistance aux chocs ;
- ✓ Dureté après trempe : 55 HRC.

- **Les arbres** : on a pris l'acier 42CrMo4 (42CD4)

Tableau II-2 : Caractéristiques du matériau 42CrMo4 (42CD4).

Propriétés	Valeur	Unité
Module d'élasticité	210000	N/mm ²
Coefficient de poisson	0,28	
Module de cisaillement	79000	N/mm ²
Masse volumique	7800	Kg/ m ²
Limite de la traction	1000	N/mm ²
Limite d'élasticité	750	N/mm ²
Conductivité thermique	14	W/(m.k)
Chaleur spécifique	440	J/(Kg.k)

Le matériau 42CD4 a les propriétés suivantes

- ✓ Bonne trempabilité à l'huile
- ✓ Bonne résistance aux surcharges à l'état trempé
- ✓ Dureté après trempe : 27 à 48 HRC

- **les galets de profilage** : on a pris comme matériau l'acier Z200C12(X210CR12)

Tableau II-3 : Caractéristiques du matériau Z200C12(X210CR12).

Propriétés	Valeur	Unité
Module d'élasticité	210000	N/mm ²
Coefficient de poisson	0,3	
Module de cisaillement	76923,08	N/mm ²
Masse volumique	8000	Kg/ m ²
Limite de la traction	1000	N/mm ²
Limite d'élasticité	850	N/mm ²
Conductivité thermique	0.46	W/(m.k)

- **La tôle qui va être soumise au profilage**, on a pris comme matériau l'acier non allié écroui DC04 (BS 1449 1 CR)

Tableau II-4 : Caractéristiques du matériau Z7CN 18-9 (X5CrNi 18-10).

Propriétés	Valeur	Unité
Module d'élasticité	210000	N/mm ²
Coefficient de poisson	0,3	
Densité	7,86	g/cm ³

Capacité thermique	460	Kg°c
Dilatation thermique	$12 \cdot 10^{-6}$	N/mm ²
Résistance électrique	0.13	Omh*mm ² /m
Conductibilité thermique	45.55	W/ (m°c)
Perméabilité relative	2000	

II-8- Calcule les paramètres de la conception

II-8-1- Calcule de la vitesse de rotation

$$N = \frac{30\omega}{\pi} \text{ tr/min} \quad \text{II-1}$$

$$\omega = \frac{v}{r} \quad , \text{ et } \quad r = \frac{d}{2} \quad \text{II-2}$$

Avec

N : La vitesse de rotation en (tr/min)

ω : La vitesse angulaire en (rad/s)

d : Le diamètre de l'arbre en (mm)

On a

$$V = 50 \text{ m/min} = 0.83 \text{ m/s}$$

$$d = 60 \text{ mm}$$

AN

$$\omega = \frac{83}{30} = 2.76 \text{ rad/s}$$

$$N = \frac{30\omega}{\pi} = \frac{30 \cdot 2.76}{3.14} = 26.43 \text{ tr/min}$$

II-8-2-La transmission de mouvement

La transmission par obstacle d'un mouvement de rotation entre deux arbre parallèle et éloignés par l'intermédiaire d'un lien articulé « chaîne-pignon »

Ce mécanisme pourtant ne concerne que les galets inférieurs, dans lequel le moteur électrique entraîne 10 galets inférieurs, nous choisirons deux chaînes pour la transmission de mouvement, l'une servira pour la réduction de vitesse venant du moteur, l'autre à transmettre le mouvement à tous les galets. Ce qui peut ne pas suffire pour l'avance de la tôle, les galets supérieurs doivent eux aussi être animés d'un mouvement de sens contraire que celle des galets inférieurs mais de même vitesse de rotation.

Ces galets supérieurs ne seront pas entraînés par un moteur électrique mais seront entraînés par les galets directement inférieurs à elles même.

Le rapport de transmission (r)

$$r = \frac{N2}{N1} = \frac{Z1}{Z2} \quad \text{II-3}$$

Avec

N1 : vitesse de rotation de l'arbre (moteur)

N2 : vitesse de rotation de l'arbre (récepteur)

Z1 : nombre de dent de pignon sur l'arbre (moteur)

Z2 : nombre de dent de pignon sur l'arbre (récepteur)

Z1 = Z2 = 32 dent

$$\text{Donc : } r = \frac{32}{32} = 1$$

II-8-3-Calcul de l'effort tangentiel T

On a

$$P = C \cdot \omega \quad \Rightarrow \quad C = \frac{P}{\omega} \quad \text{II-4}$$

$$C = T \cdot \frac{d}{2} \Rightarrow T = \frac{2C}{d} \quad \text{II-5}$$

$$T = \frac{2 * 170}{0.6} = 5666.6$$

$$\Rightarrow T = 5666.6 \text{ N}$$

II-8-4-Vérification du diamètre d'arbre

$$\tau = \frac{Mt}{Wp} \leq [\tau] \quad \text{II-6}$$

$$Wp = 0.2 * d^3 \quad \text{II-7}$$

Avec

Wp : Module de torsion.

En torsion

$$\frac{Mt}{0.2 * d^3} \leq [\tau] \quad \text{II-8}$$

$$\Rightarrow d^3 \geq \frac{Mt}{0.2[\tau]} \quad \text{II-9}$$

$$p = c \cdot w = Mt \cdot w \Rightarrow Mt = \frac{p}{w} \quad \text{II-10}$$

$$[\tau] = Rpg = \frac{Re}{2} \quad \text{II-11}$$

$$Mt = \frac{7500}{2.76} = 2718 \text{ N.m}$$

$$d^3 \geq \frac{2718 * 10^3}{0.2[325]}$$

$$d \geq 35 \text{ mm}$$

La condition est vérifiée

II-8-5-Découpage de la lame

La force nécessaire à la cisaille pour la découpe de la lame obtenue en sortant de la ligne de profilage, on l'assimile à une tôle plane mince sollicitée par une force de cisaillement F.

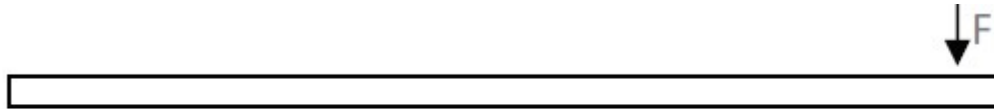


Figure II-1 : découpe de la lame

La condition de solidité en contrainte de cisaillement

$$\tau \leq \tau_{adm} \quad \text{II-6}$$

$$\tau = \frac{F}{A} \quad \text{II-7}$$

Avec

F : la force de cisaillement

A : la surface

$$A = h * L$$

$$\tau_{adm} = R_{eg}$$

$$R_{eg} = 0.5 * R_e$$

$$R_e = 210 \text{ Mpa}$$

$$R_{eg} = 0.5 * 210 = 105$$

AN

$$A = 0.8 * 180 = 144 \text{ mm}^2$$

$$\tau = \frac{5666.6}{144} = 39.35 \text{ N/mm}^2$$

Donc la condition est vérifiée.

II-9- Conception des composants de la profileuse

La conception de la profileuse est réalisée avec le logiciel SolidWorks 2020, les dimensions qu'on a prises sont celles d'une profileuse que n'a déjà vue dans une usine.

II-9-1- Conception des galets

Les galets de profilage élément qui se monte sur une ligne de profilage à froid. Ils représentent la partie active de la machine. Ils sont responsables du pliage et de la mise en forme de la tôle.

1^{er} jeu

➤ Galet supérieur

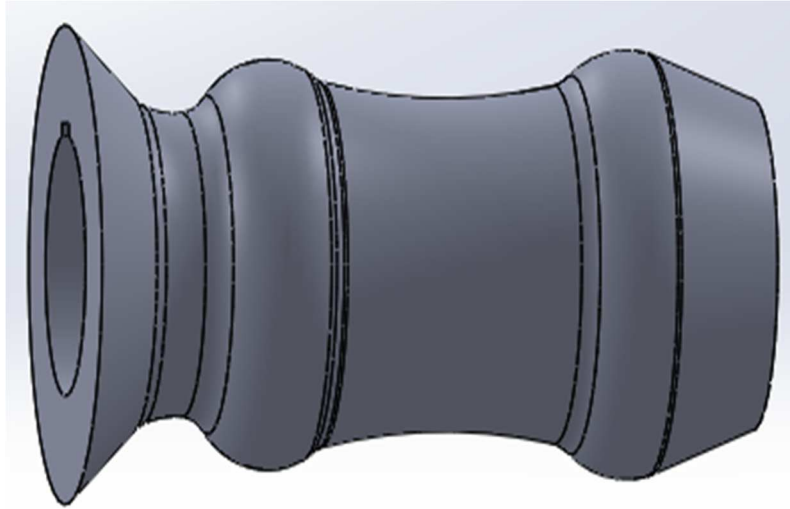


Figure II-2 : Conception d'un galet supérieur 1.

➤ **Galet inférieur**



Figure II-3 : Conception d'un galet inférieur 1.

2^{ème} jeu

➤ **Galet supérieur**

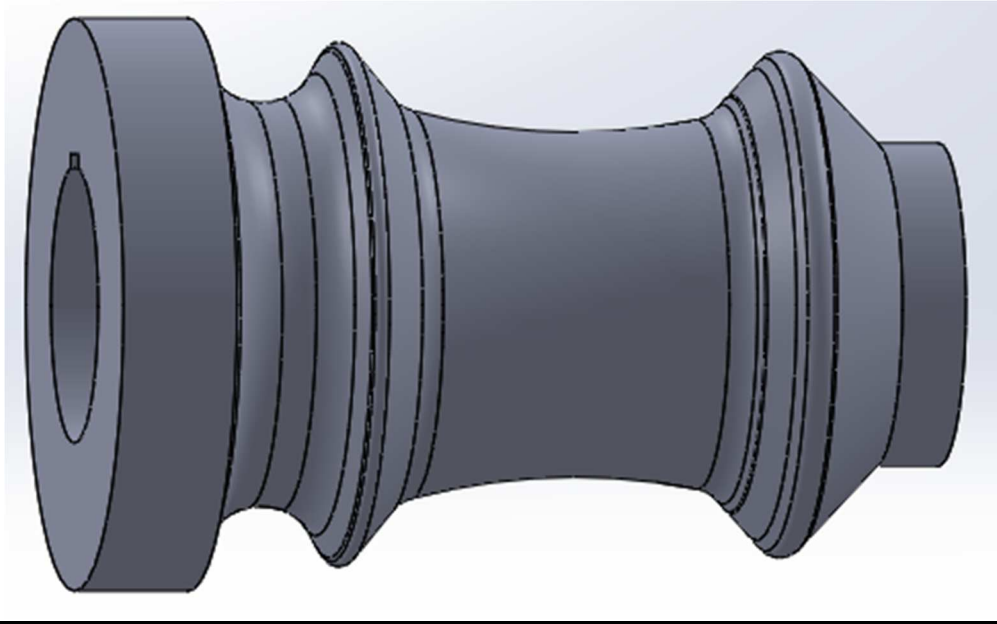


Figure II-4 : Conception d'un galet supérieur 2.

➤ Galet inférieur

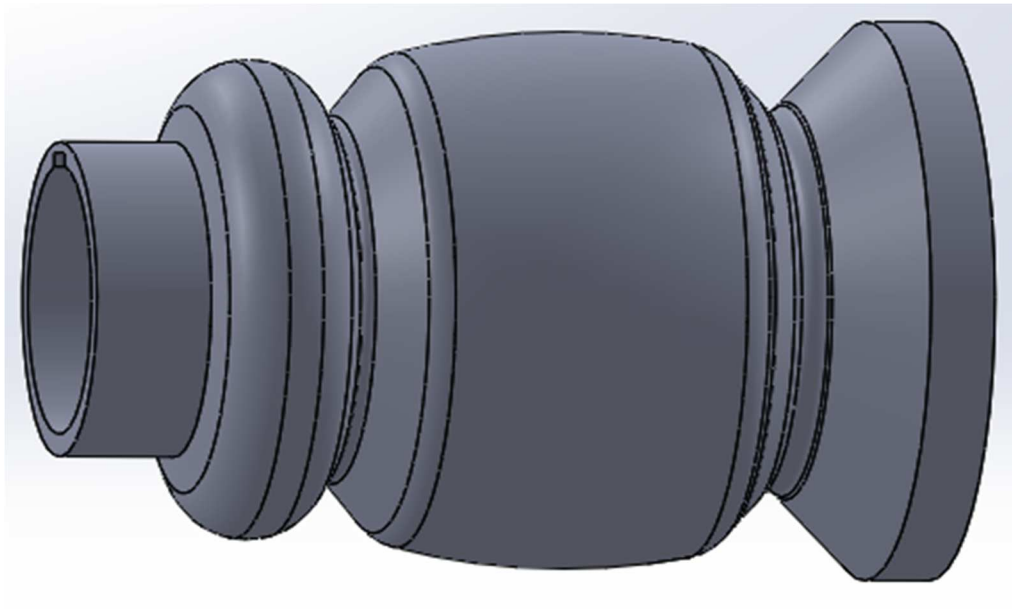


Figure II-5 : Conception d'un galet inférieur 2.

3^{ème} jeu

➤ Galet supérieur

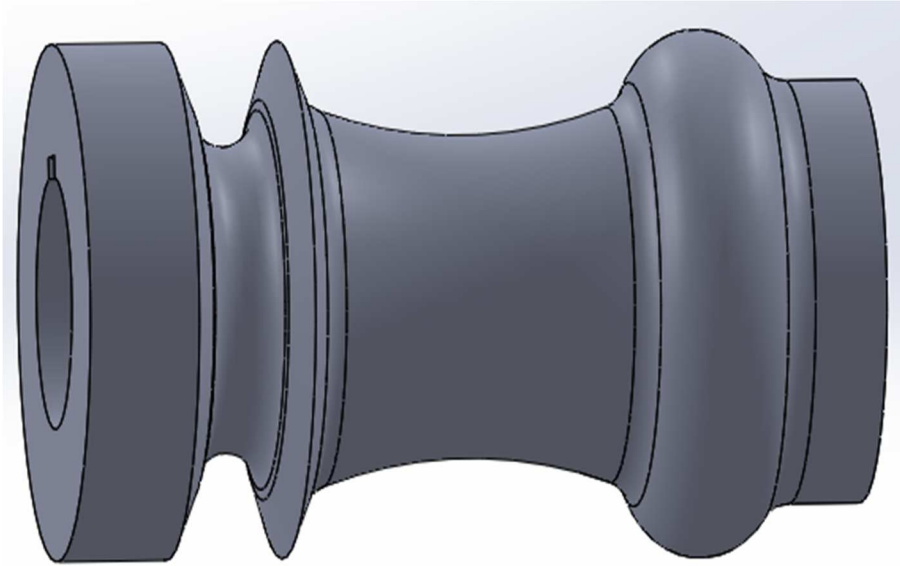


Figure II-6 : Conception d'un galet supérieur 3.

➤ **Galet inférieur**

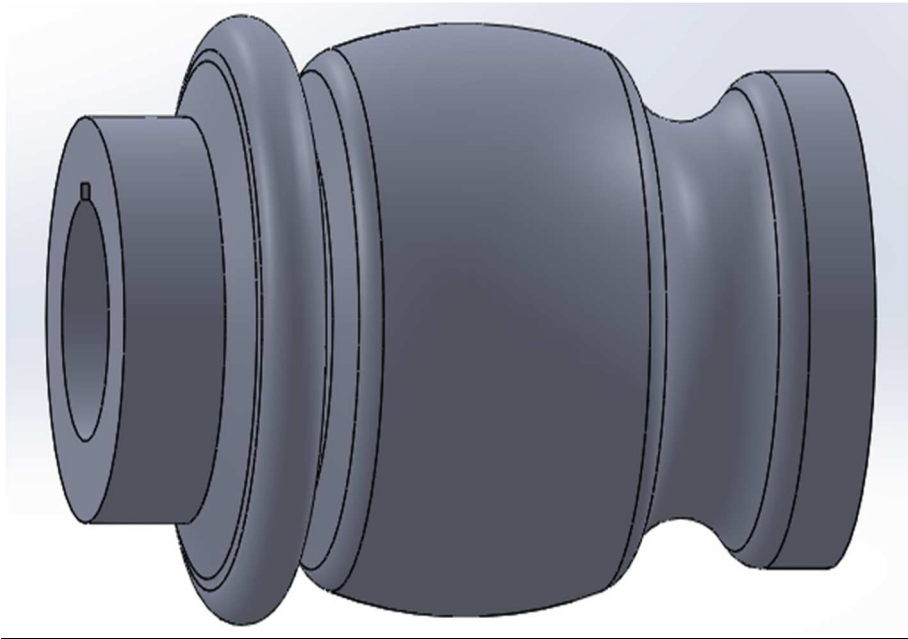


Figure II-7 : Conception d'un galet inférieur 3.

4^{ème} jeu

➤ **Galet supérieur**

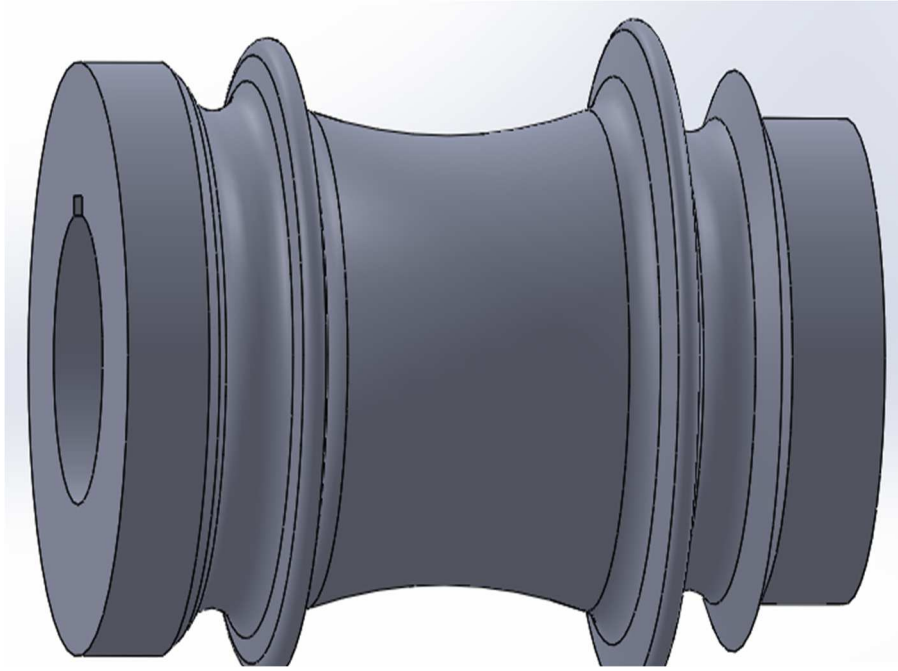


Figure II-8 : Conception d'un galet supérieur 4.

➤ **Galet inférieur**

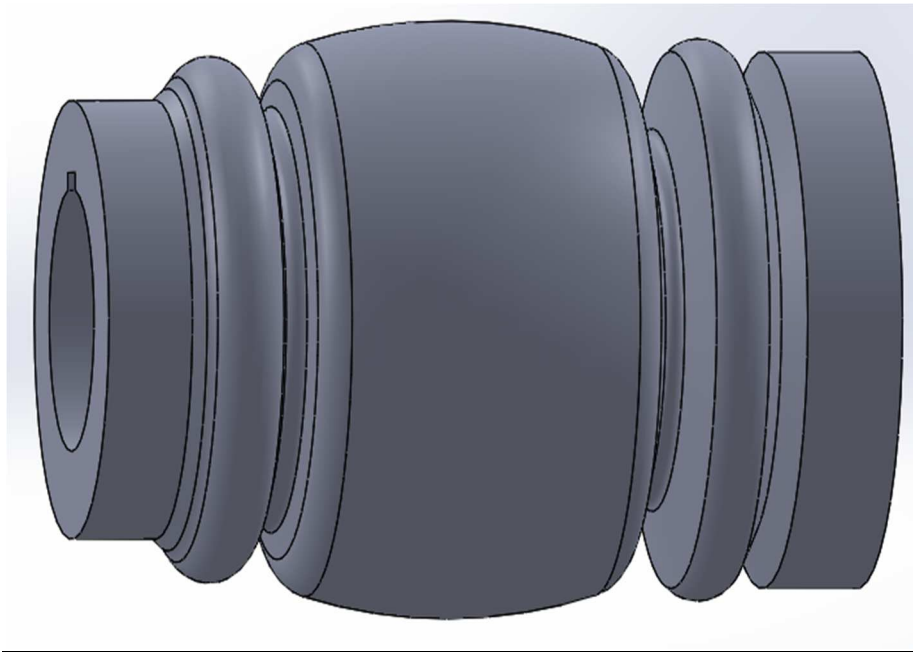


Figure II-9 : Conception d'un galet inférieur 4.

5^{ème} jeu

➤ **Galet supérieur**

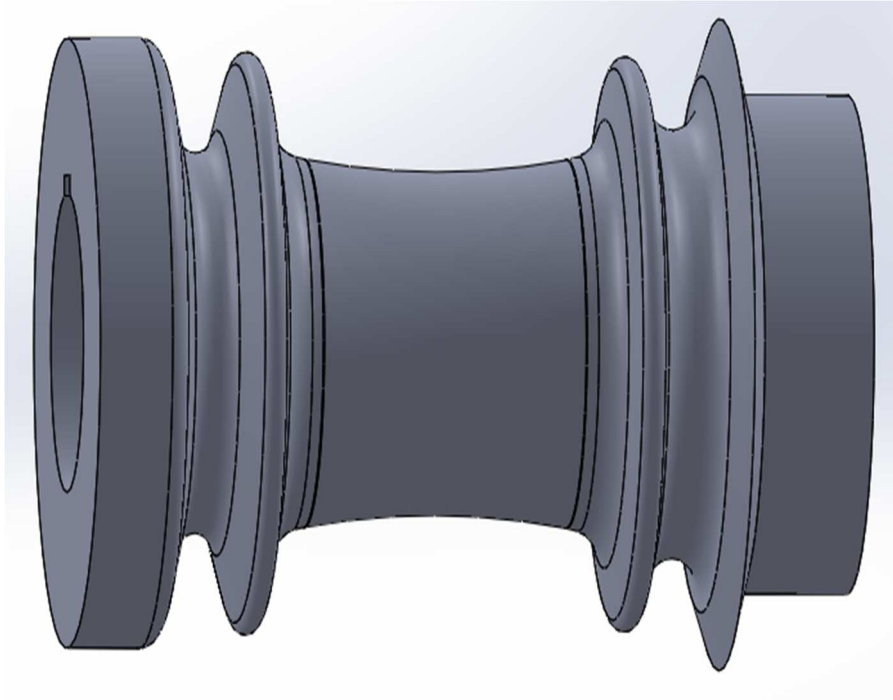


Figure II-10 : Conception d'un galet supérieur 5.

➤ **Galet inférieur**

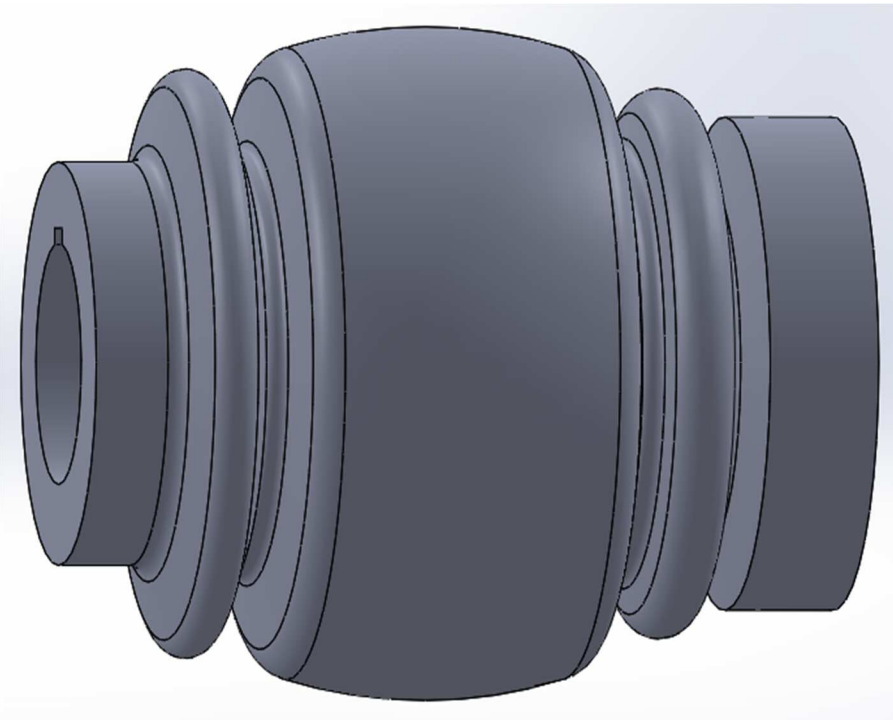


Figure II-11 : Conception d'un galet inférieur 5.

6^{ème} jeu

➤ **Galet supérieur**

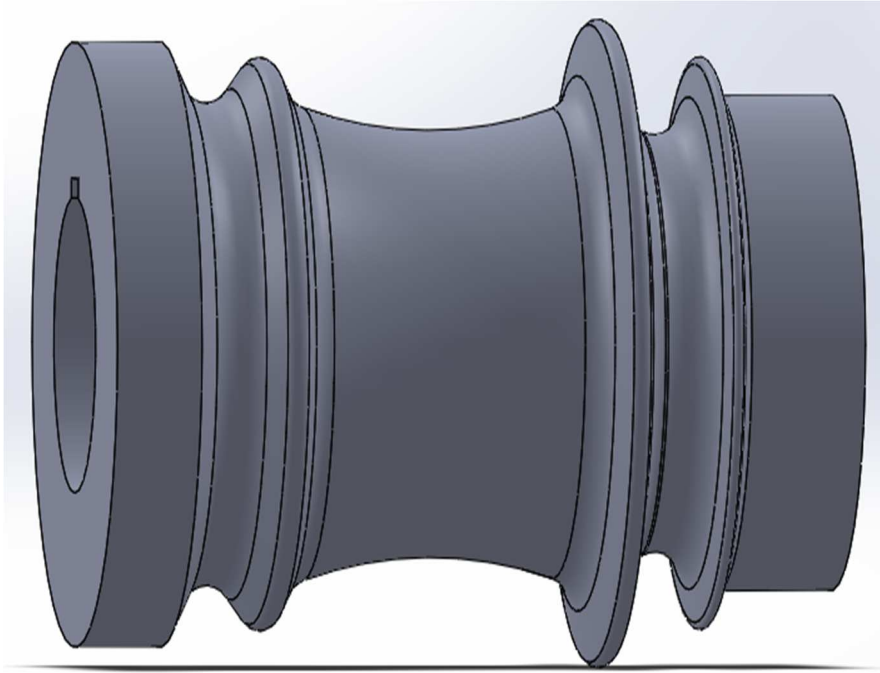


Figure II-12 : Conception d'un galet supérieur 6.

