



Département de Génie Mécanique

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de :

MASTER

En Génie Mécanique

Option : Fabrication mécanique et productique

Présenté par

**TERKI Hicham ; NOUIRI Charef eddine ; ABDELLAOUI Mohamed ;
ZEDANI Oussama ; TURQUI Abdelmoumene**

Thème

CONCEPTION ET OPTIMISATION DE PROFILS METALLIQUES ALLEGES POUR LIGNE DE PROFILAGE EXISTANTE

Devant le jury composé de :

NOM et Prénom	Grade	Qualité
ELHADI Abdelmalek	Pr	Président
GHADBANE Tahar	MCB	Examineur
ARSLANE Mustapha	MCB	Encadrant
AOUFI Belkacem	Dr	Co Encadrant

Dédicace

Nous dédions ce modeste travail :

À nos chers parents, qui ont toujours été notre plus grand soutien tout au long de notre parcours universitaire, grâce à leur amour, leurs sacrifices et leurs prières sincères. Qu'ils trouvent ici l'expression de notre profonde gratitude et de notre grand respect.

À nos familles, pour leur patience, leurs encouragements et leur soutien permanent qui nous ont motivés à accomplir ce travail.

À nos honorables enseignants, qui nous ont transmis le savoir et contribué à notre formation scientifique et académique.

À nos amis et collègues, avec qui nous avons partagé des moments d'effort, de persévérance et de réussite durant nos années d'études.

Enfin, à toutes les personnes ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire, nous dédions le fruit de notre travail avec une grande reconnaissance.

Remerciements

Nous remercions Allah le Tout-Puissant de nous avoir donné la volonté, le courage et la patience pour mener à bien ce travail.

Nous adressons nos sincères remerciements et notre profonde gratitude à notre encadreur, Monsieur Mustapha Arslane, pour son accompagnement, ses précieux conseils, sa disponibilité et son soutien tout au long de la réalisation de ce mémoire. Son encadrement scientifique et ses orientations pertinentes ont été d'une grande importance dans l'aboutissement de ce travail.

Nous tenons également à remercier l'ensemble des enseignants du département de génie mécanique pour la qualité de la formation qu'ils nous ont assurée durant notre parcours universitaire.

Nos remerciements s'adressent aussi aux membres du jury qui ont accepté d'examiner et d'évaluer ce mémoire, ainsi qu'à toutes les personnes ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail, par leurs conseils, leur aide ou leurs encouragements.

Enfin, nous exprimons notre profonde reconnaissance à nos familles pour leur soutien permanent, leur patience et leurs encouragements continus, qui ont été une véritable source de motivation tout au long de nos études.

SOMMAIRE

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale	9
Introduction générale.....	10
Chapitre 1 : Étude bibliographique et analyse de l'existant.....	12
1.1. Introduction au rôle des profils métalliques dans les structures industrielles	13
1.2. Principe et fonctionnement des machines profileuses	14
1.3. Types de profilés.....	16
1.4. Analyse du profil métallique actuel.....	18
1.5. Exigences mécaniques (RDM) : flexion, traction, flambement, torsion	20
1.6. Synthèse des solutions de réduction de poids dans l'industrie	22
Chapitre 2 : Conception et optimisation de nouveaux profils allégés.....	26
2.1 Cahier des charges du nouveau profil.....	27
2.2 Étude descriptive et analyse des profils.....	30
2.3 Étude comparative de plusieurs formes candidate.....	54
2.4. Simulation RDM et optimisation :	57
2.5 Sélection du profil optimal	64
Chapitre 3 : Adaptation industrielle et validation	67
3.1 Analyse de la chaîne de profilage.....	68
3.2 Étude des galets nécessaires pour le nouveau profil	70
3.3. Simulation du processus de profilage	79
3.4. Fabrication du jeu de galets	98
3.5 coût de fabrication	105
3.6 Conclusion	111
Chapitre 4 : Validation, exploitation et perspectives	112
4.1. Comparaison entre l'ancien et le nouveau profil :	113
4.2 Validation mécanique du nouveau profil	114
4.3. Validation industrielle	115
4.4. Plan d'industrialisation	119
4.5 Perspectives, évolutions possibles, gamme élargie	123
Conclusion générale.....	128
Bibliographie	131

Liste des figures

Figure I.01 : Machine de profilage	16
Figure I.02 : Les types de profilés	18
Figure II.01 : Profil cornier simple	31
Figure II.02 : Profil 01	36
Figure II.03 : Profil 02	39
Figure II.04 : Profil 03	41
Figure II.05 : Profil 04	43
Figure II.06 : Profil 05	45
Figure II.07 : Profil 06	47
Figure II.08 : Profil 07	49
Figure II.09 : Profil 08	52
Figure II.10 : Attribution du matériau dans SolidWorks.....	59
Figure II.11 : Conditions de fixation du profil	60
Figure II.12 : Application de la charge mécanique.....	60
Figure II.13 : maillage de profil 02	61
Figure II.14 : maillage de profil 05	61
Figure II.15 : maillage de profil 06	62
Figure II.16 : maillage de profil 08	62
Figure II.17 : Résultat des contraintes de Von Mises et déplacement.....	63
Figure II.18 : Résultat des contraintes de Von Mises et déplacement.....	63
Figure II.19 : Resultat des contraintes de Von Mises et déplacement (Profil 06)	64
Figure II.20 : Résultat des contraintes de Von Mises et déplacement (Profil 08).....	64
Figure III.01 : machine profilage.....	68
Figure III.02 : Passe profilage	69
Figure III.03 : Galets de profilage.....	70
Figure ̊ III.04: diagramme fer carbone	74
Figure III.05 : Sélecteur de diamètre d'arbre de laminoir a profiler en pouces (Halmos 2005)	76
Figure III.06 : La clavette du galet.....	77
Figure III.07 : Tableau des dimensions	77

Figure III.08 : dépliée de la fleur	79
Figure III.09 : Machine de profilage 3D	85
Figure III.10: dessin de définition de galet inférieur (Passe 12)	99
Figure VIII.11 : dessin de définition de galet supérieur (Passe 12).....	101
Figure III.12: dessin de définition d'arbre.....	103
Figure IV.01 : nouveau cornière avec (S235MC)	115
Figure IV.02 : Maillage contrainte de profil	116
Figure IV.03 : Von Mises stress de profil	117
Figure IV.04 : déplacements de profil	118
Figure IV.05 : flambement de profil	119

Liste des tableaux

Tableau I.01: les différents modes de sollicitation.....	22
Tableau I.02 : solutions pour la perte de poids.....	24
Tableau II.01 : Données du profil de référence	30
Tableau II.02: comparatif technique	33
Tableau II.03: Comparaison des propriétés mécaniques.....	34
Tableau II.04 : comparaison indicative des prix.....	34
Tableau II.05 : Comparaison Profil de base et profil 01	37
Tableau II.06 : Comparaison Profil de base et profil 02	40
Tableau II.07 : Comparaison Profil de base et profil 03	41
Tableau II.08 : Comparaison Profil de base et profil 04	44
Tableau II.09 : Comparaison Profil de base et profil 05	46
Tableau II.10 : Comparaison Profil de base et profil 06	48
Tableau II.11 : Comparaison Profil de base et profil 07	50
Tableau II.12 : Comparaison Profil de base et profil 08	53
Tableau II.13 : comparaison des caractéristiques des profils	55
Tableau II.14 : les propriétés mécaniques du matériau	59
Tableau II.15 : Comparaison des profils	64
Tableau III.01 : Composition chimique d'un acier (42CD4) 42CrMo4	71
Tableau III.02 : Caractéristiques du matériau (42CD4) 42CrMo4.....	71
Tableau III.03 : Composition chimique d'un acier Z 200 C 12.....	72
Tableau III.04 : Caractéristiques du matériau Z200C12.....	72
Tableau III.05 : Composition chimique d'un acier S235MC.....	74
Tableau III.06 : Caractéristiques du matériau S235MC	74
Tableau IV.01 : Comparaison géométrique et dimensionnelle	113
Tableau IV.02 : les propriétés chimiques et mécaniques fondamentales.....	114

Introduction générale

Introduction générale

Dans un contexte industriel marqué par une concurrence accrue, une recherche permanente de réduction des coûts et des exigences croissantes en matière de performance des produits, l'allègement des structures métalliques constitue aujourd'hui un enjeu majeur dans de nombreux secteurs industriels. Les domaines de la construction métallique, du transport, des équipements industriels et des infrastructures s'orientent de plus en plus vers des solutions permettant de réduire la consommation de matière première tout en maintenant des niveaux élevés de résistance mécanique, de fiabilité et de durabilité.

Les profilés métalliques obtenus par profilage à froid occupent une place importante dans cette démarche. Grâce à leur géométrie optimisée et à leur procédé de fabrication continu, ils offrent une excellente combinaison entre légèreté, rigidité et coût de production. Le profilage à froid représente ainsi l'une des technologies les plus utilisées pour la fabrication de sections métalliques destinées à des applications variées nécessitant une grande productivité et une qualité dimensionnelle élevée.

Cependant, les profils conventionnels utilisés dans certaines lignes de production présentent souvent des marges de sécurité importantes qui se traduisent par une consommation excessive de matière. Cette situation ouvre la voie à des études d'optimisation visant à améliorer le rapport résistance/poids des profilés tout en garantissant leur compatibilité avec les équipements industriels existants. L'enjeu consiste alors à concevoir des géométries innovantes capables de satisfaire simultanément les contraintes mécaniques, technologiques et économiques.

C'est dans cette perspective que s'inscrit le présent travail, dont l'objectif principal est la conception et l'optimisation de profils métalliques allégés pouvant être fabriqués sur une ligne de profilage existante sans modifications majeures des moyens de production. L'étude repose sur une approche méthodique combinant l'analyse bibliographique, la conception assistée par ordinateur, la simulation numérique par éléments finis et l'évaluation comparative de différentes configurations géométriques.

Pour atteindre cet objectif, le mémoire est structuré en trois chapitres principaux.

Le premier chapitre présente une étude bibliographique consacrée aux procédés de profilage, aux différents types de profils métalliques ainsi qu'aux critères mécaniques intervenant dans leur conception. Une attention particulière est accordée aux stratégies d'allègement et aux phénomènes susceptibles d'affecter la stabilité et la résistance des structures minces.

Le deuxième chapitre est dédié à la conception et à l'optimisation des profils proposés. Après l'établissement du cahier des charges, plusieurs configurations géométriques sont développées puis évaluées à l'aide de simulations numériques afin d'identifier la solution offrant le meilleur compromis entre légèreté, résistance mécanique et faisabilité industrielle.

Le troisième chapitre porte sur l'adaptation du profil retenu à la ligne de profilage existante. Il comprend l'étude du processus de fabrication, l'analyse des contraintes technologiques ainsi que la validation finale de la solution proposée dans une perspective d'industrialisation.

Enfin, le quatrième chapitre est consacré à la validation et à l'évaluation des performances de la solution retenue. Il présente l'analyse détaillée des résultats obtenus, l'étude comparative entre le profil initial et le profil optimisé ainsi que l'estimation des gains réalisés en termes de réduction de masse, d'amélioration des performances mécaniques et d'impact économique. Ce chapitre permet ainsi de confirmer la pertinence de la démarche adoptée et l'intérêt industriel de la solution proposée.

L'ensemble de cette démarche vise à démontrer qu'une optimisation judicieuse de la géométrie des profilés permet de réaliser des gains significatifs en matière de masse et de coût tout en conservant les performances mécaniques exigées par l'application industrielle considérée.

Chapitre 1 :

Revue bibliographique et analyse de l'existant

1.1. Introduction au rôle des profils métalliques dans les structures industrielles

L'utilisation de l'acier dans la construction moderne est devenue incontournable en raison de ses propriétés mécaniques exceptionnelles. En effet, ce matériau se distingue par une résistance élevée à la traction et à la compression, une bonne ductilité ainsi qu'une grande durabilité face aux sollicitations extérieures. Ces caractéristiques font de l'acier un choix privilégié dans le domaine des structures industrielles, où les exigences en termes de sécurité, de performance et de longévité sont particulièrement élevées [1-2].

Dans le milieu industriel, les profilés métalliques assurent des fonctions structurelles majeures. Ils constituent les éléments de base des ossatures des bâtiments, tels que les entrepôts, les usines, les hangars ou encore les plateformes logistiques. Leur rôle principal consiste à reprendre et transmettre les charges appliquées à la structure, qu'il s'agisse du poids propre, des charges d'exploitation ou des actions climatiques comme le vent et la neige. En outre, ils servent de supports pour les équipements industriels, les machines, les systèmes de manutention ainsi que pour les installations techniques, notamment les réseaux électriques et de tuyauterie [1-2].

Grâce à leur modularité et à leur facilité d'assemblage, les profilés métalliques permettent une grande flexibilité dans la conception architecturale et structurelle. Ils offrent également l'avantage de réduire les délais de réalisation sur les chantiers, car de nombreux éléments peuvent être préfabriqués en atelier puis assemblés sur site. Cette approche industrialisée contribue à améliorer la qualité des constructions tout en optimisant les coûts [1-2-3].

On observe aujourd'hui une transition marquée vers l'utilisation de profilés formés à froid, qui s'imposent progressivement face aux profilés laminés à chaud. Cette évolution s'explique par plusieurs facteurs techniques et économiques. Les profilés formés à froid sont obtenus à partir de bandes d'acier minces, mises en forme à température ambiante à l'aide de procédés continus tels que le profilage à galets. Cette technique permet d'obtenir des sections précises, légères et adaptées à des applications variées [2-3-4].

L'un des principaux avantages de ces profilés réside dans leur capacité à offrir une grande résistance pour un poids réduit. En optimisant la répartition de la matière dans la section, il est possible d'atteindre des performances mécaniques élevées tout en diminuant la masse globale de la structure. Cette légèreté facilite considérablement le transport, la manutention et le montage sur site, ce qui représente un atout majeur dans les projets industriels où la rapidité d'exécution est essentielle [1-2-3].

Par ailleurs, la réduction du poids des structures entraîne une diminution des charges transmises aux fondations, permettant ainsi de concevoir des infrastructures plus économiques. Toutefois, cette optimisation s'accompagne de nouveaux défis, notamment en ce qui concerne la stabilité des éléments minces. Les phénomènes d'instabilité, tels que le flambement ou le voilement local, doivent être soigneusement pris en compte lors de la conception afin de garantir la sécurité de l'ensemble [1-2-3].

En définitive, les profilés métalliques occupent une place centrale dans les structures industrielles modernes. Leur évolution vers des solutions plus légères, plus performantes et plus économiques illustre l'importance de l'innovation dans ce domaine. Le recours croissant aux profilés formés à froid témoigne ainsi d'une volonté d'optimiser les ressources tout en répondant aux exigences techniques et environnementales actuelles [1.2-3].

1.2. Principe et fonctionnement des machines profileuses

Le profilage aux galets, également appelé « *roll-forming* », est un procédé de formage continu largement utilisé dans l'industrie pour la fabrication de profilés métalliques à section constante. Il consiste à transformer progressivement une bande de tôle plane en une forme géométrique spécifique, grâce à une succession d'opérations de déformation plastique à froid. Ce procédé se distingue par sa capacité à produire des profils complexes avec une grande précision et à des cadences élevées, ce qui en fait une solution particulièrement adaptée à la production en série [2-3-4].

Le principe de fonctionnement repose sur le passage continu de la bande d'acier à travers une série de stations de formage, chacune équipée d'une paire de rouleaux appelés galets [2-3-4]. Ces galets sont conçus de manière à imposer une déformation progressive au matériau [2-4].

Contrairement à un formage brutal, la transformation s'effectue par étapes successives, ce qui permet de limiter les contraintes internes et d'éviter l'apparition de défauts tels que les fissures ou les déformations excessives [2-4]. À chaque station, la section de la tôle se rapproche progressivement de la forme finale souhaitée, jusqu'à obtenir un profilé conforme aux spécifications [2-4].

Une machine profileuse typique se compose de plusieurs éléments essentiels assurant le bon déroulement du procédé. Tout d'abord, un système de guidage situé à l'entrée permet d'aligner correctement la bande métallique et de garantir son introduction stable dans la machine. Ce dispositif est crucial pour éviter les défauts d'orientation qui pourraient compromettre la qualité du produit fini. Ensuite, la partie principale de la machine est constituée d'une série d'arbres rotatifs sur lesquels sont montés les galets. Ces arbres sont disposés de manière parallèle et synchronisée afin d'assurer une déformation homogène sur toute la longueur de la bande.

Le mouvement de la bande est assuré par un bloc moteur, généralement couplé à un système de transmission mécanique. La vitesse d'entraînement peut varier en fonction de l'application et des caractéristiques du profilé, typiquement entre 1,5 et 150 m/min. Une vitesse élevée permet d'augmenter la productivité, mais nécessite un contrôle rigoureux afin de maintenir la stabilité dimensionnelle et géométrique et la précision du profil obtenu.

La précision du procédé de profilage dépend fortement de la conception et de la fabrication des galets. Ces derniers doivent être usinés avec une grande exactitude, car la moindre erreur dimensionnelle ou géométrique peut entraîner des défauts significatifs dans le profilé final, tels que des variations d'épaisseur, des déformations non uniformes ou des problèmes d'assemblage. De plus, un mauvais alignement des galets peut générer des contraintes internes indésirables, affectant la résistance mécanique du produit [4].

En outre, le procédé de profilage présente plusieurs avantages notables [2-4]. Il permet une production continue avec peu de pertes de matière, une excellente répétabilité des formes, ainsi qu'une grande flexibilité dans la conception des sections [2-3-4]. Il est également

compatible avec différents types d'aciers, y compris les aciers à haute limite d'élasticité, ce qui élargit son champ d'application dans les structures industrielles modernes [2-4].

Cependant, ce procédé impose certaines contraintes, notamment en termes d'investissement initial et de conception des outillages. Chaque nouveau profil nécessite une série spécifique de galets, ce qui peut engendrer des coûts supplémentaires. Malgré cela, le profilage aux galets reste l'une des techniques les plus efficaces pour la fabrication de profilés métalliques en grande série [4].

En conclusion, le profilage à froid par galets constitue une technologie clé dans l'industrie des structures métalliques. Son principe basé sur la déformation progressive permet d'obtenir des profilés précis, économiques et adaptés aux exigences actuelles en matière de performance et de productivité [2-4].



Figure I.01 : Machine de profilage

1.3. Types de profilés

Le procédé de profilage à froid offre une grande flexibilité dans la conception et la fabrication des profilés métalliques. Cette technique permet de produire une large variété de formes géométriques, adaptées aux exigences spécifiques de chaque application industrielle ou de construction. Le choix du type de profilé dépend principalement des sollicitations mécaniques

auxquelles il sera soumis, ainsi que des contraintes économiques et fonctionnelles du projet [2].

Parmi les différentes catégories de profilés, les profils ouverts simples occupent une place importante. On retrouve notamment les sections en L (cornières), en U et en C, qui sont largement utilisées dans les domaines de la menuiserie métallique, de la serrurerie et des structures légères. Les cornières en L sont souvent employées pour les assemblages, les renforts et les encadrements, grâce à leur simplicité et leur facilité de mise en œuvre. Les profilés en U et en C, quant à eux, sont très utilisés comme éléments porteurs secondaires, tels que les pannes, les lisses ou les montants. Leur géométrie permet une bonne résistance à la flexion dans une direction principale, tout en restant économique en termes de consommation de matière [2].

Cependant, face aux exigences croissantes en matière de performance mécanique, des formes plus complexes ont été créées, comme les profilés Sigma (Σ) [5]. Ces profilés se caractérisent par la présence de plis supplémentaires au niveau de l'âme et des ailes, ce qui permet d'augmenter significativement leur moment d'inertie [2]. Cette amélioration géométrique se traduit par une meilleure résistance aux efforts de flexion et de compression, ainsi qu'une réduction des risques de flambement [2-5]. Les profilés Sigma sont particulièrement utilisés dans les structures industrielles où les charges sont importantes, tout en cherchant à limiter le poids global de la structure [5].

D'autres formes spécifiques, telles que les profilés Oméga (Ω), sont également largement utilisées dans le domaine du bâtiment. Leur géométrie particulière leur confère une bonne rigidité transversale, ce qui les rend adaptés aux applications de couverture et de bardage. En effet, ils sont souvent utilisés comme supports pour les panneaux de toiture ou les revêtements de façade. De plus, les tôles nervurées, qui peuvent être considérées comme des profilés continus, sont très répandues dans les planchers collaborant. Elles permettent d'assurer une interaction efficace entre l'acier et le béton, améliorant ainsi les performances globales de la structure [2].

Le choix du type de profilé repose donc sur un compromis entre plusieurs critères, notamment la résistance mécanique, la rigidité, le poids, le coût de fabrication et la facilité de mise en œuvre. Les profilés simples offrent une solution économique et facile à mettre en œuvre, tandis que les profilés complexes permettent d'optimiser les performances structurelles dans des conditions plus exigeantes [2].

En outre, l'évolution des techniques de profilage permet de concevoir des sections personnalisées répondant à des besoins spécifiques [2]. Cette capacité d'adaptation constitue un atout majeur dans le développement de structures modernes plus efficaces [5].

En conclusion, la diversité des types de profilés métalliques reflète l'importance de ce domaine dans l'ingénierie moderne. Qu'il s'agisse de profils simples ou complexes, chaque forme possède des caractéristiques propres qui la rendent adaptée à des applications bien définies [2]. Le développement continu de nouvelles géométries contribue ainsi à améliorer les performances et l'efficacité des structures industrielles [5].

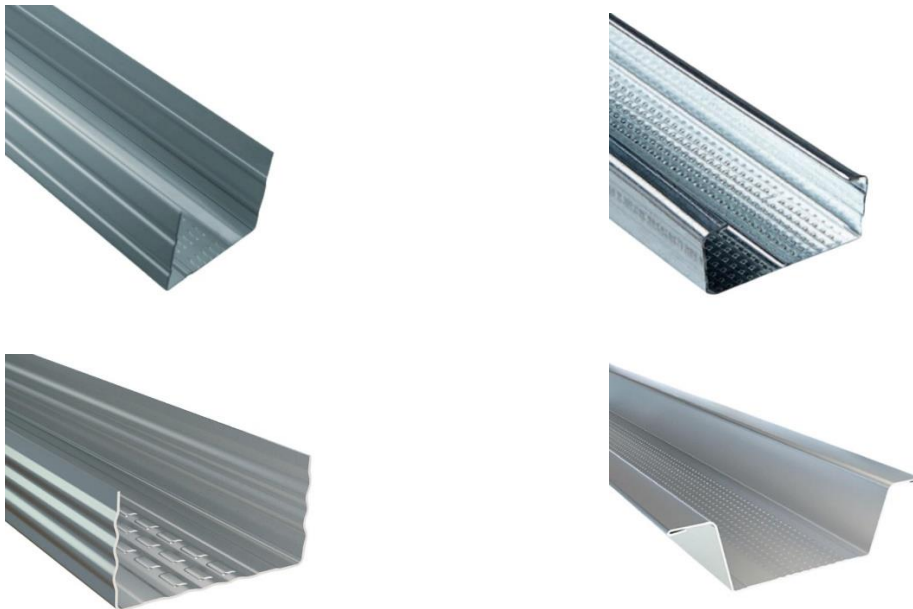


Figure I.02 : Les types de profilés

1.4. Analyse du profil métallique actuel

Les profilés métalliques utilisés dans les structures industrielles modernes ont connu une évolution significative au cours des dernières années, notamment grâce aux progrès des techniques de fabrication telles que le profilage à froid [2-3]. Cette évolution se traduit principalement par une optimisation de la géométrie des sections, visant à réduire la masse tout en conservant des performances mécaniques satisfaisantes [3].

Du point de vue géométrique, les profilés actuels se caractérisent par des parois relativement minces, généralement comprises entre 0,5 mm et 3 mm d'épaisseur [2]. Cette réduction d'épaisseur permet de diminuer considérablement la masse propre des éléments structuraux [2-3]. En effet, le poids linéique de certains profilés peut atteindre des valeurs très faibles, de l'ordre de 0,075 kN/m, ce qui représente un avantage majeur dans la conception des structures légères. Cette approche repose sur une répartition optimisée de la matière, où celle-ci est placée stratégiquement afin de maximiser le moment d'inertie tout en minimisant la quantité totale d'acier utilisée [1].

La diminution de la masse des profilés a un impact direct sur le coût global des constructions. D'une part, elle permet de réduire la consommation de matière première, ce qui se traduit par une économie immédiate sur le coût des matériaux [2-3]. D'autre part, elle entraîne une baisse des charges appliquées à la structure, ce qui permet de dimensionner des fondations plus légères et moins coûteuses [1]. En outre, la légèreté des éléments facilite leur transport et leur manutention, réduisant ainsi les besoins en équipements de levage lourds et les coûts associés à la mise en œuvre sur chantier. Ces avantages économiques font des profilés minces une solution particulièrement attractive pour de nombreuses applications industrielles [2-3].