➤ **Galet inférieur**

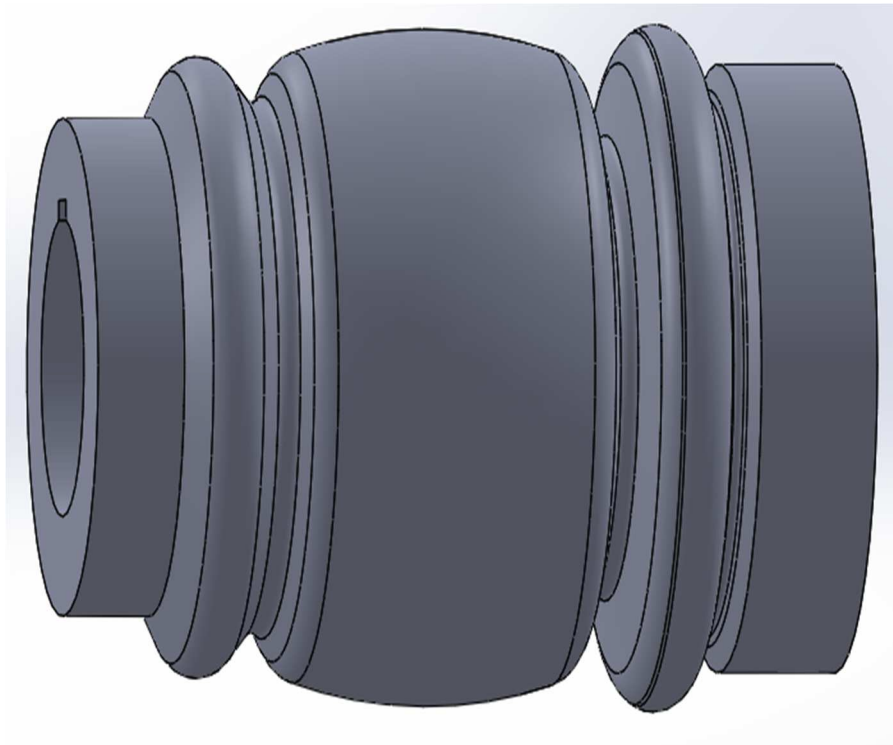


Figure II-13 : Conception d'un galet inférieur 6.

7^{ème} jeu

➤ **Galet supérieur**

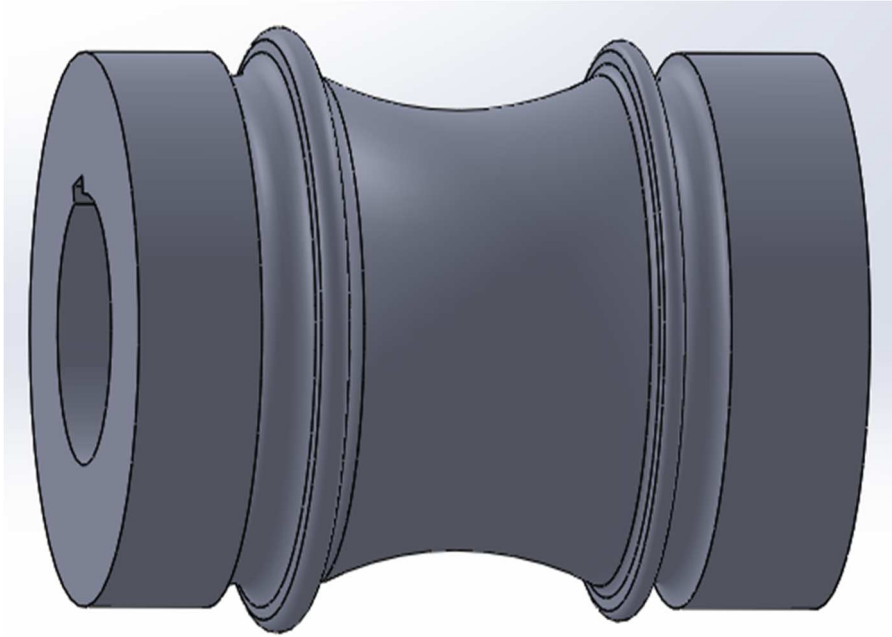


Figure II-14 : Conception d'un galet supérieur 7.

➤ Galet inférieur

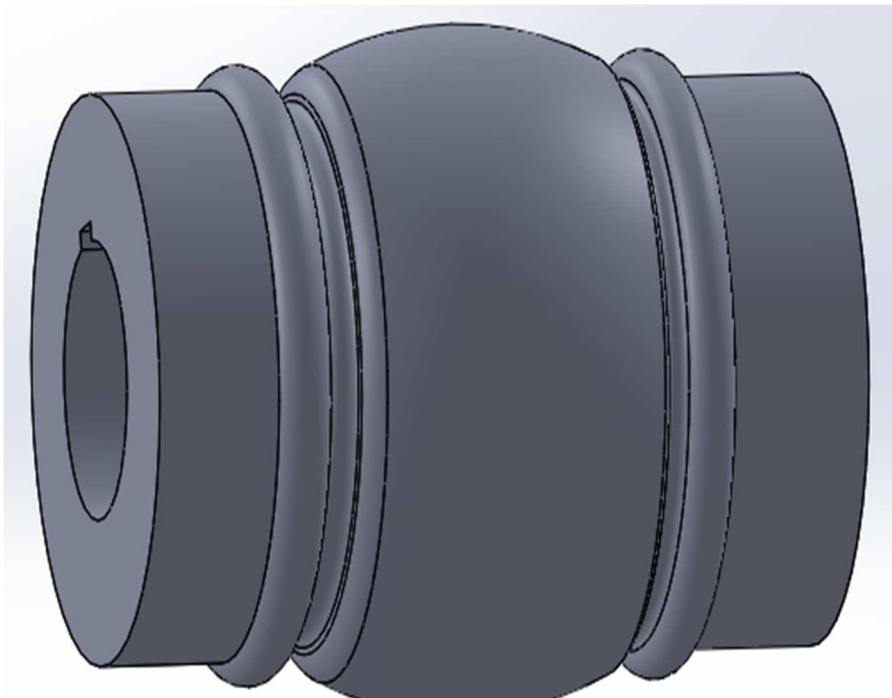


Figure II-15 : Conception d'un galet inférieur 7.

8^{ème} jeu

➤ Galet supérieur

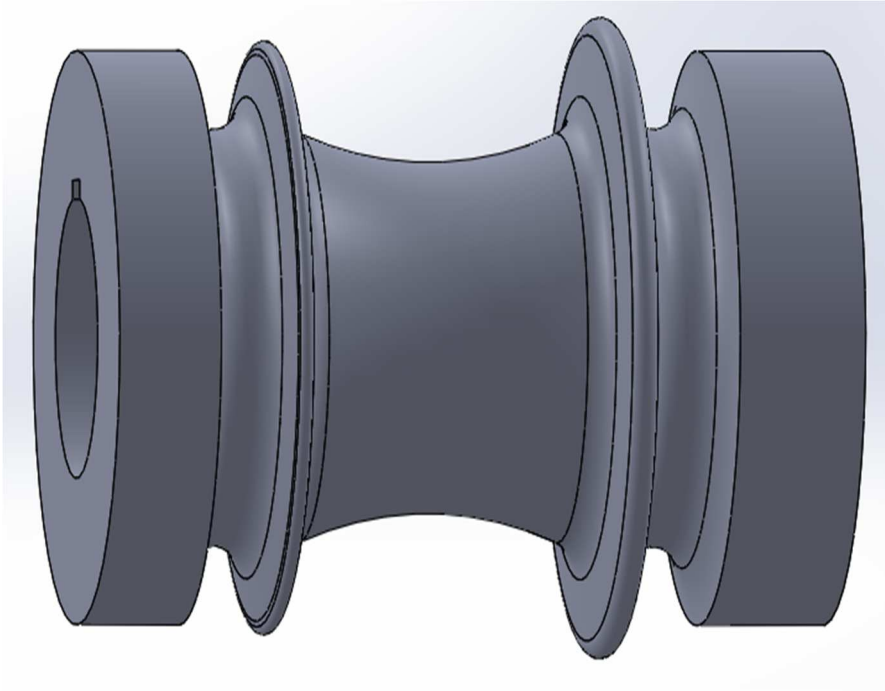


Figure II-16 : Conception d'un galet supérieur 8.

➤ **Galet inférieur**

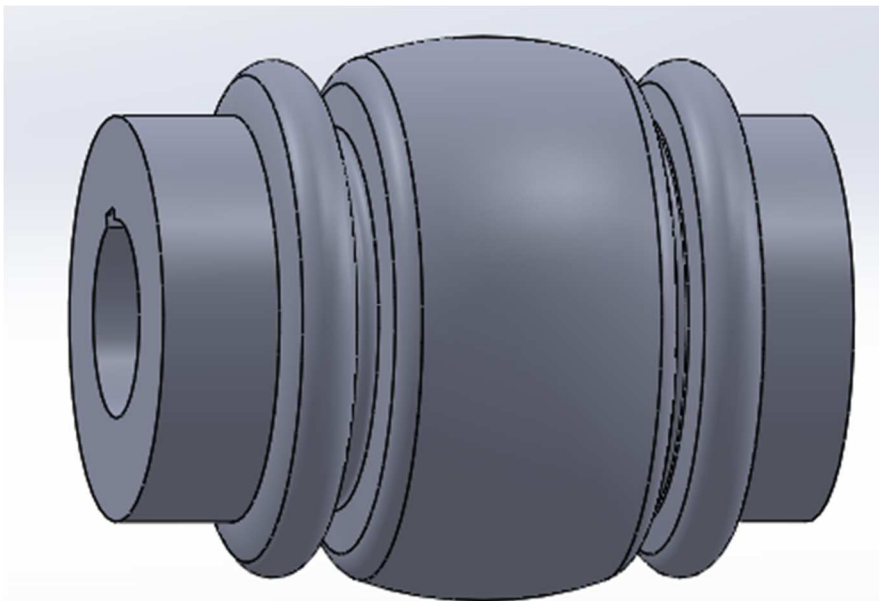


Figure II-17 : Conception d'un galet inférieur 8.

9ème et 10ème jeu

Le 9ème et 10ème jeu sont des galets de positions

➤ **Galet supérieur**

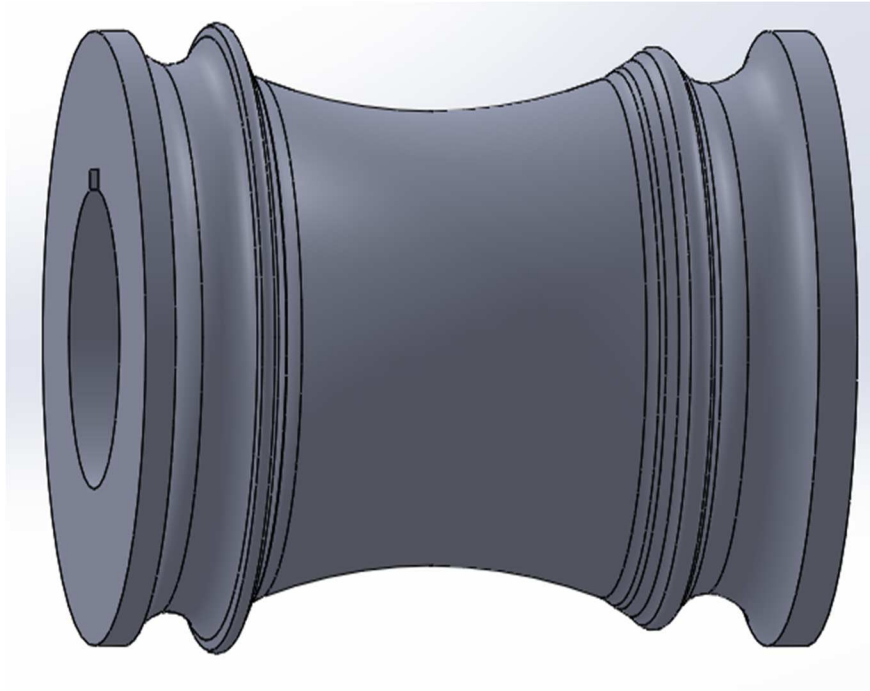


Figure II-18 : Conception d'un galet supérieur 9 et 10.

➤ **Galet inférieur**



Figure II-19 : Conception d'un galet inférieur 9 et 10.

II-9-2- Conception d'un arbre

L'arbre est une pièce qui sert comme axe de galet. la liaison est assuré par un rainurage dans le galet, et une clavette montée sur l'arbre.

➤ Arbre supérieur

Figure II-20 : Conception d'un arbre supérieur.

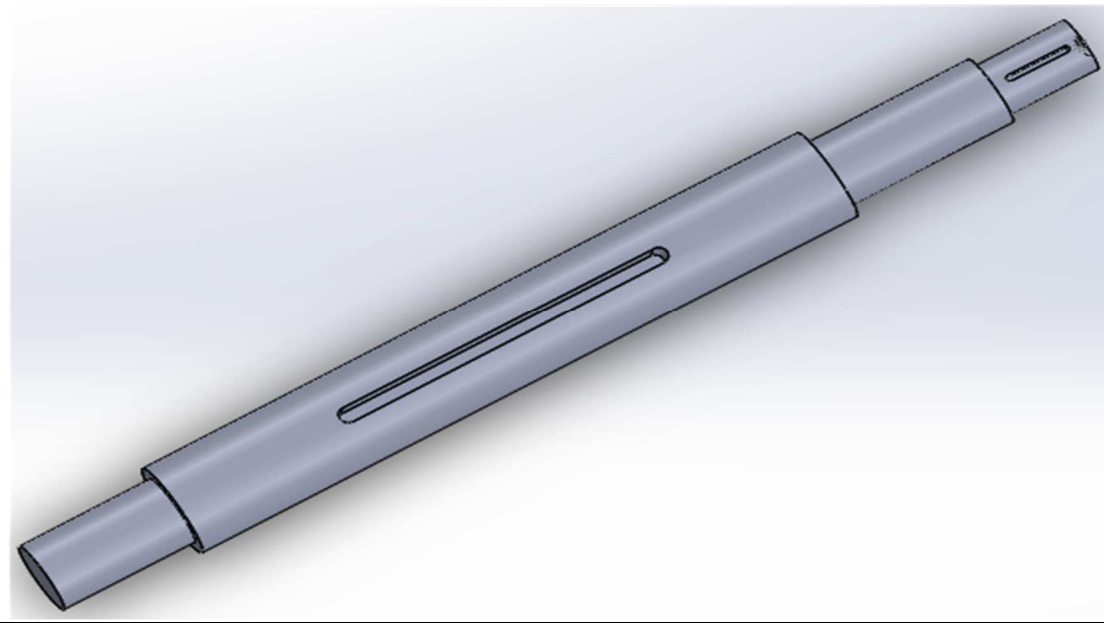
➤ Arbre inférieur

Figure II-21 : Conception d'un arbre inférieur.

II-9-3- Conception d'un support arbre

➤ Conception d'un support arbre supérieur

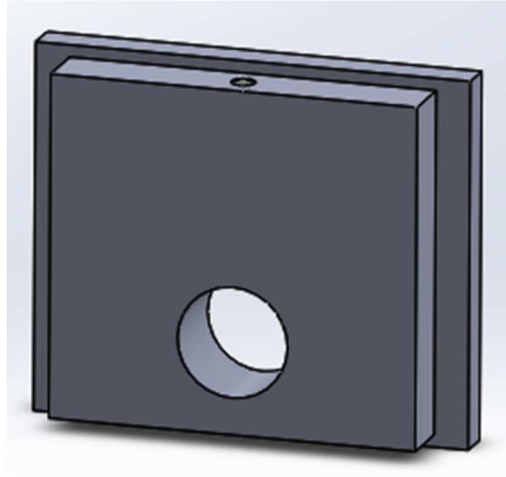


Figure II-22 : Conception d'un support arbre supérieur.

➤ **Conception d'un support arbre inférieur**

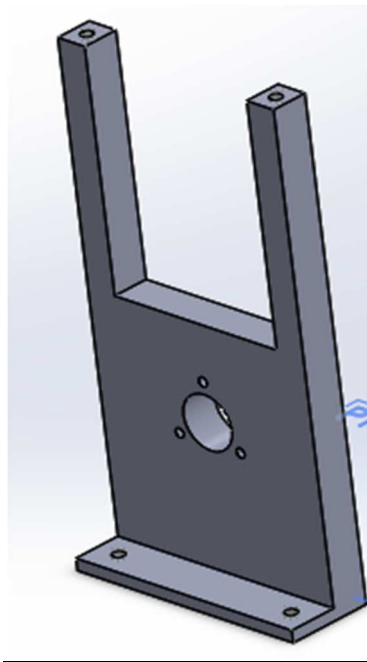


Figure II-23: Conception d'un support arbre inférieur.

II-9-4- Conception d'une pièce d'insert

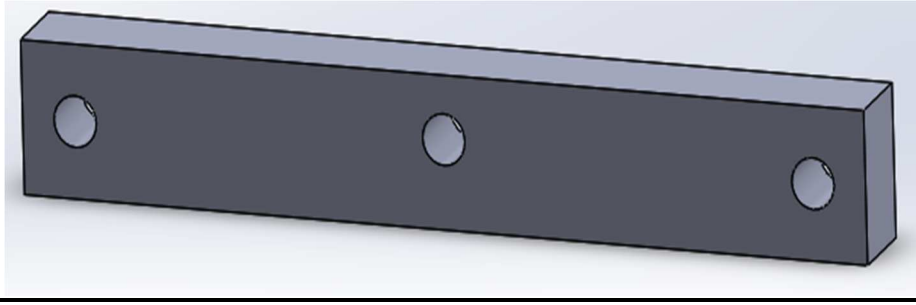


Figure II-24 : Conception d'une pièce d'insert.

II-9-5- Conception d'une table de profileuse

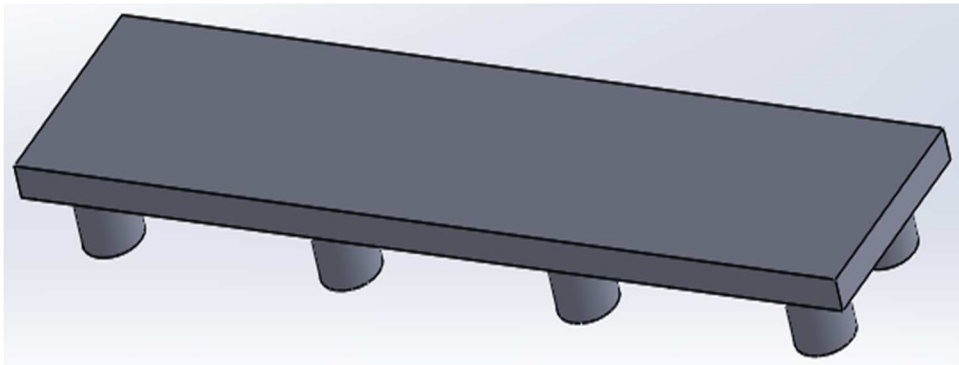


Figure II-25 : Conception d'une table de profileuse.

II-9-6- Conception d'une clavette

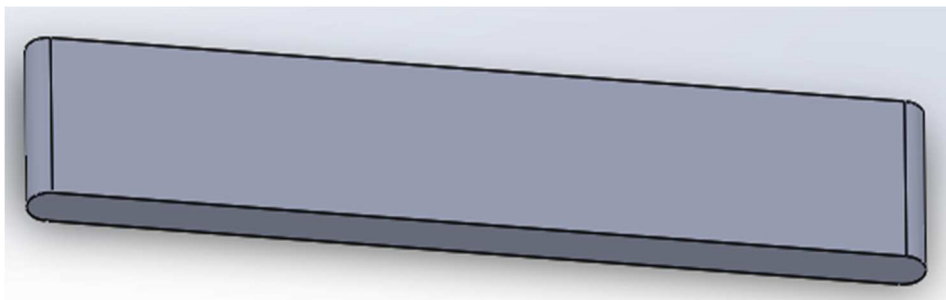


Figure II-26 : Conception d'une clavette.

II-9-7- Conception du système Moteur

➤ Conception de la base

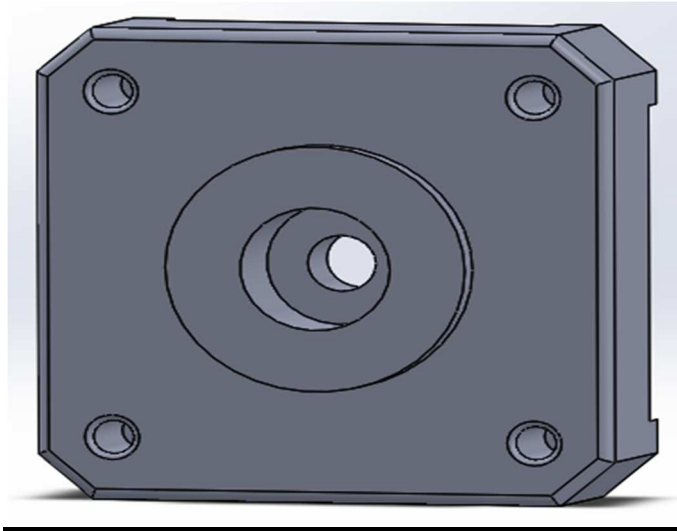


Figure II-27 : Conception de la base.

➤ **Conception de corps**

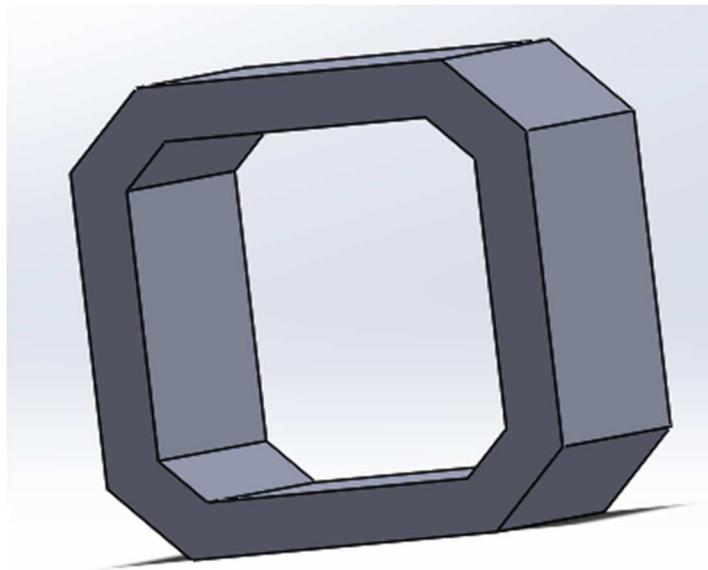


Figure II-28 : Conception de corps.

➤ **Conception de la plaque arrière**

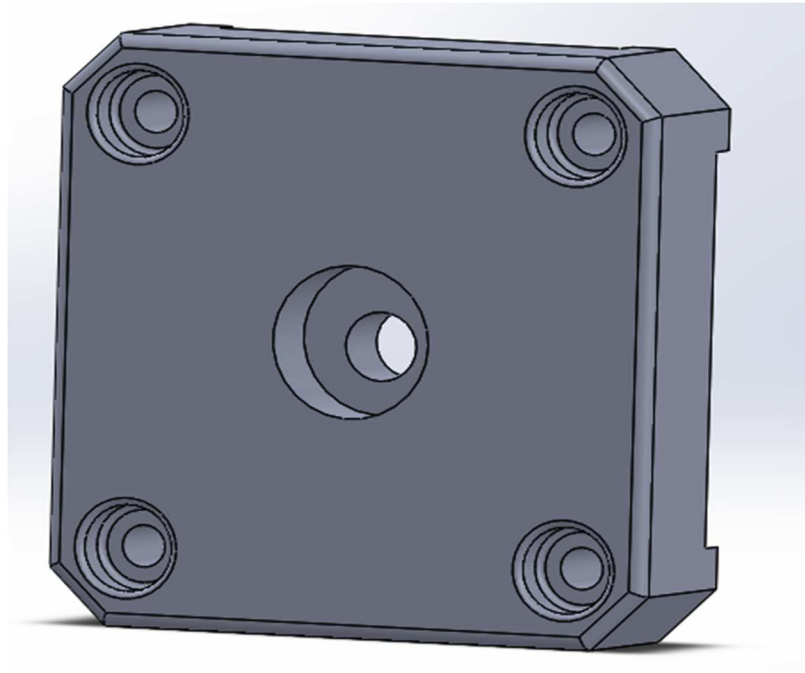


Figure II-29 : Conception de la plaque arrière.

➤ **Conception de la tige axiale**

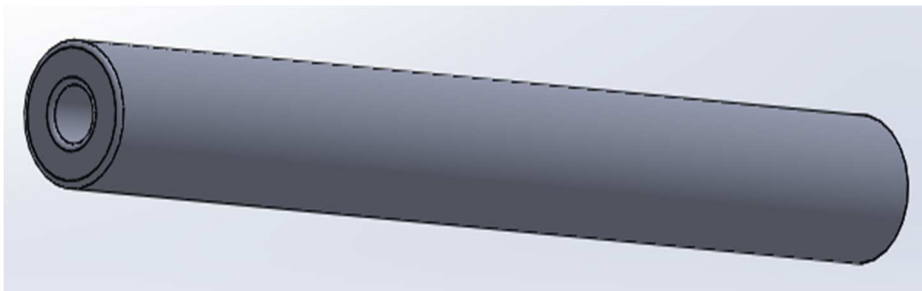


Figure II-30 : Conception de la tige axiale.

➤ **Conception de la poulie**

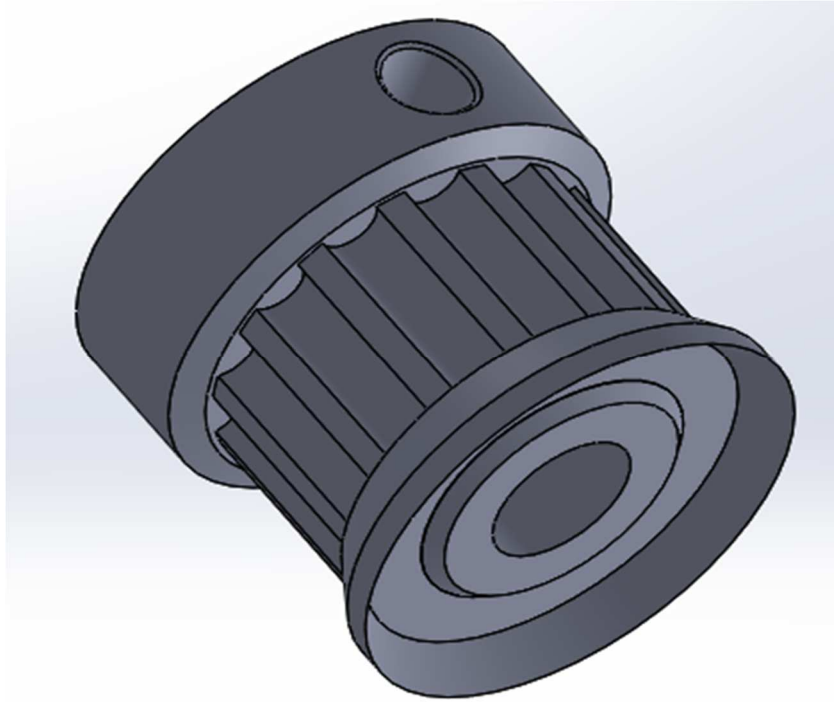


Figure II-31 : Conception de la poulie.

➤ **Conception d'un Moteur final**

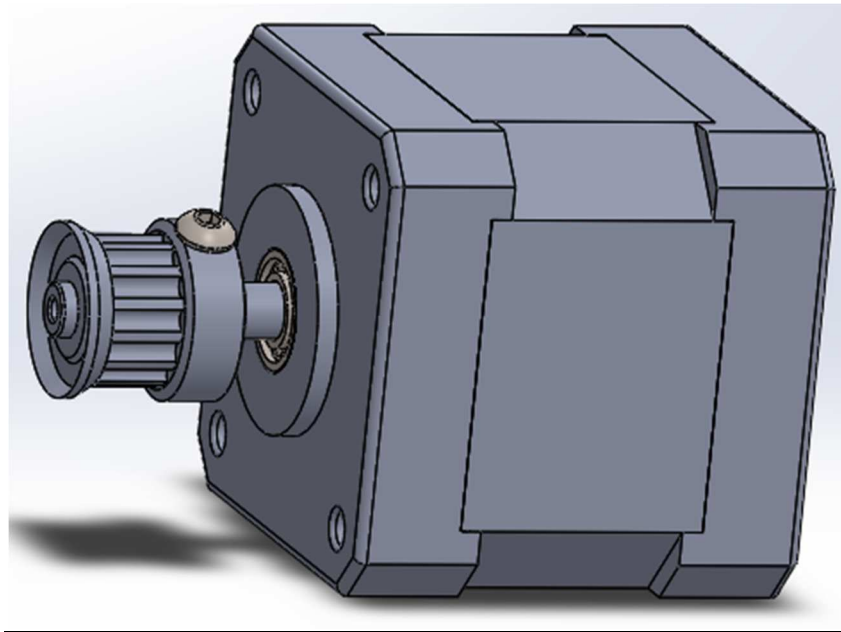


Figure II-32 : Conception d'un moteur final.

II-9-8- Conception d'une table Moteur

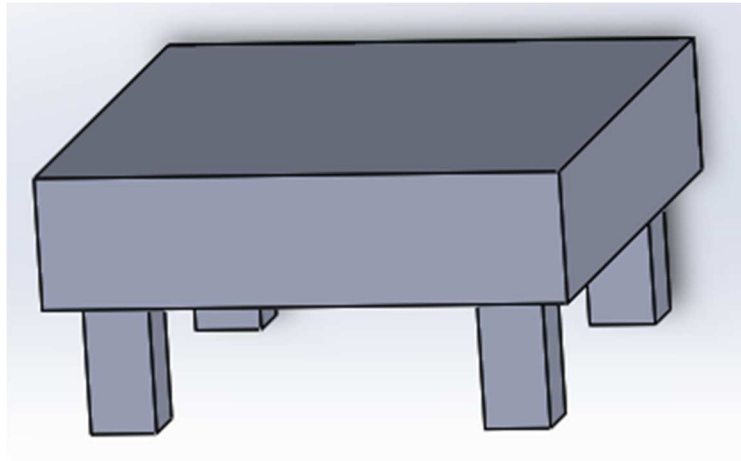


Figure II-33 : Conception d'une table Moteur.

II-9-9- Conception d'un boulon

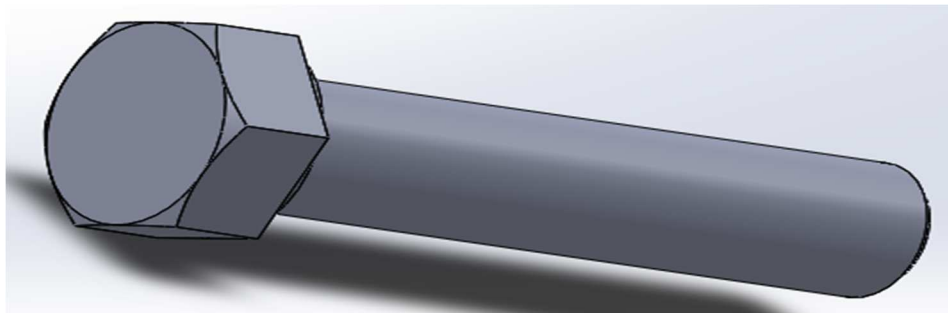


Figure II-34 : Conception d'un boulon.

II-9-10- Conception d'une vis de réglage

Le réglage est nécessaire pour permettre le travail sur plusieurs épaisseurs de la tôle.
Le réglage se fera par vis de réglage au niveau des galets supérieurs.

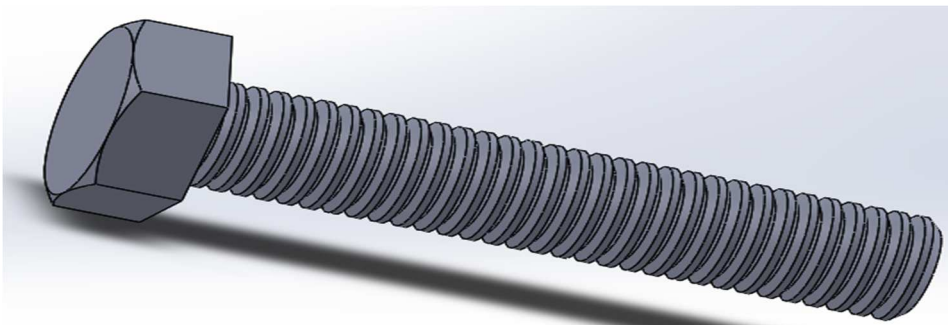


Figure II-35 : Conception d'une vis de réglage.

II-9-11- Conception d'écrou

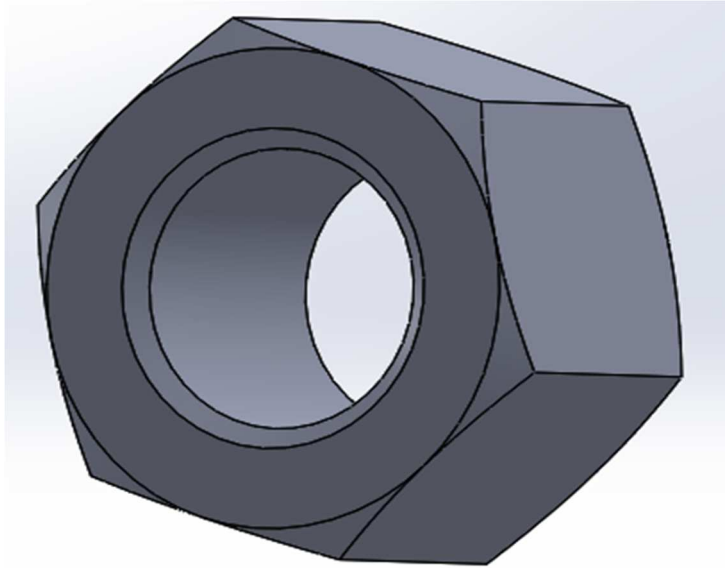


Figure II-36 : Conception d'un écrou.

II-9-12- Conception d'un circlips



Figure II-37 : Conception d'un circlipe.

II-9-13- Conception d'un engrenage

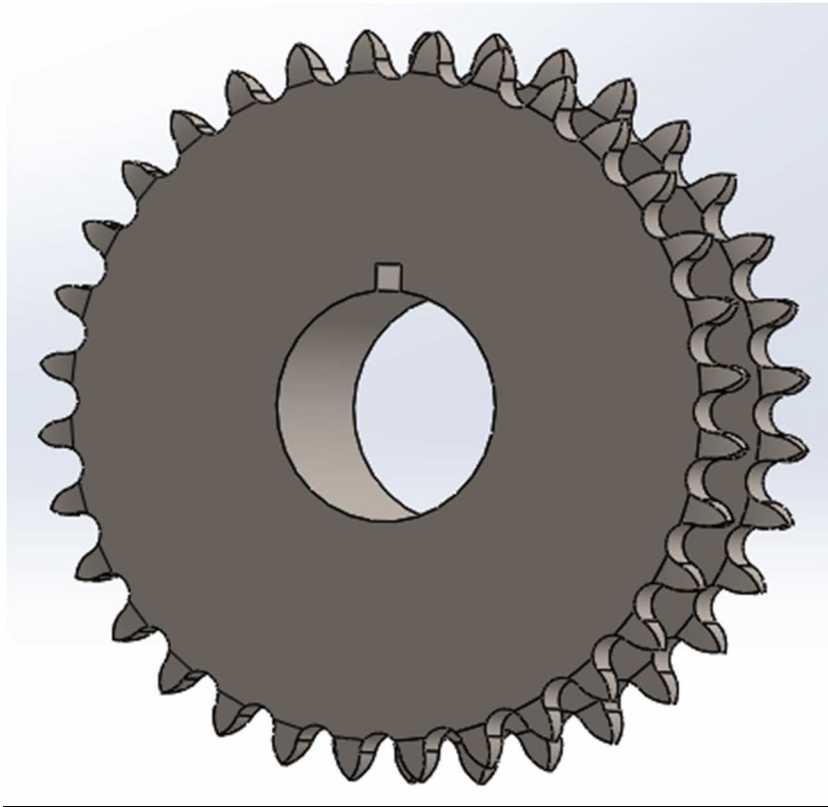


Figure II-38 : Conception d'un pignon.

II-9-14- Conception d'une chaine



Figure II-39 : Conception d'une chaine.

II-9-15-Assemblage final de la profileuse

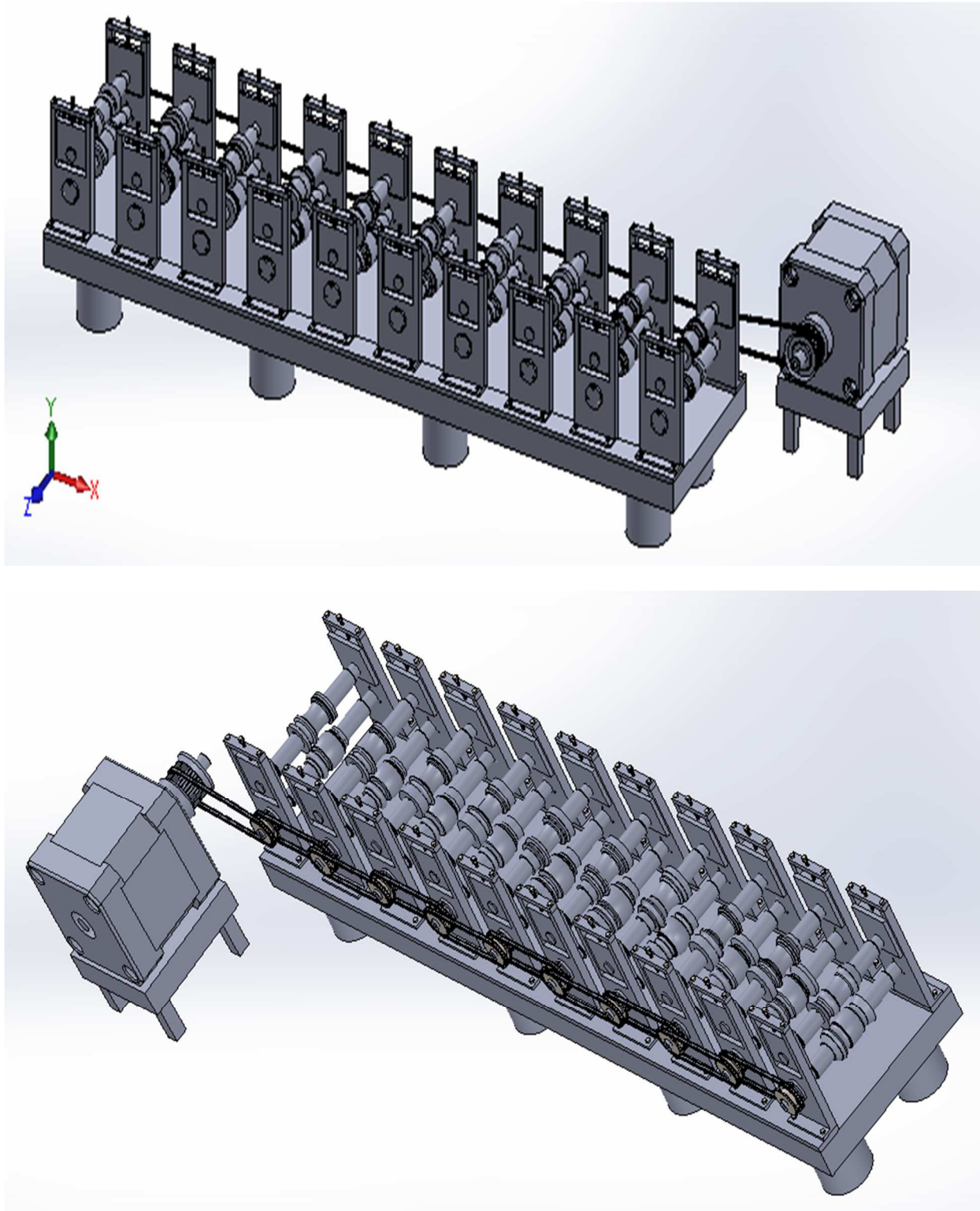


Figure II-40 : Assemblage final d'une profileuse.

II-10-Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les éléments essentiels qui composent la profileuse que nous avons conçue. Nous avons aussi présenté le choix de matériaux ainsi que les dimensions de certains composants. Dans le chapitre suivant, nous étudierons le procédé de profilage en utilisant le logiciel de simulation numérique ABAQUS.

III-1-Introduction

Dans ce chapitre nous allons réaliser des simulations numériques de la partie active de la profileuse, plus précisément, du procédé profilage d'une tôle. Nous avons commencé par une présentation générale du code de calcul par éléments finis ABAQUS, puis nous avons entamé la simulation en important les pièces déjà conçu sur Solidworks et en les assemblant en appliquant les conditions aux limites appropriées. Pour réaliser les simulations nous avons introduit les différentes propriétés de matériau et nous avons maillé tous les composants de l'assemblage après quoi nous avons lancé les calculs. Nous montrerons par la suite les résultats obtenus et vers la fin une conclusion de ce chapitre.

III-2-Généralité sur ABAQUS

ABAQUS est très utilisé dans les industries automobiles et aéronautiques. En raison du large spectre de ses capacités d'analyse et de sa bonne ergonomie. Il est également très populaire dans les milieux universitaires, pour la recherche et l'éducation.

- ABAQUS se compose de trois produits

ABAQUS/Standard, ABAQUS/Explicit et ABAQUS/CAE.

❖ ABAQUS/Standard

Est un solveur généraliste qui recourt à un schéma traditionnel d'intégration implicite.

- Résolution basée sur l'algorithme de Newton-Raphson et méthode de Riks.
- Problèmes linéaires et non-linéaires. [9]
- Géométrie 1D, 2D, 3D et Axisymétrique
- Nombreuses procédures d'analyse dans le domaine temporel et fréquentiel.

❖ ABAQUS/Explicit

Est un solveur qui emploie un schéma d'intégration explicite pour résoudre des problèmes dynamiques ou quasi statiques non linéaires. [9]

- Analyse non-linéaire

- Problème transitoire et dynamique des structures
- Résolution basés sur la méthode explicite d'intégration en temps.
- Géométrie 1D, 2D, 3D et Axisymétrique.

❖ ABAQUS/CAE

Constitue une interface intégrée de visualisation et de modélisation pour lesdits solveurs.

Chacun de ces produits est complété par des modules additionnels ou optionnels, spécifiques à certaines applications.

ABAQUS fut d'abord conçu pour analyser les comportements non-linéaires. Il possède en conséquence une vaste gamme de modèles de matériau.

III-3-Modélisation du profilage

Nous avons construit un modèle dans le logiciel de calcul par éléments finis ABAQUS/ CAE. La géométrie du modèle est représentée sur la « figure III-1 ». Dans les simulations nous avons considéré tous les galets (supérieur et inférieur) comme des corps rigide. La tôle est de dimension de $180 \times 700 \times 0.8$ mm³ est modélisée comme une coque isotrope déformable.

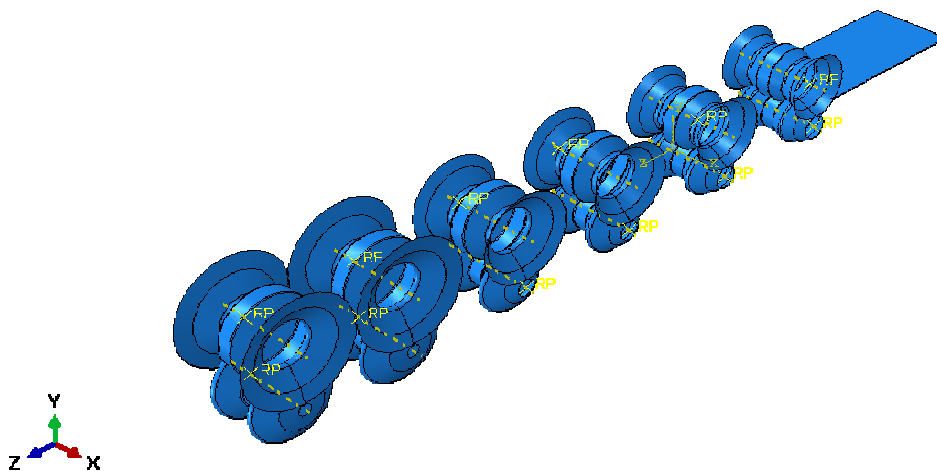


Figure III-1 : Modélisation du profilage.

III-4-Matériau

Pour la tôle nous avons utilisés le matériau CD04, et pour les galets Z200C12, et ce choix est tiré des caractéristique mécaniques de ces matériaux, citées dans le chapitre précédent.

Les paramètres utilisés pour ces deux matériaux

❖ Elasticité : loi de Hooke

La loi d'élasticité et donné par

$$\sigma = 2\mu\varepsilon^e + \lambda \operatorname{tr}(\varepsilon^e) \mathbf{II} \quad \text{III-1}$$

$$\mu = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad \text{et} \quad \lambda = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad \text{III-2}$$

Avec

- ✓ Le module de Young $E = 210000$ MPa.
- ✓ Le coefficient de poisson $\nu = 0.3$.
- ✓ μ et λ sont les coefficients de lame

III-5-Le maillage

Le maillage sert à subdiviser les surfaces compliquées à des éléments géométriques faciles à étudier. Il existe plusieurs types de maillage. Dans notre cas, nous avons utilisé le maillage avec des éléments cubiques à 8 nœuds avec pour les galets et des éléments coques. S4R pour la tôle.

III-5-1-Maillage des galets

Les maillages adoptés pour les galets sont de types volumiques, nous les donnons sur les figures suivantes :

1^{er} jeu

➤ Maillage d'un galet supérieur 1

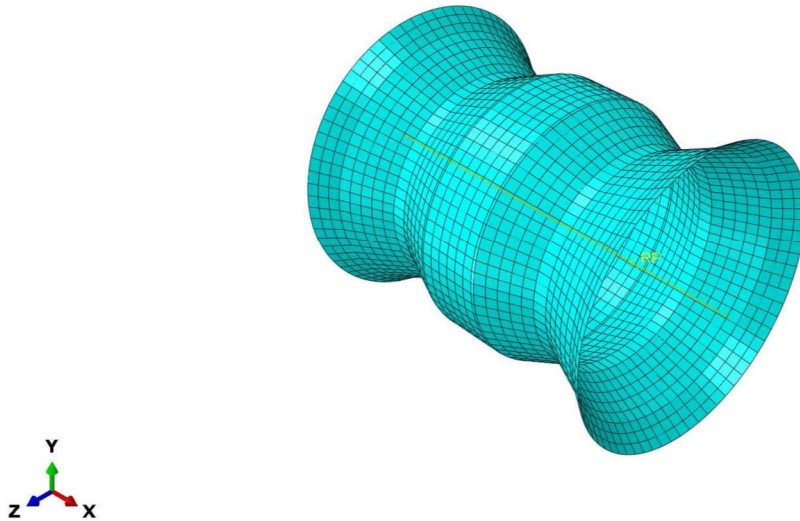


Figure III-2 : Maillage d'un galet supérieur 1.

➤ Maillage d'un galet inférieur 1

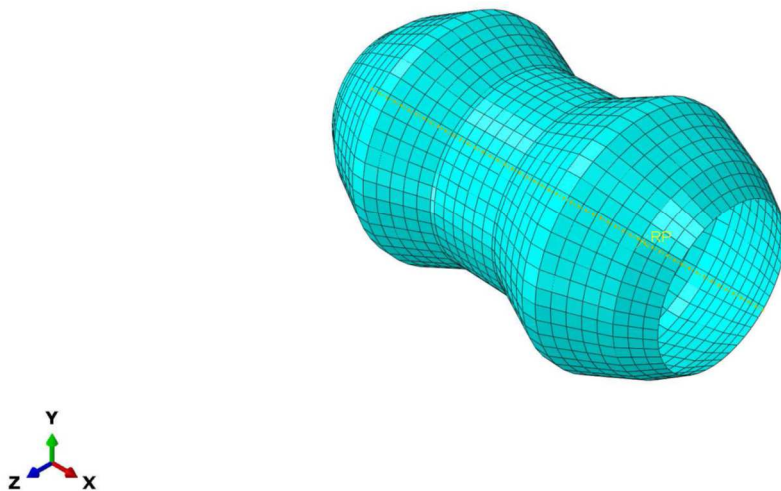


Figure III-3 : Maillage d'un galet inférieur 1.

2^{ème} jeu

➤ Maillage d'un galet supérieur 2

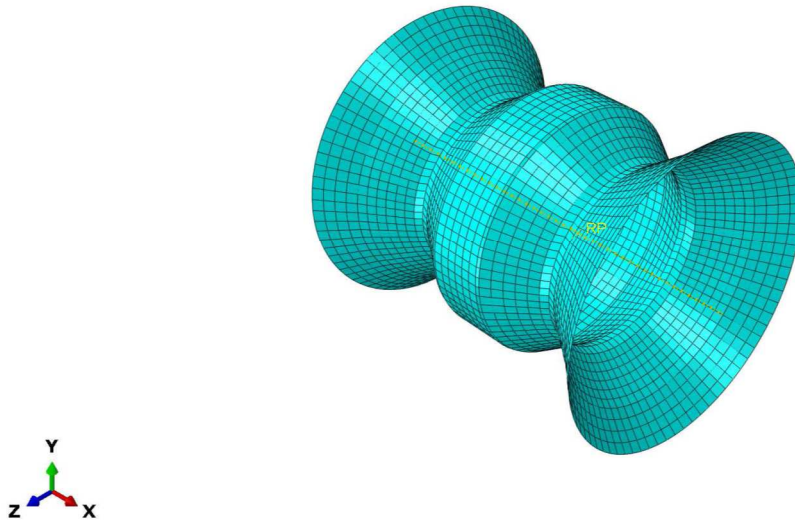


Figure III-4 : Maillage d'un galet supérieur 2.

➤ Maillage d'un galet inférieur 2

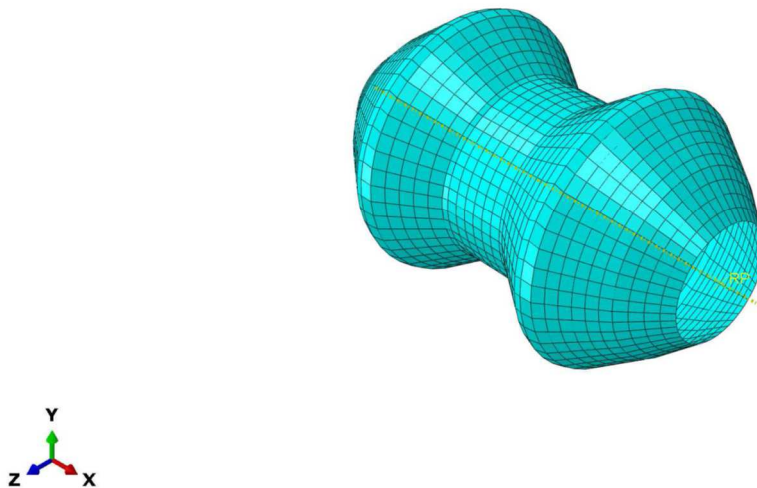


Figure III-5 : Maillage d'un galet inférieur 2.

3^{ème} jeu

➤ Maillage d'un galet supérieur 3

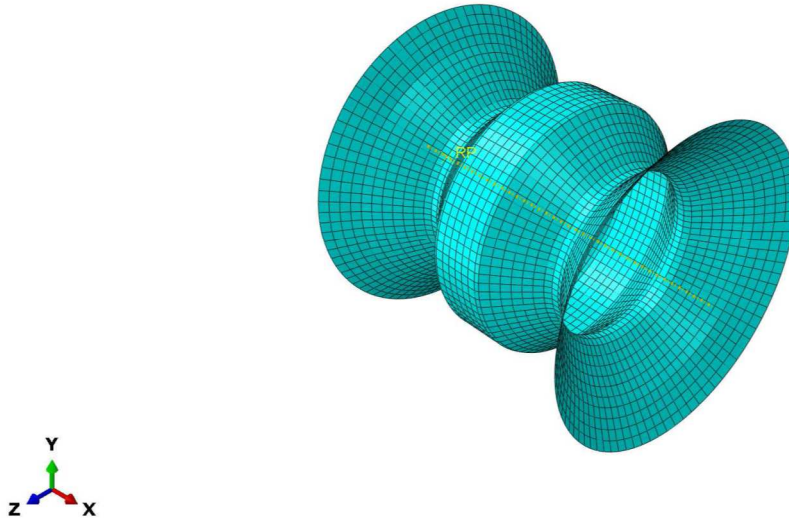


Figure III-6 : Maillage d'un galet supérieur 3.