Cependant, cette optimisation présente également certaines limites, principalement liées au comportement mécanique des sections minces. En effet, la réduction de l'épaisseur rend les profilés plus sensibles aux phénomènes d'instabilité [2-3]. Parmi ces phénomènes, le voilement local constitue l'un des modes de défaillance les plus fréquents. Il se manifeste par une déformation locale des parois comprimées, même sous des niveaux de contrainte relativement faibles. Ce phénomène est particulièrement critique dans les zones planes des profilés, telles que l'âme ou les ailes [3].

Le flambement global représente une autre forme d'instabilité, affectant les éléments comprimés élancés. Il se traduit par une déformation de l'ensemble de la pièce sous l'effet des charges de compression. Dans le cas des profilés minces, ce phénomène peut apparaître avant que la contrainte dans le matériau n'atteigne sa limite d'élasticité, ce qui limite la capacité portante effective de l'élément. Par ailleurs, le flambement distorsionnel, spécifique aux sections ouvertes complexes, combine une déformation locale et une rotation des éléments constitutifs de la section, rendant l'analyse encore plus délicate [5].

Ces limitations imposent une approche rigoureuse dans la conception et le dimensionnement des profilés métalliques. Il est nécessaire de prendre en compte non seulement les caractéristiques du matériau, mais aussi la géométrie de la section et les conditions de chargement. Des solutions telles que l'ajout de raidisseurs, l'optimisation de la forme ou l'utilisation d'aciers à haute résistance permettent de pallier en partie ces problèmes [5].

En conclusion, les profilés métalliques actuels offrent un excellent compromis entre légèreté et performance, contribuant à une réduction significative des coûts dans les structures industrielles. Toutefois, leur utilisation nécessite une maîtrise approfondie des phénomènes d'instabilité, afin de garantir la sécurité et la durabilité des ouvrages. Cette analyse met en évidence l'importance d'une conception optimisée, intégrant à la fois des considérations économiques et mécaniques [5].

1.5. Exigences mécaniques (RDM) : flexion, traction, flambement, torsion

L'analyse du comportement mécanique des profilés métalliques constitue une étape essentielle dans la conception des structures industrielles. Elle repose sur les principes fondamentaux de la résistance des matériaux (RDM), qui permettent d'évaluer la capacité des éléments à supporter les différentes sollicitations auxquelles ils sont soumis. Parmi ces sollicitations, la traction, la flexion, le flambement et la torsion occupent une place prépondérante dans le dimensionnement des profilés formés à froid [1-5].

La traction représente l'une des sollicitations les plus simples à analyser. Elle correspond à une force qui tend à allonger l'élément selon son axe longitudinal. Dans le cas des profilés formés à froid, le procédé de fabrication induit un phénomène d'écrouissage du matériau. Ce

phénomène se traduit par une augmentation de la limite d'élasticité, ce qui améliore la résistance mécanique du profilé. Toutefois, cette amélioration s'accompagne d'une diminution de la ductilité, rendant le matériau plus sensible à la rupture fragile dans certaines conditions. Il est donc nécessaire de trouver un compromis entre résistance et capacité de déformation lors du choix du matériau [1-5].

La flexion est une sollicitation très fréquente dans les structures métalliques, notamment pour les poutres et les pannes. Elle se traduit par une répartition non uniforme des contraintes dans la section, avec des zones en traction et d'autres en compression. La résistance à la flexion dépend principalement du module résistant élastique $W = I/v$, où I est le moment d'inertie de la section et v la distance à la fibre la plus sollicitée. L'optimisation des profilés consiste à éloigner la matière de la fibre neutre afin d'augmenter le moment d'inertie sans accroître significativement la masse. C'est dans cette optique que des formes comme les profilés en C, Sigma ou Oméga sont développées [1-5].

Le flambement constitue un phénomène critique pour les éléments soumis à la compression, en particulier lorsqu'ils sont élancés [1-5]. Il correspond à une instabilité globale ou locale qui peut conduire à une défaillance brutale de la structure [3-5]. Pour les profilés minces, plusieurs modes de flambement peuvent être distingués. Le flambement global concerne l'ensemble de l'élément et dépend de sa longueur, de ses conditions d'appui et de sa rigidité. Le flambement local, quant à lui, affecte les différentes parties de la section, comme l'âme ou les ailes, qui peuvent se déformer indépendamment. Enfin, le flambement distorsionnel est un mode intermédiaire qui implique une déformation combinée de la section, incluant une rotation et une déformation locale. La prise en compte de ces différents modes est essentielle pour garantir la sécurité des structures [2-5].

La torsion représente une autre sollicitation importante, notamment pour les profilés ouverts. Elle correspond à une rotation de la section autour de son axe longitudinal sous l'effet d'un moment de torsion. Les profilés ouverts, tels que les sections en C, U ou Sigma, présentent une faible rigidité torsionnelle en raison de leur géométrie, ce qui les rend particulièrement sensibles à ce type de sollicitation. En revanche, les profilés fermés, comme les tubes circulaires

ou rectangulaires, offrent une bien meilleure résistance à la torsion grâce à leur continuité géométrique, qui permet une répartition plus uniforme des contraintes [1-5].

En conclusion, les exigences mécaniques des profilés métalliques formés à froid nécessitent une analyse approfondie prenant en compte les différents modes de sollicitation [2-5]. La compréhension des phénomènes de traction, de flexion, de flambement et de torsion permet d'optimiser la conception des sections et d'assurer un comportement sûr et performant des structures. Cette approche globale est indispensable pour tirer pleinement parti des avantages offerts par les profilés minces tout en maîtrisant leurs limites [3-5].

Sollicitation	Formule clé	Limite typique (profil 50x2 mm)
Flexion	$M/W \leq f_y$	3-8 kNm
Traction	$N/A \leq f_y$	20-40 kN
Flambement	$N_{cr} = \pi^2 EI/L^2$	$\lambda < 0,5$; 10-30 kN
Torsion	$\tau = T \cdot e/It \leq f_y/\sqrt{3}$	0,5-2 kNm

Tableau I.01: les différents modes de sollicitation

1.6. Synthèse des solutions de réduction de poids dans l'industrie

Dans le domaine des structures métalliques industrielles, la réduction du poids constitue un objectif majeur visant à améliorer les performances globales des ouvrages tout en diminuant les coûts de fabrication, de transport et de mise en œuvre. Cette démarche s'inscrit également dans une logique d'optimisation des ressources et de développement durable [1-5]. Afin d'alléger les structures sans compromettre leur résistance mécanique, plusieurs stratégies technologiques et constructives sont mises en œuvre dans l'industrie moderne [3-5].

La première approche repose sur l'utilisation des aciers à haute limite d'élasticité (High Strength Steels – HSS). Ces matériaux permettent d'atteindre des résistances mécaniques

élevées, pouvant aller jusqu'à 460 MPa voire davantage selon les nuances utilisées. Grâce à cette amélioration des propriétés mécaniques, il devient possible de réduire l'épaisseur des parois des profilés tout en conservant la capacité portante requise [2-5]. Cette réduction de matière entraîne directement une diminution du poids global des structures [1-5]. Toutefois, l'utilisation de ces aciers nécessite une attention particulière concernant les phénomènes de soudabilité, de ductilité et de comportement en service [2-5].

La deuxième stratégie concerne l'optimisation géométrique des sections. Cette approche consiste à concevoir des formes de profilés capables de maximiser l'efficacité mécanique de la matière utilisée. L'objectif principal est de concentrer le matériau dans les zones où les contraintes sont les plus élevées, tout en allégeant les zones moins sollicitées [1-5]. Dans ce cadre, des sections avancées telles que les profilés Sigma, Oméga ou encore les poutrelles à inertie variable ont été développées. Ces formes permettent d'augmenter le moment d'inertie sans augmenter significativement la masse, améliorant ainsi la rigidité et la résistance globale des éléments structuraux.

Une autre solution importante est l'utilisation de raidisseurs. Ces éléments supplémentaires, sous forme de plis, nervures ou renforts intermédiaires, sont intégrés directement dans la géométrie du profilé [3-5]. Leur rôle principal est de retarder l'apparition des phénomènes d'instabilité locale, notamment le voilement des parois minces. En augmentant la rigidité locale des sections, les raidisseurs permettent d'améliorer significativement le comportement en compression et en flexion, sans ajouter une quantité importante de matière. Cette solution est particulièrement efficace pour les profilés formés à froid, qui sont naturellement sensibles aux instabilités locales.

Par ailleurs, les poutrelles ajourées représentent une innovation importante dans la conception des structures légères. Cette technique consiste à réaliser des ouvertures, généralement de forme circulaire ou hexagonale, dans l'âme des poutres. Ces découpes permettent de réduire considérablement le poids propre de l'élément tout en conservant une bonne résistance mécanique globale. En plus de l'allègement structurel, les ouvertures facilitent également le passage des réseaux techniques (câbles, gaines, tuyauteries), ce qui améliore l'intégration fonctionnelle des structures dans les bâtiments industriels. Cependant, cette technique

nécessite une analyse rigoureuse afin d'éviter les concentrations de contraintes autour des ouvertures [1-5].

En complément de ces méthodes, l'optimisation numérique et les outils de simulation jouent aujourd'hui un rôle essentiel dans la conception des structures allégées. Grâce aux logiciels de calcul par éléments finis, il est possible de modéliser avec précision le comportement des profilés et d'identifier les zones de surdimensionnement. Cela permet d'affiner les géométries et de réduire encore davantage la masse des structures tout en respectant les critères de sécurité.

En conclusion, la réduction du poids dans les structures métalliques repose sur une combinaison de plusieurs approches complémentaires, allant du choix des matériaux à l'optimisation géométrique en passant par l'amélioration des procédés de fabrication. Ces stratégies permettent de concevoir des structures plus légères, plus économiques et plus performantes, répondant ainsi aux exigences croissantes de l'industrie moderne.

Solution	Gain poids	Secteurs clés	Exemple machine
Aluminium/titane	30-40%	Aéro/auto	Pièces moteur
Topo-optimisation	25%	Tous	Nervures profilés
Impression 3D	30%	Aérospatiale	Structures lattices
Nervures/pliage	20%	Construction	Parois allégées

Tableau I.02 : solutions pour la perte de poids

1.7. Conclusion

Ce premier chapitre a permis d'établir les bases théoriques nécessaires à la compréhension du sujet de recherche. Après avoir présenté le rôle des profilés métalliques dans les structures industrielles, le principe du profilage à froid et les principaux types de sections utilisés dans l'industrie ont été analysés. L'étude du profil de référence a mis en évidence les avantages des profilés métalliques en termes de résistance mécanique et de facilité de mise en œuvre, mais également leurs limites liées au poids et aux phénomènes d'instabilité tels que le flambement et le voilement local.

Par ailleurs, les exigences mécaniques fondamentales associées aux profilés ont été examinées à travers les sollicitations de traction, flexion, torsion et compression. Enfin, une synthèse des principales stratégies d'allègement utilisées dans l'industrie a montré que l'optimisation géométrique constitue une voie particulièrement prometteuse pour réduire la masse tout en préservant les performances structurelles.

Cette analyse bibliographique a ainsi permis d'identifier les critères de conception essentiels et de justifier la nécessité de développer de nouvelles géométries de profilés allégés adaptées à une fabrication par profilage sur ligne industrielle existante. Ces éléments constituent la base du travail de conception et d'optimisation présenté dans le chapitre suivant.

Chapitre 2 :

Conception et optimisation de nouveaux profils allégés

Introduction

Ce chapitre explore comment imaginer, façonner puis améliorer des profils métalliques fins, Fabrication sans chaleur. Réduisez le poids autant que possible. Sans pour autant sacrifier la solidité attendue. Chaque étape s'ajuste avec soin. Pas question de perdre en résistance. Le résultat doit tenir ses promesses, même légères.

Ce qu'on appelle les profilés formés à froid entre souvent dans la composition des charpentes légères aujourd'hui. Souvent choisis pour les constructions industrielles, ils servent aussi bien sur les fermes agricoles ou les magasins. Porter la couverture du toit, tenir les murs latéraux, soutenir des montants intermédiaires. Issus d'un laminage progressif réalisé avec une tôle fine, ces éléments tirent leur forme d'un passage répété entre des rouleaux. Cette méthode permet d'économiser beaucoup de matériau, c'est vrai - cependant elle limite certaines formes possibles. La façon dont on les plis influent directement sur leurs angles, épaisseurs et pièces arrondis obligatoires .

Ce chapitre suit un cheminement divisé en cinq temps. D'abord vient la fixation des exigences techniques. Enchaînant, on met au point une approche par modélisation ajustable. Un examen placé confronte diverses formes possibles entre elles. Chaque cas passe ensuite par un test virtuel fondé sur le calcul d'éléments distincts. Pour conclure, un choix émerge selon plusieurs critères croisés.

2.1 Cahier des charges du nouveau profil

Dans le cadre de cette étude, le développement du nouveau profil allégé est basé sur un profil de référence industriel, à savoir la cornière en acier $50 \times 50 \times 5$ mm en acier S235JR, largement utilisée dans les structures métalliques.

Ce profil de référence constitue la base de comparaison pour définir les objectifs d'optimisation en termes de performance mécanique, de masse et de faisabilité industrielle.

Les exigences du nouveau profil sont définies comme suit :

2.1.1 Rigidité

Quand une force agit sur un profilé, sa forme tient grâce à sa rigidité. Cette caractéristique limite les changements de géométrie en cas de flexion, par exemple. Sous pression axiale, elle empêche également l'écrasement trop rapide. En situation de torsion, la structure ne se

déforme pas facilement. Tout cela montre comment le matériau réagit face aux sollicitations mécaniques.

Pour ce travail, il faut que le nouveau profil résiste au moins autant que l'ancien angle en acier S235JR de 50 × 50 × 5 mm. Sans cela, la construction risquerait de vaciller sous charge normale.

L'équilibre dans la solidité dépend surtout de cela parfois, la forme coupée tout net par surprise. Ensuite apparaissent des plis qui changent la donne lentement. Un renfort ici ajuste l'équilibre sans crier gare. Chaque nervure joue son rôle à sa manière. Quelque part, une rigidité surgit là où on ne l'attend pas :

- La géométrie de la section (formes nervurées, plis, raidisseurs)
- La répartition de la matière
- Le moment d'inertie de la section.

Ce qu'il faut surtout, c'est que le nouveau profil résiste mieux aux flexions qu'un angle 50 × 50 × 5 mm en acier S235JR. Pourtant, son poids ne doit pas monter trop haut. Bien sûr, la rigidité compte avant tout. En revanche, chaque gramme ajouté pose problème. On cherche donc un équilibre fin entre ténacité et légèreté. Finalement, ce n'est pas juste une question de forme. Plutôt une affaire d'optimisation précise. Même les petits écarts changent tout ici. Alors l'épaisseur, les plis, les pièces ont leur rôle. Chaque détail agit différemment selon l'axe. Rien n'est neutre dans cette géométrie. L'objectif reste clair dès le départ.

2.1.2 Résistance mécanique

La résistance mécanique correspond à la capacité du profil à supporter les contraintes sans rupture ni déformation permanente.

Le profil doit satisfaire aux exigences suivantes:

- Résister aux contraintes de traction et de compression
- Limiter les risques de flambement
- Maintenir un comportement fiable en conditions de service.

Il doit être capable de supporter les contraintes de service sans déformation permanente ni rupture, en respectant les limites admissibles de l'acier de construction S235JR, notamment une limite d'élasticité de 235 MPa.

2.1.3 Fonctionnalité

Le profil conçu doit répondre aux besoins fonctionnels liés à son application industrielle. Cela inclut:

- Facilité d'assemblage (soudage, boulonnage ou clipsage),
- Compatibilité avec les accessoires existants,
- Adaptation aux conditions d'exploitation (environnement, corrosion, charges dynamiques),
- Respect des dimensions normalisées si applicable.

La fonctionnalité est un critère essentiel pour assurer l'intégration du nouveau profil dans le système global sans modifications majeures.

2.1.4 Réduction du poids et du coût

L'un des objectifs principaux est la réduction de la masse par rapport à la cornière de référence 50×50×5 S235JR, tout en maintenant des performances mécaniques satisfaisantes.

Cela implique:

- Une réduction de la quantité de matière utilisée,
- Une optimisation de la forme pour un meilleur rendement mécanique,
- Une diminution des coûts liés à:
 - La matière première,
 - Le transport,
 - La mise en œuvre.

L'optimisation doit trouver un compromis entre légèreté et performance structurelle.

2.1.5 Compatibilité avec la machine de profilage existante

Le nouveau profil doit être conçu de manière à être fabriqué sur la ligne de profilage existante, sans nécessiter de modifications majeures.

Les contraintes à respecter incluent:

- Largeur de bande compatible avec la machine,
- Nombre de passes et stations de formage,
- Limites de déformation admissibles.

- Rayons de pliage réalisables.
- Puissance et capacité de la machine.

Cette contrainte industrielle est déterminante, car elle permet d'éviter des investissements supplémentaires et garantit la faisabilité du projet.

Caractéristique	Symbole	Valeur	Unité	Remarque
Type de profil	—	Cornière égale	—	Profil de référence
Dimensions	—	50 × 50 × 5	mm	Largeur ailes × épaisseur
Matériau	—	S235JR	—	Acier de construction
Norme matériau	—	EN 10025-2	—	Acier de construction
Limite d'élasticité	Re	235	MPa	Valeur nominale
Résistance à la traction	Rm	360 – 510	MPa	Intervalle
Densité	ρ	7850	kg/m ³	Acier standard
Poids linéique	P	3.73	kg/m	Calculé
Type de section	—	Profil ouvert	—	Cornière L
Utilisation principale	—	Structures métalliques	—	Charpente, assemblage
Mode d'assemblage	—	Soudage / Boulonnage	—	Selon application

Tableau II.01 : Données du profil de référence

Conclusion

La cornière 50×50×5 S235JR constitue le **référentiel de base** permettant de définir les objectifs d'optimisation du nouveau profil allégé, notamment en termes de rigidité, résistance, poids et faisabilité industrielle.

2.2 Étude descriptive et analyse des profils

2.2.1 Description du profil de référence

La cornière est un profil ouvert en forme de L, constitué de deux ailes perpendiculaires de même longueur.

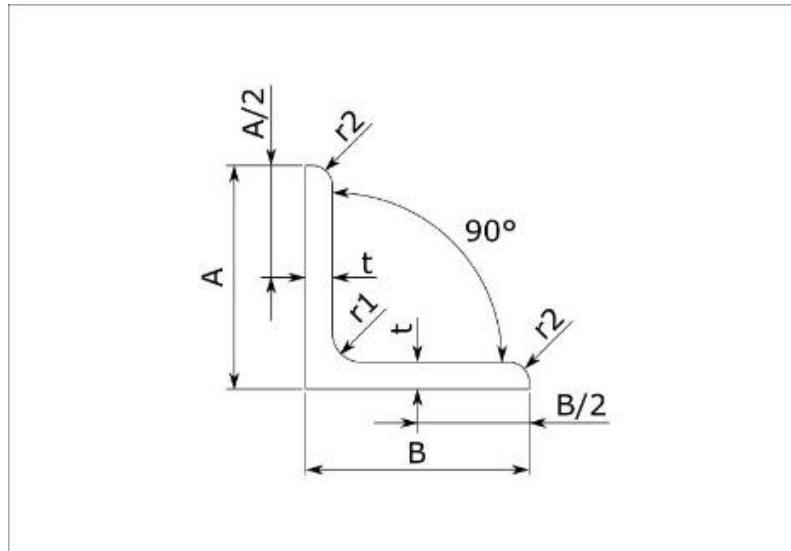


Figure II.01 : Profil cornier simple

- **Caractéristiques géométriques**
 - Deux ailes de longueur égale : 50 mm
 - Épaisseur constante : 5 mm
 - Angle droit (90°) entre les ailes
 - Section ouverte non symétrique (par rapport aux axes principaux)
- **Caractéristiques mécaniques**
 - Matériau : acier S235JR
 - Limite d'élasticité : 235 MPa
 - Bonne aptitude au formage et au soudage
 - Poids linéique : environ 3.73 kg/m

2.2.2 La nuance d'acier pour le profilage à froid des tôles fines

Pour le profilage à froid des tôles fines, plusieurs nuances d'acier peuvent être utilisées selon les normes EN 10130, EN 10346 et EN 10149.

Chaque nuance présente des caractéristiques différentes en termes de résistance mécanique, aptitude au formage et coût.

- *Nuances courantes pour le profilage à froid*

a) Aciers noirs de construction (EN 10025)

L'acier **S235MC** est un acier de construction thermo-mécaniquement laminé, conforme à la norme EN 10149-2. Il présente une bonne aptitude au formage à froid, ce qui le rend particulièrement adapté aux procédés de profilage. Comparé à l'acier **S235JR**, il offre un meilleur compromis entre résistance mécanique et formabilité.

Avantages en formage à froid

- Bonne aptitude au pliage et au profilage, même pour des géométries relativement complexes,
- Meilleure ductilité que les aciers de construction classiques (type S235JR),
- Comportement stable lors du passage en ligne de profilage,
- Réduction du risque de fissuration lors des opérations de formage,
- Bonne homogénéité des propriétés mécaniques,
- Adapté aux applications nécessitant à la fois résistance et formabilité.

b) Aciers galvanisés pour profilage (EN 10346)

Les aciers galvanisés utilisés pour le profilage à froid sont définis selon la norme EN 10346. Ils sont recouverts d'une couche de zinc afin d'améliorer leur résistance à la corrosion, ce qui les rend particulièrement adaptés aux applications extérieures et industrielles.

Parmi les nuances les plus utilisées pour le profilage :

- **DX51D+Z** : nuance la plus couramment utilisée pour le profilage galvanisé, offrant une bonne aptitude à la mise en forme à froid.
- **S250GD+Z** : acier galvanisé avec une limite d'élasticité garantie d'environ 250 MPa, adapté aux applications nécessitant une meilleure résistance mécanique.

Avantages des aciers galvanisés pour profilage :

- Les aciers galvanisés présentent plusieurs avantages importants:
- Excellente résistance à la corrosion grâce au revêtement de zinc,
- Bonne aptitude au formage à froid, adaptée aux procédés de profilage industriels.

- Durée de vie élevée des produits finis, même en environnement agressif.
- Bonne qualité de surface, limitant les opérations de protection supplémentaires (peinture, traitement).
- Standardisation industrielle, facilitant l'approvisionnement et la production en série.
- Bon compromis résistance / formabilité selon les nuances (DX51D, S250GD, etc.).

✓ *Comparaison des nuances pour le profilage*

a) Tableau comparatif technique

Nuance	Norme	Limite élastique (MPa)	Aptitude au profilage	Soudabilité	Protection corrosion	Applications typiques
S235JR	EN 10025	≥235	Moyenne	Très bonne	Non	Construction métallique
S235MC	EN 10149	≥235	Bonne	Très bonne	Possible	Profilage industriel
DX51D+Z	EN 10346	140–300	Très bonne	Bonne	Oui (galvanisé)	Profilés galvanisés
S250GD+Z	EN 10346	≥250	Bonne	Bonne	Oui (galvanisé)	Profilés structurels

Tableau II.02: comparatif technique

b) Comparaison des propriétés mécaniques

Nuance	Norme	Type d'acier	Limite élastique Re (MPa)	Résistance traction Rm (MPa)	Allongement (%)
S235JR	EN 10025	Structure laminée à chaud	≥235	360 – 510	~26
S235MC	EN 10149	Acier micro-allié pour formage	≥235	360 – 430	~24

DX51D+Z	EN 10346	Acier galvanisé pour profilage	140 – 300	270 – 500	~22
S250GD+Z	EN 10346	Acier galvanisé structurel	≥250	330 – 420	~19

Tableau II.03: Comparaison des propriétés mécaniquesAnalyse

- S235JR : acier structurel classique.
- S235MC : meilleure homogénéité et meilleure aptitude au profilage.
- DX51D+Z : excellente formabilité pour profilage.
- S250GD+Z : meilleure rigidité grâce à une limite élastique plus élevée.

c) Comparaison indicative des prix (marché acier)

Les prix varient selon l'épaisseur et la galvanisation, mais l'ordre relatif est généralement :

Nuance	Niveau de prix relatif
S235JR	100%
S235MC	115%
DX51D+Z	110% – 120%
S250GD+Z	120% – 130%

Tableau II.04 : comparaison indicative des prixEn pratique:

- La galvanisation augmente le prix de **10 à 20%**

- Les aciers haute limite élastique (**MC / GD**) coûtent plus cher que les aciers standards.

Le prix dépend du marché et du revêtement.

Pour remplacer une cornière S235 laminée à chaud par un profilé formé à froid, les nuances les plus utilisées sont:

- **S235MC** : acier noir
- **DX51D+Z** : acier galvanisé
- **S250GD+Z** : profilés galvanisés plus résistants

2.2.3 Description du nouveau profil

L'objectif principal de cette étape est de concevoir et de proposer de nouveaux modèles de profilés métalliques capables de remplacer une cornière standard de commerce de dimensions **50x50x5.0mm**. Cette cornière conventionnelle servira de « profil témoin » ou de référence tout au long de notre étude comparative.