➤ Maillage d'un galet inférieur 3

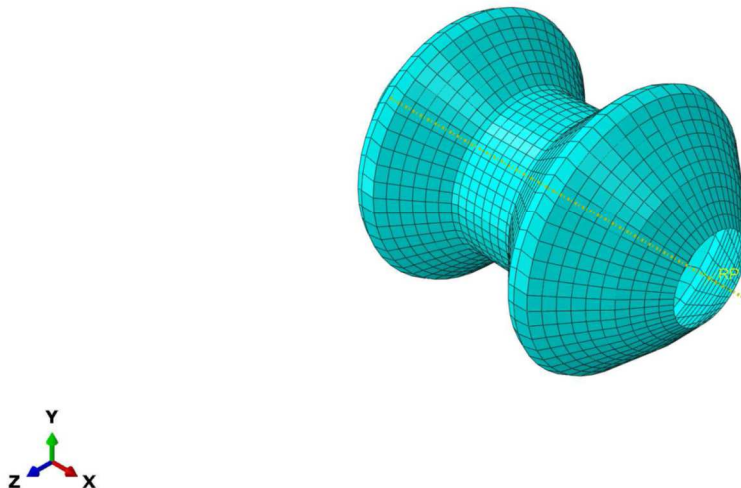


Figure III-7 : Maillage d'un galet inférieur 3.

4^{ème} jeu

➤ Maillage d'un galet supérieur 4

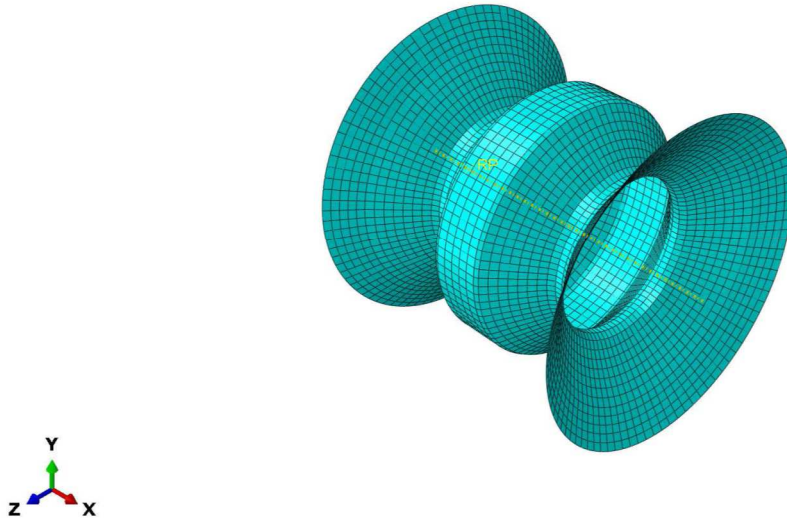


Figure III-8 : Maillage d'un galet supérieur 4.

➤ Maillage d'un galet inférieur 4

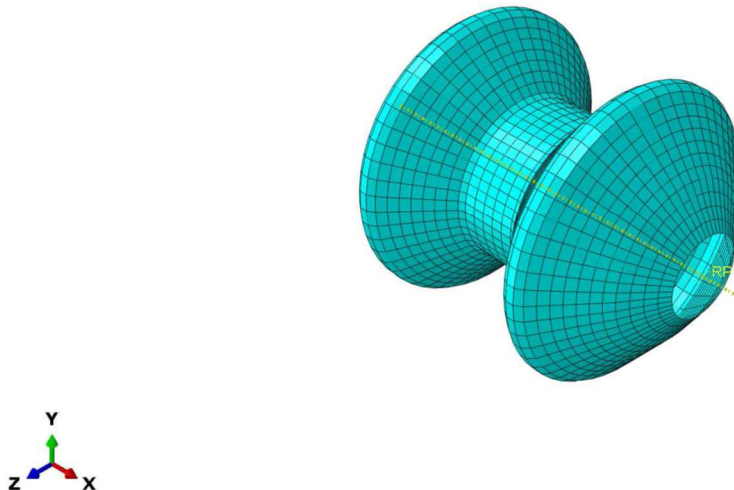


Figure III-9 : Maillage d'un galet inférieur 4.

5^{ème} jeu

➤ Maillage d'un galet supérieur 5

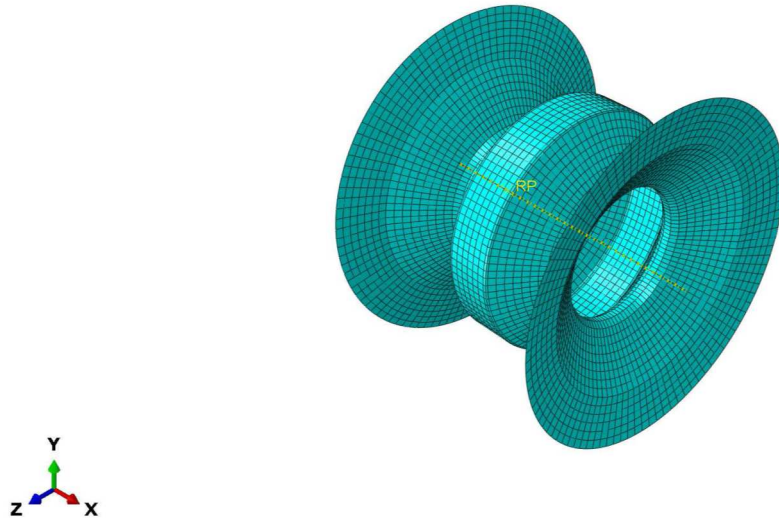


Figure III-10 : Maillage d'un galet supérieur 5.

➤ Maillage d'un galet inférieur 5

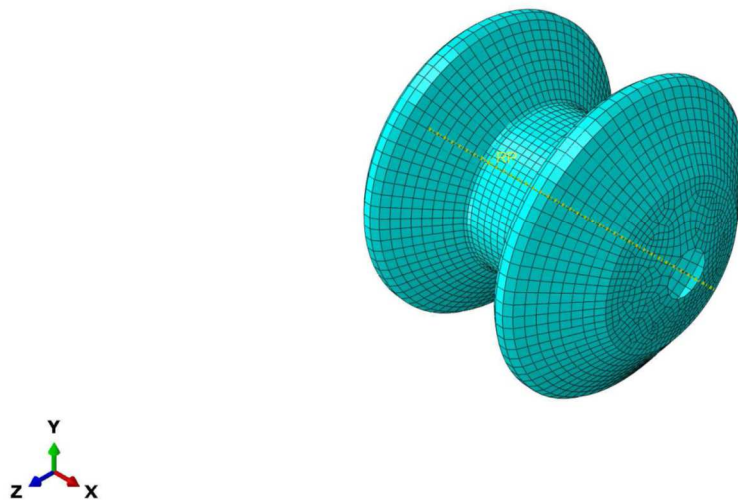


Figure III-11 : Maillage d'un galet inférieur 5.

III-5-2-Maillage de la tôle

Le maillage adopté pour la tôle est constitué de 8000 éléments.

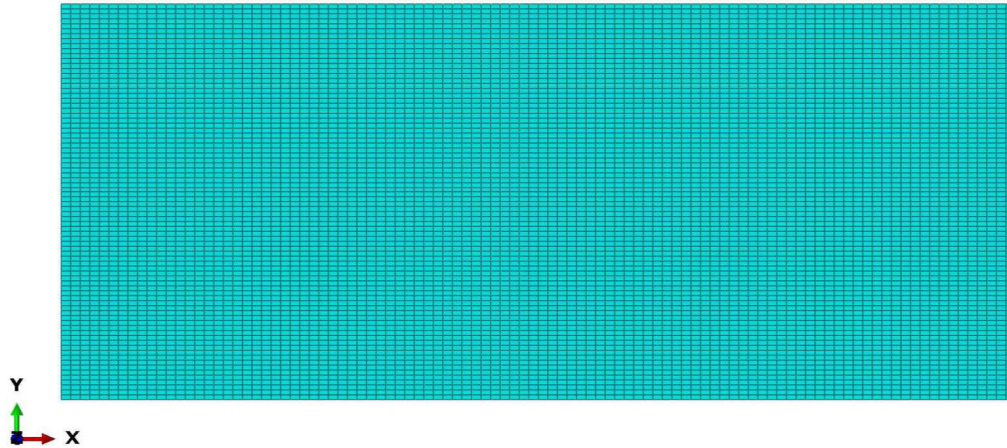


Figure III-12 : Maillage de la tôle.

III-6-Conditions aux limites

La figure III-13 représente les conditions aux limites imposées sur les galets (supérieur et inférieur) et la tôle. Un déplacement est imposé selon l'axe Z. Les galets sont maintenus inamovibles afin d'assurer l'opération de profilage.

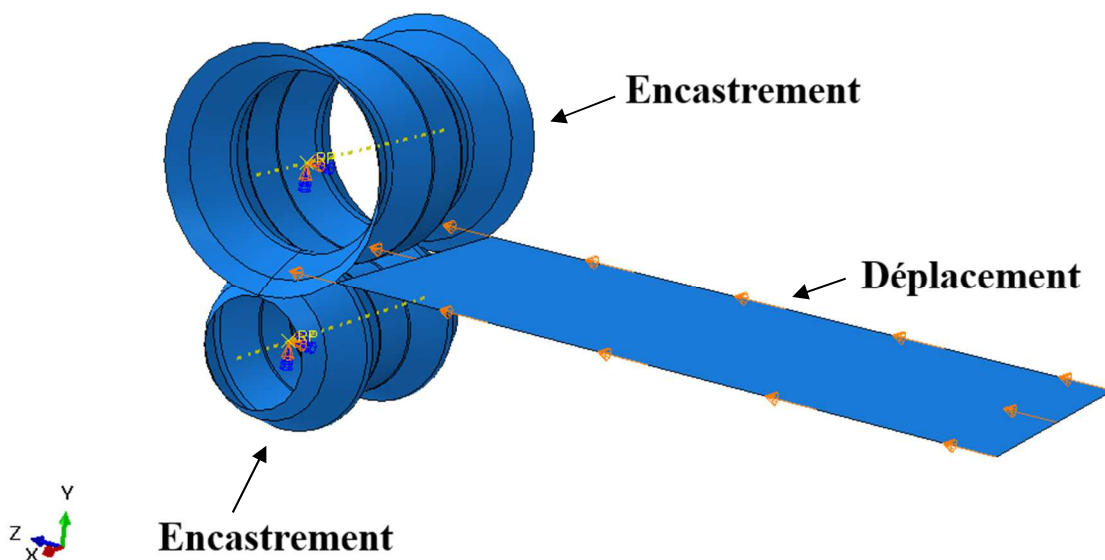
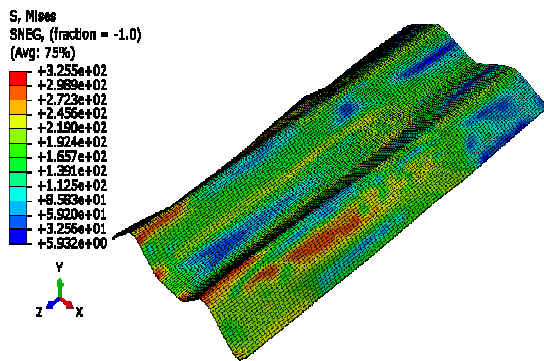


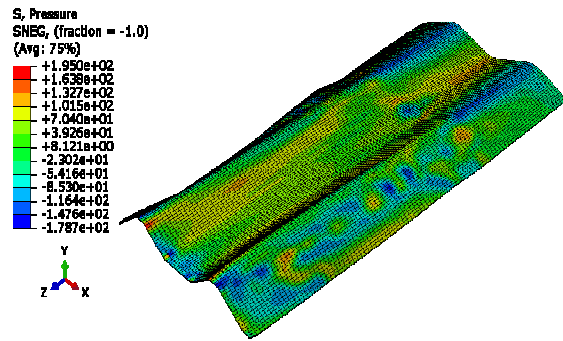
Figure III-13 : Répartition des conditions limite.

III-7-Résultats de la simulation

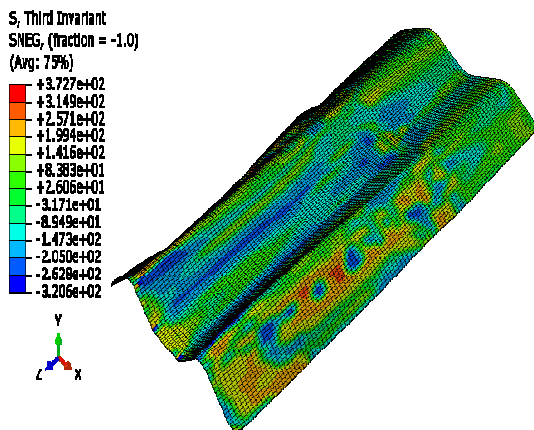
Nous donnons au-dessous les distributions des contraintes de Von-Mises, la pression hydrostatique $p = -tr(\sigma)$, le troisième invariant $J_3 = \det(S)$ et la déformation plastique cumulée $\overline{\varepsilon_{eq}^p}$ dans la tôle à différents moment du procédé.



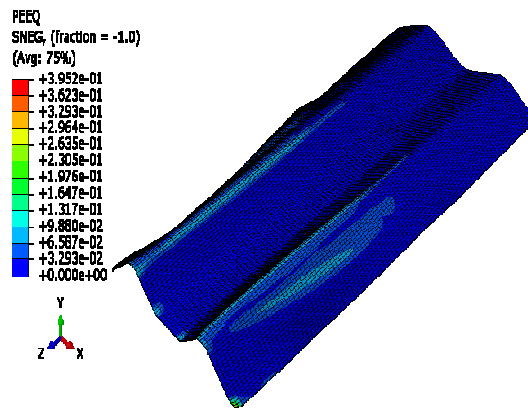
Contrainte de Von Mises



Pression hydrostatique

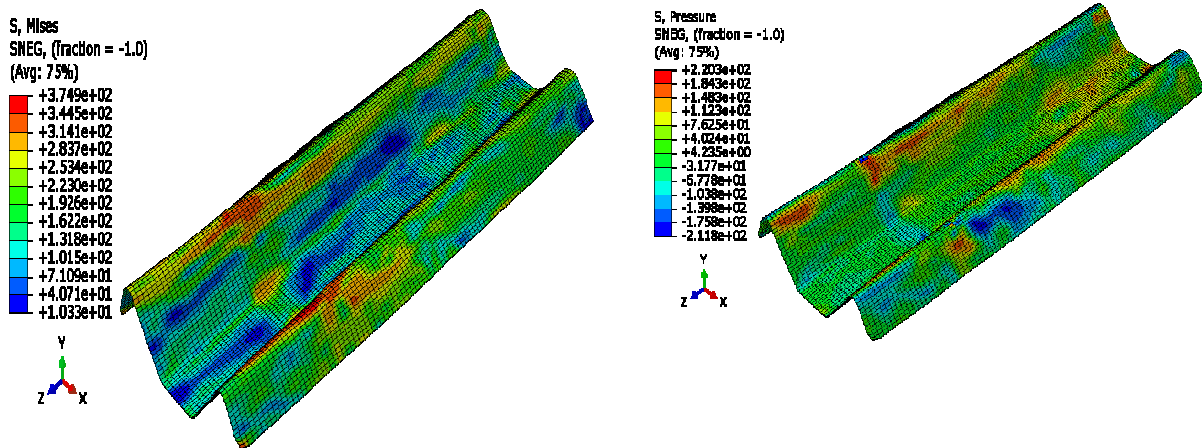


Le troisième invariant de contrainte



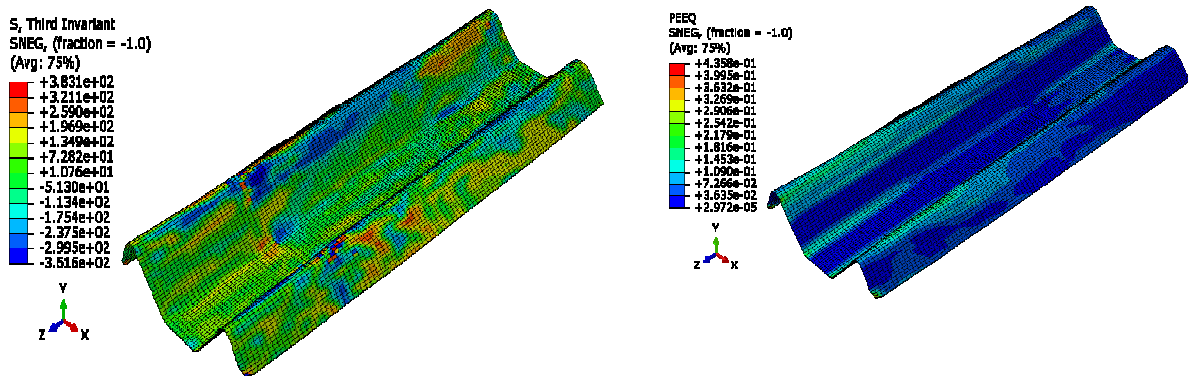
Déformation plastique cumulée

Figure III-14 : Simulation de profilage après 1^{er} jeu.



Contrainte de Von Mises

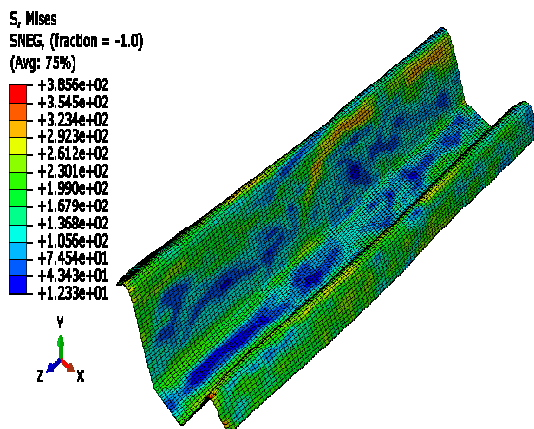
Pression hydrostatique



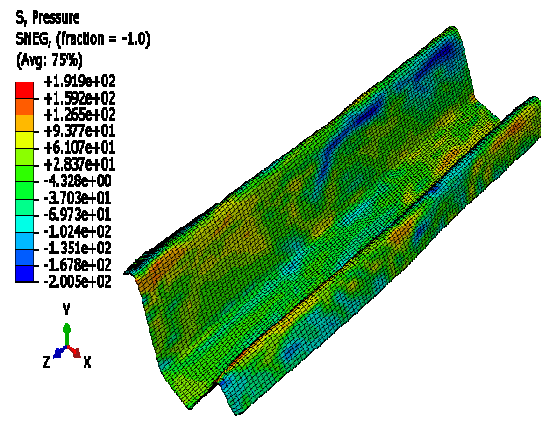
Le troisième invariant de contrainte

Déformation plastique cumulée

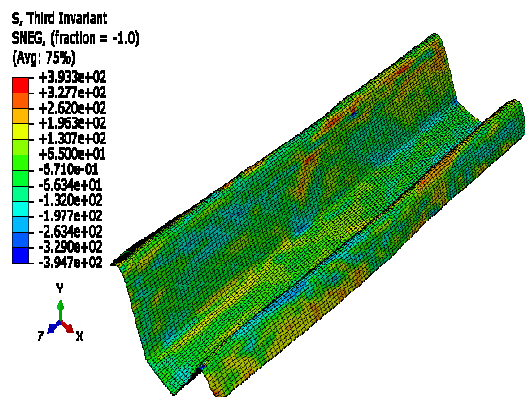
Figure III-15 : Simulation de profilage après 3^{ème} jeu.



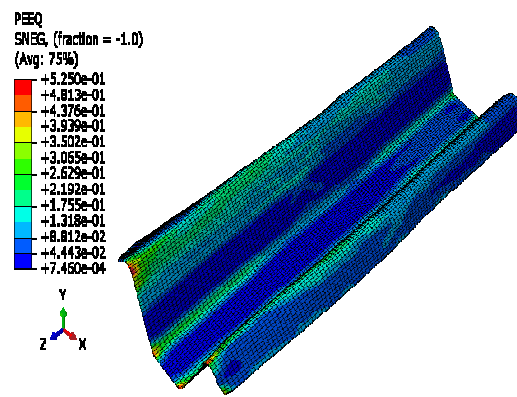
Contrainte de Von Mises



Pression hydrostatique



Le troisième invariant de contrainte



Déformation plastique cumulée

Figure III-16 : Simulation de profilage après dernier jeu.

Avec

- La contrainte de Von Mises :

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\frac{3}{2} S_{ij} S_{ij}} \quad \text{III-2}$$

- La pression :

$$p = -(\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}) \quad \text{III-3}$$

- Le 3^{ème} invariant :

$$J_3 = \det(S) \quad \text{III-4}$$

- La déformation plastique équivalente :

$$\dot{\varepsilon}_{eq}^p = \sqrt{\frac{2}{3} \varepsilon_{ij}^p \cdot \varepsilon_{ij}^p} \quad \text{III-5}$$

III-8-Interprétation des résultats

Après l'étape de simulation nous disposons de différentes courbes de l'effort appliqué lors du passage de la tôle sur les 12 différents galets (6 supérieurs et 6 inférieurs). Nous donnons donc les courbes Force-déplacement ci-dessous qui salissent le plus grand pliage induit pas les formes des galets. Nous obtenons sur les figures de les contraintes et déformations plastique se concentrent sur les galets

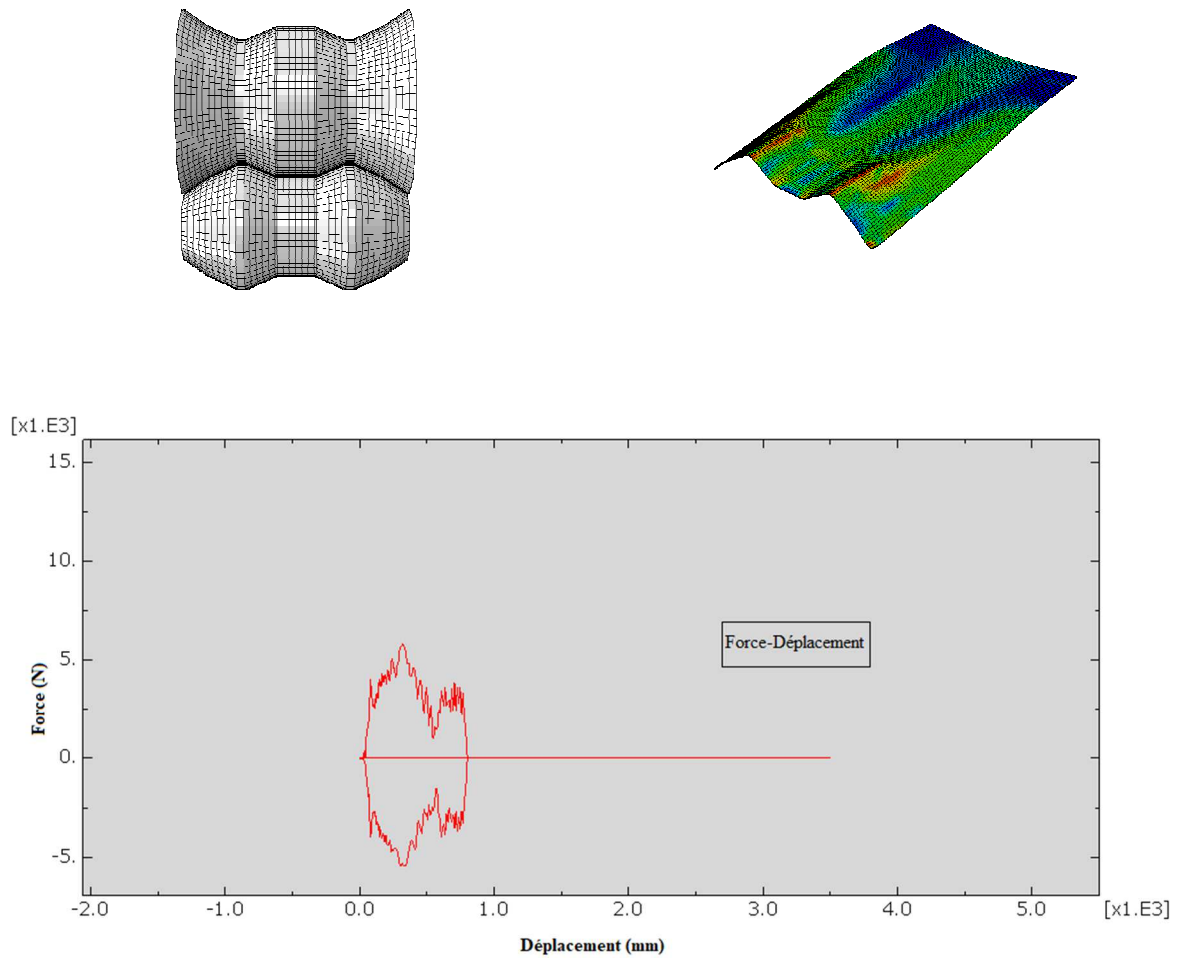
➤ 1^{er} jeu

Figure III-17 : Courbe force - déplacement du 1^{er} jeu.

La figure III-17 montre l'évolution de la force des galets de 1^{er} jeu en fonction de déplacement de la tôle. Dans cette courbe nous remarquons que l'amplitude maximale de la force est la même entre le galet supérieur et inférieur, $|F_{max}| = 6000 \text{ N}$ au déplacement $D = 300 \text{ mm}$, de la tôle. Ce qui prouve que la répartition des efforts entre le galet supérieur et le galet inférieur est faite de façon similaire.