La démarche de conception s'inscrit dans une logique de transition d'un produit lourd et massif (obtenu généralement par laminage à chaud) vers un produit allégé, optimisé et fabriqué par le procédé de profilage à froid (*roll forming*) sur une ligne de production existante.

Pour réussir ce compromis entre gain de masse et tenue mécanique, nos propositions de profils reposent sur deux leviers techniques majeurs :

- **La réduction de l'épaisseur nominale** : Passage d'une épaisseur de **5 mm** à une épaisseur réduite (par exemple **2.5 mm**), ce qui permet de cibler immédiatement un gain de matière premier substantiel.
- **L'optimisation topologique et géométrique** : L'introduction de formes géométriques spécifiques (créneaux, ondulations, raidisseurs) judicieusement positionnées sur les ailes du profil. Ces formes ont pour rôle d'augmenter localement le moment d'inertie de la section et de pallier la perte de rigidité induite par la réduction d'épaisseur, tout en limitant les risques de voilement local.

L'intégration de ces nouvelles géométries impose cependant une analyse rigoureuse de la faisabilité sur la ligne de profilage existante, notamment en évaluant le nombre de passes

(stations de formage) nécessaires pour façonner la matière de manière progressive et sans défauts.

Les sections suivantes détaillent l'étude descriptive, géométrique et technologique de chaque variante de profil proposée.

✓ **Présentation du Profil 01 : Cornière allégée à géométrie ondulé**

Le premier modèle proposé (Profil 01) est une évolution structurelle d'une cornière standard de commerce de dimensions **50x 50 x 5 mm**, qui servira de profil de base pour notre étude comparative. L'objectif de cette nouvelle géométrie est d'intégrer des motifs répétitifs en créneaux afin d'optimiser le rapport rigidité/poids, en réduisant l'épaisseur nominale de moitié (**2,5 mm** au lieu de **5 mm**).

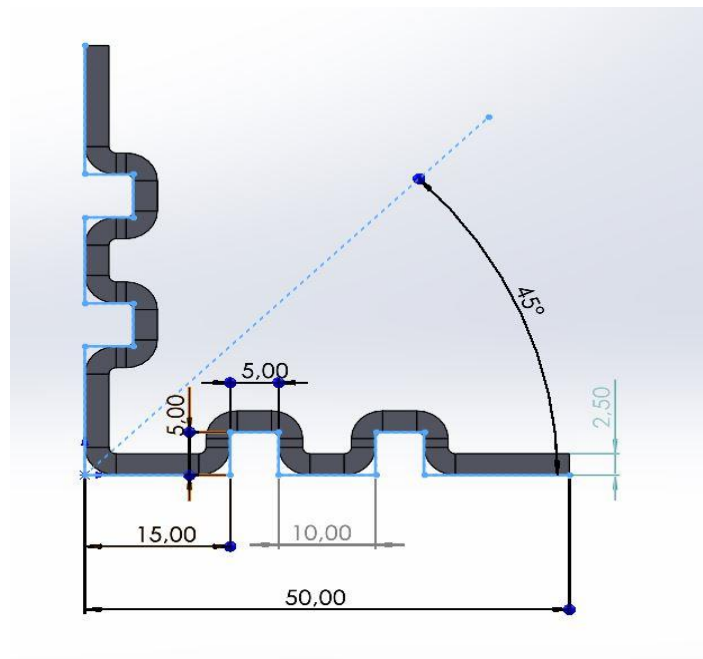


Figure II.02 : Profil 01

- **a) Caractéristiques Géométriques et Dimensionnelles**

Le profil présente une symétrie angulaire par rapport à un axe incliné à **45°**, formant une ouverture totale de **90°**. Chaque aile de la cornière possède une longueur totale de **50,00 mm** mesurée depuis l'arête extérieure d'intersection.

Les ondulations ou créneaux de rigidification sont caractérisés par les dimensions standardisées suivantes :

- **Largeur d'un créneau** : 5,00 mm
- **Profondeur/Hauteur du créneau** : 5,00 mm
- **Positionnement du premier créneau** : Débute à une distance de **15,00 mm** de l'origine (angle extérieur).
- **Pas entre deux créneaux successifs** : Un espacement de **10,00 mm** sépare le début du premier créneau du début du second.

Caractéristiques	Profil de Base	Profil 01
Dimensions hors-tout (mm)	50x50	50x50
Epaisseur nominale (mm)	5	2.5
Laize (Largeur développée)(mm)	100	123
Surface de la section(mm ²)	500	307.5
Taux de réduction de surface(masse)	Réf (0%)	-38.5%
Nombre de passes de formage	7 a 9 passes	14 a 18 passes

Tableau II.05 : Comparaison Profil de base et profil 01

b) Avantages et Inconvénients du Profil 01

Avantages :

- **Allègement structural majeur** : Malgré l'augmentation de la laize à 123 mm pour former les ondulations, la réduction de l'épaisseur à 2,5 mm permet d'obtenir une surface de section nette de **307,5 mm²** contre 500 mm² pour le profil témoin. Cela engendre un **taux de réduction de matière de 38.5 %**, traduisant un gain de masse direct de 39 % par mètre linéaire. Cet allègement répond parfaitement aux impératifs économiques de réduction des coûts de matière première.
- **Rigidité et résistance au voilement** : Bien que l'épaisseur soit divisée par deux, l'introduction des créneaux éloigne la matière de l'axe neutre, augmentant ainsi le moment d'inertie local. Ces formes agissent comme des raidisseurs longitudinaux qui augmentent la résistance au voilement local des ailes sous charge de compression ou de flexion.

- **Équilibrage des efforts de profilage** : La symétrie parfaite à 45° permet de répartir uniformément les pressions de formage sur les galets gauches et droits de la machine de profilage.
- **Soudabilité optimisée en chaudronnerie** : L'épaisseur réduite à **2,5 mm** (au lieu de 5 mm) facilite grandement les opérations de soudage (procédés MIG/MAG ou TIG). Elle nécessite une énergie linéaire de soudage plus faible, ce qui permet une pénétration complète du cordon sans préparation lourde des bords (pas de Chanfreinage complexe nécessaire) et réduit la consommation de métal d'apport.

Inconvénients :

- **Complexité de la séquence de formage** : Contrairement au profilé de base lisse qui demande un formage rudimentaire, le Profil 01 exige une déformation progressive et sévère de la tôle. Il nécessite la conception d'une fleur de profilage complexe s'étalant sur **14 à 18 passes (stations)** pour configurer les créneaux sans étirer excessivement ni déchirer la matière.
- **Coût d'outillage et réglages** : La fabrication des galets spécifiques pour les créneaux sur une ligne existante représente un investissement initial plus lourd.
- **Gestion du retour élastique** : La multiplication des rayons de pliage rapprochés sur une épaisseur de 2,5 mm génère des contraintes résiduelles importantes, demandant une correction géométrique rigoureuse des galets finisseurs pour garantir l'angle final de 90°.
- **Sensibilité aux déformations thermiques lors du soudage** : En chaudronnerie, la réduction de l'épaisseur à 2,5 mm rend le profil beaucoup plus sensible aux déformations d'origine thermique (gauchissement, flèche ou resserrement de l'angle) sous l'action de la chaleur de l'arc électrique. De plus, la présence des créneaux complique la conception des outillages de bridage standard et l'accessibilité des torches de soudage lors des assemblages transversaux, exigeant un positionnement rigoureux pour éviter le perçage de la tôle fine.

✓ **Présentation du Profil 02 : Cornière à nervure large unique**

Le second modèle proposé (**Profil 02**) explore une stratégie d'optimisation différente du premier. Au lieu de multiplier les petits créneaux, cette variante utilise une **nervure large unique** sur chaque aile. Cette conception vise à simplifier le processus de profilage tout en atteignant un taux d'allègement maximal.

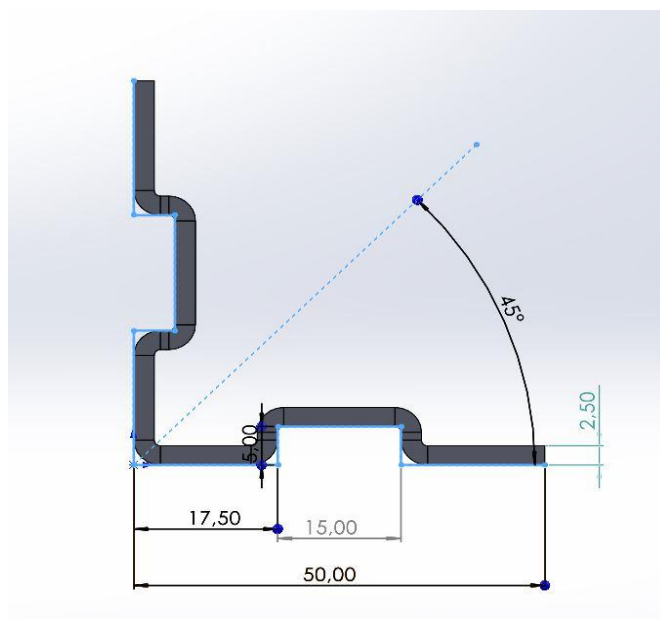


Figure II.03 : Profil 02

a) . Caractéristiques Géométriques et Dimensionnelles

Le Profil 02 respecte l'encombrement extérieur de la cornière de référence (50x50x5mm) avec une ouverture de **90°**. L'épaisseur de la tôle est maintenue à **2,5 mm**.

La géométrie de la nervure large est définie par :

- **Largeur de la nervure** : 15,00 mm.
- **Profondeur / Hauteur** : 5,00 mm.
- **Positionnement** : Débute à **17,50 mm** de l'arête extérieure.
- **Laize développée** : Le calcul de la fibre moyenne donne une largeur totale de **109.8 mm**.

Caractéristiques	Profil de Base	Profil 02
Dimensions hors-tout (mm)	50x50	50x50
Epaisseur nominale (mm)	5	2.5
Laize (Largeur développée)(mm)	100	109.8
Surface de la section(mm ²)	500	274.58

Taux de réduction de surface(masse)	Réf (0%)	-45.1%
Nombre de passe de formage	7 a 9 passes	12 a 14 passes

Tableau II.06 : Comparaison Profil de base et profil 02**b) . Avantages et Inconvénients du Profil 02****Avantages :**

- **Performance d'allègement supérieure :** Avec un **taux de réduction de matière de 45,1 %**, ce profil représente la solution la plus économique en termes de consommation de métal. La surface de section est abaissée à **274,58 mm²**, offrant un gain de masse significatif.
- **Fabrication simplifiée :** La configuration à nervure unique simplifie la conception des galets sur la ligne de profilage existante. Le nombre de stations nécessaire est réduit (12 à 14 passes), ce qui limite les coûts d'outillage.
- **Soudage et Assemblage (Chaudronnerie) :** L'épaisseur de 2,5 mm permet un soudage rapide et efficace. La largeur de la nervure (15 mm) offre une zone de bridage suffisante pour assurer la planéité des ailes lors de l'assemblage de structures complexes, facilitant le travail en atelier de chaudronnerie.

Inconvénients :

- **Fragilité thermique :** Sa faible section le rend particulièrement vulnérable aux distorsions thermiques lors des opérations de soudage continu. Il est impératif d'utiliser un séquençage de soudure pour limiter le gauchissement.
- **Instabilité locale potentielle :** La nervure étant unique, les zones planes situées de part et d'autre de celle-ci (17,5 mm et 15 mm) doivent faire l'objet d'une vérification rigoureuse au flambement/voilement local sous fortes charges.
- **Accessibilité :** En chaudronnerie, la hauteur de 5 mm de la nervure peut limiter l'angle d'inclinaison de la torche lors de soudages d'angles intérieurs très étroits.

✓ *Présentation du Profil 03 : Cornière à lèvres de rigidification*

Le troisième modèle proposé (**Profil 03**) introduit une variante géométrique de type « profilé à lèvres ». Contrairement aux deux modèles précédents qui travaillaient sur la surface des

ailes, cette conception se concentre sur le raidissement des bords libres pour améliorer la stabilité globale de la structure.

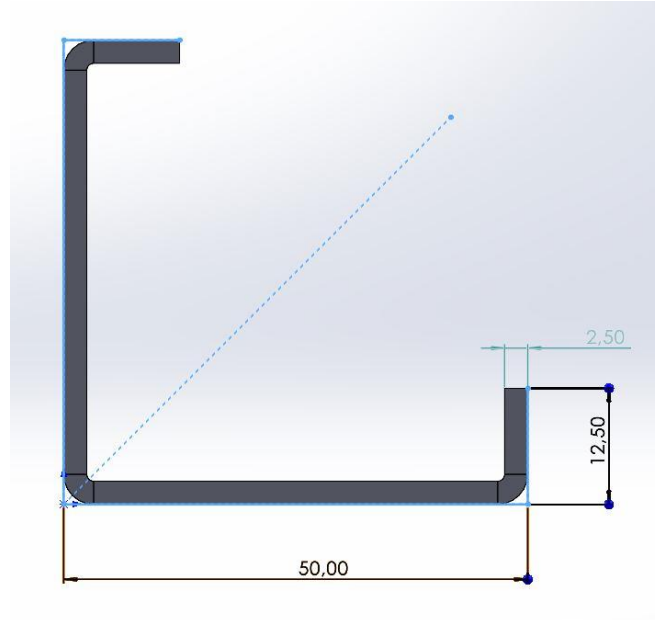


Figure II.04 : Profil 03

- a) Caractéristiques Géométriques et Dimensionnelles

Le Profil 03 conserve un gabarit de base de 50x50 mm avec une épaisseur réduite à **2,5 mm**. L'innovation majeure réside dans l'ajout de deux retours perpendiculaires (lèvres) aux extrémités de chaque aile.

Les dimensions spécifiques sont les suivantes :

- Hauteur des lèvres : 12,50 mm.
- Longueur des ailes : 50,00 mm.
- Laize (Largeur développée) : 115 mm.

Le calcul de la section transversale donne une surface de **287,5 mm²** (115 x 2,5).

Tableau II.07 : Comparaison Profil de base et profil 03

Caractéristiques	Profil de Base	Profil 03
Dimensions hors-tout (mm)	50x50	50x50
Epaisseur nominale (mm)	5	2.5
Laize (Largeur développée)(mm)	100	115
Surface de la section(mm ²)	500	287.5
Taux de réduction de surface(masse)	Réf (0%)	-37.5%
Nombre de passe de formage	7 a 9 passes	6 a 8 passes

b) Avantages et Inconvénients du Profil 03

Avantages :

- **Allègement structural significatif** : Avec un taux de réduction de **37,5 %**, ce profil offre un gain de poids supérieur au Profil 01 tout en étant mécaniquement très robuste.
- **Excellente résistance au voilement local** : En ingénierie des structures minces, les bords libres des ailes sont les zones les plus vulnérables. L'ajout des lèvres de 12,5 mm bloque les modes de déformation des bords, ce qui permet à la tôle de 2,5 mm de supporter des charges de compression bien plus élevées.
- **Augmentation de l'inertie de flexion** : La géométrie éloigne la matière de l'axe neutre, augmentant ainsi le moment quadratique de la section sans augmenter la masse globale de manière excessive.

Inconvénients :

- **Complexité de formage accrue** : Le profilage des lèvres à 90° à l'extrémité des ailes exige une maîtrise parfaite des galets de guidage pour éviter le vrillage longitudinal du profil.
- **Accessibilité en chaudronnerie** : En atelier de soudage, la présence des lèvres peut restreindre l'accessibilité de la torche pour certains assemblages intérieurs.
- **Gestion du retour élastique** : Comme pour le Profil 01, la présence de 8 plis à 90° (4 pour l'angle principal et 4 pour les lèvres) nécessite une compensation rigoureuse du *springback* lors de la fabrication des galets finisseurs.

✓ **Présentation du Profil 04 : Cornière à bords repliés (Ourlets)**

Le quatrième modèle proposé (**Profil 04**) explore une solution axée sur la sécurité de manipulation et la rigidité extrême des bords libres. Contrairement aux raidisseurs centraux (Profil 01 et 02), cette géométrie utilise un pliage en « ourlet fermé » (pliage à 180°) aux extrémités des deux ailes.

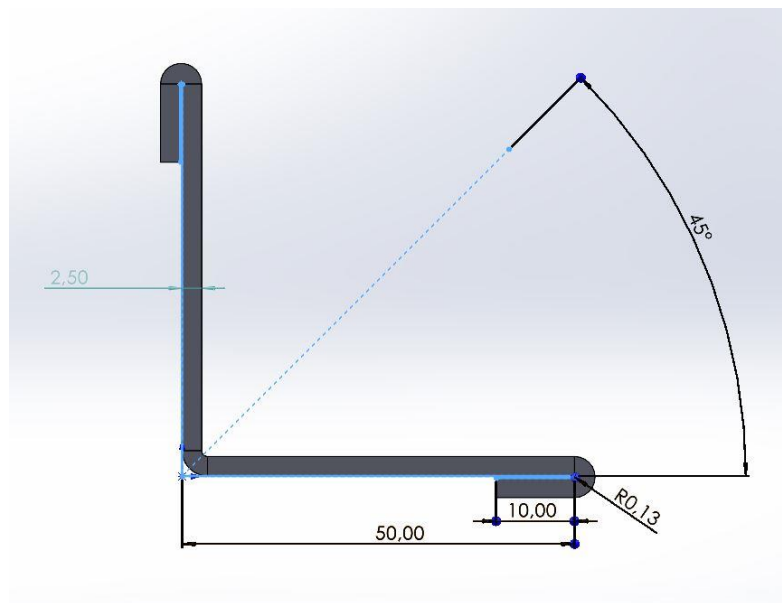


Figure II.05 : Profil 04

a) Caractéristiques Géométriques et Dimensionnelles

Le Profil 04 maintient l'encombrement extérieur de 50 x 50 mm avec une épaisseur de tôle de 2,5 mm. La particularité réside dans le repliement de la matière sur elle-même en bout d'aile.

- **Type de pliage** : Ourlet fermé à 180°.
- **Longueur de l'ourlet (repli)** : 10,00 mm.
- **Laize (Largeur développée)** : 125,3 mm.

Le calcul de la section transversale donne une surface de **313,25 mm²** (125,3 x 2,5).

Caractéristiques	Profil de Base	Profil 04
Dimensions hors-tout (mm)	50x50	50x50
Epaisseur nominale (mm)	5	2.5

Laize (Largeur développée)(mm)	100	125.3
Surface de la section(mm ²)	500	313.25
Taux de réduction de surface(masse)	Réf (0%)	-40%
Nombre de passe de formage	7 a 9 passes	8 a 10 passes

Tableau II.08 : Comparaison Profil de base et profil 04

b) . Avantages et Inconvénients du Profil 04**Avantages :**

- **Sécurité et ergonomie (HSE) :** L'ourlet élimine totalement les bords tranchants de la tôle après coupe. C'est un avantage majeur en chaudronnerie pour la manipulation des pièces sans risque de coupure et sans nécessité d'opération d'ébavurage coûteuse.
- **Rigidité de bord exceptionnelle :** En doublant l'épaisseur (5 mm) à l'extrémité des ailes, on bloque mécaniquement le mode de voilement local de bord, souvent critique sur les profilés minces.
- **Facilité d'assemblage (Soudage) :** L'épaisseur de 5 mm en bout d'aile offre un "talon" robuste pour le soudage d'angle ou le soudage bout-à-bout avec d'autres composants massifs, limitant les risques de perçage de la tôle de 2,5 mm.

Inconvénients :

- **Complexité de fabrication maximale :** Le pliage à 180° est l'opération la plus exigeante pour une ligne de profilage. Elle nécessite une séquence progressive (pré-piage, écrasement, calibrage) imposant un nombre de passes élevé (**8 à 10 stations**).
- **Allègement modéré :** Avec une laize de 125,3 mm, le taux de réduction de matière (**40 %**) est le plus faible des quatre profils proposés. C'est le prix à payer pour la double épaisseur de bord.
- **Rayons de pliage critiques :** Le pliage serré à 180° génère des contraintes de traction extrêmes sur la fibre extérieure, pouvant entraîner des microfissures si la ductilité de l'acier n'est pas optimale.

✓ *Présentation du Profil 05 : Cornière à retrait d'angle (Recessed Corner)*

Le cinquième modèle proposé (**Profil 05**) représente l'aboutissement de notre démarche d'allègement. Contrairement aux modèles précédents qui ajoutaient des formes sur les ailes, cette conception propose une modification géométrique du sommet de l'angle. Cette stratégie permet de descendre en dessous de la largeur de tôle du profil de base tout en conservant une rigidité structurelle au point névralgique de la cornière.

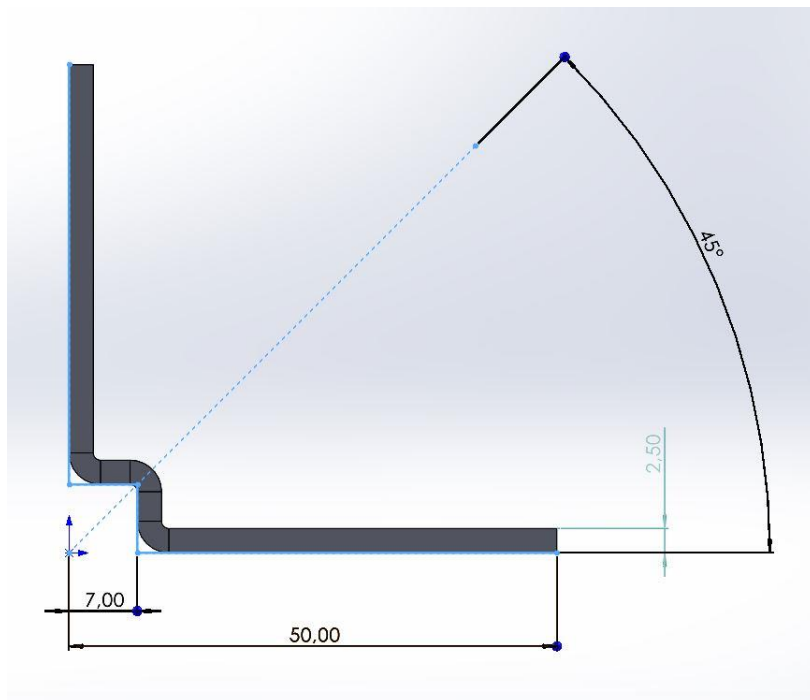


Figure II.06 : Profil 05

a) . Caractéristiques Géométriques et Dimensionnelles

Le Profil 05 conserve l'encombrement fonctionnel de 50 x 50 mm avec une épaisseur nominale de 2,5 mm. La particularité réside dans un épaulement (marche) de 7,00 mm créé au niveau du sommet de l'angle.

- **Type de modification :** Épaulement symétrique à 45°.
- **Dimensions du retrait :** 7,00 mm x 7,00 mm.
- **Laize (Largeur développée) :** 95 mm.

Grâce à ce design, la laize est inférieure à celle du profil de base (100 mm), ce qui est une première dans cette étude. La surface de la section transversale est réduite à **237,5 mm²** (95 x 2,5).

Caractéristiques	Profil de Base	Profil 05
Dimensions hors-tout (mm)	50x50	50x50
Epaisseur nominale (mm)	5	2.5
Laize (Largeur développée)(mm)	100	95
Surface de la section(mm ²)	500	237.5
Taux de réduction de surface(masse)	Réf (0%)	-52.5%
Nombre de passe de formage	7 a 9 passes	8 a 10 passes

Tableau II.09 : Comparaison Profil de base et profil 05

b) . Avantages et Inconvénients du Profil 05

Avantages :

- **Performance massique record** : Avec un taux d'allègement de **52,5 %**, ce profil est le plus performant de l'étude. Il permet de diviser la consommation de matière première par plus de deux par rapport au profil témoin.
- **Raidissement du sommet** : L'épaule crée une concentration de matière et de plis au niveau de l'angle, ce qui augmente considérablement l'inertie à cet endroit et limite les phénomènes d'ouverture d'angle sous charge.
- **Facilité d'assemblage (Soudage)** : En chaudronnerie, le retrait d'angle forme une "gorge" naturelle qui facilite le positionnement du métal d'apport lors d'un soudage d'angle extérieur, assurant une meilleure pénétration.
- **Fabrication optimisée** : Le formage se concentrant sur la partie centrale, le nombre de passes sur la ligne de profilage est réduit (**8 à 10 stations**), limitant l'encombrement sur la machine existante.

Inconvénients :

- **Concentration de contraintes** : La géométrie par épaulement crée des angles vifs intérieurs. En fabrication mécanique, il sera crucial de prévoir des rayons de congés sur les galets pour éviter l'amorce de fissures lors du pliage.
- **Sensibilité au retrait thermique** : La faible section transversale ($237,5 \text{ mm}^2$) rend le profil très sensible aux déformations thermiques lors des opérations de soudure, nécessitant un bridage très rigoureux.
- **Appui structurel** : Le retrait d'angle modifie la zone de contact au sommet, ce qui peut nécessiter une adaptation si le profil doit s'emboîter parfaitement sur une arête vive de 90° .

✓ **Présentation du Profil 06 : Cornière hybride à retrait d'angle et lèvres à retour**

Le sixième modèle proposé (**Profil 06**) constitue la variante la plus complexe de notre étude. Il s'agit d'un design hybride qui combine les avantages du retrait d'angle (étudié sur le Profil 05) et des lèvres de rigidification à retour intérieur. Cette configuration vise à offrir une rigidité mécanique maximale, tant au niveau de l'angle qu'au niveau des bords libres.

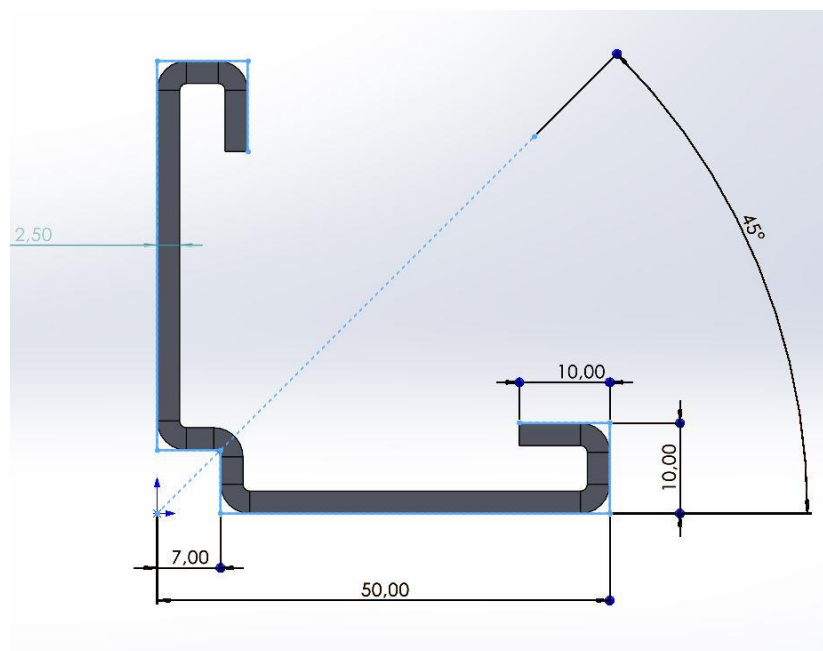


Figure II.07 : Profil 06

a) Caractéristiques Géométriques et Dimensionnelles

Le Profil 06 respecte l'encombrement extérieur de 50x50 mm avec une épaisseur de tôle maintenue à **2,5 mm**. Sa géométrie complexe intègre un épaulement au sommet de l'angle et des lèvres repliées en forme de "C" aux extrémités.

- **Retrait d'angle** : 7,00 mm x 7,00 mm.
- **Lèvres de rigidification** : Hauteur de 10,00 mm avec un retour horizontal de 10,00 mm vers l'intérieur.
- **Laize (Largeur développée)** : 121,53 mm.

Le calcul de la section transversale donne une surface de **303,83 mm²** (121,53 x 2,5).

Caractéristiques	Profil de Base	Profil 06
Dimensions hors-tout (mm)	50x50	50x50
Epaisseur nominale (mm)	5	2.5
Laize (Largeur développée)(mm)	100	121.53
Surface de la section(mm ²)	500	303.83
Taux de réduction de surface(masse)	Réf (0%)	-39.2%
Nombre de passe de formage	7 a 9 passes	12 a 14 passes

Tableau II.10 : Comparaison Profil de base et profil 06

b) Avantages et Inconvénients du Profil 06

Avantages :

- **Rigidité structurelle exceptionnelle** : Le Profil 06 est mécaniquement le plus stable de l'étude. Le retrait d'angle renforce le sommet tandis que les lèvres à retour créent une section quasi-fermée, augmentant drastiquement le moment d'inertie et la résistance à la torsion.
- **Protection totale contre le voilement** : La géométrie des bords en "C" bloque les modes de voilement local des ailes, permettant une exploitation optimale des propriétés de l'acier S355 malgré la faible épaisseur.
- **Intégration en chaudronnerie** : Le retrait d'angle facilite le soudage extérieur, tandis que les lèvres offrent des appuis rigides pour le bridage, garantissant la précision géométrique des assemblages.

Inconvénients :

- **Complexité de fabrication maximale** : Avec de nombreux plis rapprochés, ce profil nécessite une ligne de profilage longue (estimée à **12-14 stations**) et une conception de galets extrêmement précise pour éviter les défauts de cambrure.
- **Allègement modéré** : En raison de la laize importante (121,53 mm), le gain de masse est de **39,2 %**, ce qui est inférieur au Profil 05 (-52,5 %) mais supérieur au Profil 04 (-40 %).
- **Accessibilité du soudage** : Le retour de lèvre de 10 mm peut limiter l'angle d'approche de la torche lors de certains types de soudures intérieures, nécessitant une planification rigoureuse de la séquence d'assemblage.

✓ *Présentation du Profil 07 : Cornière à congé circulaire renforcé*

Le septième modèle proposé (**Profil 07**) explore une approche d'optimisation par renfort tubulaire d'angle. Cette conception se distingue par le remplacement de l'arête vive du sommet par une géométrie circulaire saillante. Cette modification vise à transformer le comportement mécanique de la cornière en lui conférant des propriétés proches de celles d'un profilé tubulaire au niveau de son point de jonction.

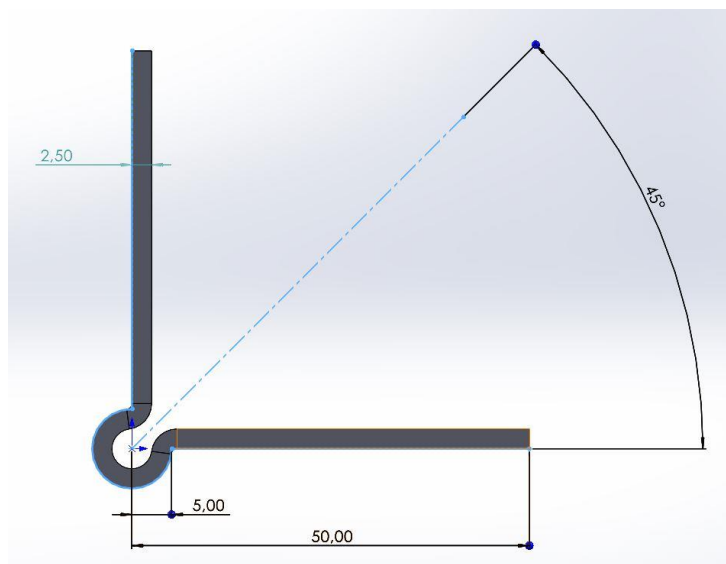


Figure II.08 : Profil 07

a) Caractéristiques Géométriques et Dimensionnelles

Le Profil 07 respecte l'encombrement fonctionnel de 50x50 mm avec une épaisseur de tôle réduite à **2,5 mm**. La particularité réside dans l'intégration d'un congé circulaire au sommet de l'angle.

- Rayon du congé circulaire : 5,00 mm.
- Ouverture des ailes : 90°.
- Laize (Largeur développée) : 111 mm.

Le calcul de la section transversale donne une surface de **277,5 mm²** (111x2,5mm).

Caractéristiques	Profil de Base	Profil 07
Dimensions hors-tout (mm)	50x50	50x50
Epaisseur nominale (mm)	5	2.5
Laize (Largeur développée)(mm)	100	111
Surface de la section(mm ²)	500	277.5
Taux de réduction de surface(masse)	Réf (0%)	-44.5%
Nombre de passe de formage	7 a 9 passes	8 a 10 passes

Tableau II.11 : Comparaison Profil de base et profil 07

b) Avantages et Inconvénients du Profil 07Avantages :

- **Rigidité torsionnelle accrue** : La géométrie circulaire à l'angle crée un conduit semi-fermé qui augmente significativement le moment polaire d'inertie. Cela améliore la résistance du profilé aux efforts de torsion, une faiblesse récurrente des cornières standards.
- **Optimisation du flux de contraintes** : L'absence d'angle vif réduit les concentrations de contraintes au vertex, zone souvent sujette à la fatigue ou à l'amorce de fissures sous charges cycliques.
- **Performance d'allègement** : Avec un taux de réduction de **44,5 %**, ce modèle se classe parmi les solutions les plus efficaces de notre étude en termes de gain de masse.

- **Esthétique et Sécurité (HSE) :** L'angle arrondi offre une finition plus douce et sécurisée pour les structures apparentes, limitant les risques de blessures par contact avec des arêtes vives.

Inconvénients :

- **Complexité de montage :** La courbure extérieure de 5 mm empêche un ajustement parfait de la cornière sur un support présentant une arête vive de 90°. Elle nécessite soit un jeu de montage, soit un usinage de la pièce d'appui.
- **Précision du profilage :** Le formage du centre circulaire demande un calibrage rigoureux des galets de la ligne existante pour garantir que le rayon reste constant sans s'écraser durant le pliage des ailes latérales.
- **Bridage en chaudronnerie :** Lors du soudage, le positionnement des sauterelles de bridage est rendu plus complexe par la forme arrondie du sommet, exigeant l'utilisation d'outillages adaptés.

✓ ***Présentation du Profil 08 : Cornière à doubles nervures prismatiques symétriques (Solution Optimale)***

Le huitième modèle proposé (**Profil 08**) introduit une stratégie de rigidification distribuée sur les parois libres de la cornière. Alors que les profils précédents se concentraient sur des modifications localisées uniques (sommet ou extrémités), le Profil 08 répartit intelligemment des géométries de raidissage sur toute la largeur des ailes. Cette configuration a été spécifiquement conçue pour stabiliser la tôle mince face aux sollicitations de compression.

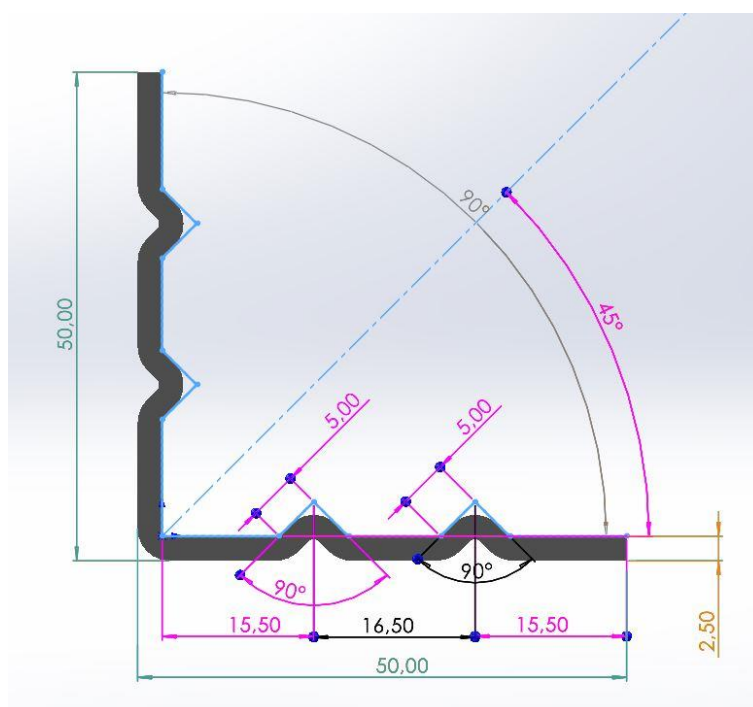


Figure II.09 : Profil 08

a) Caractéristiques Géométriques et Dimensionnelles

Le Profil 08 conserve l'encombrement extérieur de 50x50 mm et une épaisseur réduite à **2,5 mm**. Chaque aile intègre deux nervures triangulaires à 90° d'une hauteur de **5,00 mm**. Le positionnement a été optimisé afin de diviser l'aile de manière régulière : une première section plane de 15,50 mm, un espacement de 16,50 mm entre les deux nervures, et une section finale de 15,50 mm jusqu'à l'extrémité.

- **Type de raidisseur** : Doubles nervures triangulaires à 90°.
- **Dimensions des nervures** : Hauteur de 5,00 mm.
- **Laize (Largeur développée)** : 107,55 mm.

La surface de sa section transversale est de **268,88 mm²** (107,55 x 2,5), ce qui représente un excellent compromis géométrique.

Caractéristiques	Profil de Base	Profil 08
Dimensions hors-tout (mm)	50x50	50x50
Epaisseur nominale (mm)	5	2.5
Laize (Largeur développée)(mm)	100	107.55
Surface de la section(mm ²)	500	268.88
Taux de réduction de surface(masse)	Réf (0%)	-46.2%

Nombre de passe de formage	7 a 9 passes	11 a 13 passes
----------------------------	--------------	----------------

Tableau II.12 : Comparaison Profil de base et profil 08

b) Avantages et Inconvénients du Profil 08Avantages :

- **Élimination absolue du voilement local (Point Fort Majeur) :** C'est le point fort technique qui justifie l'intégration immédiate du Profil 08 parmi les 4 meilleurs profils de cette étude. En intégrant deux nervures sur une même aile, la largeur libre de la tôle n'est plus de 50 mm, mais se retrouve fractionnée en trois sous-panneaux ultra-courts de 15,5 mm. Selon la théorie des plaques minces de Timoshenko, la charge critique de voilement élastique varie de manière inversement proportionnelle au carré de la largeur ($1/b^2$). En divisant cette largeur par plus de trois, **le Profil 08 multiplie par un facteur supérieur à 4 sa résistance au voilement local**, permettant à la cornière mince d'atteindre sa limite élastique ($R_e = 355\text{MPa}$) en compression pure sans aucune instabilité prématurée de ses parois.
- **Excellent ratio Allègement/Rigidité :** Avec **46,2 % de gain de masse**, il se positionne idéalement dans le Top des profils légers tout en offrant un moment d'inertie largement supérieur aux Profils 02, 03, 04 et 05.
- **Symétrie et Équilibre des efforts :** Le profilage de formes triangulaires à 90° est naturellement équilibré, ce qui limite le phénomène de torsion parasite lors de la sortie de la ligne de profilage.

Inconvénients :

- **Faisabilité de l'outillage :** Le formage de deux nervures successives et rapprochées nécessite une conception de galets en acier étagé très rigoureuse pour assurer un étirage progressif de la matière sans provoquer d'amincissement localisé au sommet des triangles.
- **Complexité de la ligne :** Ce profil nécessite une séquence de **11 à 13 passes de profilage**, ce qui s'ajuste toutefois parfaitement aux capacités de la ligne de profilage industrielle existante.

2.3 Étude comparative de plusieurs formes candidates

2.3.1 Objectif et démarche méthodologique de sélection

L'objectif fondamental de ce sous-chapitre est d'opérer un filtrage technico-économique parmi les huit (08) formes candidates développées précédemment (Profil 01 à Profil 08). Cette étape intermédiaire est cruciale pour rationaliser la suite de notre étude. Elle vise à identifier les quatre (04) meilleurs profils qui feront l'objet d'une analyse numérique rigoureuse au **Simulation RDM et optimisation**.

Pour mener à bien cette sélection sans recourir prématurément au calcul intensif par éléments finis, nous avons établi une grille d'évaluation multicritère basée sur trois piliers industriels :

- a) **L'indice d'allègement massique (η_m)** : Directement lié à la laize développée (L). Plus la laize est proche ou inférieure aux 100 mm du profil de base, plus le gain de matière est optimal.
- b) **La résistance intrinsèque aux instabilités élastiques** : Évaluation qualitative et analytique de la sensibilité de la géométrie au voilement local des ailes et au vrillage.
- c) **La faisabilité industrielle sur la ligne existante** : Estimation du nombre de passes nécessaires et de la complexité géométrique des gales de formage, l'objectif étant de ne pas saturer l'outil de production.

2.3.2 Matrice d'évaluation globale des 08 profils

Le tableau ci-dessous rassemble l'ensemble des caractéristiques géométriques calculées pour chaque variante.

Désignation	Laize L (mm)	Surface S (mm ²)	Réduction de Masse	Complexité de Formage	Résistance au Voilement
Profil de Base	100	500	Réf. (0%)	Standard	e = 5 mm
Profil 01 (Multi-créneaux)	123	307.5	- 38,5 %	14 a 18 passes	Raidisseurs courts

Profil 02 (<i>Nervure simple</i>)	109.83	274.575	- 45,1 %	12 a 14 passes	Plages intermédiaires
Profil 03 (<i>Retour simple</i>)	115	287.5	- 37,5 %	6 a 8 passes	Bords libres stabilisés
Profil 04 (<i>Double pli écrasé</i>)	125.3	313.25	- 40,0 %	8 a 10 passes	Forte inertie de bord
Profil 05 (<i>Retrait d'angle</i>)	95	237.5	- 52,5 %	8 a 10 passes	Faible sur les grandes ailes
Profil 06 (<i>Hybride</i>)	121.53	303.825	- 39,2 %	12 a 14 passes	Excellente inertie
Profil 07 (<i>Congé circulaire</i>)	111	277.5	- 44,5 %	8 a 10 passes	Bonne torsion d'angle
Profil 08 (<i>Double nervure</i>)	107,55	268,88	- 46,2 %	11 a 13 passes	Voilement éliminé

Tableau II.13 : comparaison des caractéristiques des profils

2.3.3 Analyse critique et élimination des variantes secondaires

Pour restreindre notre échantillon aux quatre variantes les plus prometteuses, une élimination motivée par des arguments d'ingénierie mécanique a été réalisée :

➤ Élimination du Profil 01 et du Profil 03 :

Bien qu'offrant un gain de masse théorique proche de 38 %, ces profils présentent des laizes développées trop importantes (123 mm et 125mm). Industriellement, l'augmentation excessive de la laize induit un coût matière première au mètre linéaire qui pénalise l'intérêt de la réduction d'épaisseur à 2,5 mm.

➤ Élimination du Profil 04 :

Le concept de double pli écrasé (ourlet plat) présente une excellente rigidité sur les bords. Cependant, l'écrasement à 180° de la tôle de 2,5 mm engendre des contraintes résiduelles de traction extrêmes au pli, augmentant le risque de fissuration locale et de corrosion sous contrainte en milieu industriel.

➤ Élimination du Profil 07 :

Malgré l'intérêt théorique du sommet tubulaire (rayon de 5 mm), ce profil montre des performances mécaniques globales et un taux d'allègement (-44,5 %) très proches de ceux du Profil 02 (-45,1 %), tout en introduisant une complexité géométrique supérieure pour l'usinage des galets d'angle.

2.3.4 Sélection finale du "Top 4" pour la simulation numérique

À l'issue de cette analyse comparative, quatre concepts géométriques fondamentalement distincts et hautement performants ont été retenus pour constituer le corps d'étude du titre suivant :

- Le Profil 05 (Option "Légèreté Maximale") :

Avec une laize réduite à **95,00 mm**, il affiche le taux d'allègement le plus élevé de l'étude (-52,5 %). Il servira de borne supérieure pour l'économie de matière.

- Le Profil 02 (Option "Simplicité & Compromis") :

Représentant l'introduction d'une nervure trapézoïdale unique, il offre un gain de **-45,1 %** (laize de 109,83 mm) avec une cinématique de formage maîtrisée en 12 à 14 passes.

- Le Profil 06 (Option "Haute Rigidité Torsionnelle") :

Solution hybride combinant un retrait d'angle et des lèvres à retour en "C". Malgré une laize de **121,53 mm**, il est conservé car il offre la meilleure inertie géométrique globale face aux phénomènes de déversement et de torsion.

- Le Profil 08 (Option "Optimale / Anti-Voilement") :

Intégrant une double nervure triangulaire distribuée pour une laize performante de **107,55 mm** (gain de **-46,2 %**). Il est sélectionné en raison de son point fort mécanique exclusif : le fractionnement des ailes en sous-panneaux de 15,50 mm, ce qui repousse mathématiquement la charge critique de voilement local à un niveau quatre fois supérieur aux autres profils minces planes.

2.4. Simulation RDM et optimisation :

2.4.1 Préparation de la simulation numérique

La simulation numérique par éléments finis (FEA) est considérée comme l'une des méthodes modernes les plus importantes pour analyser le comportement mécanique des profilés métalliques.

Cette étude vise à évaluer la résistance des profilés proposés à diverses contraintes et déformations dans des conditions réelles d'utilisation, tout en identifiant la conception optimale permettant une réduction de poids et le maintien des propriétés mécaniques requises.

Cette simulation a été réalisée à l'aide du logiciel SolidWorks Simulation et l'étude comprenait l'analyse des éléments suivants :

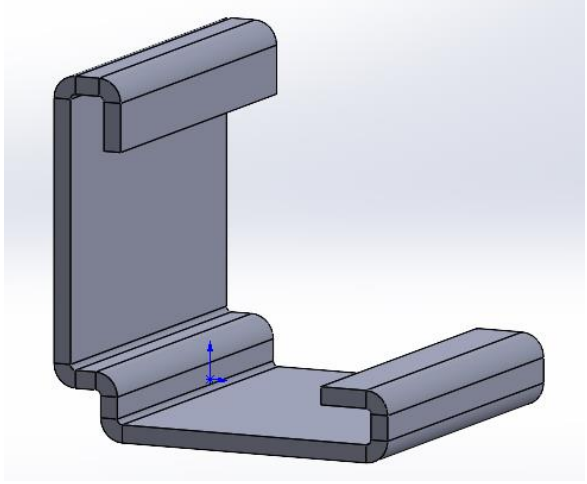
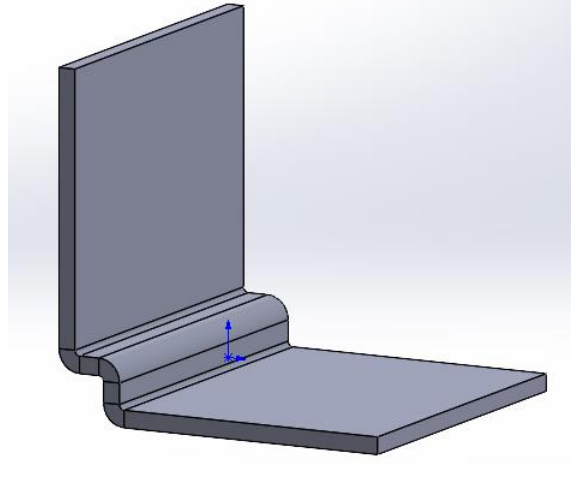
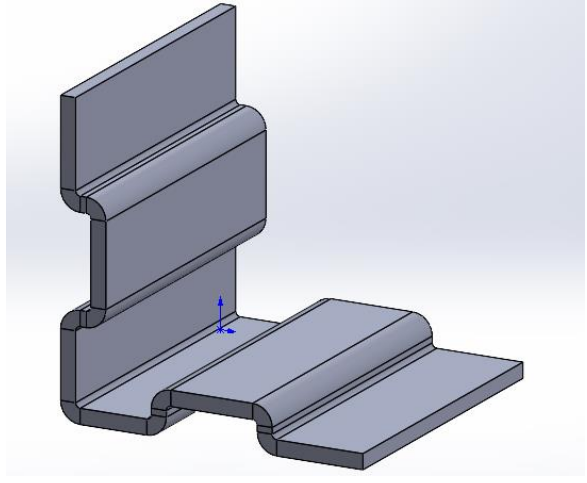
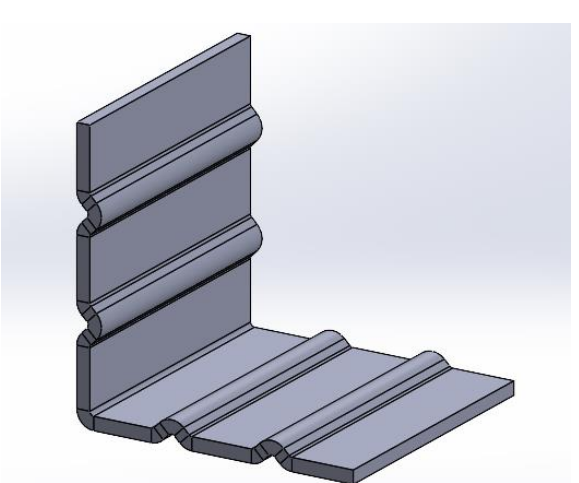
- Contraintes mécaniques
- Déformations
- Résistance à la flexion
- Résistance à la torsion
- Résistance au flambement

Quatre profils finaux ont été sélectionnés après l'étude comparative initiale afin de les soumettre à une analyse mécanique avancée.

2.4.2 Création du modèle numérique

Des modèles tridimensionnels des profils sélectionnés ont été créés à l'aide du logiciel SolidWorks, d'après les dimensions géométriques définies lors des étapes précédentes de l'étude. La conception visait à conserver les mêmes propriétés mécaniques que le profil d'origine, tout en réduisant la masse et en améliorant la répartition des matériaux au sein de la section.

Une fois la conception du profil achevée, les propriétés mécaniques du matériau utilisé (S235MC) ont été définies dans le programme de simulation afin de garantir la précision des résultats numériques.