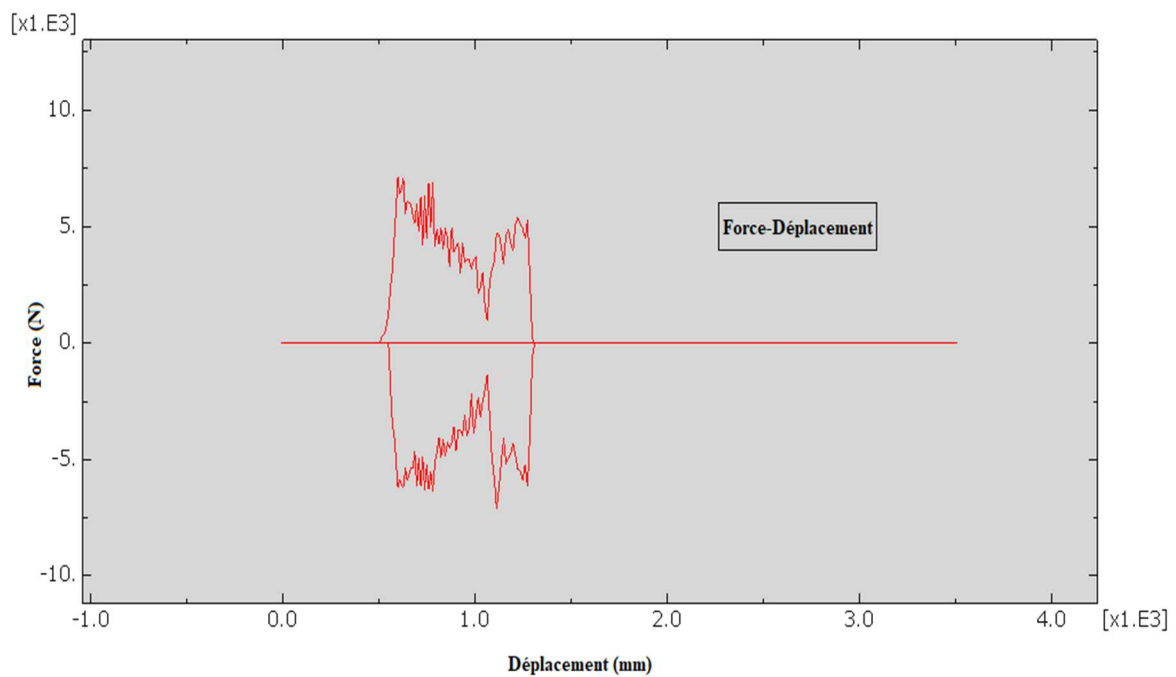
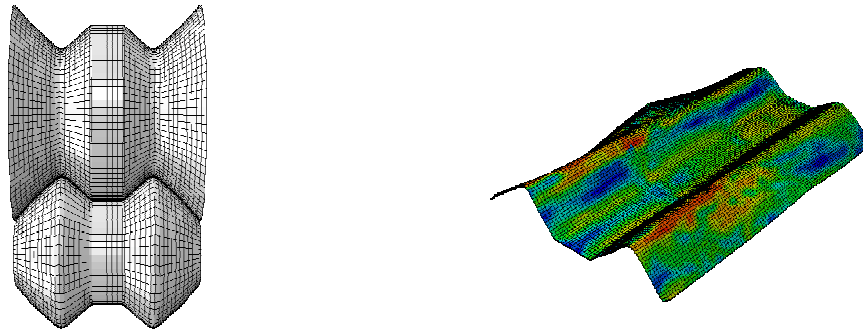
➤ 2^{ème} jeu

Figure III-18 : Courbe force - déplacement du 2^{ème} jeu.

La figure III-18 montre l'évolution de la force des galets du 2^{ème} jeu en fonction du déplacement de la tôle. Dans cette courbe nous remarquons que l'évolution des forces sur les galets inférieur et supérieur sont assez différente. En effet la force maximale sur galet inférieur est atteinte à l'entrée de la tôle que la force maximale du galet supérieur est maximale à la sortie de la tôle.

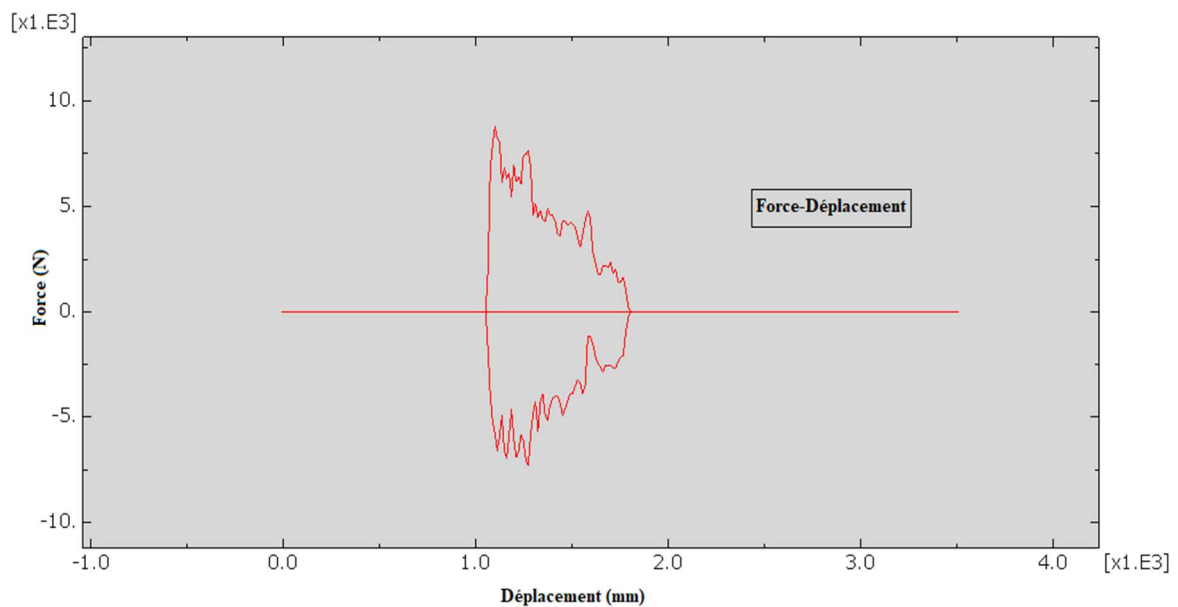
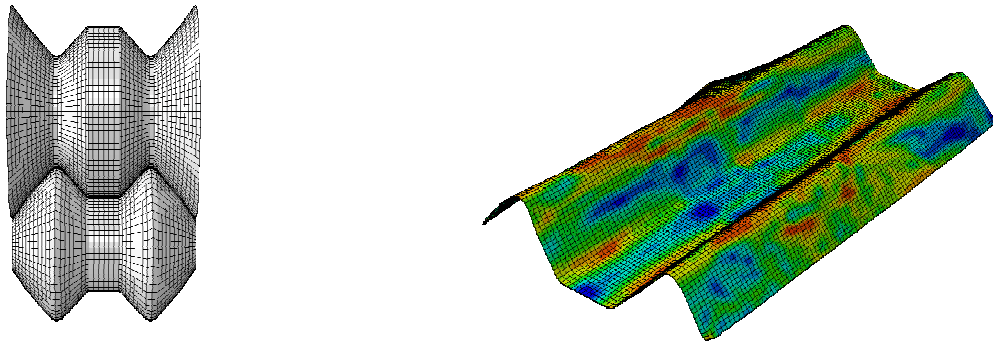
➤ 3^{ème} jeu

Figure III-19 : Courbe force - déplacement du 3^{ème} jeu.

La figure III-19 montre l'évolution de la force des galets du 3^{ème} jeu en fonction du déplacement de la tôle. Dans cette courbe nous remarquons que l'amplitude des galets supérieur et inférieur est presque symétrique pour un déplacement $D = 1300 \text{ mm}$, puis pour le galet inférieur on note que la valeur de la force diminue au fur et à mesure que le déplacement augmente, Par contre pour le galet supérieur on remarque que il y a une légère hausse puis une baisse graduelle des valeurs de la force qui est symétrique à celle du galet supérieur montrant ainsi une bonne répartition des efforts entre les galets.

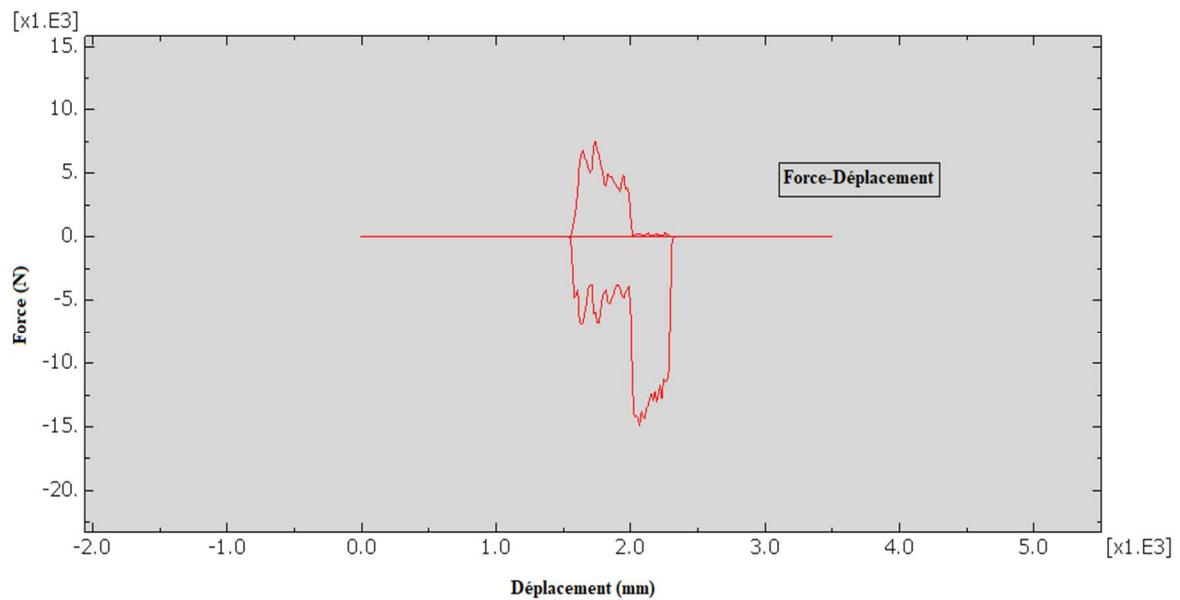
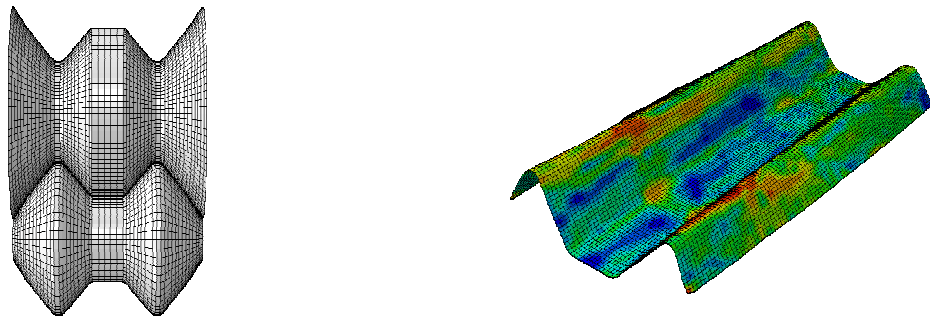
➤ 4^{ème} jeu

Figure III-20: Courbe force - déplacement du 4^{ème} jeu

La figure III-20 montre l'évolution de la force des galets du 4^{ème} jeu en fonction du déplacement de la tôle. Dans cette courbe nous remarquons que la courbe est repartie en deux parties, L'évolution de la tôle la 1^{ère} partie est symétrique entre les deux galets. Dans la 2^{ème} partie, l'effort de réaction est important dans le galet inférieur et presque nul pour le galet supérieur. Ce ci peut s'appliquer pas la tôle qui commence à perdre sa forme.

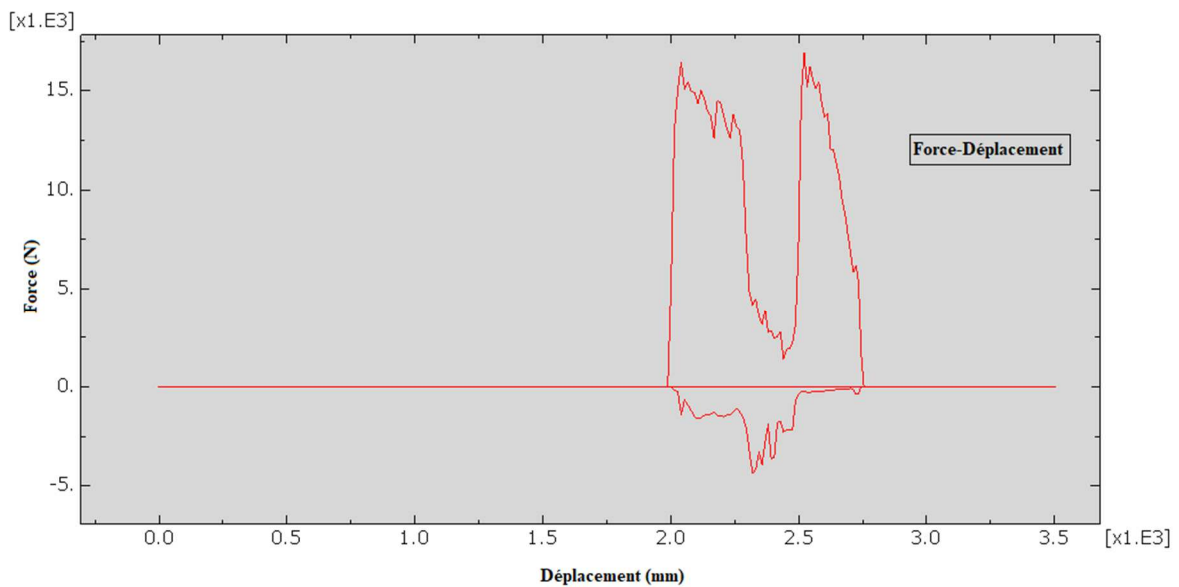
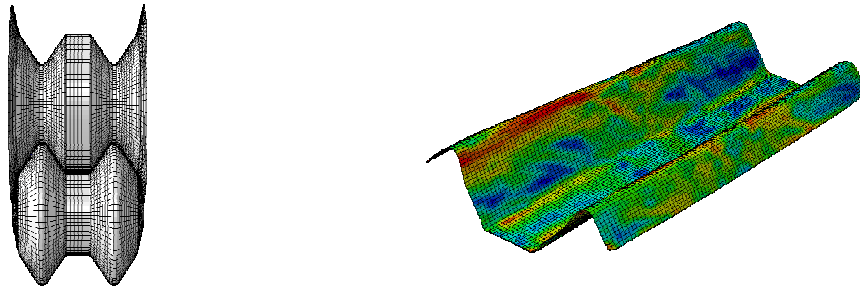
➤ 5^{ème} jeu

Figure III-21 : Courbe force - déplacement du 5^{ème} jeu.

La figure III-21 montre l'évolution de la force des galets du 5^{ème} jeu en fonction du déplacement de la tôle. Dans cette courbe nous remarquons que la courbe du galet inférieur présente deux pics le premier à $D=2100\text{mm}$ avec une force de $F=16500\text{N}$ et un autre pic à $D=2500\text{mm}$ avec une force atteignant 17000N . Pour le galet supérieur, la force atteint une amplitude $|F|=5100\text{N}$. Ce niveau de la force faible indique que l'effort appliqué par ce galet pour former la tôle est faible. Ceci est dû au fait que la tôle s'apprend de plus en plus de sa forme finale.

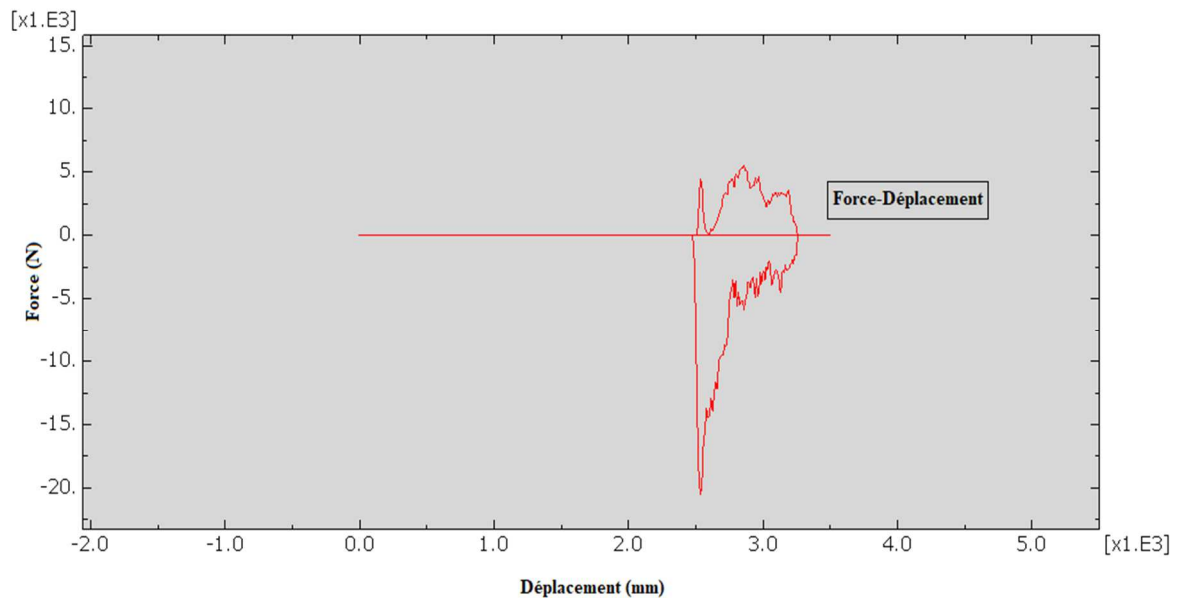
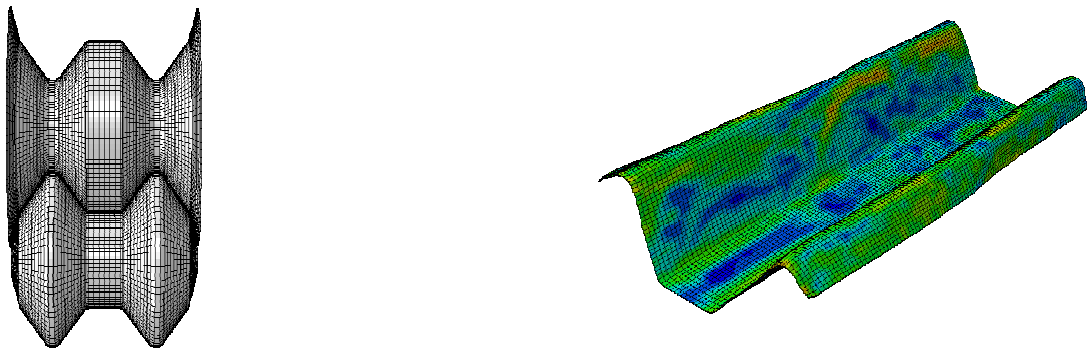
➤ 6^{ème} jeu

Figure III-22 : Courbe force - déplacement du 6^{ème} jeu.

La figure III-22 montre l'évolution de la force des galets du 6^{ème} jeu en fonction du déplacement de la tôle. Dans cette courbe, la plus grande valeur de la force est présente dans le galet supérieur avec $|F| = 21000\text{N}$ puis celle-ci descend au fur et à mesure de l'avancement du déplacement. Pour le galet inférieur, la force atteint juste environ 5000N . Ceci est dû au fait que le jeu entre les galets est réduit. Dans la pratique ce dernier jeu est utilisé pour donner des formes précises à la tôle car il ne défait que très peu du 5^{ème} jeu.

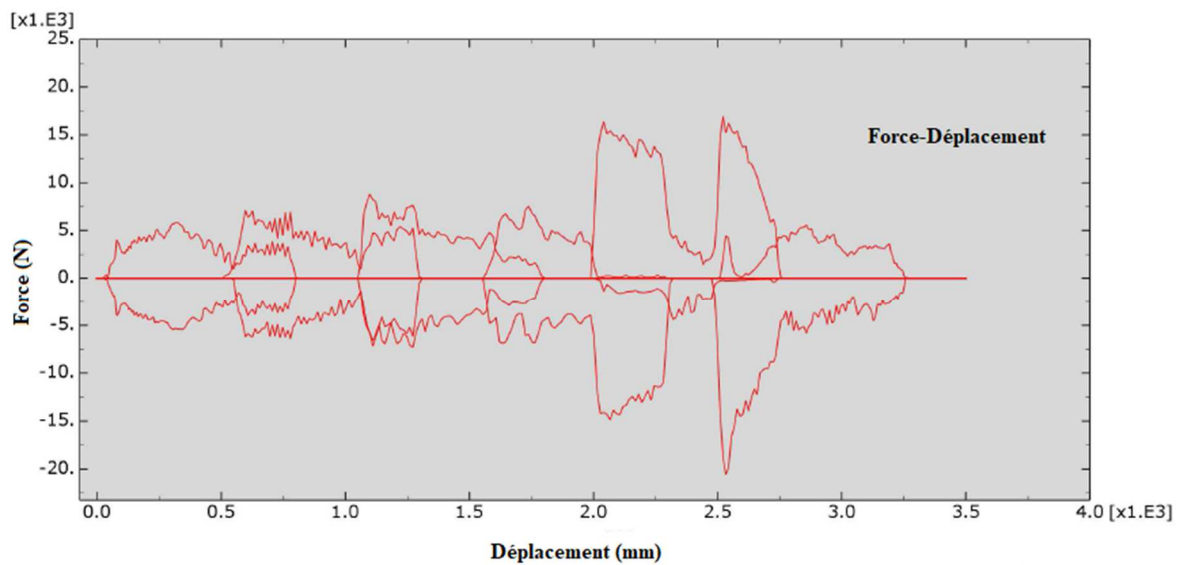


Figure III-23 : Courbe force - déplacement du profilage.

III-9-Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons réalisé des simulations numériques de procédé de profilage par galet. Nous avons décidé de réaliser une barrière autoroutière de sécurité avec ce procédé. Nous adopté six (06) jeux de galets afin d'optimiser les temps de calculs. La répartition des contraintes et déformations a mentie que notre choix est cohérent.

IV-1-Introduction

Dans ce chapitre nous étudierons la fatigue des galets de profileuse avec le logiciel de simulation de la fatigue des matériaux appelé Fe-Safe (Simulia-Dassault Systèmes). Fe-Safe permet de mieux adapter et prédire la vie de produits. Il a été développé depuis le début des années 1990 en collaboration avec l'industrie, Fe-Safe fournit les capacités nécessaires pour de véritables applications industrielles. Il continue d'établir la référence pour les logiciels d'analyse de la fatigue et témoigne du fait que, non seulement une analyse précise de la fatigue est possible, mais qu'elle est possible indépendamment de la complexité du modèle et de l'expertise en matière de fatigue de ses utilisateurs.

Fe-Safe a été le premier logiciel d'analyse de fatigue disponible dans le commerce à se concentrer sur les méthodes modernes de fatigue multiaxiale basée sur les souches. Il analyse les métaux, le caoutchouc, la thermomécaniques et la fatigue fluage et les joints soudés. Notons enfin que nous avons volontairement tiré les définitions, concepts et théorie présentés ci-dessous de la documentation fournit par Fe-Safe 2020.

IV-2-Définition de la fatigue

La fatigue est l'endommagement local d'une pièce sous l'effet d'efforts variables : forces appliquées, vibrations, etc. Alors que la pièce est conçue pour résister à des efforts donnés, la variation de l'effort, même à des niveaux bien plus faibles que ceux pouvant provoquer sa rupture, peut à la longue provoquer sa rupture.

La fatigue est un processus qui sous l'action de contraintes ou déformations variables dans le temps modifie les propriétés locales d'un matériau. Ces dernières peuvent entraîner la formation de fissures et éventuellement la rupture de la structure. La fatigue est notamment caractérisée par une étendue de variation de contrainte qui peut être bien inférieure à la limite d'élasticité du matériau. Les étapes principales de la ruine par fatigue d'un assemblage sont l'amorçage de fissures (si des défauts ne sont pas déjà présents dans le matériau), la propagation de fissures et la rupture finale.

Les paramètres souvent utilisés pour prédire le comportement en fatigue et ainsi le nombre de cycles à la rupture d'une structure sont

- ✓ l'amplitude de la sollicitation (chargement ou déformation imposée),

- ✓ sa valeur moyenne,
- ✓ l'état de surface et le milieu dans lequel la structure sera utilisée.

Même si l'étude de la fatigue s'appuie sur des considérations théoriques, c'est essentiellement un domaine expérimental. La caractérisation d'un matériau, d'une pièce, d'un ensemble, d'une structure... nécessite de nombreux essais et mesures.

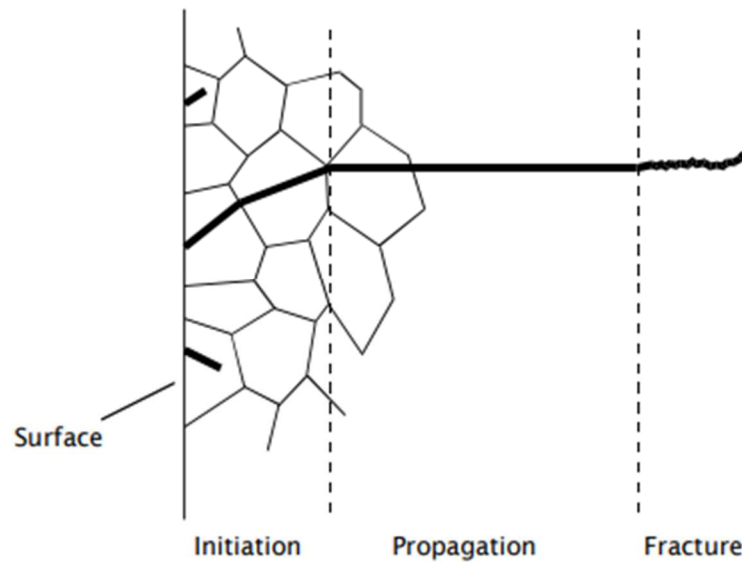


Figure IV-1 : les trois étapes de l'échec de fatigue

IV-3- Présentation de logiciel Fe-Safe

Fe-Safe est un logiciel d'analyse en fatigue pour les modèles éléments finis. Il est directement interfacé avec les logiciels éléments finis les plus utilisés. Cela permet d'augmenter la durée de vie des structures. Fe-Safe est un logiciel développé par des experts en fatigue pour mettre cette science à portée de tous. Fe-Safe est le premier logiciel commercialisé spécialiste des méthodes de fatigue modernes basées sur les déformations multiaxiales. Il est réputé pour sa précision, sa vitesse et sa facilité d'utilisation.

IV-4-Interface utilisation

L'interface utilisateur, qui est commune à toutes les plateformes, est indiquée dans la figure VI-2.

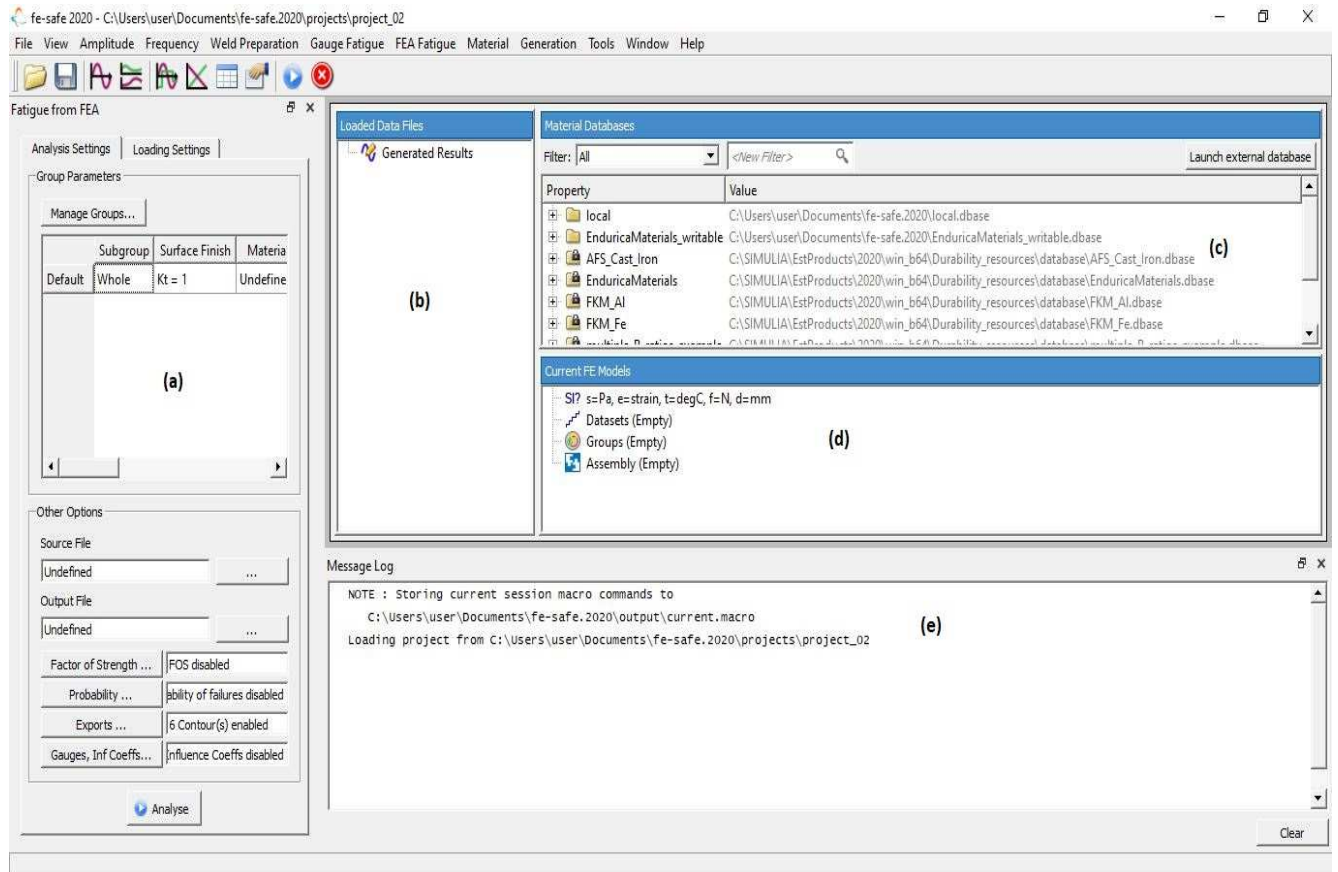


Figure IV-2 : Interface utilisation.

Cette interface se compose de:

- (a)- La boîte de dialogue FEA-fatigue;
- (b)- Une fenêtre répertoriant les fichiers de chargement (fichiers de données);
- (c)- Une fenêtre contenant les bases de données matérielles;
- (d)- Une fenêtre pour afficher les détails du fichier FEA ouvert;
- (e)- Une fenêtre de message.

La disposition de l'interface utilisateur peut être ajustée en fonction de la préférence de l'utilisateur et de la taille de l'écran. Sur les plateformes Windows, les modèles EF actuels et les fenêtres de fichiers de données chargés soutiennent les méthodes de « drag-and-drop » : sélectionner/glisser. Lorsqu'un fichier est sélectionné et glissé à la fenêtre Fichiers de données, le fichier est ajouté à la liste des fichiers de données disponibles. Lorsqu'un fichier

est sélectionné et glisser à la fenêtre Modèles FE actuels, Fe-Safe commence le processus d'importation du modèle.

- Nous présentons une simple opération de traitement de signal dans Fe-Safe
 - **Étape 1 : Ouvrir le fichier de données**
 - **Étape 2 : Examinez les données**
 - **Étape 3 : Sélectionnez la fonction de traitement du signal**

Sélectionnez la fonction requise à partir du menu Amplitude ou Fréquence.

Par exemple: effectuer une analyse de pointe-vallée du signal en sélectionnant Amplitude Peak-Valley (et P-V Exceedence)... Les fichiers de sortie produits sont ajoutés à la liste des fichiers dans la fenêtre Fichiers de données chargés.

IV-5-Description du chargement appliqué

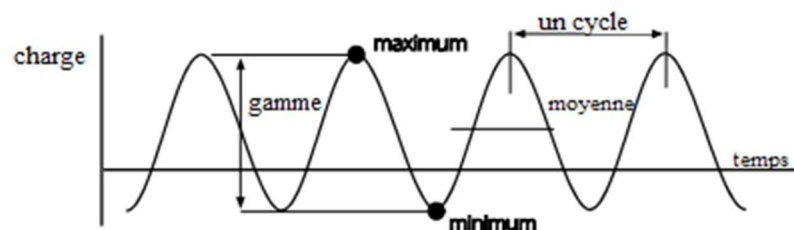


Figure IV-3 : Termes utilisés pour décrire le chargement de fatigue

Les termes mentionnés dans la figure ci-dessus sont utilisés pour décrire le chargement de la fatigue

- Charge maximale P_{max}
- Charge minimale P_{min}
- Gamme de charge $\Delta P = P_{max} - P_{min}$
- Charge amplitude $P_a = \frac{\Delta P}{2}$
- Charge moyenne $P_m = \frac{P_{max} + P_{min}}{2}$
- Rapport de charge $R = \frac{P_{min}}{P_{max}}$
- Rapport d'amplitude $A = \frac{P_a}{P_m}$

Une application de la charge est appelée un cycle de fatigue. La charge utilisée dans les essais en chaîne est une charge d'amplitude constante parce que chaque cycle a la même amplitude de charge. Les rapports de charge couramment utilisés dans les essais de fatigue sont $R = 0$ où la charge minimale est nulle, et $R = -1$ où les charges minimale et maximale sont égales et opposées et la charge moyenne est nulle.

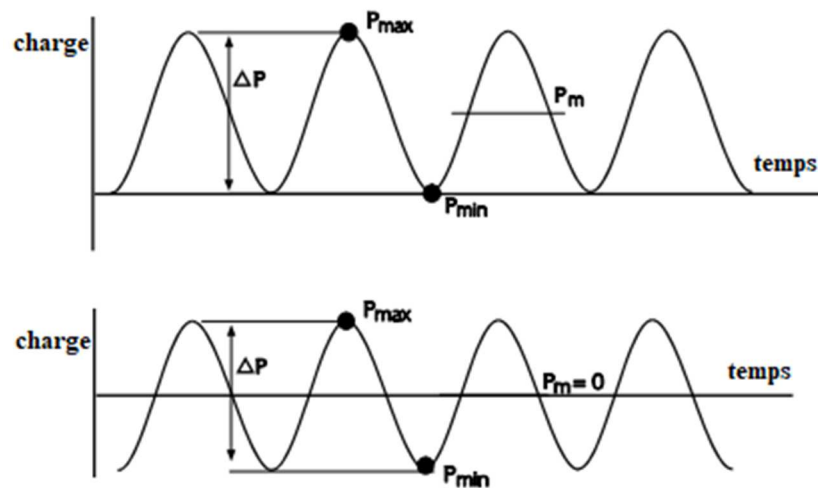


Figure IV-4 : Chargement de fatigue à un rapport de charge $R = 0$ et $R = -1$.

IV-6-Types de chargement

On a trois types de chargement :

1. Charge élevée suivie d'une faible charge ;
2. Charge faible suivie d'une charge élevée ;
3. Chargement d'amplitude constant.

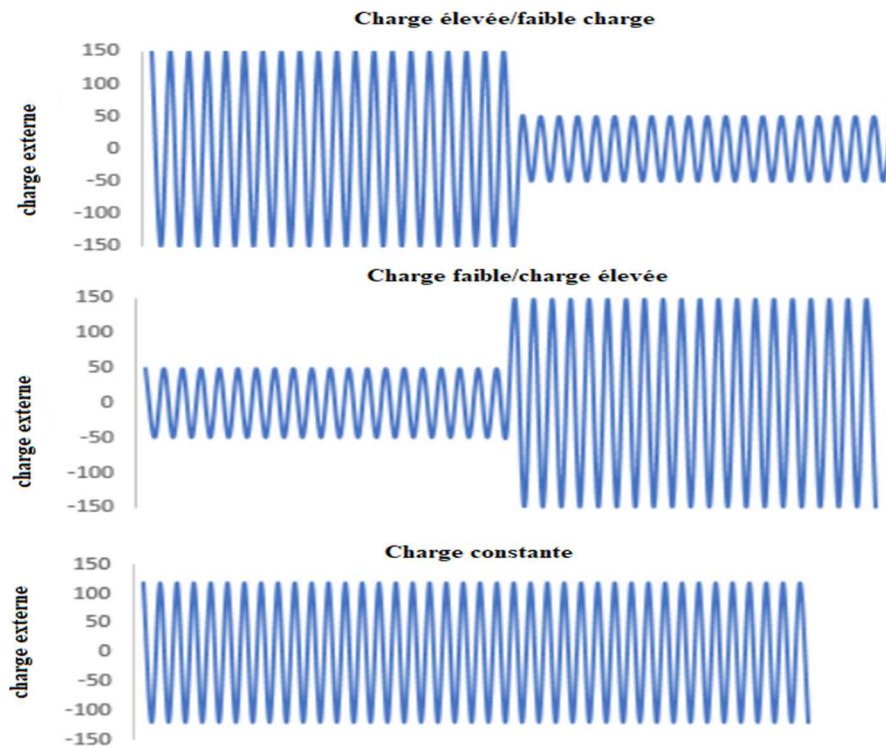


Figure IV-5 : Le chargement appliqué pour les analyses de méthodes basées sur les contraintes.

IV-7-Relations cycliques contrainte-déformation

Les boucles d'hystérésis de contrainte-déformation cyclique stables d'un certain nombre d'échantillons peuvent être tracées, et une courbe reliant les extrémités des boucles d'hystérie construite. La figure IV-6 montre des boucles d'hystérésis de dix éprouvettes, chacune testée à une amplitude de déformation constante différente. La courbe contrainte-déformation construite à travers les pointes de boucle est appelé la courbe cyclique de contrainte-déformation stable.

Il s'agit d'un concept plutôt artificiel qui est destiné à représenter la réponse stable du matériau, après un ramollissement cyclique ou un durcissement cyclique initial, suite à l'application d'une déformation à partir d'un état de contrainte-déformation nulle du matériau.

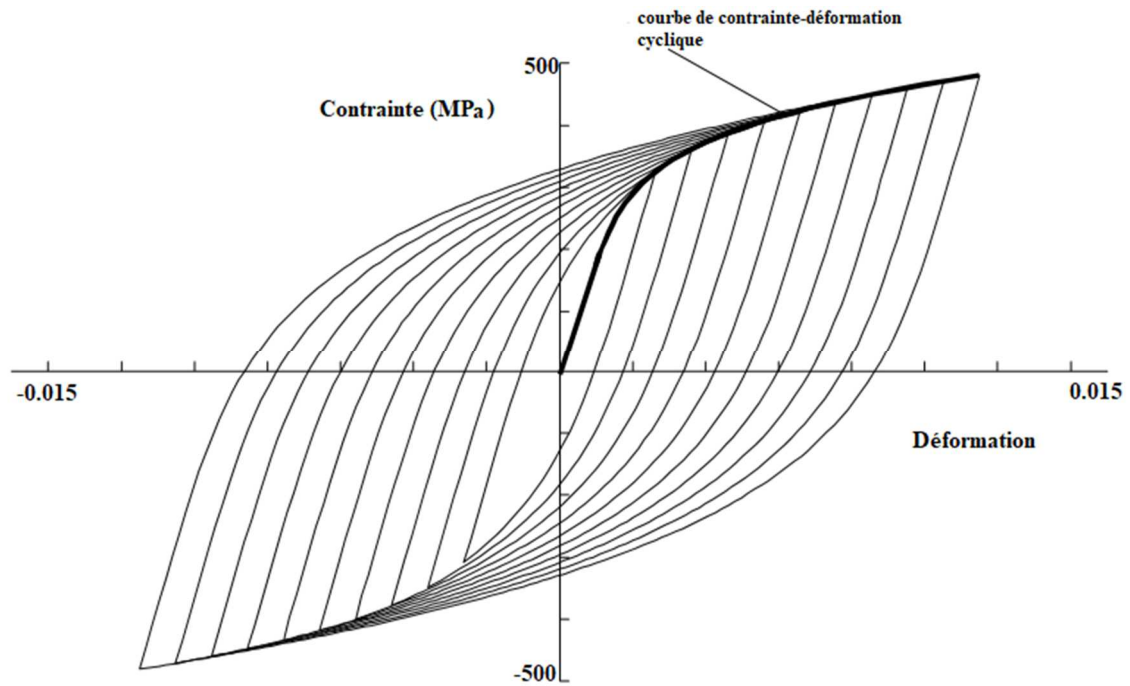


Figure IV-6 : Courbe contrainte-déformation cyclique à travers les pointes des boucles d'hystérésis.

Les nombres premiers sont ajoutés pour désigner les conditions cycliques, et l'équation complète de la déformation totale est

$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_p \quad \text{IV-1}$$

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E^*} + \left(\frac{\sigma}{K'}\right)^{\frac{1}{n}} \quad \text{IV-2}$$

Avec

E^* : Le module élastique cyclique ;

K' : Le coefficient cyclique de durcissement de la déformation ;

n' : La déformation cyclique durcissant exposant ;

ε_e : Un composant en élastique ;

ε_p : Un composant en plastique.

Et par l'équation de la courbe contrainte-déformation de la boucle d'hystérésis

$$\Delta\varepsilon = \frac{\Delta\sigma}{E} + 2 \left(\frac{\Delta\sigma}{2K'} \right)^{\frac{1}{n'}} \quad \text{IV-3}$$

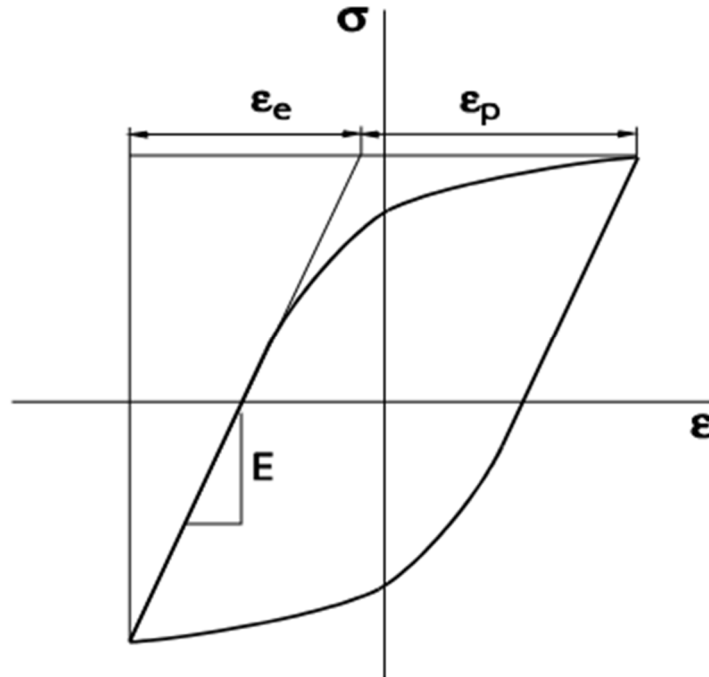


Figure IV-7 : Boucle d'hystérésis cyclique contrainte-déformation comme la somme des déformations élastiques et plastiques.

L'équation de la durée de vie du matériau peut être décomposée en une composante élastique et l'autre plastique comme suit

$$\frac{\Delta\varepsilon_e}{2} = \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b \quad \text{IV-4}$$

$$\frac{\Delta\varepsilon_p}{2} = \varepsilon'_f (2N_f)^c \quad \text{IV-5}$$

Avec

b : l'exposant de résistance à la fatigue (ou exposant de Basquin)

c : l'exposant de ductilité en fatigue (ou exposant Coffin-Manson)

ϵ_f' : le coefficient de ductilité en fatigue

σ_f' : le coefficient de résistance à la fatigue et

N_f : le nombre de cycles.

Chacune de ces deux composantes sont représentées par une droite, Figure IV-8 et Figure IV-9 respectivement, dans l'espace des déformations (élastique ou plastique selon le cas) – nombre de cycles.

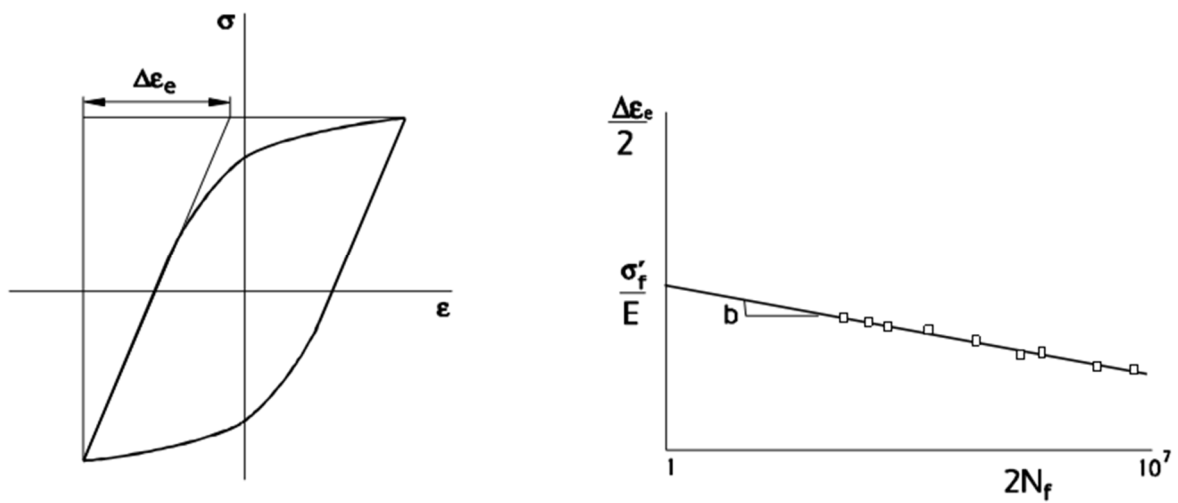


Figure IV-8 : Relation entre la déformation élastique et l'endurance.

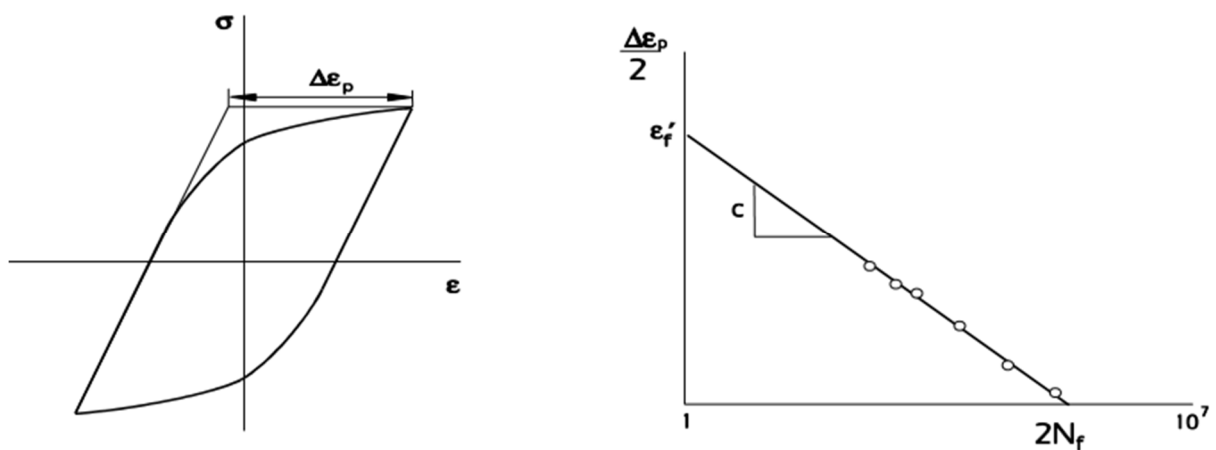


Figure IV-9 : Relation entre la déformation plastique et l'endurance.

La relation entre l'amplitude de la contrainte locale réelle et l'endurance est donnée par la relation suivante

$$\frac{\Delta\sigma}{2} = \sigma'_f (2N_f)^b \quad \text{IV-6}$$

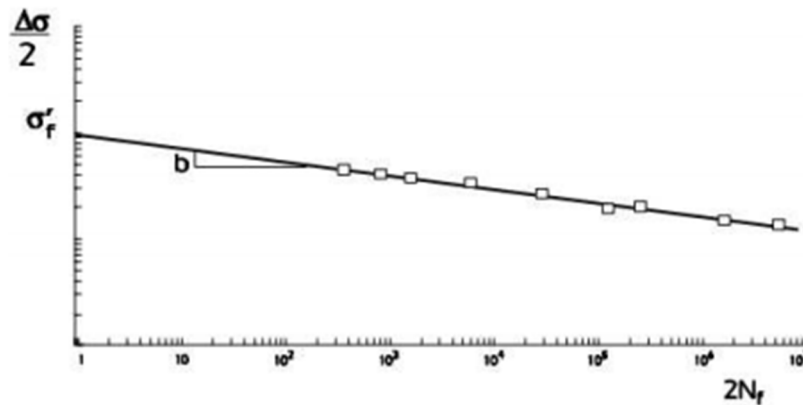


Figure IV-10 : Relation entre contrainte et durée de vie.

La relation entre l'amplitude de la déformation locale réelle et l'endurance est donnée par la relation suivante

$$\frac{\Delta\varepsilon}{2} = \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b + \varepsilon'_f (2N_f)^c \quad \text{IV-7}$$

Avec

$\Delta\varepsilon$: La plage de contrainte appliquée ;

$2N_f$: L'endurance dans les inversions ;

σ'_f : Le coefficient de résistance à la fatigue ;

ε'_f : Le coefficient de ductilité de fatigue ;

b : L'exposant de la force de fatigue ;

c : L'exposant ductilité fatigue.

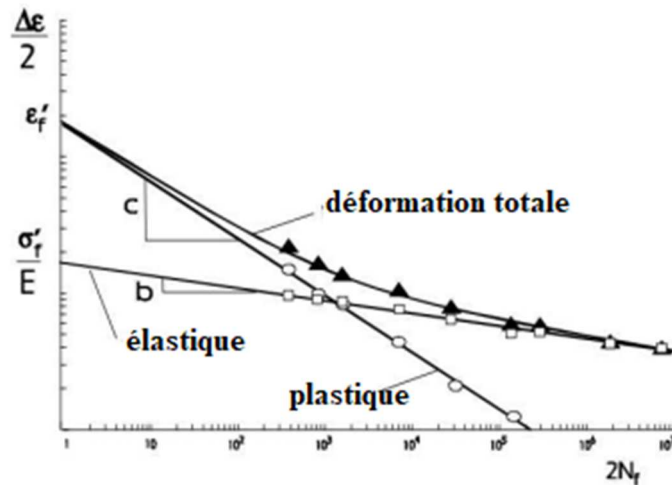


Figure IV-11 : Relation entre la déformation et durée de vie.

Les points suivants sont importants pour tirer des critères de fatigue multiaxiale

- 1) La durée de vie en fatigue pour les contraintes uniaxiales doit être calculée correctement.
- 2) La direction prévue de l'initiation des fissures doit correspondre avec les observations.
- 3) Une analyse qui utilise des propriétés de matériaux uniaxiaux standards présente des avantages économiques.

IV-8-Critère de la déformation principale

Ce critère propose que des fissures de fatigue s'initient sur les plans qui subissent la plus grande amplitude de déformation principale. Pour une contrainte uniaxiale, la déformation principale maximale est la déformation axiale dans la direction de la déformation appliquée.

Le remplacement de la déformation axiale dans l'équation (IV-7) par la déformation principale donnera une équation de fatigue multiaxiale (IV-8) qui donne la même durée de vie calculée pour les contraintes uniaxiales que l'équation (IV-7)

$$\frac{\Delta \varepsilon_1}{2} = \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b + \varepsilon'_f (2N_f)^c \quad \text{IV-8}$$

Pour la fatigue à cycle élevé, l'équation se réduit à

$$\frac{\Delta \varepsilon_1}{2} = \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b \quad \text{IV-9}$$

Ou son équivalent en termes de contrainte vraie

$$\frac{\Delta \sigma_1}{2} = \sigma'_f (2N_f)^b \quad \text{IV-10}$$

IV-9-Critère de déformation maximale de cisaillement

Il a été observé que des fissures de fatigue se déclenchent souvent sur les plans de cisaillement. Le critère de la déformation maximale de cisaillement propose que les fissures s'initient sur les plans qui subissent l'amplitude de déformation de cisaillement maximale.

Pour les contraintes uniaxiales, l'amplitude de la déformation de cisaillement est $(1 + \nu)$ fois l'amplitude directe de la déformation donc l'équation est

$$\frac{\Delta \gamma}{2} = (1 + \nu_e) \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b + (1 + \nu_p) \varepsilon'_f (2N_f)^c \quad \text{IV-11}$$

Pour les déformations élastiques le coefficient de poisson ν_e est d'environ 0,3 et pour les déformations purement plastiques, ν_p est de 0,5

L'équation uniaxiale déformation-cycles de vie, exprimée en termes de γ_{max} , est donc

$$\frac{\Delta \gamma_{max}}{2} = 1.3 \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b + 1.5 \varepsilon'_f (2N_f)^c \quad \text{IV-12}$$

IV-10-Critère de déformation combinée de Brown-Miller

L'équation Brown-Miller propose que l'endommagement maximal causé par la fatigue se produise sur le plan qui subit l'amplitude maximale de la déformation de cisaillement, et que l'endommagement soit fonction à la fois de cette déformation de cisaillement et de la déformation normale à ce plan.

$$\frac{\Delta \gamma_{max}}{2} + \frac{\Delta \varepsilon_n}{2} = c_1 \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b + c_2 \varepsilon'_f (2N_f)^c \quad \text{IV-13}$$

Avec

$$\gamma_{max} = (1 + \nu_\varepsilon) \varepsilon_1 = 1.3 \varepsilon_1 \quad \text{IV-14}$$

$$\varepsilon_n = \frac{(1 * \nu_e) \varepsilon_1}{2} = 0.35 \varepsilon_1 \quad \text{IV-15}$$

La constante C1 est de $1,3 + 0,35 = 1,65$

Pour la valeur plastique du rapport de Poissons de 0,5, $C2 = 1,75$

L'équation complète de la durée de vie de la déformation de Brown-Miller est

$$\frac{\Delta \gamma_{max}}{2} + \frac{\Delta \varepsilon_n}{2} = 1.65 \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b + 1.75 \varepsilon'_f (2N_f)^c \quad \text{IV-16}$$

IV-11-Contrainte équivalente de Von Mises

Comme le critère de Von Mises fournit une estimation du début de la déformation, il a été proposé comme critère d'estimation de la durée de vie en fatigue.