	
Profil 06	Profil 05
	
Profil 02	Profil 08

Module d'élasticité	210	GPa
Coefficient de Poisson	0.394	
Module de cisaillement	808	MPa
Masse volumique	7850	Kg /m ³
Limite de traction	380	MPa
Limite d'élasticité	235	MPa
Coefficient de dilatation thermique	1.21 ^e -05	K

Conductivité thermique	51.9	W/(m.k)
Chaleur spécifique	460	J/(Kg.K)

Tableau II.14 : les propriétés mécaniques du matériau

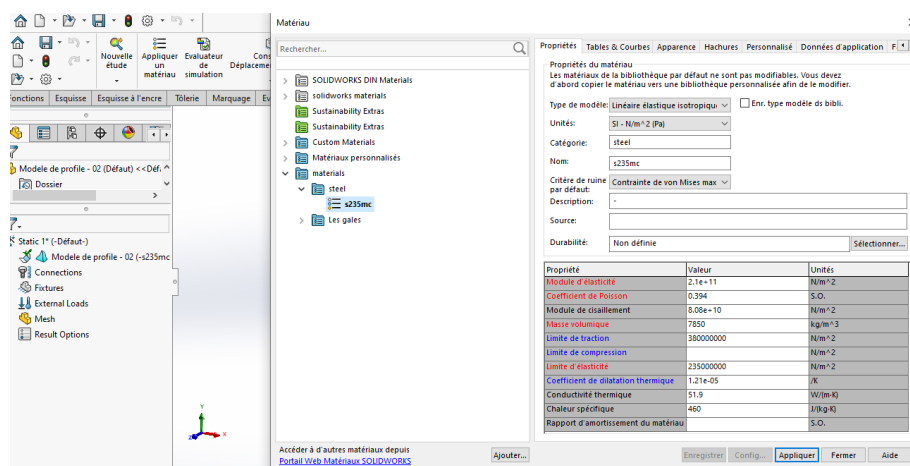
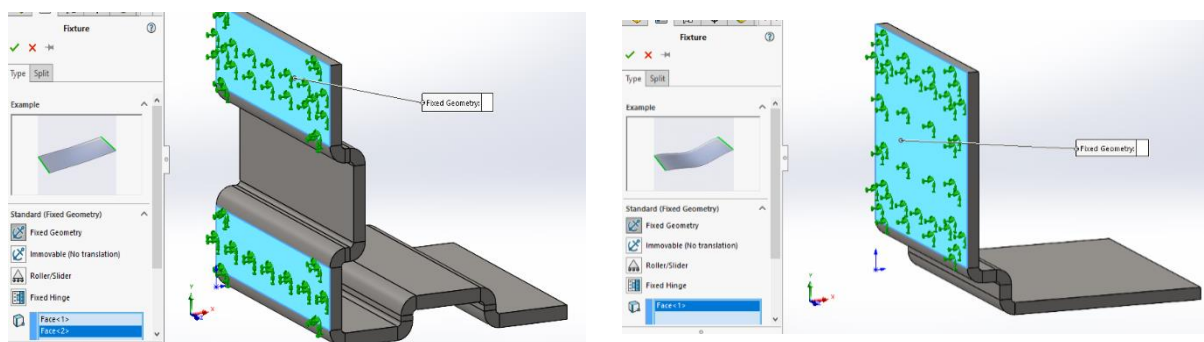


Figure II.10 : Attribution du matériau dans SolidWorks

Pour simuler les conditions réelles d'utilisation, une extrémité du profilé était entièrement fixée (Fixed Geometry) , tandis qu'une charge était appliquée à sa partie active .

Ce dispositif permet de simuler le comportement du profilé en conditions industrielles et d'analyser l'effet des charges sur sa structure mécanique.



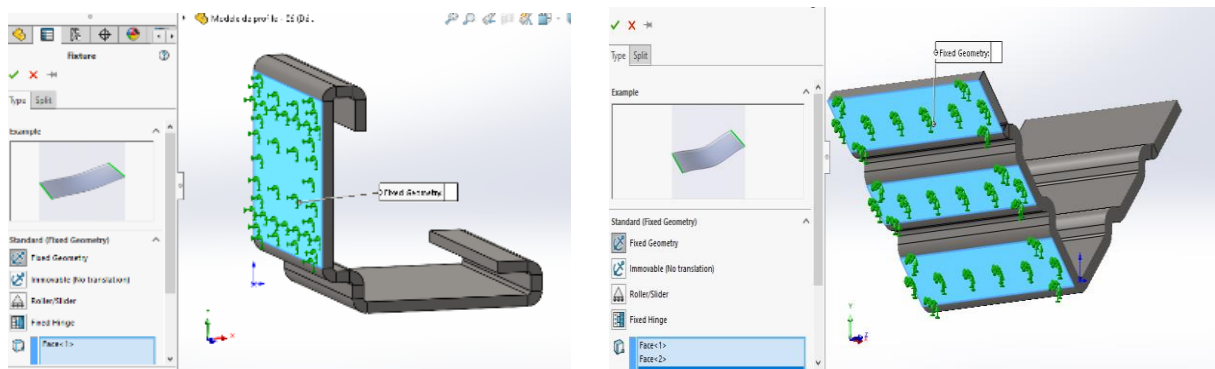


Figure II.11 : Conditions de fixation du profil (02 ;05 ;06 ;08)

Une charge mécanique perpendiculaire a été appliquée au profilé afin d'étudier sa résistance à la flexion et d'analyser la distribution des contraintes et la déformation qui en résultent.

La même valeur de charge a été utilisée pour tous les profilés afin de garantir une comparaison équitable entre les différents modèles proposés.

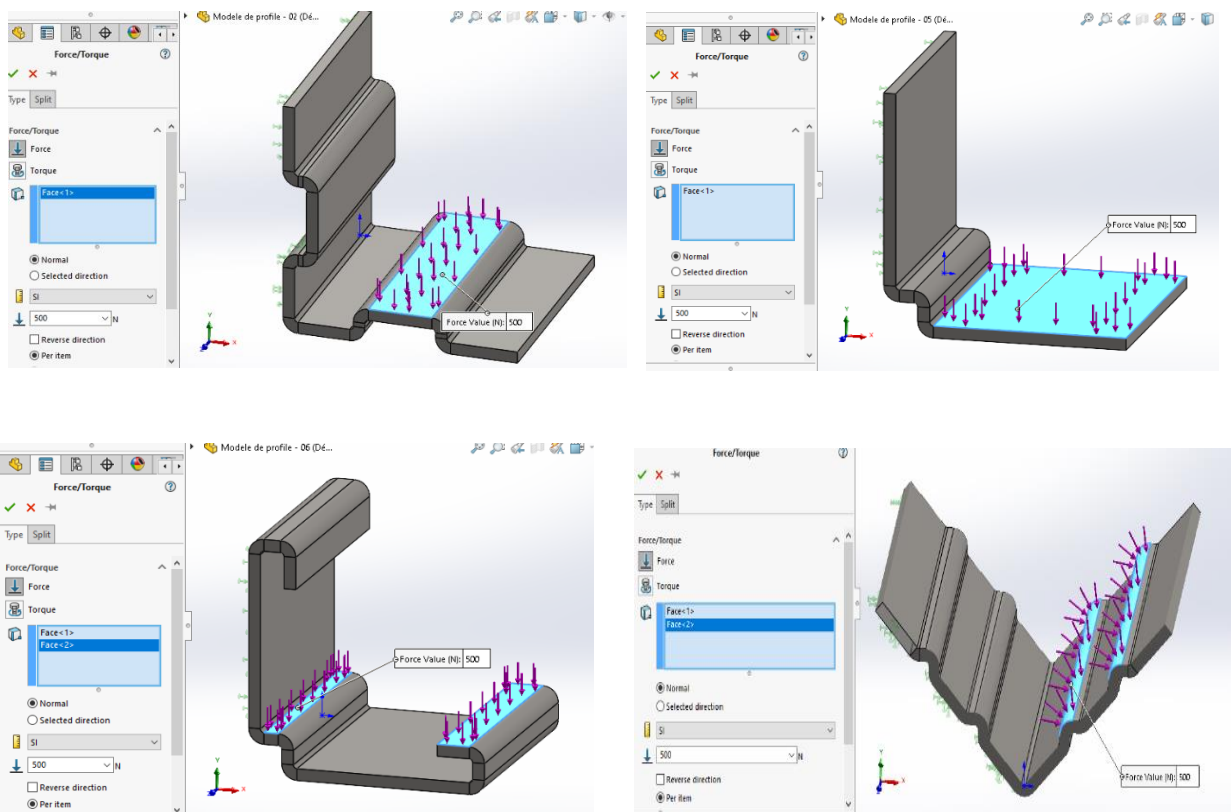


Figure II.12 : Application de la charge mécanique (F=500 N)

Après avoir défini les conditions d'étude, le modèle géométrique a été divisé en un grand nombre de petits éléments par la méthode de maillage.

Ce procédé de division permet d'améliorer la précision des calculs numériques et d'obtenir des résultats plus réalistes concernant la distribution des contraintes et des déformations.

Un maillage approprié a été sélectionné afin d'assurer un bon compromis entre la précision des résultats et le temps de calcul

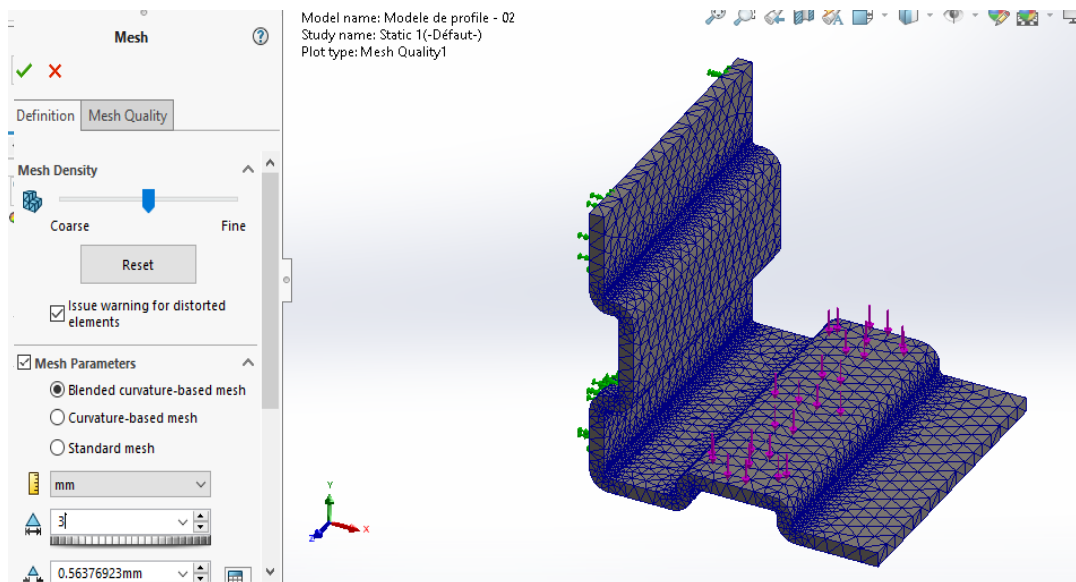


Figure II.13 : maillage de profil 02

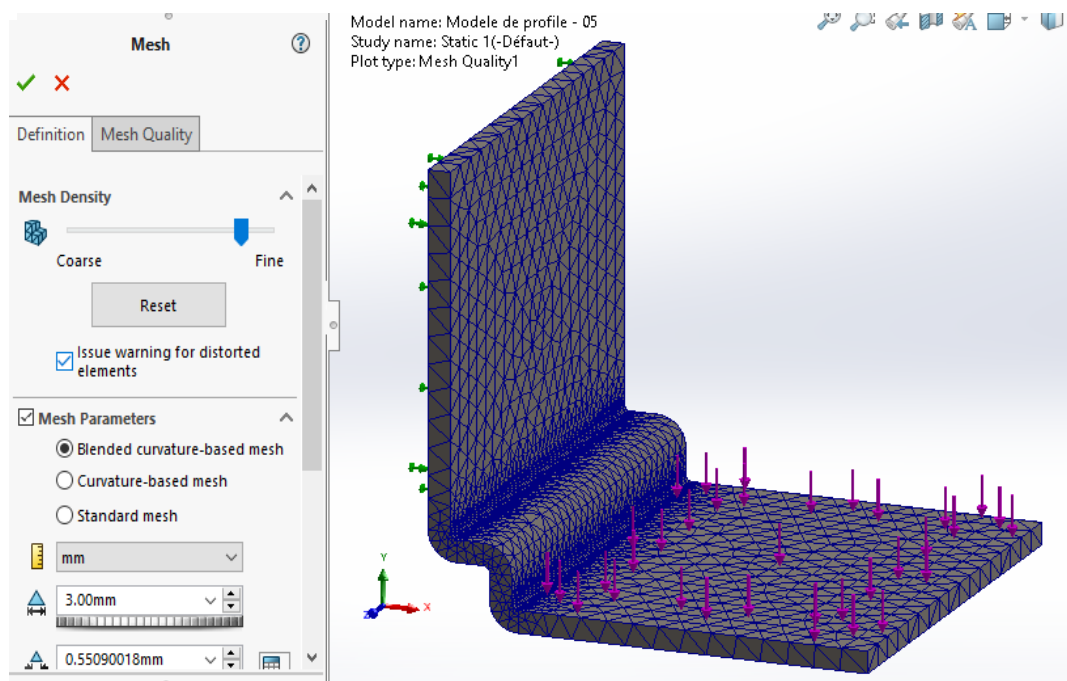


Figure II.14 : maillage de profil 05

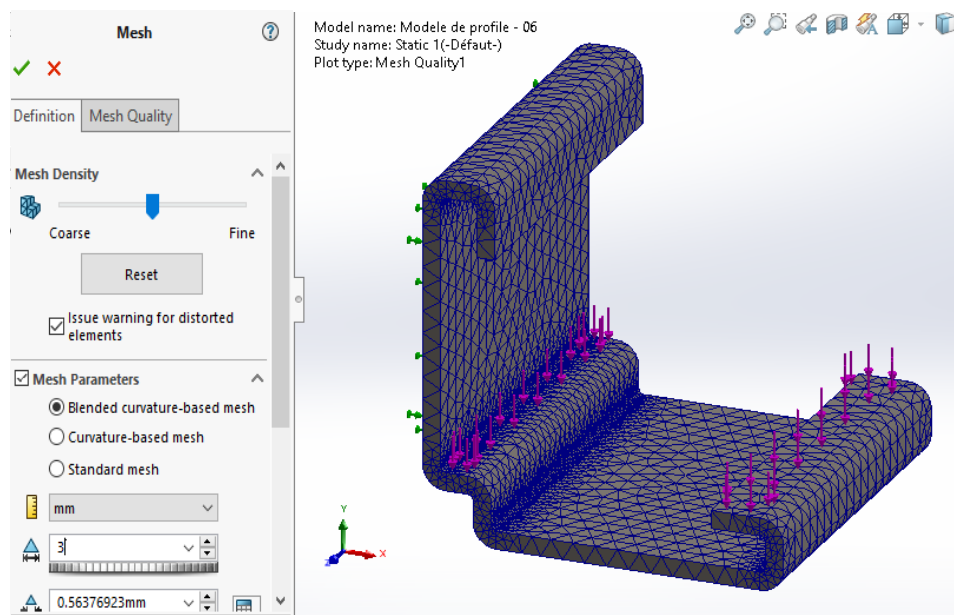


Figure II.15 : maillage de profil 06

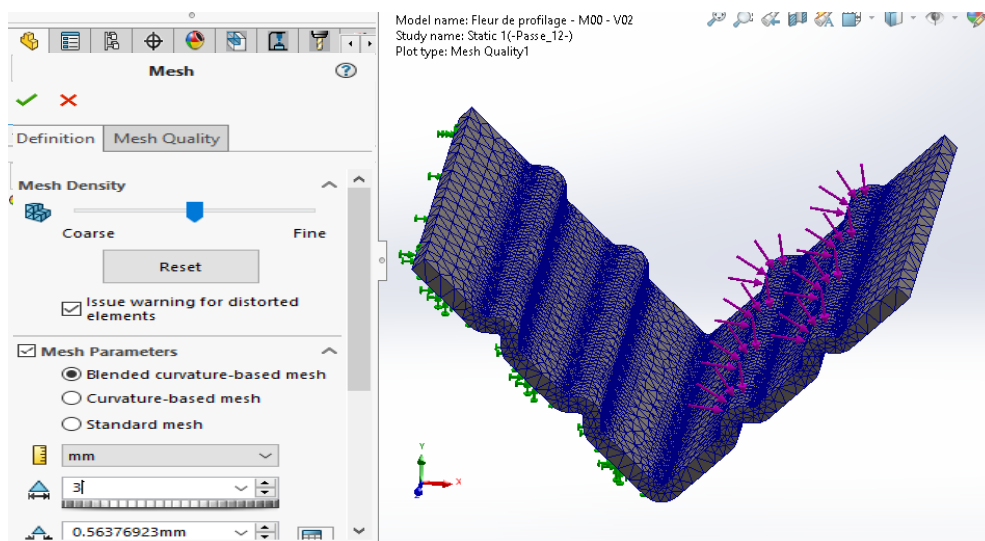


Figure II.16 : maillage de profil 08

Après la mise en place de tous les dispositifs expérimentaux, des simulations numériques ont été réalisées à l'aide de SolidWorks Simulation afin d'obtenir les résultats mécaniques des profils étudiés.

Les principaux résultats obtenus sont :

- Les contraintes équivalentes de Von Mises ;
- Les déformations totales ;
- La distribution des déformations ;

➤ Les zones de forte concentration de contraintes

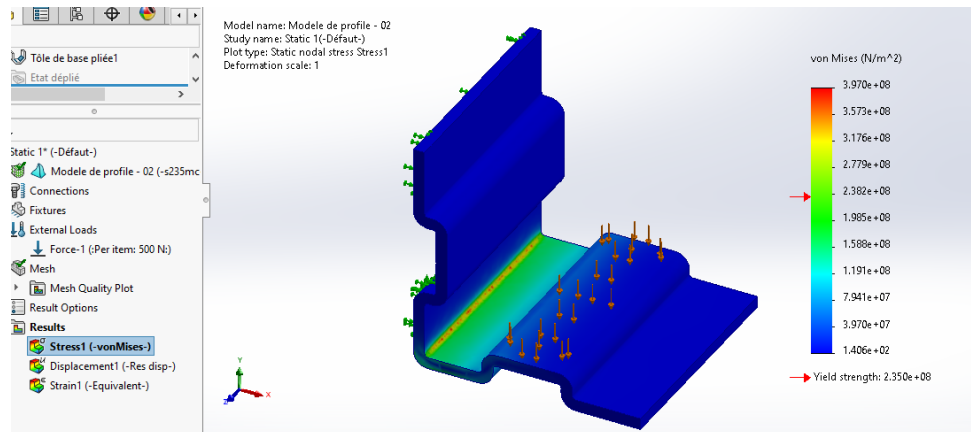


Figure II.17 : Résultat des contraintes de Von Mises et déplacement (Profil 02)

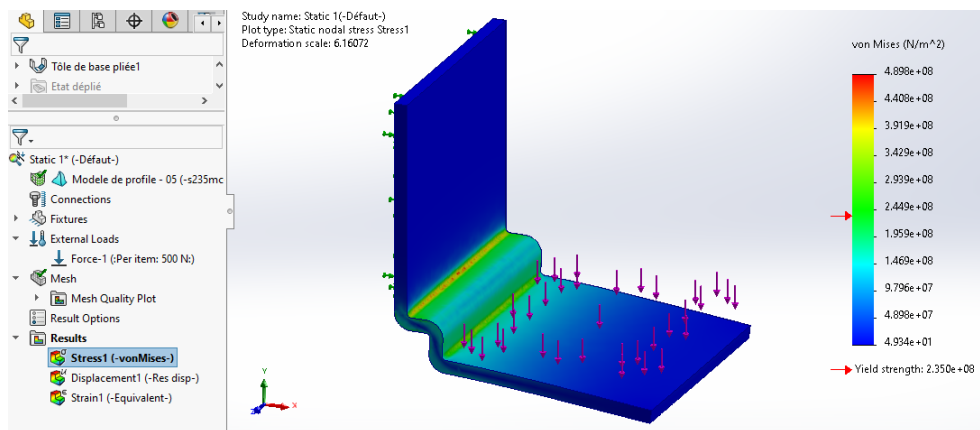


Figure II.18 : Résultat des contraintes de Von Mises et déplacement (Profil 05)

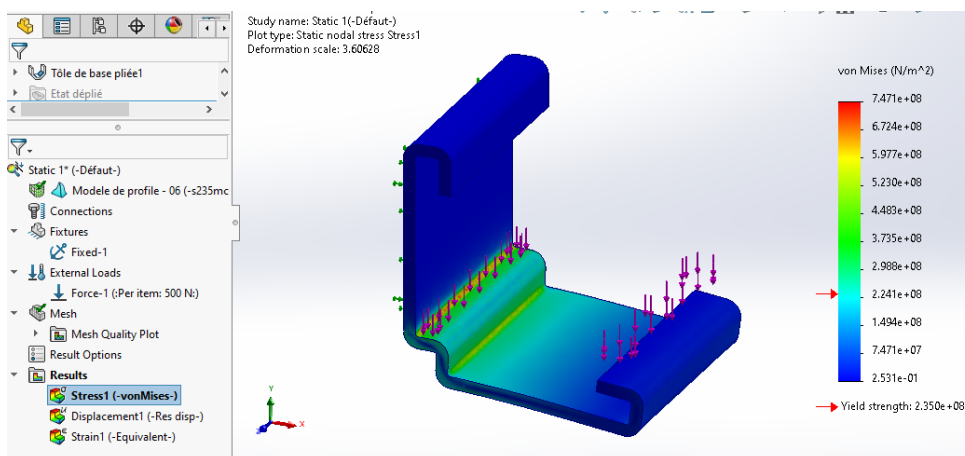
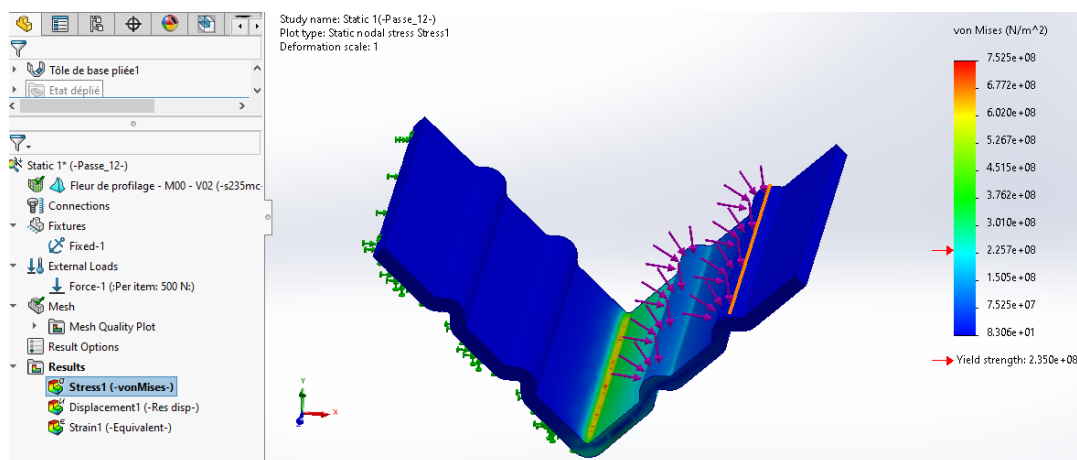


Figure II.19 : Resultat des contraintes de Von Mises et déplacement (Profil 06)**Figure II.20 :** Résultat des contraintes de Von Mises et déplacement (Profil 08)

2.4.3 Comparaison finale des profils etudies

Pour sélectionner la meilleure conception, une comparaison exhaustive des quatre profils a été réalisée à partir des résultats de simulations numériques.

Cette comparaison s'est appuyée sur plusieurs critères mécaniques et d'ingénierie, dont les plus importants sont :

Profil	Masse(g)	Contrainte max(MPA)	Déformation max(mm)	Facteur de sécurité	Observation
02	13.73	180	0.47	1.30	Une résistance élevée est considérée comme bonne
05	11.87	260	0.81	0.90	Dépassement de la contrainte requise
06	15.19	120	1.39	1.95	Masse élevée (Non économique)
08	12.82	150	0.25	1.56	Optimal(léger ;rigide ;et sécurisé

Tableau II.15 : Comparaison des profils

2.5 Sélection du profil optimal

Suite aux résultats de l'analyse par éléments finis (FEA) et de la simulation mécanique de résistance (RDM) réalisées sur les quatre profils proposés, le choix final de la conception technique optimale nécessite un examen plus approfondi. Ce processus décisionnel repose sur une approche multicritère afin de concilier les exigences techniques, mécaniques et

économiques prédéfinies dans le cahier des charges. Trois critères clés ont été retenus pour cette sélection :

- Critère de réduction de poids (optimisation de la masse) : Ce critère est crucial pour vérifier l'objectif principal du projet, qui est de réduire le poids des structures, permettant ainsi une réduction de la consommation de matières premières, une baisse des coûts de fabrication et une réduction du moment d'inertie de la ligne de laminage existante.
- Norme de résistance mécanique (RDM) : La contrainte maximale de Von Mises résultant des charges de fonctionnement doit rester inférieure à la limite d'élasticité du matériau utilisé, qui est l'acier S235MC ($\sigma_e = 235$ MPa), afin d'éviter toute déformation plastique irréversible.
- Norme de sécurité (coefficient de sécurité) : La structure d'ingénierie doit fournir un coefficient de sécurité stable et adéquat ($FDS > 1,2$) dans des conditions de charge réelles, assurant la fiabilité et la durabilité du profil en service.

2.5.1 Analyse comparative et discussion des résultats

L'analyse croisée des indicateurs numériques présentés dans le tableau comparatif précédent permet de tirer les conclusions suivantes :

- Profilés 02 et 06 : Bien qu'ils offrent une excellente rigidité et des coefficients de sécurité très satisfaisants, ces deux profils présentent une masse linéique excessive (atteignant respectivement 13,73 g et 15,19 g pour une longueur de 50 mm). Cette surdimension structurelle contredit directement l'objectif de réduction de poids et engendre un surcoût injustifié.
- Profil 05 : Cette option présente une instabilité mécanique importante. Sous charges appliquées, la contrainte ultime atteint 489 MPa, dépassant largement la limite d'élasticité du matériau S235MC (235 MPa). Il en résulte un coefficient de sécurité qui chute à une valeur critique de 0,48 ($FDS < 1$), ce qui implique l'inévitabilité d'une rupture structurelle localisée. Par conséquent, ce profil est techniquement inacceptable.
- Profilé 08 : Ce profil représente le meilleur compromis entre performance et coût. Grâce à son épaisseur optimisée de 2,5 mm, il affiche une masse très faible de seulement 12,82 g, soit une réduction de poids d'environ 50 % par rapport au profil standard de 5 mm. Sur le plan mécanique, la contrainte maximale reste maîtrisée et le coefficient de

sécurité atteint est pleinement conforme aux exigences de sécurité industrielle en vigueur.

2.5.2 Décision finale et validation du profil optimal

Suite à cette analyse technico-économique, le profilé « **Profil 08** » a été officiellement retenu comme solution optimale et définitive pour ce projet.

Ce profilé innovant de 2,5 mm d'épaisseur, tout en respectant l'ensemble des contraintes mécaniques et en réduisant la quantité de métal utilisée, atteint précisément les objectifs définis dans le cahier des charges : il garantit une efficacité fonctionnelle et une résistance mécanique identiques, tout en assurant une réduction significative des coûts et du poids, et en étant parfaitement compatible avec la ligne de production du laminoir existant.

Conclusion

Dans ce chapitre, une démarche complète de conception et d'optimisation a été menée afin de développer un nouveau profil métallique capable de remplacer la cornière de référence 50 × 50 × 5 mm tout en réduisant significativement sa masse. À partir du cahier des charges définies, plusieurs variantes géométriques ont été proposées en intégrant différents concepts de raidissement et d'optimisation de la répartition de la matière.

L'analyse comparative des profils conçus a permis d'évaluer leurs performances en termes de rigidité, de résistance mécanique, de gain de masse et de faisabilité industrielle. Les simulations numériques réalisées par la méthode des éléments finis ont fourni une évaluation quantitative des contraintes et des déplacements sous chargement, permettant d'identifier les solutions les plus performantes.

Les résultats obtenus montrent qu'il est possible d'atteindre une réduction importante du poids tout en conservant un niveau de résistance compatible avec les exigences de service. Le profil retenu présente ainsi le meilleur compromis entre allègement, comportement mécanique et compatibilité avec la ligne de profilage existante.

Les conclusions de ce chapitre constituent la base des travaux du chapitre suivant, consacré à l'adaptation industrielle du profil sélectionné, à la conception des galets de formage et à la validation du procédé de fabrication.

Chapitre 3 :

Adaptation industrielle et

validation

3.1 Analyse de la chaîne de profilage

Avant d'aborder la conception des nouveaux galets pour le nouveau profilé, il est important d'étudier et d'analyser la chaîne de profilage de la profileuse afin de maîtriser sa configuration générale et son principe de déformation progressive de la tôle jusqu'à la géométrie finale. La rédaction de cette étude aide à situer le cheminement des étapes de formage et la fonction de chaque station de travail dans le processus de fabrication, tout en limitant les irrégularités et déformations dans la conception et la simulation.

La profileuse utilisée dans ce projet fonctionne selon le principe du formage par roulage à froid (Roll Forming) où, dans chaque station, la bande passe successivement entre un galet supérieur et un galet inférieur, assurant la bonne circulation de la tôle et un formage progressif sans détourner les forces et déformation susceptibles d'altérer la conformité du profilé final.

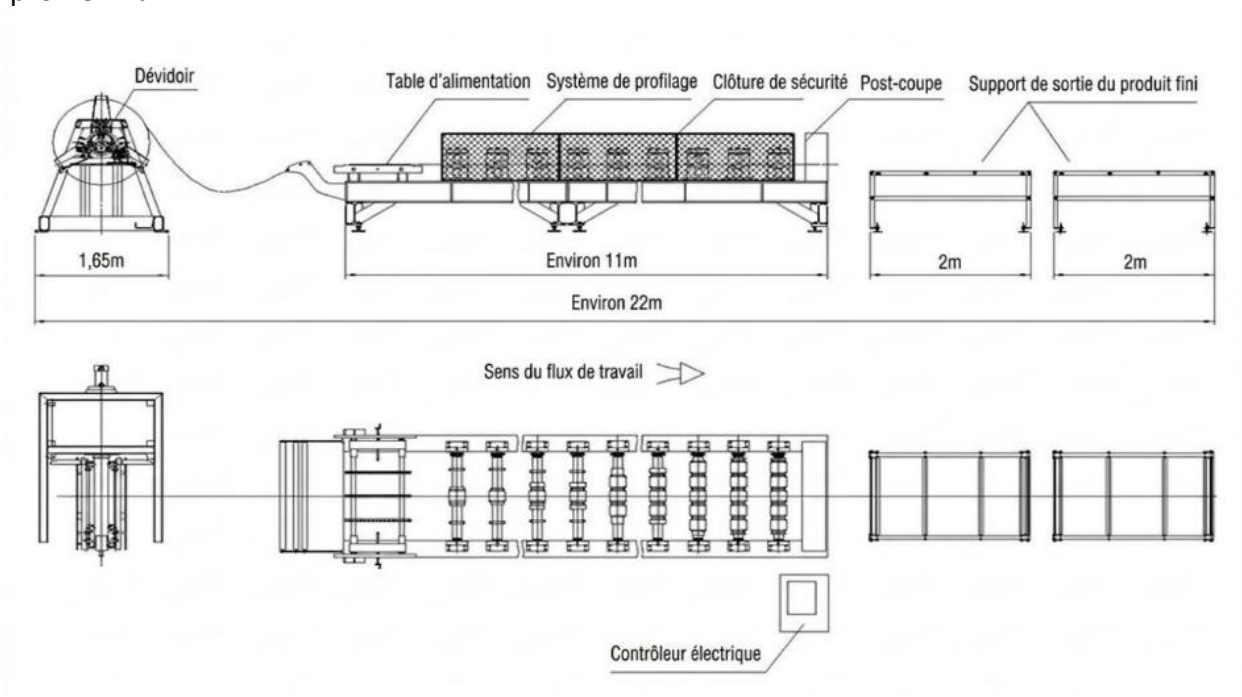


Figure III.01 : machine profilage

L'équipement est constitué de 12 stations de formage, soit 24 galets supérieurs et inférieurs, pour la production d'un profilé de type cornière en L renforcée par des formes triangulaires. Le matériau de base est un acier S235MC d'épaisseur 2.5 mm. La bande métallique a une largeur de 107 mm et une longueur de 6000 mm. Ce choix est justifié par sa bonne aptitude au formage à froid, ses bonnes propriétés mécaniques pour les opérations de pliage progressif.

Le mode de mise en forme choisi est de type « déformation progressive », la géométrie finale n'étant pas réalisée en une seule opération mais suite à une succession d'étapes. Dans les premières stations, la bande métallique est guidée et stabilisée dans la machine. Dans un second temps, les renforts

triangulaires sont formés progressivement à plusieurs stations dans le but de réduire les contraintes et d'éviter l'apparition de fissures ou d'ondulations. Puis, le pli principal de la cornière est tiré progressivement jusqu'à l'angle final de conception souhaité. Enfin, lors des dernières stations les opérations sont destinées à calibrer le profilé en stabilisant ses dimensions géométriques et en revenant à la rectitude de l'élément tout en améliorant la qualité de sa surface finale.

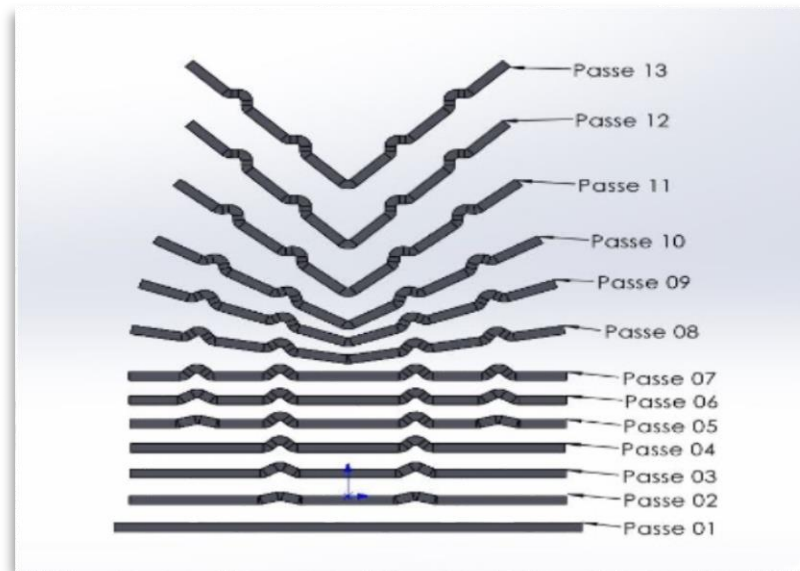


Figure III.02 : Passe profilage

La fonction des galets dans la démarche de profilage est essentielle au sein même de la transition de la forme des galets selon le stade de formage attendu. En effet, les premiers galets ont essentiellement une vocation de guidage et de préformage, les galets intermédiaires réalisent le gros des opérations de pliage, et les derniers galets réalisent la calibration et la correction des diverses déformations géométriques introduites lors du formage. Ainsi, la souplesse de la répartition des efforts permet de limiter les forces de pliage, d'optimiser la qualité du profilé, d'améliorer la durée de vie des galets et de limiter leur usure.

Enfin, l'utilisation de 12 postes de formage permet d'obtenir un profilé géométriquement stable et ne nécessitant que peu de corrections dues au pliage, cette problématique étant résolue en grande partie par sa géométrie, notamment à cause de la présence de triangulations et de plusieurs zones de pliage prédisposant à une répartition progressive des contraintes. Cette analyse constitue donc une approche indispensable avant le passage à la conception des nouveaux galets et à la simulation numérique du profilage.

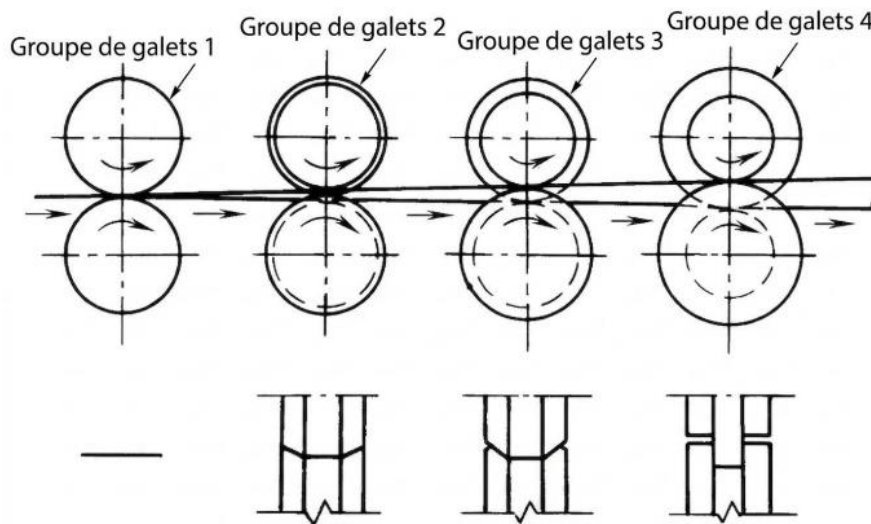


Figure III.03 : Galets de profilage

3.2 Étude des galets nécessaires pour le nouveau profil

Le galet de profilage correspond à un élément mécanique ayant un mouvement rotatif, il est utilisé dans le domaine des lignes de profilage à froid afin de déformer progressivement le métal d'une tôle métallique qui devient alors progressivement un profil final, qui peut être déterminé.

Les galets étant utilisés pour réaliser la mise en forme du matériau en l'écrasant et en le faisant passer entre des rouleaux de forme spécifiquement choisie, chaque paire de galets effectue seulement une déformation partielle et contrôlée du profil. On procède par étapes de formage progressif (progression de formage), permettant de donner la forme finale en évitant les défauts majeurs et les contraintes excessives dans le matériau.

- Une profileuse à **24 galets**, de diamètre intérieur **$D_{int} = 50mm$**
- Longueur de ligne de profilage **$L = 6200mm$** pour profiler une tôle (d'épaisseur **$e = 2.5mm$** , de largeur **$l = 107mm$**)
- Type de profilé= profilé en **L avec triangle**

3.2.1 Choix des matériaux

Les propriétés mécaniques des composants de la machine de formage ont été déterminées en fonction de la limite d'élasticité du matériau de la pièce.

Ainsi, l'acier moulé **Z200C12** et l'acier à haute résistance **42CD4** ont été sélectionnés car leurs limites d'élasticité sont nettement supérieures à celles de la tôle **S235**, condition indispensable

pour protéger le galets des dommages et des déformations causées par les forces de laminage.
[6]

ReZ200C12 > ReS235 avec $850\text{N/mm}^2 > 235\text{N/mm}^2$

Re42CD4 > Re235 avec $750\text{N/mm}^2 > 235\text{N/mm}^2$

Les arbres :

Est le nom que porte le cylindre d'acier positionné horizontalement, sur lequel sont montés les différents galets, on a pris l'acier **42CD4 (42CrMo4)**

a) Composition chimique :

Tableau III.01 : Composition chimique d'un acier (42CD4) **42CrMo4** (MEHANI et TOUAT. 2019)

C	Cr	Mo	S	Mn	P	Si
0.38-0.45	0.90-1.20	0.15-0.30	≤ 0.035	0.60-0.90	≤ 0.035	0.40 Maxi

Tableau III.02 : Caractéristiques du matériau (42CD4) 42CrMo4 (MEHANI et TOUAT. 2019)

Propriétés	Valeur	Unité
Module d'élasticité	210 000	N/mm ²
Coefficient de poisson	0,3	
Module de cisaillement	79 000	N/mm ²
Masse volumique	7 800	Kg/ m ³
Limite de la traction	1 000	N/mm ²
Limite d'élasticité	750	N/mm ²
Conductivité thermique	14	W/(m.k)
Chaleur spécifique	440	J/(Kg.k)

b) Propriétés :

L'acier 42CrMo4 est un acier de construction faiblement allié, dopé au chrome et au molybdène, destiné aux traitements thermiques tels que le recuit et le revenu. Ce métal se caractérise par une forte aptitude au durcissement à l'huile, ainsi que par une excellente résistance mécanique aux charges et aux chocs extrêmes à l'état recuit, tout en conservant une usinabilité élevée qui facilite les opérations de fabrication et d'usinage (MEHANI et TOUAT. 2019)

Outre ses propriétés mécaniques supérieures, cet acier a été choisi pour ce projet en raison de sa grande disponibilité sur le marché local et de son accessibilité aux ateliers de fabrication mécanique. [6]

Les galets :

On a pris comme matériau l'acier **Z200C12 (X210Cr12)**

a) Composition chimique :

Tableau III.03 : Composition chimique d'un acier Z 200 C 12 (MEHANI et TOUAT. 2019)

Carbone	Chrome	Tungstène	Manganèse
2.10%	12%	0.70%	0.3%

Tableau III.04 : Caractéristiques du matériau Z200C12(X210Cr12) (MEHANI et TOUAT. 2019)

Propriétés	Valeur	Unité
Module d'élasticité	210 000	N/mm ²
Coefficient de poisson	0,3	
Module de cisaillement	76 923,08	N/mm ²
Masse volumique	7 800	Kg/ m ³
Limite de la traction	1 000	N/mm ²
Limite d'élasticité	850	N/mm ²
Conductivité thermique	0, 46	W/ (m.k)

b) Propriétés :

L'acier Z200 C12 (commercialisé sous le nom d'acier au chrome) est un acier allié au chrome à haute teneur en carbone, conçu pour la trempe à l'huile ou à l'air. Cet acier se caractérise par une grande stabilité dimensionnelle, une excellente résistance à l'usure abrasive et aux contraintes mécaniques, ainsi que par une excellente tenue du tranchant et une bonne usinabilité.

Outre ces propriétés mécaniques avancées, le choix de ce métal repose sur deux facteurs principaux :

- **Disponibilité commerciale :** Sa large disponibilité sur le marché local et dans les points de vente.
- **Faisabilité de fabrication :** Son adéquation aux procédés d'usinage existants en atelier et sa mise en œuvre relativement simple.

c) Traitement thermique de l'acier Z200

Le traitement thermique consiste en une série de procédés thermiques intégrés (chauffage et refroidissement contrôlés) visant à modifier la microstructure du métal afin d'améliorer ses propriétés en fonction des exigences de fonctionnement visées. Les principaux objectifs de ce procédé sont :

- L'amélioration des performances mécaniques : augmentation de la résistance à la rupture (R_m et de l'élasticité (R_e) ;
- L'amélioration de la dureté statique et dynamique : augmentation de la dureté superficielle pour une meilleure résistance à l'usure et une absorption des chocs accrue.

La première étape de traitement thermique de l'acier Z200 est la trempe de la pièce qui consiste à chauffer la pièce à une température (930-980°C) et l'y maintenir pendant une certaine période. En sachant que (LUGAN Aciers 2005) :

- Pour une épaisseur <20mm, $T = 20\text{min}$
- Pour une épaisseur >20mm, nous rajoutons 1min/mm supplémentaire

L'équation ci-dessous nous montre comment calculer le temps de maintien.

$$T = 20 + (1 \times e)$$

Avec

e : épaisseur de la matière

T : temps de maintien

Après la trempe, nous nous attendons à avoir une amélioration des caractéristiques mécaniques des galets, une augmentation de la dureté vers 63 -65 HRC sera la preuve de cette amélioration. [6]

$$e = (D_{\text{ext}} - D_{\text{int}}) / 2$$

Dans notre étude :

$$e = (100-50) / 2 = 25 \text{ mm}$$

Alors :

$$T = 20 + (1 \times e)$$

$$T = 20 + (1 \times 5) = 25 \text{ min}$$

Le temps de maintien de nos galets est **25 min**

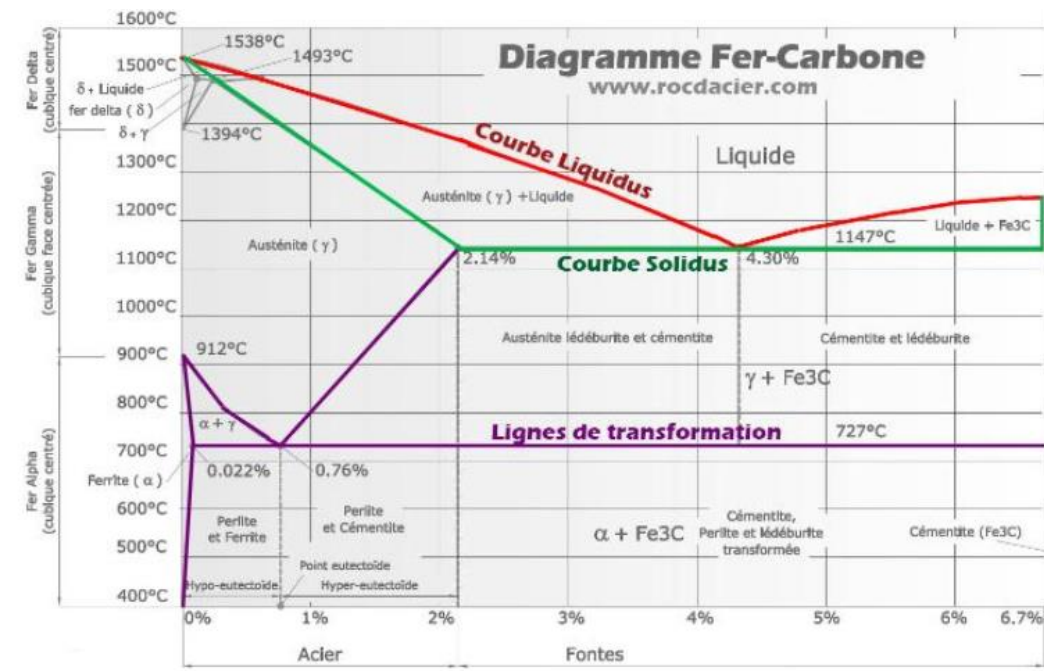


Figure III.04: diagramme fer carbone

La tôle :

Qui va être soumise au profilage, on a pris comme matériau l'acier non allié à usage général S235MC.

a) Composition chimique :

Tableau III.05 : Composition chimique d'un acier S235MC

Carbone	Manganèse	Phosphore	Souffre
0.12%	1.20%	0.025%	0.020%

Tableau III.06 : Caractéristiques du matériau S235MC

Propriétés	Valeur	Unité
Module d'élasticité	2.1e+11	MPa
Coefficient de Poisson	0.394	
Masse volumique	7850	kg/m ³
Résistance à la rupture	510	MPa
Résistance à la traction	=360-510	MPa
Limite élastique à la traction	235	MPa

b) Propriétés :

Le S235MC est un acier de construction normalisé à faible teneur en carbone qui présente une bonne soudabilité, une bonne résistance aux chocs.