L'équation déformation-durée de vie est donnée (à partir de la forme uniaxiale) comme suit :

$$\frac{\Delta \varepsilon_{eff}}{2} = \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b + \varepsilon'_f (2N_f)^c \quad \text{IV-17}$$

D'après la section IV-17, l'équation de la déformation de Von Mises, calculée à partir de la déformation principale, est la suivante

$$\varepsilon_{eff} = \beta ((\varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_1 \cdot \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_2 \cdot \varepsilon_3)^2)^{\frac{1}{2}} \quad \text{IV-17-1}$$

La valeur de β est choisie de telle sorte que ε_{eff} ait la même valeur que la déformation 1 pour la condition de contrainte uniaxiale.

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_3 = -\nu \varepsilon_1, \quad \varepsilon_{eff} = \sqrt{2} (1+\nu) \varepsilon_1$$

Pour les conditions élastiques

$$\nu_e = \frac{1}{3}, \quad \beta = \frac{3}{4\sqrt{2}} = 0.53$$

Pour les conditions entièrement plastiques

$$v_p = \frac{1}{2}, \beta = \frac{\sqrt{2}}{3} = 0.47$$

Pour une contrainte élastique-plastique générale, l'expression suivante pour β a été proposée pour un chargement en phase

$$\beta = \frac{1}{(1+V^*)\sqrt{2}}, \quad V^* = \frac{V_e \varepsilon_e + V_p \varepsilon_p}{\varepsilon_t} = 0.47$$

IV-12-Application des concentrations de contraintes

Pour appliquer des méthodes de déformation locales à des composants mécaniques réels, les contraintes et déformations locales dans les zones critiques doivent être connues. Pour certains composants, les déformations locales peuvent être mesurées directement à l'aide de jauges de contraintes. Dans de nombreux autres cas, il peut être possible de mesurer uniquement des déformations à une certaine distance d'un concentrateur de contraintes, en raison de contraintes physiques. Dans ce cas, plusieurs modèles ont été proposés pour prendre en compte les concentrations de contraintes. Nous donnons ci-dessous certains de ces modèles disponibles dans Fe-Safe.

❖ Règle de Neuber

Neuber [18] a proposé que la contrainte et la déformation locales au niveau de l'entaille puissent être déterminées en utilisant le facteur de concentration de contrainte élastique K_t . Si la contrainte et la déformation nominales sont σ_∞ et ε_∞ , et la contrainte et la déformation locale sont σ et ε , la relation de Neuber est

$$\Delta\sigma \cdot \Delta\varepsilon = K_t \Delta\sigma_\infty \cdot K_t \Delta\varepsilon_\infty \quad \text{IV-18}$$

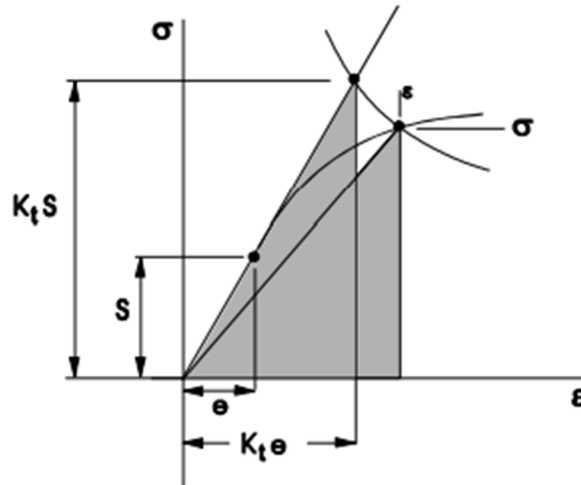


Figure IV-12 : Règle de Neuber.

Le côté gauche de l'équation est le produit de contrainte par la déformation pour les contraintes et déformations élastique-plastique locales vraies. Le côté droit est le produit de contrainte-déformation qui serait calculé si le matériel était infiniment élastique.

Comme le produit de contrainte-déformation est proportionnel à l'énergie de déformation au niveau de l'entaille, la règle de Neuber équivaut essentiellement à l'énergie de contrainte pour un matériau élastique-plastique et un matériau infiniment élastique.

Dans le cas où la contrainte/déformation nominale est élastique, ou si les contraintes ou déformations ont été calculées à l'aide d'une analyse (loi) élastique, par exemple dans un modèle d'élément finis en élasticité, la règle de Neuber se réduit à

$$\Delta\sigma\Delta\epsilon = K_t^2 \sigma_\infty / E$$

❖ Méthode de Glinka

Considérant le produit de Neuber comme analogue à l'énergie des déformations, Glinka [19] a proposé qu'il être plus cohérent pour intégrer la courbe cyclique contrainte-déformation en sélectionnent les contraintes pour obtenir une meilleure estimation de la zone. Ce produit de plus petites valeurs de contrainte réel et de vraie déformation.

Les preuves expérimentales indiquent que la méthode de Glinka sous-estime les contraintes et les déformations locales. Une comparaison entre contrainte/déformation réel calculé à partir de la règle de Neuber et la méthode de Glinka (acier SAE1045, $K_t = 1$).

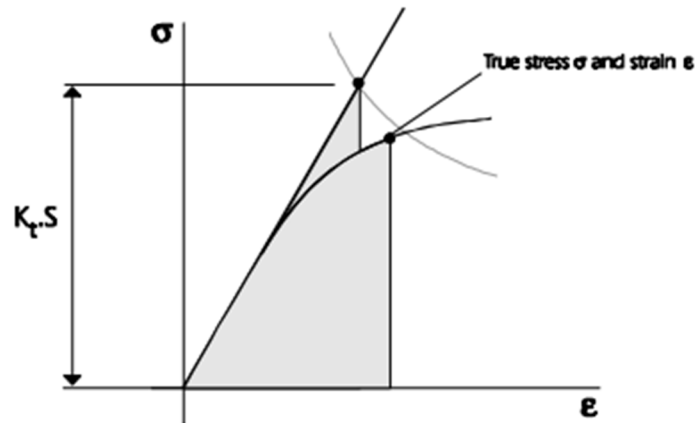


Figure IV-13 : Méthode de Glinka.

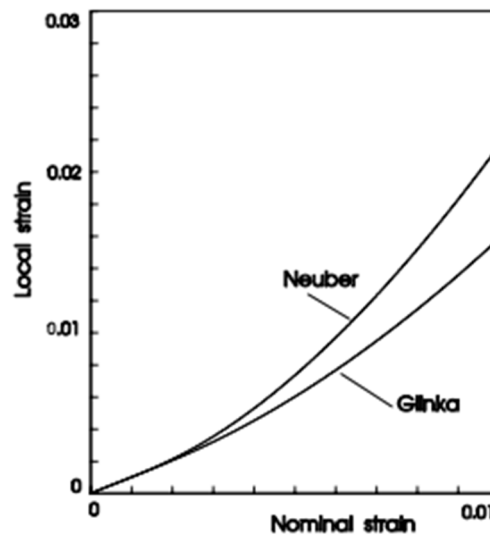


Figure IV-14 : Comparaison de la règle de Neuber et de la méthode de Glinka.

❖ La méthode Seeger-Heuler

Les équations Neuber et Glinka s'appliquent lorsque le rendement est limité à un petit volume de concentration de contrainte. Lorsque les contraintes et les déformations nominales sont suffisamment élevées pour les méthodes Neuber et Glinka ne sont pas valides. Seeger et Euler [20] a proposé que le facteur élastique de concentration de contrainte K_t pourrait être remplacé par

$$K_p = K_t \frac{S_L}{\sigma_y} \quad \text{IV-19}$$

Avec

S_L : La contrainte nominale auquel le rendement général se produit ;

σ_y : La contrainte de rendement conventionnel pour le matériel.

C'est donc la contrainte locale auquel le rendement local se produit d'abord à la contrainte concentration. D'après la définition du facteur de concentration de la contrainte élastique K_t , la contrainte nominale à que le rendement local se produit d'abord à l'encoche, S_y , est

$$S_y = \frac{\sigma_y}{K_t} \quad \text{IV-20}$$

Donc l'équation IV-17 devient

$$K_p = \frac{S_L}{\sigma_y} \quad \text{IV-21}$$

IV-13-Facteurs de concentrations de contraintes vraies et déformations vraies

Les contraintes et les déformations vraies sont calculées à partir de la règle de Neuber (ou de toute autre règle) peuvent être utilisées pour calculer facteurs de concentrations de contraintes vraies et déformations vraies, qui comprennent les effets de la plasticité.

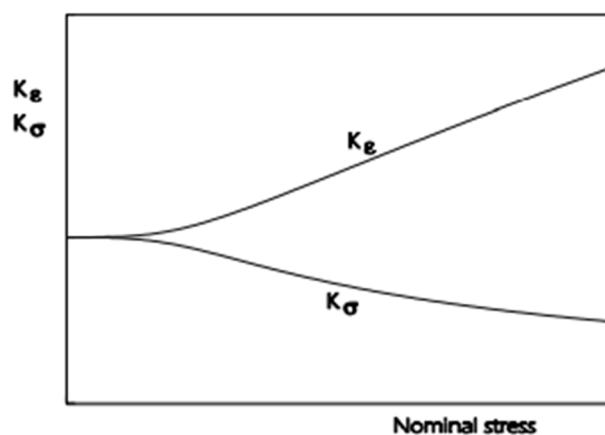


Figure IV-15 : Facteurs de concentrations de contraintes vraies et déformations vraies

Facteur de concentration de contraintes vraies

$$K_{\sigma} = \frac{\sigma}{S} \quad \text{IV-22}$$

Facteur de concentration de déformations vraies

$$K_{\varepsilon} = \frac{\varepsilon}{e} \quad \text{IV-23}$$

IV-14-Analyse de la fatigue à l'aide de courbes contrainte-durée de vie (S-N)

La contrainte moyenne dans l'ensemble de la section XX d'un composant est la contrainte nominale et ne permet pas les effets locaux de la concentration de contrainte. L'amplitude nominale de contrainte S_a est tracée contre endurance dans les cycles N_f . Il s'agit d'une courbe S-N.

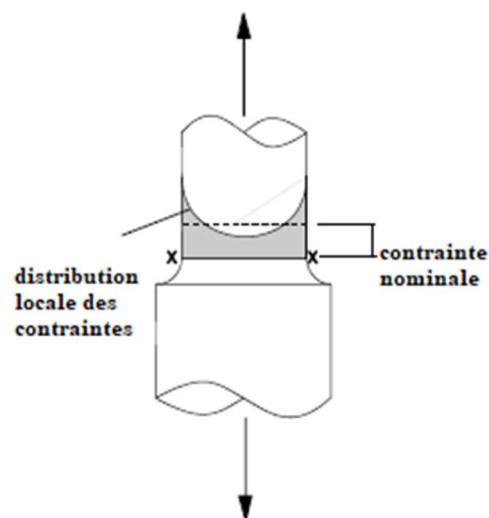


Figure IV-16 : Contrainte nominale dans un composant

Les courbes S-N sont obtenues en testant des composants ou des spécimens lisses de matériaux, sous charge d'amplitude, souvent à zéro contrainte moyenne ($R=-1$).

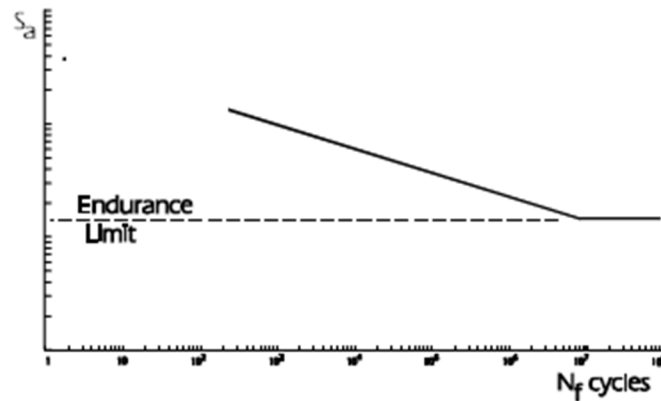


Figure IV-17 : Courbe S-N tracée sur des axes

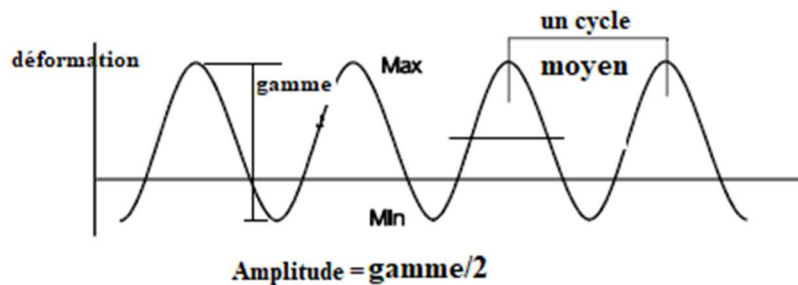


Figure IV-18 : Termes utilisés pour décrire la charge constante d'amplitude

- Contrainte maximum = S_{max}
- Contrainte minimum = S_{min}
- Plage de contrainte = $\Delta S = S_{max} - S_{min}$
- Amplitude de contrainte = $S_a = \frac{\Delta S}{2}$
- Contrainte moyenne = $S_m = \frac{S_{max} + S_{min}}{2}$
- Rapport de contrainte = $R = \frac{S_{min}}{S_{max}}$
- Rapport d'amplitude = $A = \frac{S_a}{S_m}$

Les données sur les matériaux sont souvent obtenues par des tests d'amplitude constants à zéro contrainte moyenne sur des spécimens lisses matériels. Afin d'appliquer les données à des composants réels, des méthodes sont nécessaires pour l'application à d'autres formes, et à des histoires de contrainte complexes. Il est souvent souhaitable d'estimer les propriétés de fatigue d'un matériau à partir de données sur d'autres matériaux.

IV-14-1-Application des concentrations de contraintes

La plupart des composants d'ingénierie contiennent des concentrations de contrainte telles que des trous, des rainures, et des rayons d'angle. Dans de nombreux cas de défaillances de fatigue se produisent dans ces zones. Par exemple une plaque plate contenant un trou circulaire, une simple analyse de contrainte calculerait la contrainte sur la section A-A (figure IV-19). La distribution de la contrainte à B-B est en fait beaucoup plus complexe que la valeur moyenne calculée par simple contrainte et au bord du trou, la valeur de la contrainte sera beaucoup plus élevée.

La concentration élastique de contrainte produite par le trou, K_t , est

$$K_t = \frac{\text{contrainte réel au trou}}{\text{contrainte moyenne à la section B - B}} = \frac{\sigma}{S_{BB}} \quad \text{IV-24}$$

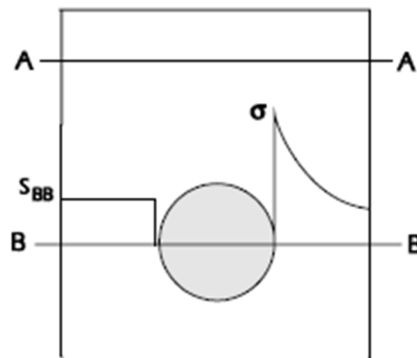


Figure IV-19 : Concentration des contraintes au niveau d'un trou circulaire.

Une courbe S-N pour la plaque avec le trou pourrait être obtenue par des essais, et l'amplitude de la contrainte, S_a , utilisé pour tracer les données, pourrait être la contrainte calculée à la section B-B de la figure IV-19. Une comparaison avec une courbe S-N pour une éprouvette lisse est présentée à la figure IV-20.

En cas d'endurance élevée, la réduction de la résistance à la fatigue peut être calculée en divisant l'éprouvette lisse par K_t .

À une durée de vie plus courte, la concentration de la contrainte entraîne une réduction plus faible de la résistance à la fatigue, cela est dû au fait que la déformation au niveau de l'entaille réduit le véritable facteur de concentration de la contrainte K_σ .

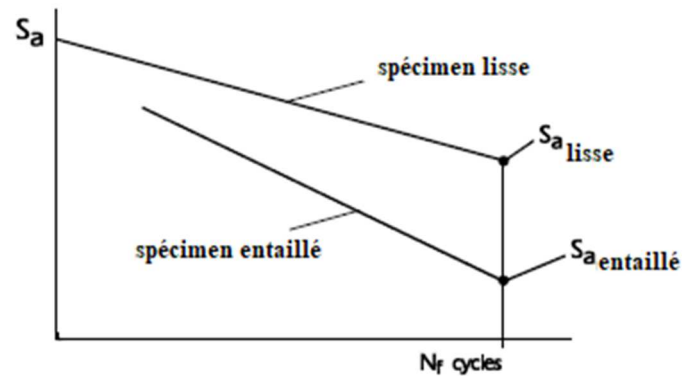


Figure IV-20 : Courbes S-N pour une éprouvette lisse et une éprouvette entaillée

IV-14-2-Histoire de la charge complexe

Le chargement en service réel généralement ne consiste pas en une onde sinusoïde d'amplitude constante à contrainte moyenne nulle.

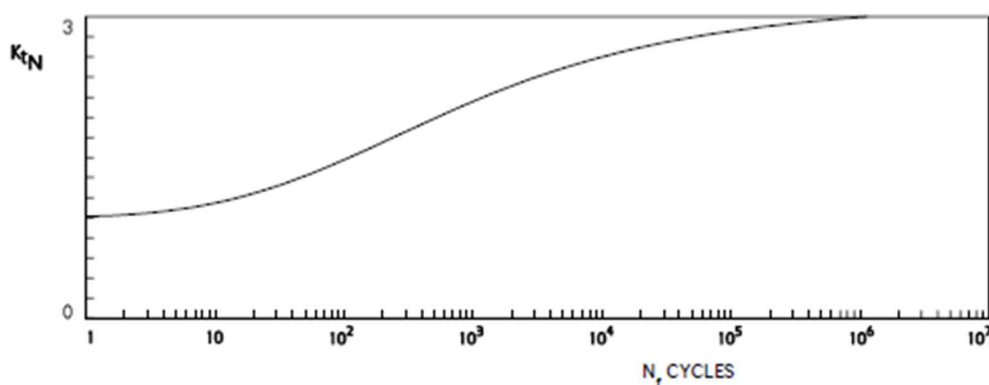


Figure IV-21 : Relation de Peterson entre l'endurance et la concentration de contrainte effective K_{tN} ($K_t = 3$)

La figure IV-22 montre un exemple d'historique des déformations mesurée sur la pale d'une éolienne. La valeur moyenne de nombreux cycles de ce signal n'est clairement pas nulle, et il ne s'agit pas d'un signal d'amplitude constante. Pour appliquer une courbe S-N à ce type de signal, nous avons besoin

- une méthode d'application des données de fatigue obtenues à une contrainte ne moyenne nulle à des cycles qui ne sont pas à une contrainte moyenne nulle.

- une méthode d'application des données de fatigue obtenues à partir d'essais d'amplitude constante à des signaux de l'amplitude variable.

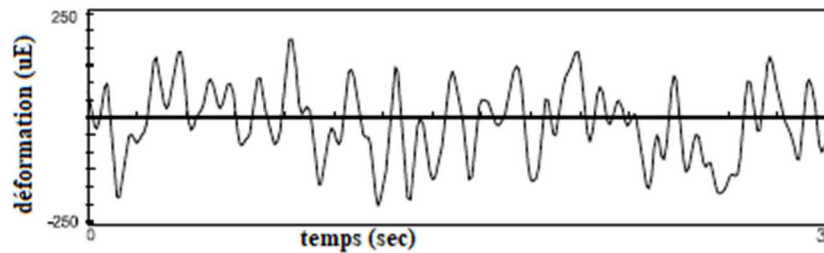


Figure IV-22 : Signal de déformation mesuré

IV-14-3-Effet de la contrainte moyenne

Considérez trois signaux d'amplitude constante, de la même amplitude de contrainte mais des contraintes moyennes différentes



Figure IV-23 : Signaux d'essai à amplitude constante pour différentes contraintes moyennes.

Le signal avec une petite contrainte moyenne de traction produirait une durée de vie en fatigue plus courte que le signal avec une contrainte moyenne nulle, et le signal avec une contrainte moyenne plus grande produirait une durée de vie en fatigue encore plus (Figure IV-25)

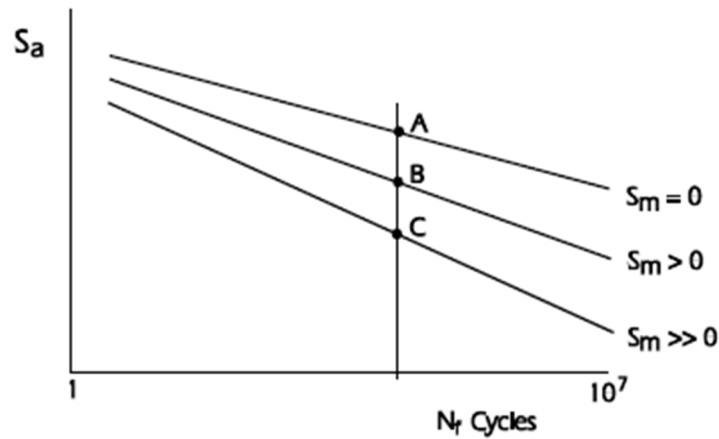


Figure IV-24 : Effet de la contrainte moyenne sur l'endurance

À n'importe quelle endurance, ces données peuvent être tracées de façon croisée pour montrer l'effet de la contrainte moyenne sur l'endurance choisie. Ce type de graphique est appelé diagramme de Haigh (figure IV-26).

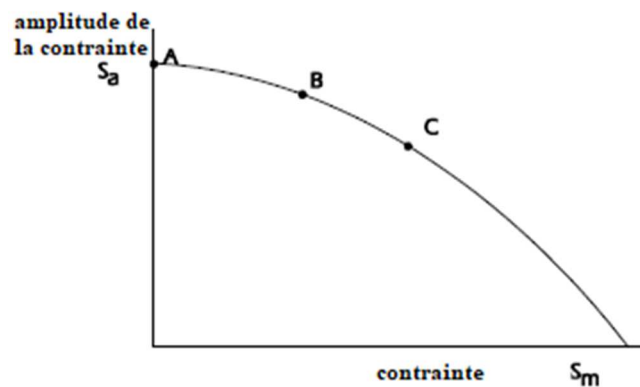


Figure IV-25 : Effet de la contrainte moyenne représenté sous la forme d'un diagramme de Haigh

Pour rendre les axes non dimensionnels, l'axe vertical peut être exprimé en

$$\frac{S_a}{S_{a0}} \quad \text{IV-25}$$

Avec

S_a : L'amplitude de stress

S_{a0} : L'amplitude de stress à zéro stress moyen.

IV-14-4-Analyse des historiques de contrainte d'amplitude variable

Les historiques de contrainte sinusoïdale d'amplitude constante se produisent rarement dans les composants techniques réels. La règle de miner est utilisé pour calculer l'endommagement par fatigue pour les historiques des contraintes d'amplitude variable. Le comptage du cycle de Rainflow peut être utilisé pour obtenir les cycles présents dans un historique de charges, de contraintes,...

Considérez un historique de la contrainte simple composée de deux blocs d'amplitude constante.

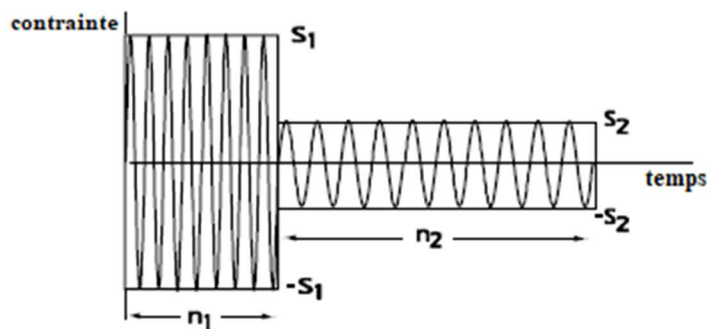


Figure IV-26 : Chargement en bloc avec deux amplitudes de contrainte.

Si le signal ne se compose que de la grande amplitude, la rupture de l'échantillon se produit lorsque le nombre cycle appliqué (n_1) est égal au nombre de cycles jusqu'à la rupture obtenu à partir de la courbe S-N du composant (N_1) - en ignorant toute dispersion des résultats d'essai.

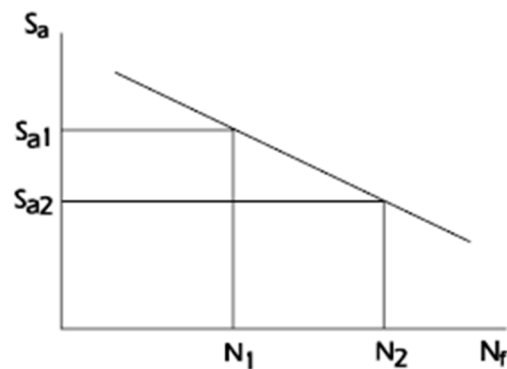


Figure IV-27 : Endurance N pour les deux blocs de cycles.

$$\frac{n_1}{N_1} = 1$$

IV-26

De même, si le signal ne se compose que de la plus petite amplitude, alors la défaillance se produirait lorsque le nombre de cycle appliqué (n_2) est égal au nombre de cycle jusqu'à la rupture obtenu à partir de la courbe S-N (N_2) pour cette Amplitude.

La règle du miner peut-être utilisée pour calculer la durée de vie du signal combiné. Pour les signaux plus complexes, avec de nombreux blocs d'amplitudes différentes, la défaillance se produira lorsque

$$\sum \frac{n_i}{N_i} = 1$$

IV-27

IV-14-5-Calcul des facteurs de sécurité en fatigue

Les diagrammes de contraintes moyennes – Goodman, Gerber, Soderberg, Buch et d'autres, ont été utilisés pour calculer des facteurs de résistance basés sur les contraintes pour une durée de vie spécifiée.

Le cycle qui se rapproche le plus de la ligne Goodman, est tracé sur le diagramme Goodman. Une ligne est tracée à travers ce point de l'origine. Cela indique à quel point la contrainte pourrait être augmentée avant qu'il ne touche la ligne de Goodman. Le rapport A/B dans la figure IV-29 indique le facteur de la résistance.