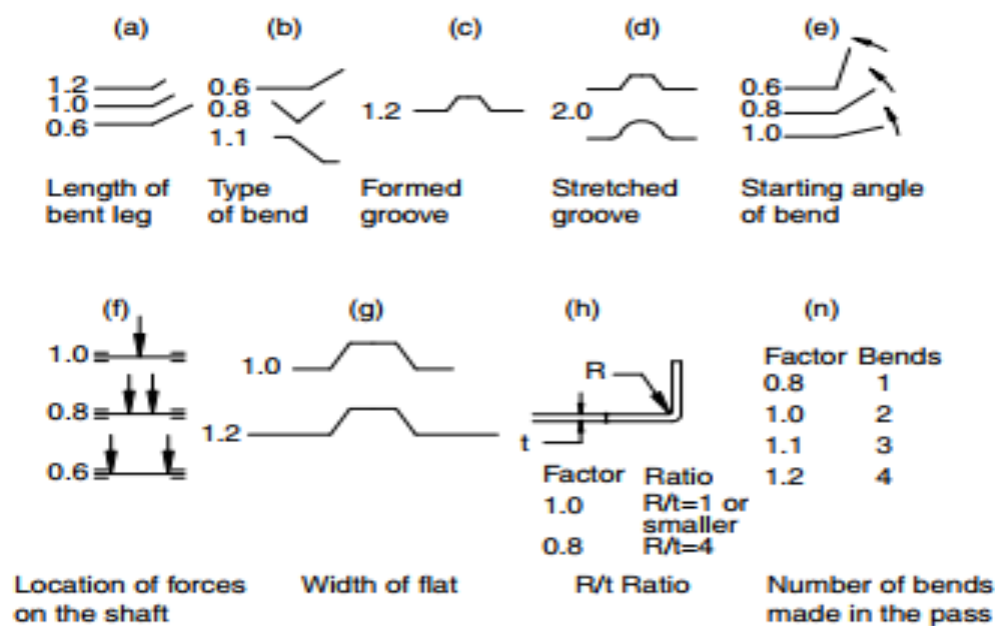
3.2.2 Calcul des paramètres de la conception :**Calcul du diamètre de l'arbre :**

On peut retrouver dans la littérature plusieurs tentatives dans le but de créer une loi empirique afin de dimensionner les composants standards des profileuses, l'une des plus pertinentes est l'équation proposée par George T. Halmos pour calculer les diamètres d'arbres appropriés. (Halmos 2005)

$$D = 1.46 [0.173 \sqrt[3]{L} + 0.47 + 0.7 \times a \times b \times c \times d \times e \times f \times g \times h \times n \sqrt{t} \times 6 \sqrt{\frac{Y}{50}}]^4$$

DIA=50mm

Après avoir calculé le diamètre de l'arbre nous avons projeté cette valeur sur le diagramme de la Figure II-3, représentant le diamètre de l'arbre en fonction de l'épaisseur de la tôle et de l'espacement entre stations. Ce dernier a été obtenu en projetant la valeur du diamètre de l'arbre sur l'épaisseur de la tôle (**e=1mm**) puis nous projetant encore cette valeur sur l'axe (X) pour obtenir l'espacement entre les galets. [6]



Thickness used in the diagram = metal thickness (t) $\times a \times b \times c \times d \times e \times f \times g \times h \times n$

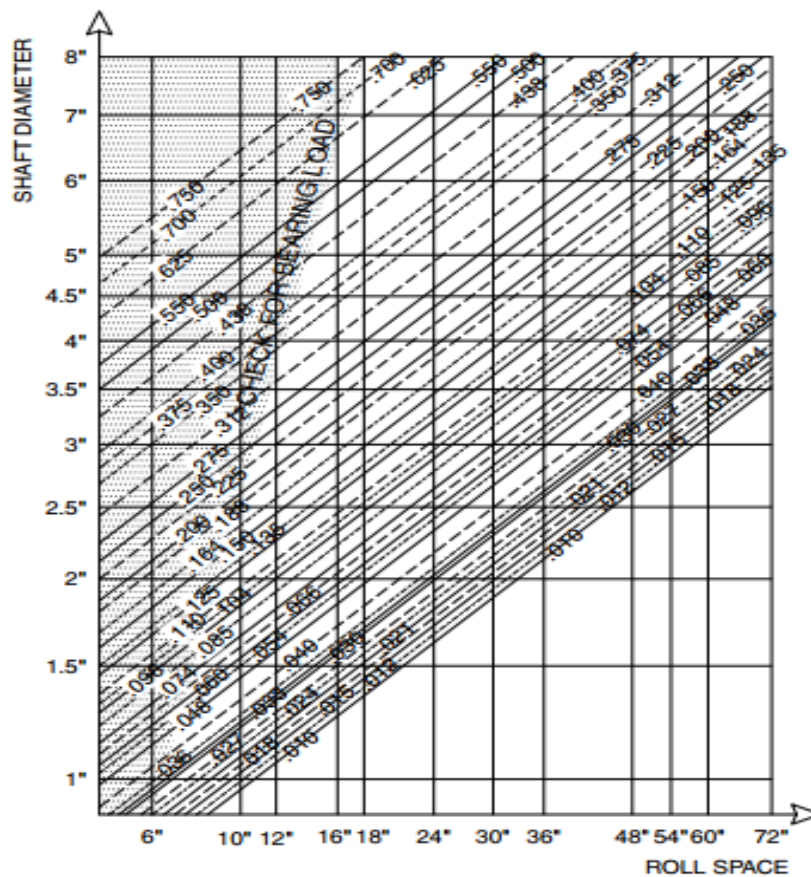


Figure III.05 : Sélecteur de diamètre d'arbre de laminoir a profiler en pouces (Halmos 2005)

Avec :

L= longueur de l'arbre

t= épaisseur du matériau

Y=limite d'élasticité

a=longueur de pliage

b=type de pliage

c=rainure formée

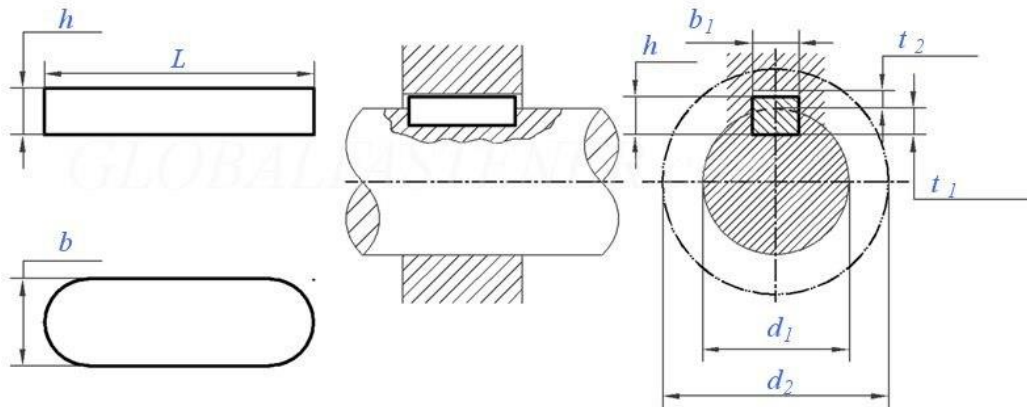
d=rainure étirée

e=angle de départ du pliage

f=localisation des forces sur l'arbre

g=largeur

n=nombre de coude

Calcule du Diamètre minimum du galet :**Figure III.06 : La clavette du galet**

DIMENSIONS EN MILLIMÈTRES							
DIAMÈTRE DE L'ARBRE (d)		DIMENSIONS DE LA CLAVETTE		PROFONDEUR DE LA RAINURE		LONGUEUR (L)	
De >	À <=	b	h	Dans l'arbre (t)	Dans le moyeu (t1)	Min.	Max.
6	8	2	2	1.1	1	8	20
8	10	3	3	1.7	1.4	8	36
10	12	4	4	2.4	1.7	10	45
12	17	5	5	2.9	2.2	12	56
17	22	6	6	3.5	2.6	16	70
22	30	8	7	4.1	3	20	90
30	38	10	8	4.7	3.4	25	110
38	44	12	8	4.9	3.2	32	110
44	50	14	9	5.5	3.6	40	140
50	58	16	10	6.2	4	45	180
58	65	18	11	6.8	4.4	50	200
65	75	20	12	7.4	4.8	56	220
75	85	22	14	8.5	5.7	63	250
85	95	25	14	8.7	5.5	70	280
95	110	28	16	9.9	6.3	80	315
110	130	32	18	11.1	7.1	90	355
130	150	36	20	12.3	7.9	100	400

Figure III.07 : Tableau des dimensions

$$D_{min} = d + 2k + 0.265d^{1.07}$$

$D_{min} = 75 \text{ mm}$

Avec :

D: diamètre du galet

d: diamètre de l'arbre(**d=50mm**)

K: la hauteur de la clavette dans le galet(**d=50mm** alors **K=3.6mm**)

Calcule du diamètre maximum de galet :

$$D_{max} = 2(VD - d) - St - 0.006V_d^{0.4} \text{ (Halmos 2005)}$$

$D_{max} = 106 \text{ mm}$

Avec :

VD : La distance verticale entre les arbres (**$VD = 103 \text{ mm}$**)

d : diamètre de l'arbre

St : Épaisseur de la paroi de l'entretoise (**$St = 0$**) (Halmos 2005)

Calcule des Tailles des clavettes :

$$W = 0.34d^{0.65} + 0.000506(D_{max}^{1.43})4.8t^{0.51} \text{ (Halmos 2005)}$$

$W = 7.15 \text{ mm}$

W : largeur de la clé

d : diamètre de l'arbre

Dmax : le plus grand diamètre du rouleau

t : épaisseur du métal (**$t = 2.5 \text{ mm}$**) (Halmos 2005)

Calcule du nombre de passe :

$$n = \left[0.237h^{0.8} + \frac{0.834}{t^{0.87}} + \frac{\alpha}{90} \right] \left[\frac{\gamma^{2.1}}{0.003U} \right]^{0.15} s(1 + 0.5z) + e + f + 5zs$$

Dans le but d'atteindre la précision maximale du profilé, mais aussi d'éviter les défauts du process tels que l'ondulation des bords (Edge waving), le nombre de stations a été déterminé selon le modèle empirique de Halmos (2005) intégrant les dimensions géométriques du flanc (107 mm), l'épaisseur (2.5 mm) et les propriétés mécaniques de l'acier S235MC. En ajustant les coefficients de tolérances et de qualité ($s=0.6, z=0.1$), il est conclu qu'il faut 12 stations pour atteindre un taux de transition suffisant, justifié par l'encombrement de 500 mm entre les têtes de formage qui réduit au minimum les résultantes de traction aux bords. Avec cette configuration, une progression angulaire constante de 15° par station est maintenue également grâce à la station d'entrée pour le guidage et à la station de dressage pour garantir la planéité du produit fini.

3.3. Simulation du processus de profilage

3.3.1. Simulation du galet

Les galets de profilage sont l'un des éléments principaux qui compose une ligne de profilage. Ils représentent la partie active de la machine et sont responsables du pliage et de la mise en forme de la tôle.

La conception des galets du profilage a été réalisée dans un premier temps, avec le logiciel SOLIDWORKS, qui est un logiciel spécifiquement conçu pour la conception des galets de profilage en prenant compte du matériau de la tôle, de son épaisseur, les dimensions et la forme de notre profilé.

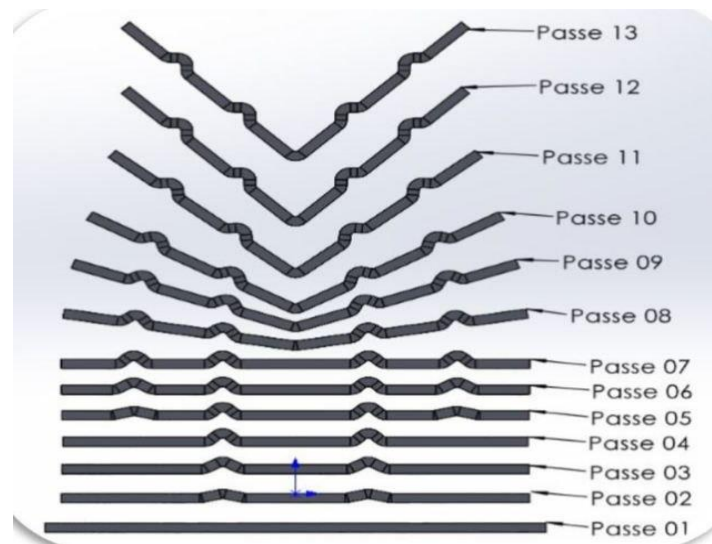


Figure III.08 : dépliée de la fleur

Puis nous sommes passés ensuite sur le logiciel de conception assistée par ordinateur (CAO) SolidWorks. Nous avons exploité les dessins 2D des galets, afin de concevoir les pièces en 3D et procéder à l'assemblage des stations et la mise en plan de tous les composants, ce dernier 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 **assistée par ordinateur (CAO)**.

➤ LE MAILLAGE

Le maillage sert à subdiviser les surfaces compliquées en 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 pour les galets et des éléments coques. S4R pour la tôle.

Après l'assemblage de la machine, nous verrons le profil changer en fonction de chaque station

Maillage des galets

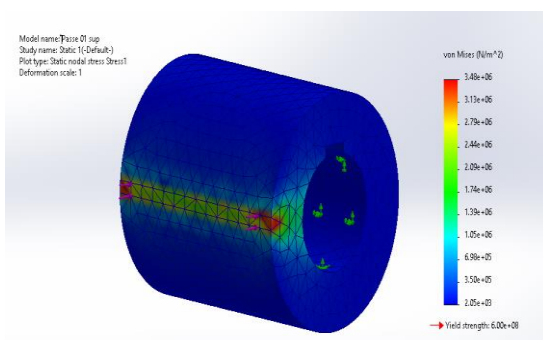
maillage	10	9	8	7	6	4
contrainte	3.61 ^e +06	3.538 ^e +06	3,481 ^e +06	3.853 ^e +06	3.998 ^e +06	4.88 ^e +06

D'après les résultats numériques obtenus dans le tableau ci-dessus, nous constatons que la valeur de la contrainte reste stable et convergente entre les maillages 9 mm et 8 mm. Cependant, à partir d'un maillage inférieur à 7 mm, une augmentation continue et singulière de la contrainte est observée, ce qui interprète le phénomène de singularité de contrainte (Stress Singularity) au niveau des zones géométriques critiques.

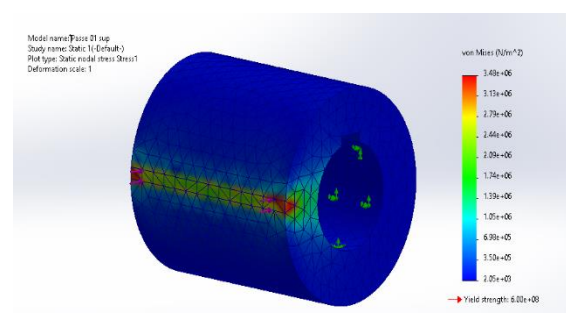
Par conséquent, le maillage de 8 mm est retenu comme le maillage optimal pour notre étude. Il représente le meilleur compromis, assurant la convergence physique des résultats tout en évitant la divergence mathématique et en optimisant le temps de calcul.

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

Passe 01

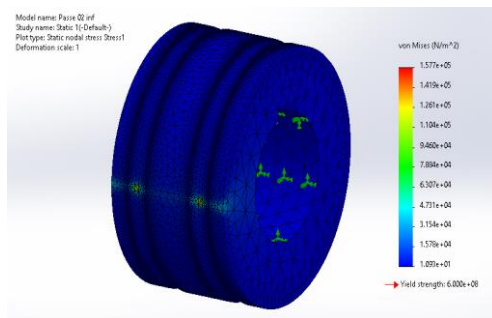


Passe 01 inferieur

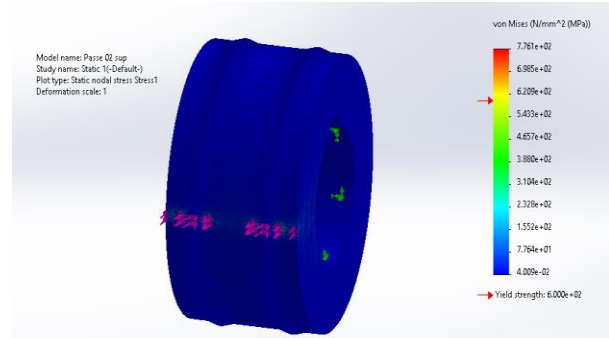


Passe 01 supérieur

Passe 02

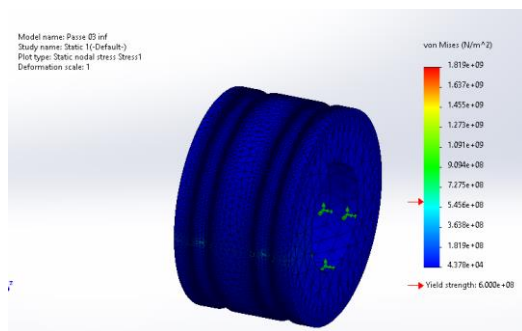


Passe 02 inferieur

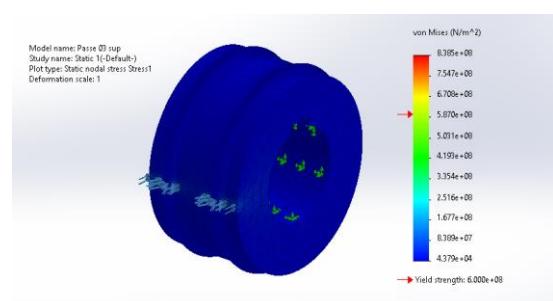


Passe 02 supérieur

Passe 03

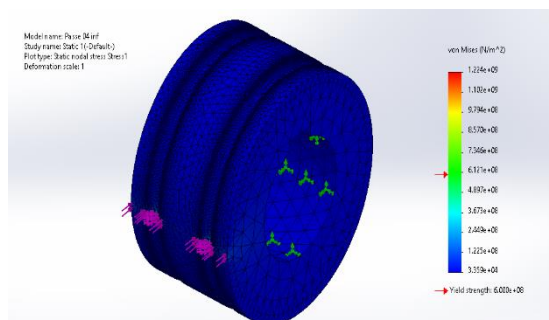


Passe 03 inferieurs

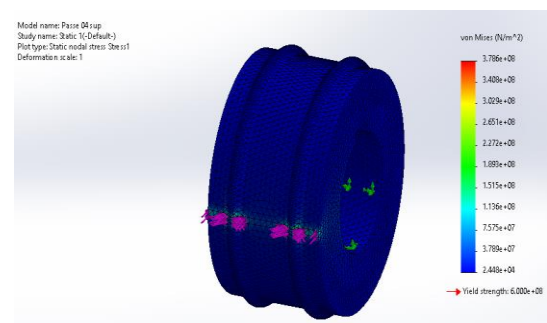


Passe 03 supérieur

Passe 04

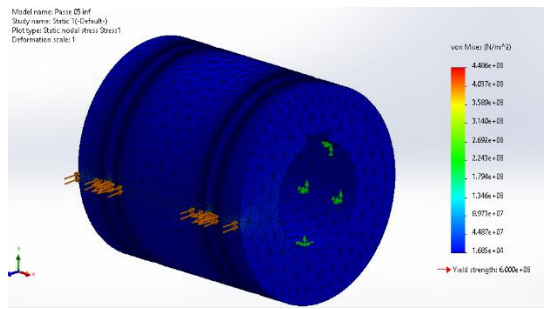


Passe 04 inferieurs

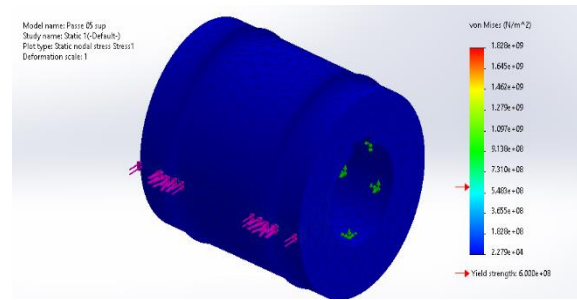


Passe 04 supérieur

Passe 05

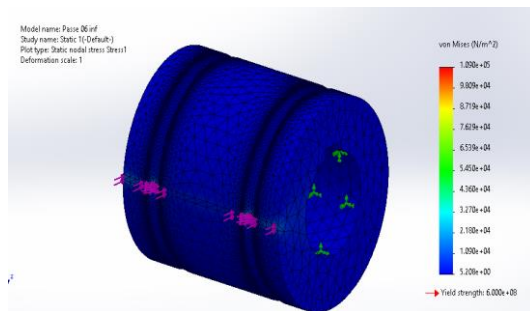


Passe 05 inferieurs

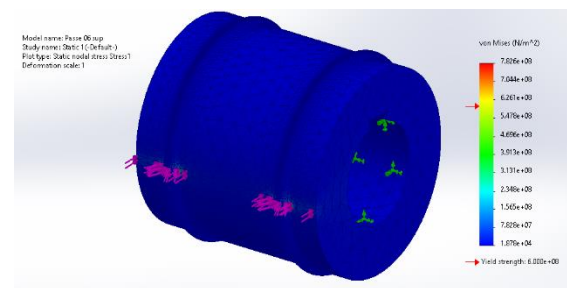


Passe 05 supérieur

Passe 06

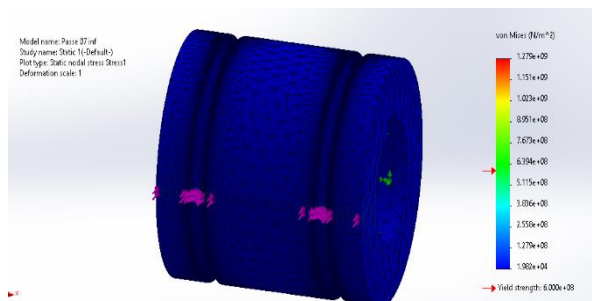


Passe 06 inferieurs

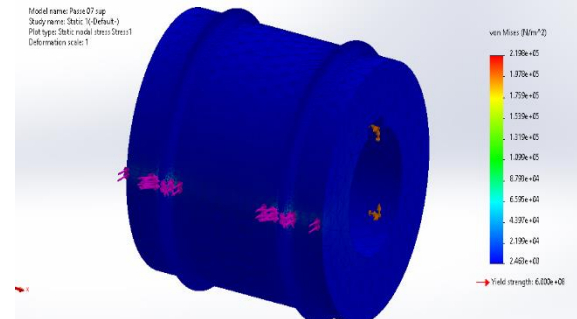


Passe 06 supérieur

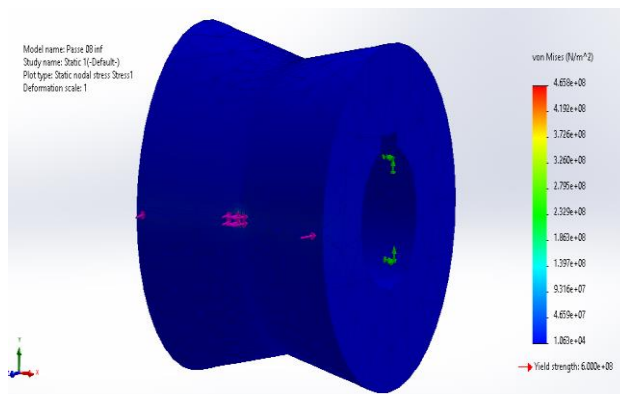
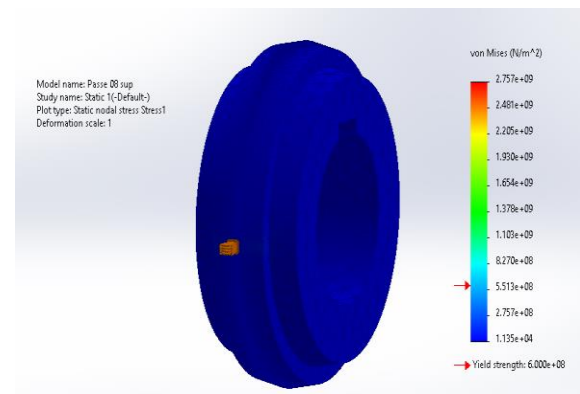
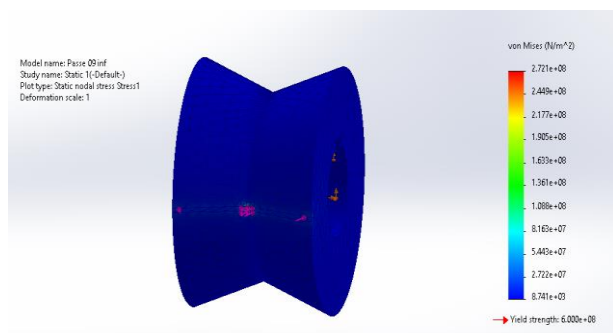
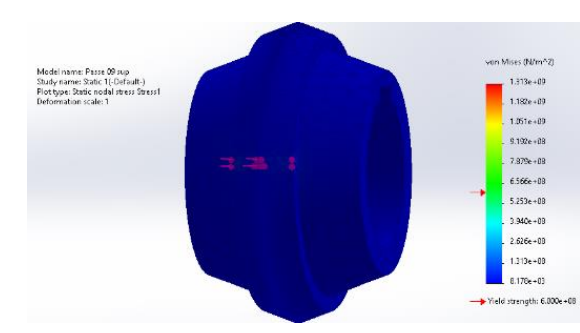
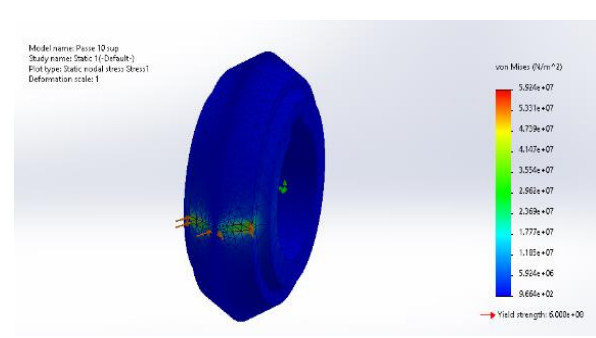
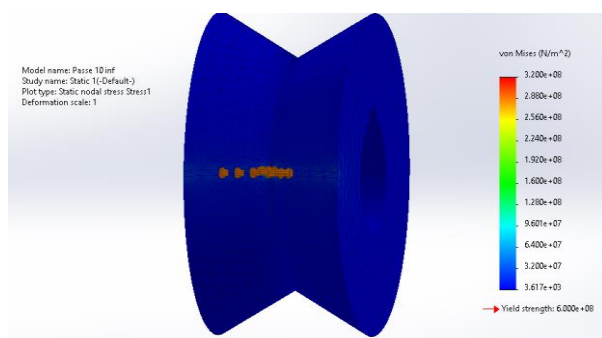
Passe 07



Passe 07 inferieurs

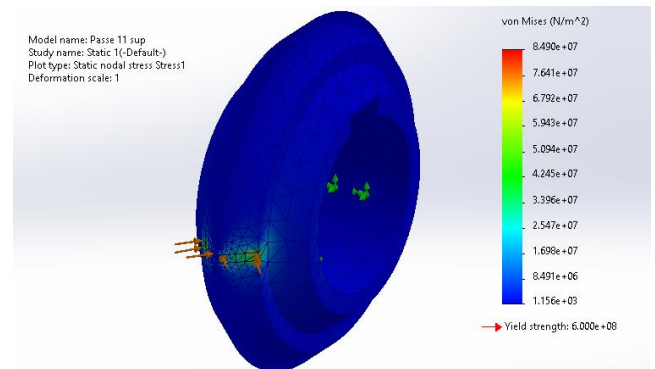
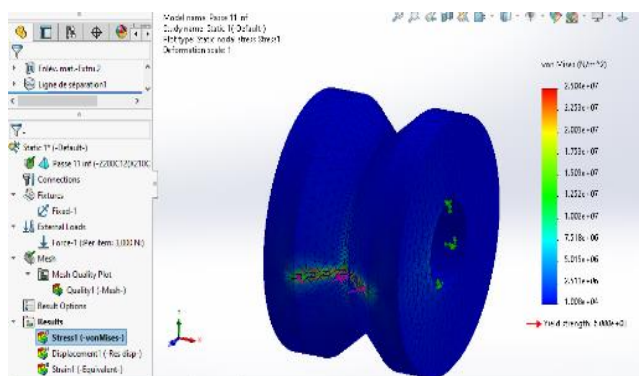


Passe 07 supérieur

Passe 08**Passe 08 inferieurs****Passe 08 supérieur****Passe 09****Passe 09 inferieurs****Passe 09 supérieur****Passe 10**

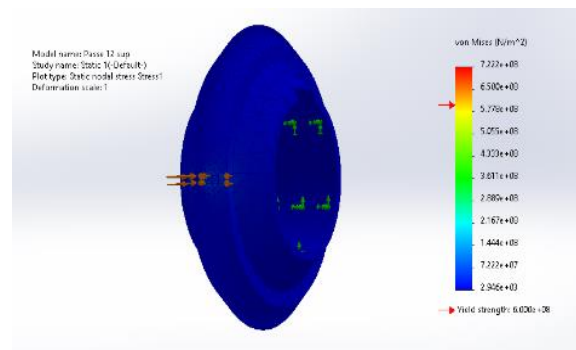
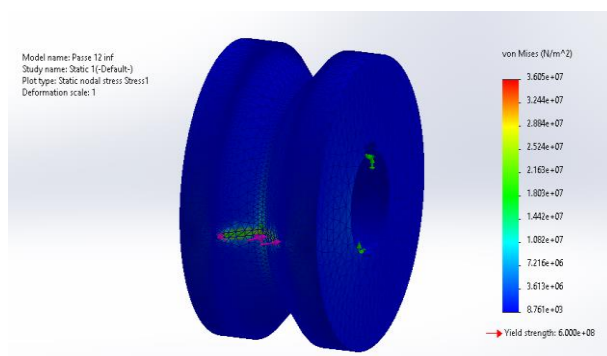
Passe 10 inferieurs

Passe 10 supérieur

Passe 11

Passe 11 inferieurs

Passe 11 supérieur

Passe 12

Passe 12 inferieurs

Passe 12 supérieur

3.3.2. Assemblage de profilage

Avant que la fabrication n'atteigne l'étape d'enroulement et de formage de la bande, la vérification numérique du comportement de cette dernière durant le processus de formage est essentielle. La simulation des éléments finaux est devenue un outil crucial, car elle permet d'analyser la déformation progressive du matériau à travers les différentes colonnes de la machine. C'est précisément ainsi que ce problème est résolu.