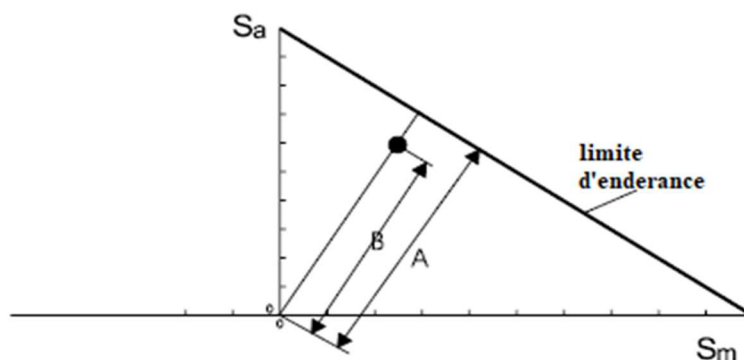


Figure IV-28 : Facteur de résistance (FOS) - Diagramme de Goodman.

Pour déterminer l'amplitude de la contrainte admissible pour une contrainte moyenne fixe, le rapport A/B peut-être déterminé à partir d'une ligne verticale (figure IV-30). Une ligne

horizontale peut être utilisée pour déterminer la contrainte moyenne pour une amplitude de la contrainte fixe.

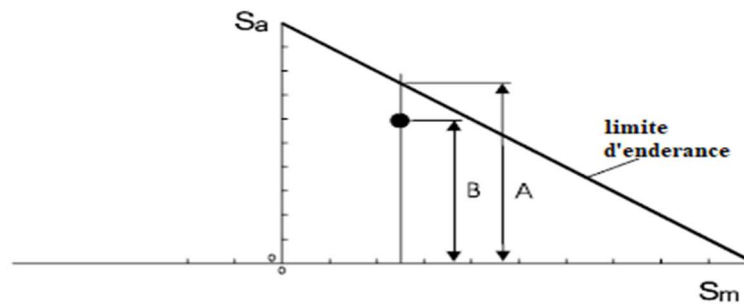


Figure IV-29 : Facteur de résistance sur l'amplitude de la contrainte pour une contrainte moyenne fixe.

Cette méthode de détermination des facteurs de sécurité basés sur les contraintes, ou les contraintes admissibles, est valable soit pour

- un chargement constant d'amplitude à n'importe quelle endurance spécifiée
- des historiques de contrainte plus complexes pour une conception à durée de vie infinie.

À la figure IV-31, le chargement consiste en une répétition du cycle le plus important et 100 répétitions du plus petit cycle représenté en gris. La durée de vie de conception est à peu près de 10^5 répétitions de la charge.

Sous la charge appliquée, on supposerait que les cycles plus petits ne sont pas destructifs. L'analyse de Goodman utiliserait alors le rapport A/B pour estimer le facteur de résistance. Cependant, la mise à l'échelle de la charge appliquée par cette valeur rendrait les petits cycles endommageables. Comme ceux-ci sont beaucoup plus nombreux, le facteur de sécurité serait largement surestimé et l'analyse ne serait pas sûre.

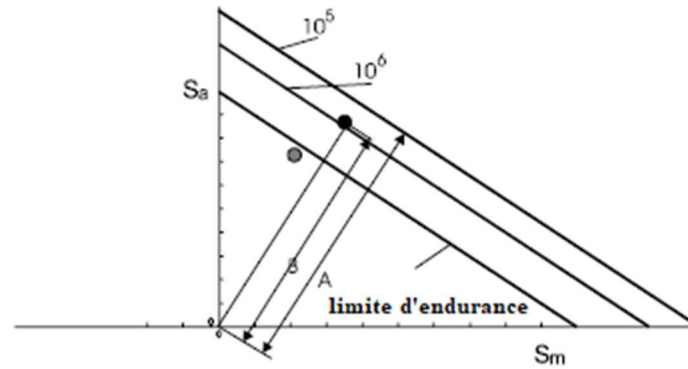


Figure IV-30 : Erreur dans le calcul des facteurs de sécurité basés sur la contrainte pour des antécédents de contrainte complexes.

IV-15-Concentrations de contrainte

Un facteur élastique de concentration de la contrainte peut être utilisé pour appliquer les données d'essais sur éprouvettes lisses à des composants entaillés. Les méthodes de conception statique pour prévenir la rupture ultime peuvent utiliser une contrainte moyenne sur une section transversale critique.

On suppose que la déformation globale redistribue les charges sur la section jusqu'à ce qu'elle soit uniformément sollicitée. Sous charges de service normales la déformation globale ne devrait jamais se produire, et les contraintes seront élastiques sur la plupart des composants. Les exceptions sont les zones de contraintes locales élevées causées par des détails tels que les trous, les rainures et les rayons d'angle.

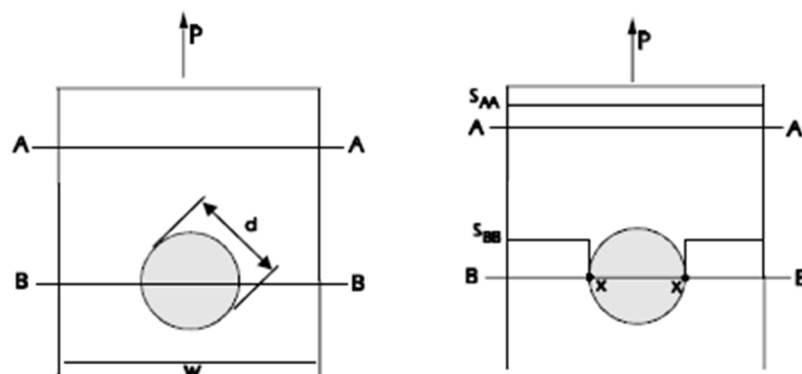


Figure IV-31 : Distribution de la contrainte moyenne au niveau d'un trou circulaire.

Au niveau de la section AA non perturbée par la présence du trou, la contrainte élastique est uniformément répartie est

$$S_{AA} = \frac{P}{A_{AA}} \quad \text{IV-28}$$

A_{AA} : Est l'aire de la section transversale en AA.

À la section BB, la contrainte moyenne sera plus élevée, parce que la présence du trou réduit la surface de la section transversale.

$$S_{BB} = \frac{P}{A_{BB}} \quad \text{IV-29}$$

A_{BB} : Est l'aire de la section transversale à BB.

Le rapport des surfaces est

$$\frac{A_{BB}}{A_{AA}} = \frac{w \cdot d}{w} \quad \text{IV-30}$$

Toutefois, la présence du trou provoque également une perturbation locale de la distribution de contrainte au niveau de la section BB, de sorte que la contrainte n'est pas uniformément répartie sur la section. Il peut être montré mathématiquement que la contrainte maximale aux points X, au bord du trou, sera de 2 à 3 fois plus élevée que la pression moyenne sur BB et sera distribuée comme montre la figure IV-33.

L'aire sous les courbes de la distribution de la contrainte moyenne et de la distribution de la contrainte réelle doit être la même, afin de maintenir l'équilibre. Même, afin de maintenir l'équilibre des forces à la section BB, de sorte que la contrainte au bord de la plaque sera inférieure à la valeur moyenne de S_{BB} .

Pour les contraintes élastiques, le rapport entre la contrainte maximale σ et la contrainte moyenne est appelé facteur de concentration des contraintes, K_t , où le suffixe t désigne une valeur théorique ou mathématique.

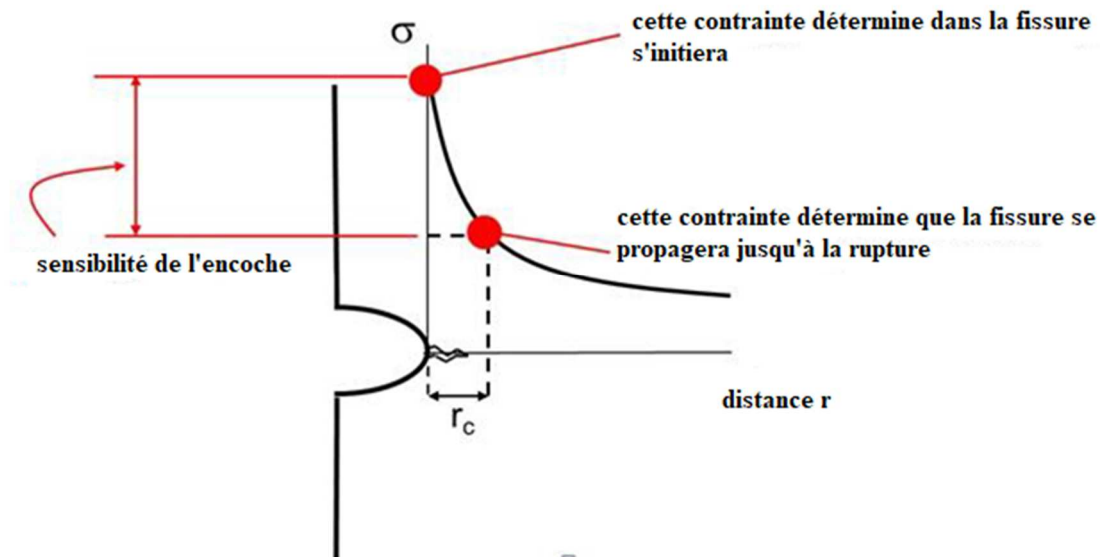


Figure IV-32 : Distribution réelle des contraintes.

Deux valeurs du facteur de concentration des contraintes peuvent être calculées pour l'exemple indiqué à la figure IV-32.

Sur la base de la contrainte « brute » à AA

$$K_{t \text{ brut}} = \frac{\sigma}{S_{AA}} \quad \text{IV-31}$$

Sur la base de la contrainte « nette » à BB

$$K_{t \text{ nett}} = \frac{\sigma}{S_{BB}} \quad \text{IV-32}$$

Ces valeurs du facteur de concentration des contraintes sont basées sur des effets purement géométriques et sont calculées pour des conditions élastiques. La méthode de calcul peut utiliser une analyse bidimensionnelle, avec les contraintes uniformément répartis à travers l'épaisseur de la plaque. Ces conditions de la contrainte plane s'appliquent aux sections minces.

La figure IV-33 montre comment la valeur de la section brute $K_{t \text{ brut}}$ et de la section nette $K_{t \text{ nett}}$ varie selon la géométrie de la plaque.

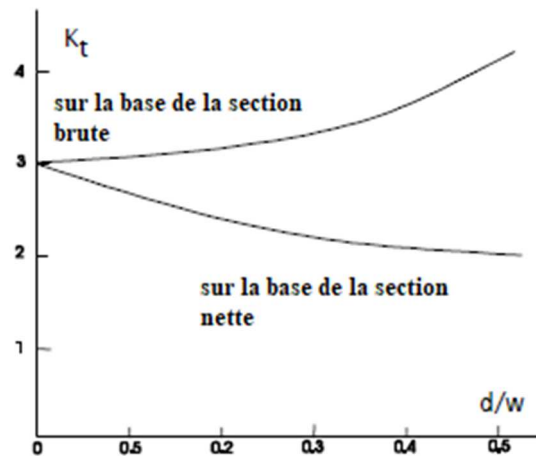


Figure IV-33 : Effet de la géométrie sur la valeur du facteur de concentration des contraintes pour un trou circulaire dans une plaque mince.

IV-16-Résultats

Nous donnons ci-dessous les résultats des simulations numériques obtenus lors des différentes simulations de fatigue en utilisant le logiciel Fe-Safe. Afin de mener à terme cette étude, nous avons comparés plusieurs modèles de fatigue dans le cas de durée de vie limitée et fatigue illimitée.

Les tableaux ci-dessous représentent :

- Nombre de cycle dans la zone critique (Worst Life-Repeats).
- Facteur de concentration de contrainte (WorstFOS@Life = Infinite)
- La contrainte maximale(SMAX), celle rapportée à la limite d'élasticité $S_{MAX}/YIELD$ et celle rapportée à la contrainte maximale en traction monotone S_{MAX}/UTS .

1. Durée de vie limitée

❖ Fatigue : Déformation normale – Morrow

Tableau IV-1 : Déformation normale – Morrow

Worst Life-Repeats	2950.839	Element [2]18378.1
Worst FOS@Life=Infinite	0.5	Element [2]313.1
Largest(+ or -) SMAX	499.927MPa	Element [2]18378.1
Largest(+ or -) SMAX/Yield	1.538	Element [2]18378.1
Largest(+ or -) SMAX/UTS	0.461	Element [2]18378.1
Largest Damage	3.389E-4	Element [2]18378.1

❖ Fatigue : Brown Miller –Morrow

Tableau IV-2 : Brown Miller – Morrow

Worst Life-Repeats	3240.971	Element [2]18378.1
Worst FOS@Life=Infinite	0.5	Element [1]3010.1
Largest(+ or -) SMAX	499.927MPa	Element [2]18378.1
Largest(+ or -) SMAX/Yield	1.538	Element [2]18378.1
Largest(+ or -) SMAX/UTS	0.461	Element [2]18378.1
Largest Damage	3.085E-4	Element [2]18378.1

❖ **Fatigue : Déformation de cisaillement maximale – Morrow****Tableau IV-3:** Déformation de cisaillement maximale – Morrow

Worst Life-Repeats	4857.937	Element [1]3010.1
Worst FOS@Life=Infinite	0.5	Element [1]3010.1
Largest(+ or -) SMAX	499.927MPa	Element [2]18378.1
Largest(+ or -) SMAX/Yield	1.538	Element [2]18378.1
Largest(+ or -) SMAX/UTS	0.461	Element [2]18378.1
Largest Damage	2.058E-4	Element [1]3010.1

❖ **Fatigue : Déformation normale – Smith-Watson-Toppel (SWT)****Tableau IV-4 :** Déformation normale – SWT

Worst Life-Repeats	792.729	Element [2]18378.1
Worst FOS@Life=Infinite	0.5	Element [2]17868.1
Largest(+ or -) SMAX	499.927MPa	Element [2]18378.1
Largest(+ or -) SMAX/Yield	1.538	Element [2]18378.1
Largest(+ or -) SMAX/UTS	0.461	Element [2]18378.1
Largest Damage	1.261E-3	Element [2]18378.1

IV-16-1-Interprétations des résultats

Nous donnons sur les figure IV-1 et IV-2 les courbes d'évolution du nombre de cycles et de l'endommagement tirés des tableaux IV-1 à IV-4

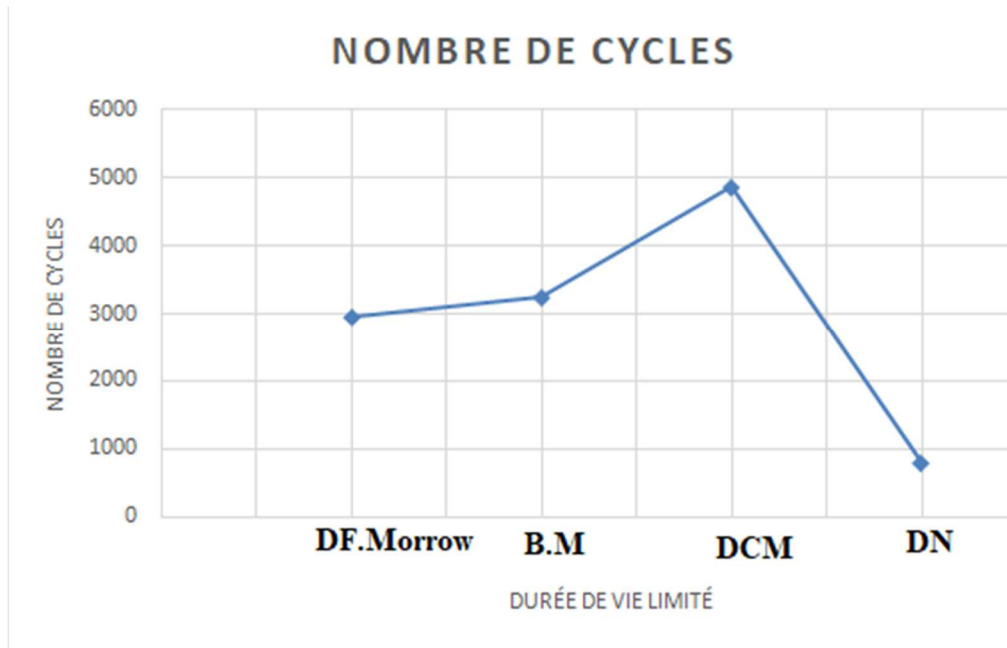


Figure IV-34 : Nombre de cycles prédit par chaque modèle.

La figure IV-35 représente le nombre de cycles prédit par les modèles. Nous remarquons que le nombre de cycles le plus grand est obtenu en utilisant le critère de la déformation de cisaillement au niveau de la déformation de cisaillement maximale – Morrow. Par contre, il est faible au niveau déformation normale – SWT.

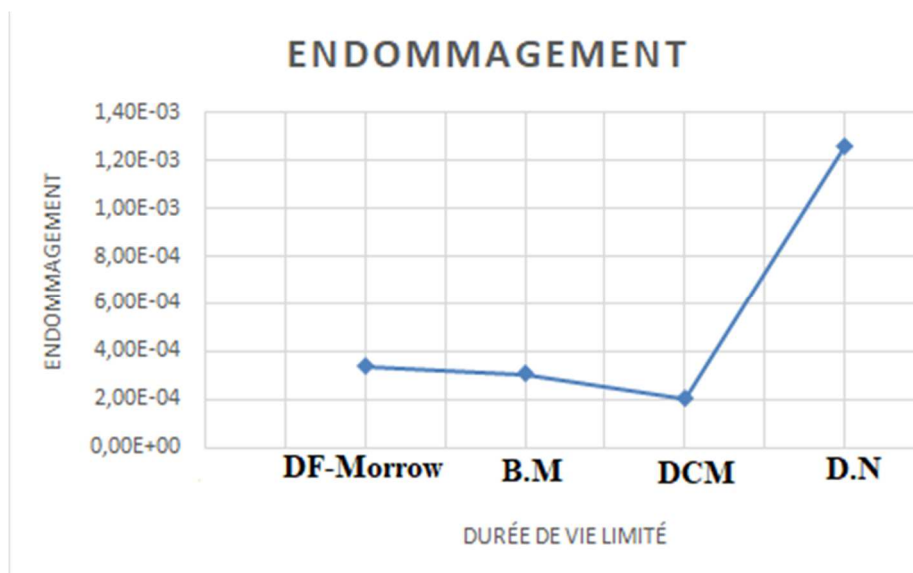


Figure IV-35 : Courbe de l'endommagement.

La figure IV-36 représente l'endommagement. Dans cette courbe nous remarquons que l'endommagement prédit par le modèle est plus grand. Par contre l'endommagement au niveau de la déformation de cisaillement maximale – Morrow est faible.

A partir de ces deux courbes (figure IV-35 et IV-36) on constate que si le nombre de cycles augmente l'endommagement diminue, et si le nombre de cycles diminue l'endommagement augmente.

2. Durée de vie illimitée

Dans le cas de la simulation de la durée de vie en fatigue illimitée (fatigue à grand nombre de cycles), nous donnons dans les tableaux ci-dessous en plus le facteur de réserve en fatigue en anglais Fatigue Reserve Factor (FRF). Le FRF est un facteur d'échelle linéaire obtenu à partir de corrections de contraintes moyennes telles que Goodman, ...Il est utilisé pour calculer les coefficients de sécurité de fatigue basés sur les contraintes pour une durée de vie calculée en fonction de la durée de vie infinie du matériau (ou une durée de vie autre à préciser).

❖ Fatigue : Déformation normale – Goodman

Tableau IV-5 : Déformation normale – Goodman

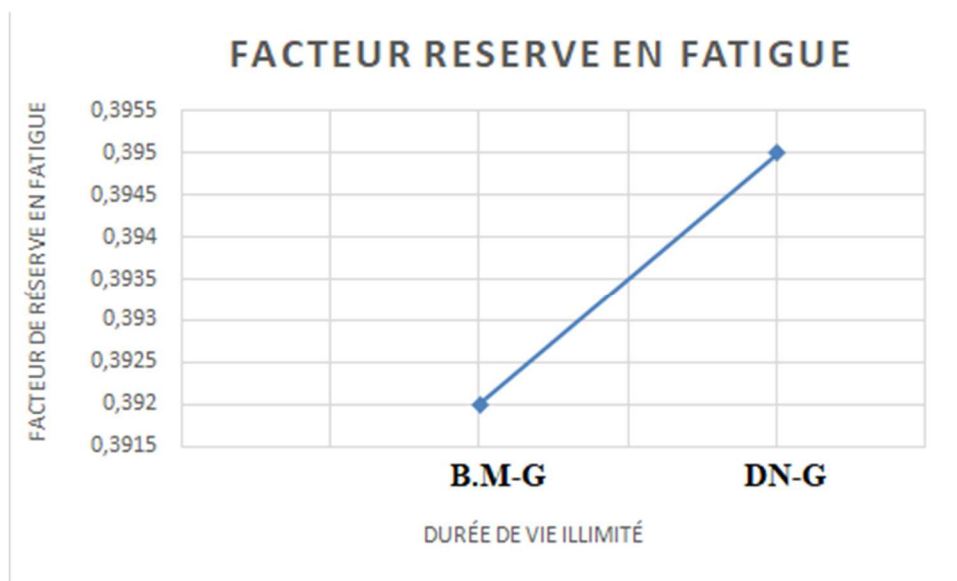
Worst FRF-Radial	0.392	Element [2]18378.1
Worst FRF-Vert	0.392	Element [2]18378.1
Worst FRF-Horz	0	Element [1]672.1
Worst FRF-Worst	0	Element [1]672.1
Largest(+ or -) SMAX	499.927MPa	Element [2]18378.1
Largest(+ or -) SMAX/Yield	1.538	Element [2]18378.1
Largest(+ or -) SMAX/UTS	0.461	Element [2]18378.1

❖ **Fatigue : Brown Miller – Goodman****Tableau IV-6 : Brown Miller - Goodman**

Worst FRF-Radial	0.395	Element [2]18378.1
Worst FRF-Vert	0.395	Element [2]18378.1
Worst FRF-Horz	0	Element [1]672.1
Worst FRF-Worst	0	Element [1]672.1
Largest(+ or -) SMAX	499.927MPa	Element [2]18378.1
Largest(+ or -) SMAX/Yield	1.538	Element [2]18378.1
Largest(+ or -) SMAX/UTS	0.461	Element [2]18378.1

IV-16-2-Interprétation des résultats de fatigue illimitée

Dans le cas de la fatigue illimitée, le critère représenté est le Facteur de réserve en Fatigue

**Figure IV-36 : courbe facteur de réserve.**

La figure IV-3 représente le facteur de réserve. Nous remarquons que le facteur de réserve en fatigue est plus grand au niveau Brown Miller – Goodman. Donc ce critère est plus sévère.

IV-17-Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons mené ces études sur la fatigue des galets. Pour mener ce travail, nous avons utilisé le logiciel de fatigue Fe-Safe qui a permis de déterminer la durée de vie des galets aussi que leurs endommagements pour la fatigue limitée.

Conclusion générale

Le travail effectué dans le cadre de ce mémoire consiste à l'étude et la conception d'une profileuse à galet et la simulation du profilage ainsi que le calcul en fatigue d'un galet.

Dans le chapitre 2, nous avons réalisé la conception d'une profileuse à galet à le logiciel de CAO SolidWorks. Puis, nous avons étudié et vérifié certaines parties importantes de la profileuse.

Dans le chapitre 3, nous avons mené une étude sur le procédé de profilage avec le logiciel de calcul éléments finis ABAQUS. Nous avons donc choisi de simuler le profilage d'une barrière autoroute de sécurité. Afin d'optimiser les temps de calcul, nous avons opté pour six (06) jeux de galets. L'étude a montré que les matériaux et paramètres du procédé reproduisent correctement la forme choisie.

Dans le dernier chapitre nous avons soumis intéressés aux chargement en fatigue des galets car ces derniers glissements des chargements cycliques sur une longue durée lors du profilage. Le travail a été réalisé avec le logiciel Fe-Safe. Afin de mené ce permes travail dans ce domaine, nous avons décède de comparer les prédictions de plusieurs modelés de fatigue limitée et illimitée.

Ce travail, nous a permis d'avoir un avant-gout de la vie d'un ingénieur vue qu'une chaque étape de conception, eu recoures à l'imagination de fonctionnement de la machine avant sa réalisation. Ce ci qui nous a permis d'imaginer et combiner les différentes solutions. Ce ci aussi à travers ce projet, nous avons pu comprendre le fonctionnement d'une profileuse à galet ainsi que maitrise le procédé.

En perspective, nous souhaitons que notre travail d'étude et de conception passe à l'étape de fabrication.

Références bibliographiques

- [1] MAKHLOUFI Lydia. Conception des galets d'une profileuse de tôles. Université Abderrahmane MIRA BEJAIA. Mémoire de fin d'études fabrication mécanique et productive. 2017-2018.
- [2] H. Neuber. Theory of stress Concentration for Shear-Strained Prismatical Bodies With Arbitrary Nonlinear Strain Law. J. Appl. Mech. Dec 1961, 28(4) : 544-550
- [3] ER-RABIY Mohammed. Étude et conception d'une machine de profilage des métaux. Mémoire de fin d'études, conception mécanique et innovation. Université Sidi Mohammed Ben Abdellah – Fès, 2013.
- [4] Jean-Jacques BERTRANDIE. Profilage. Techniques-ingénieur. Date de publication : 10 avr. 1998.
- [5] G. Glinka, Calculation of inelastic notch-tip strain-stress histories under cyclic loading, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 22, pp.839-854, 1985.
- [6] Rob Thompson. Desing, Les procédés de fabrication, (Broché), Editions VIAL, (ISBN 978-2-85101-109-1), 31/10/2012
- [7] DECULTOT Nicolas. Formage incrémental de tôle d'aluminium : étude du procédé à l'aide de la mesure de champs et identification de modèles de comportement. Thèse de doctorat : Génie Mécanique, Mécanique et Matériaux. Université de Paul Sabatier – Toulouse 3- 2009.
- [8] Jean-Paul PEYRE. Traitement de surface des outillages de profilage-rebrousage., polematériaux métalliques. Cetim, avril 2004 (ISBN 2854005597)
- [9] LAROCHE Yohann et NARCISSE Julien. Simulation numérique de l'usinage avec ABAQUS. Projet de Fin d'Etude, Polytech' Tours, année 2011/2012.
- [10] SEEGER T et HEULER P. Generalized application of Neuber's rule (Application généralisée de la règle de Neuber). J. TEST. EVAL. (ISSN 0090-3973); 1980; VOL. 8; NO 4; PP. 199-204.
- [11] Webographie : Technologie-du-profilage-a-froid. Consulté le 20 décembre 2020.
<https://www.voestalpine.com/profilafroid/Technologie-du-profilage-a-froid/Le-process-du-profilage-a-froid>
- [12] Rabah Sahli, Etude de la rupture et de la formabilité des tôles en acier A60. Propriétés et microstructure. Mémoire de fin d'études, master Construction mécanique, 2011/2012, Université MOULOUD Mammeri de Tizi Ouzou.