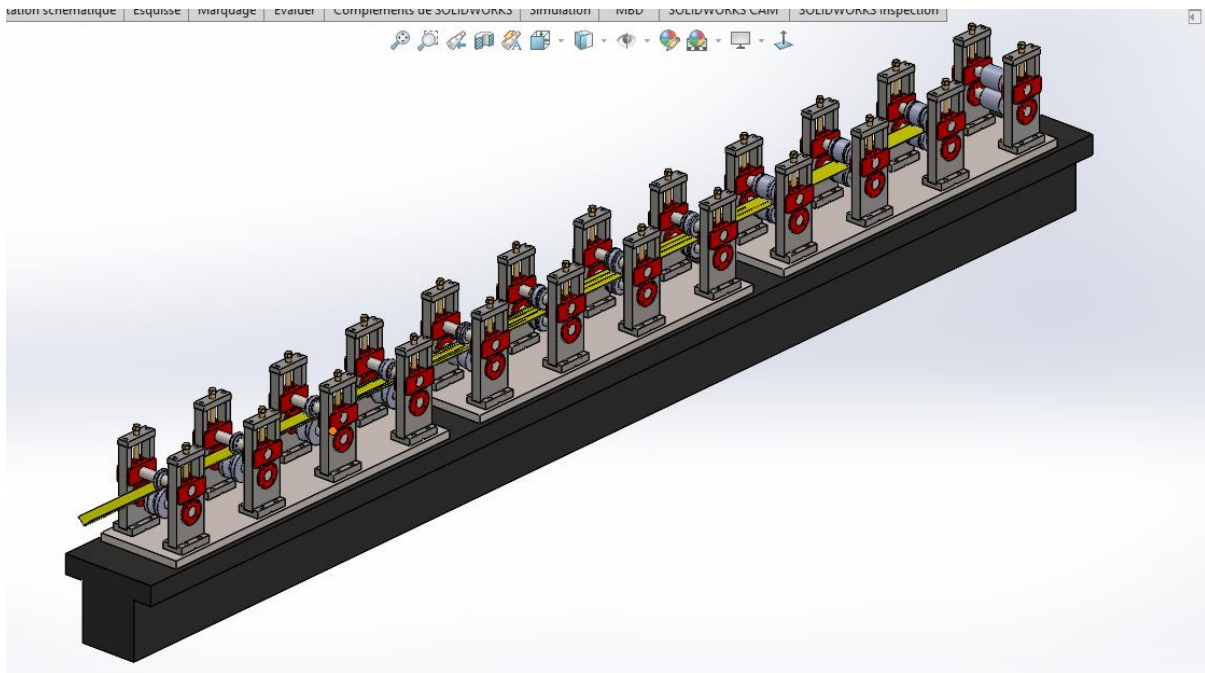


Figure III.09 : Machine de profilage 3D

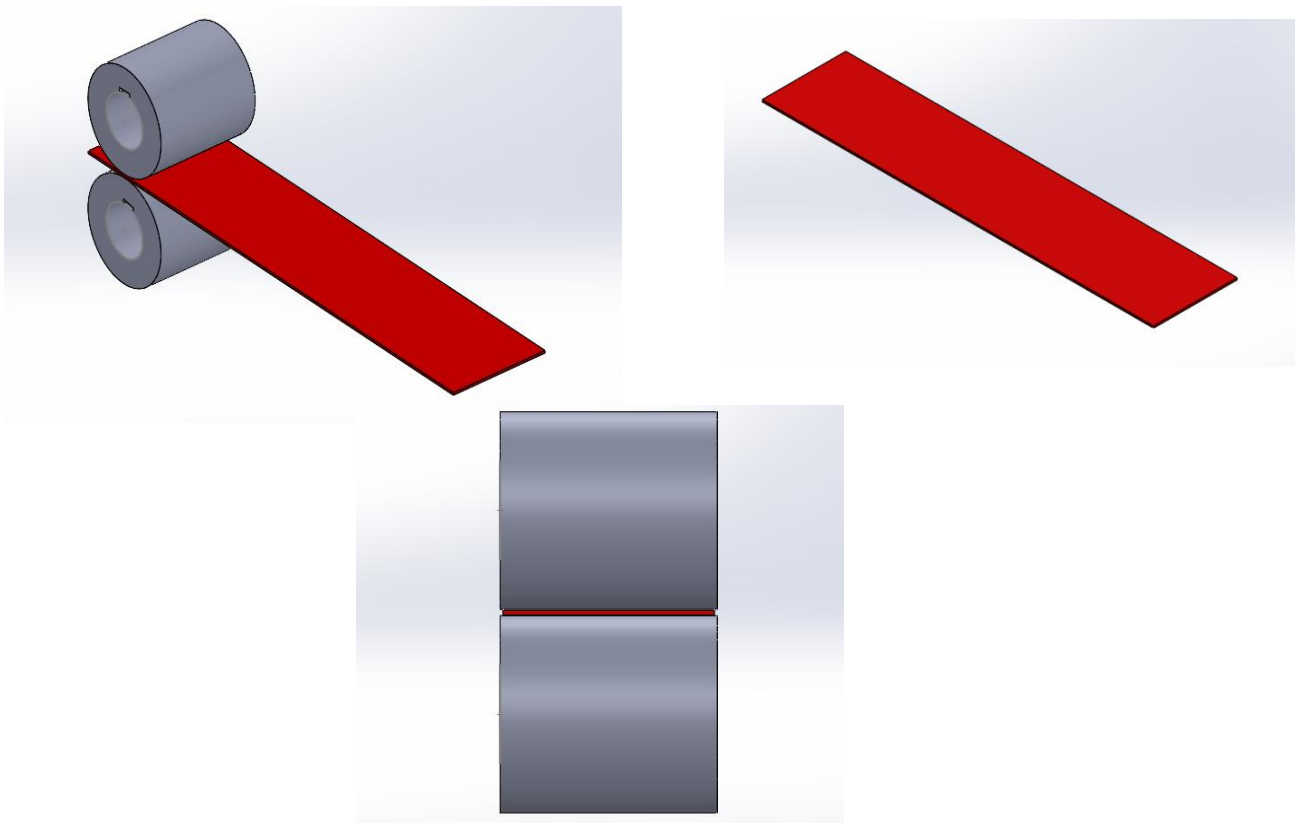
Passe 01 180°

Figure : Assemblage Passe 01

Dans une première étape, le profil a été nivelé à l'aide de deux rouleaux identiques formant un angle de 180 degrés.

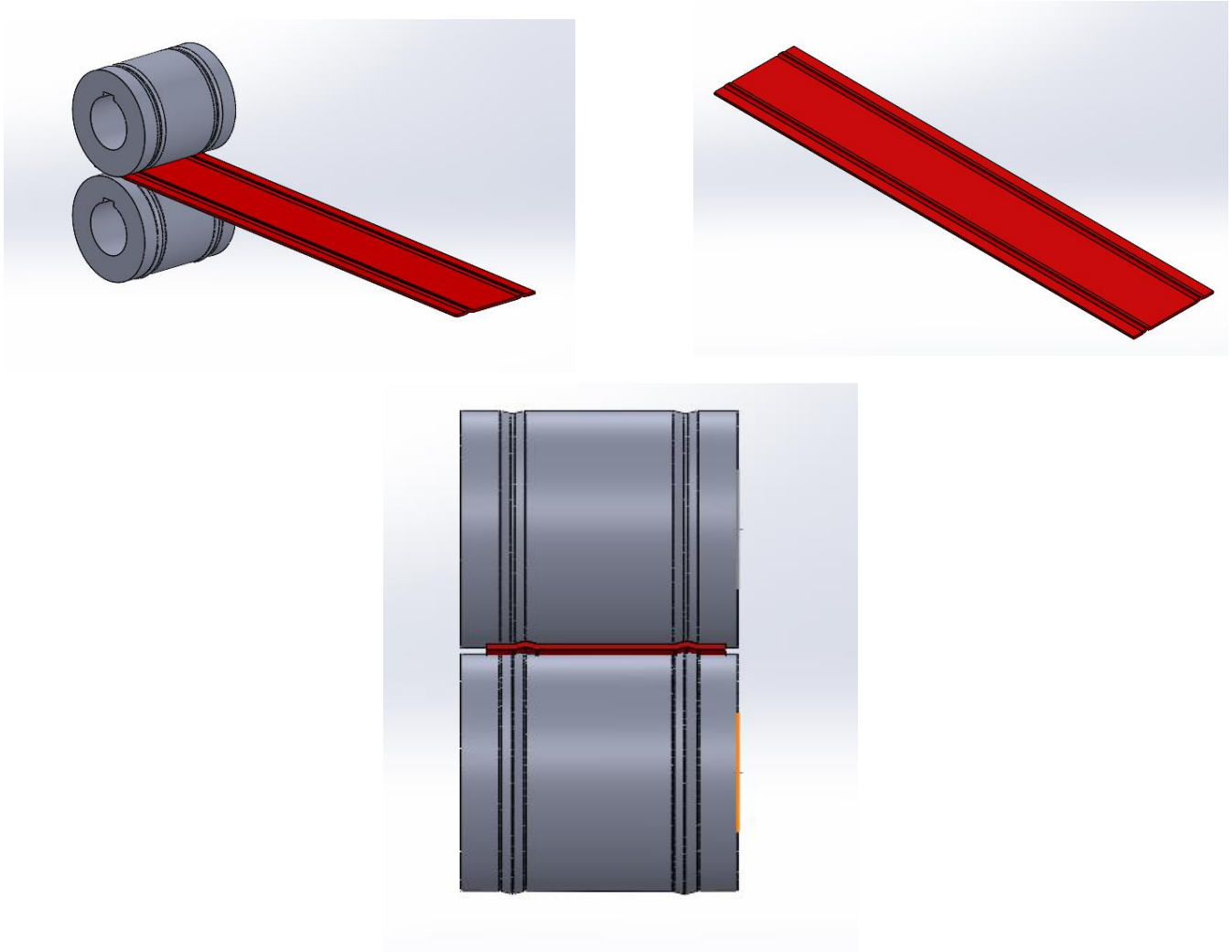
Passe 02 165°

Figure : Assemblage Passe 02

Dans une deuxième étape, le profil a changé et les premiers triangles sont apparus entre les deux poulies à un angle de 165°.

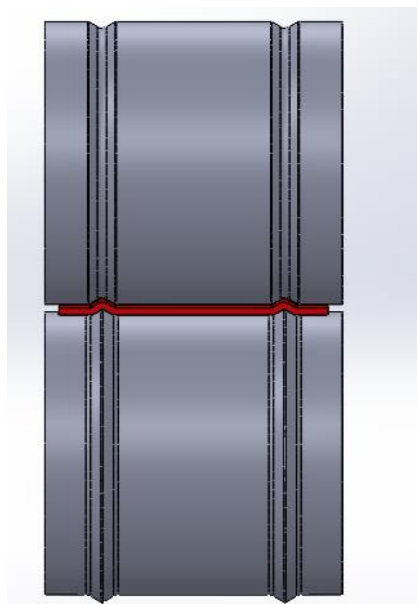
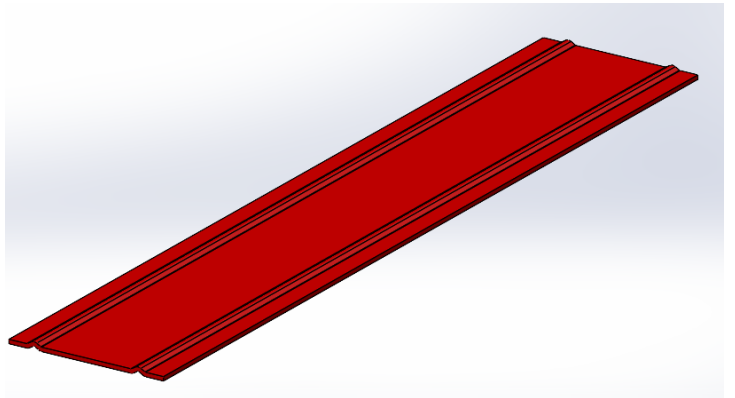
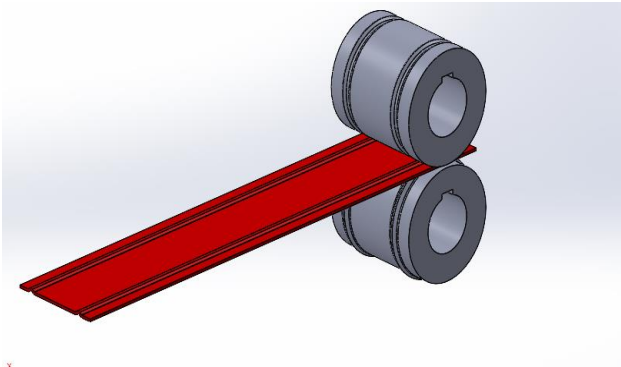
Passe 03 150°

Figure : Assemblage Passe 03

Dans la troisième étape, les triangles sont clairement visibles par deux autres rouleaux a 150°

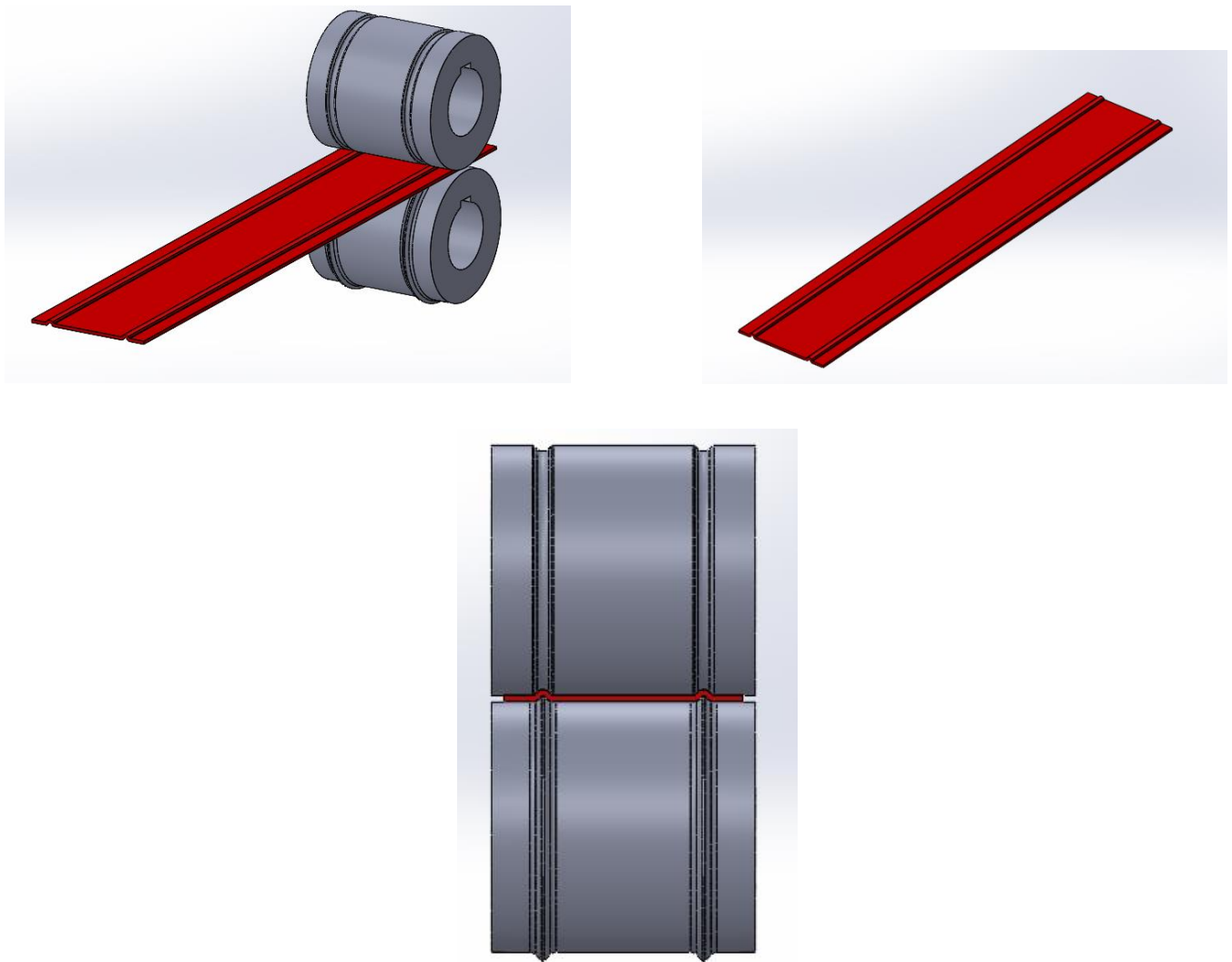
Passe 04 135°

Figure : Assemblage Passe 04

Dans la quatrième étape, la construction des angles extérieurs du profil est achevée à 135 degrés.

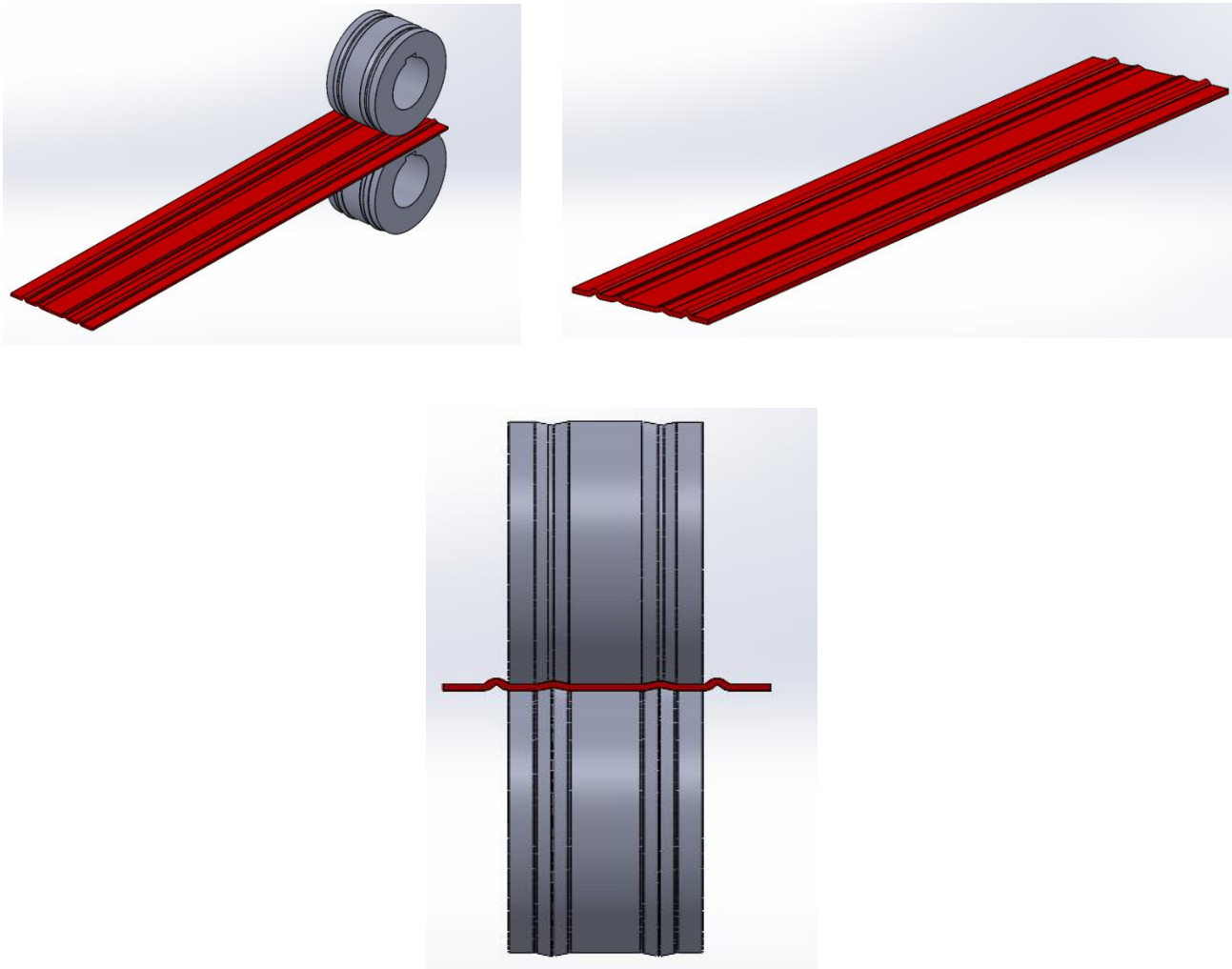
Passe 05 165°

Figure : Assemblage Passe 05

La cinquième étape consiste à déterminer les angles intérieurs et à projeter les angles intérieurs du triangle à 165 degrés.

Passe 06 150°

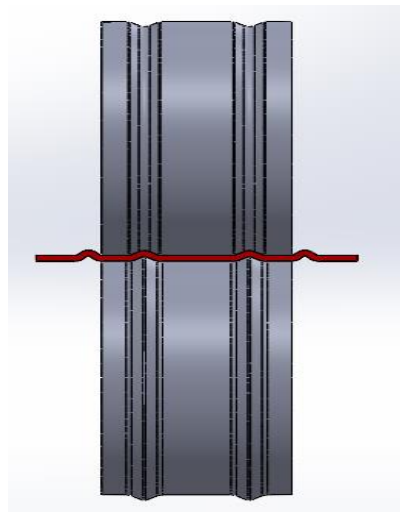
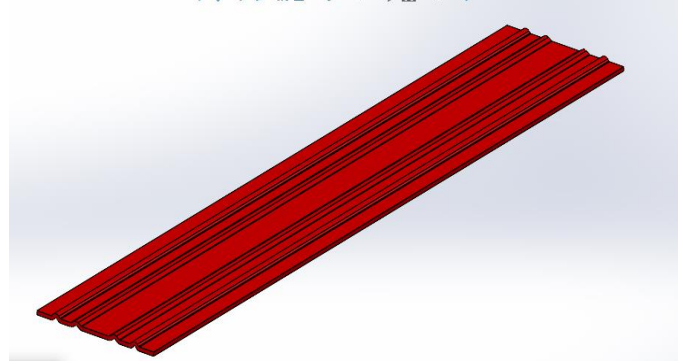
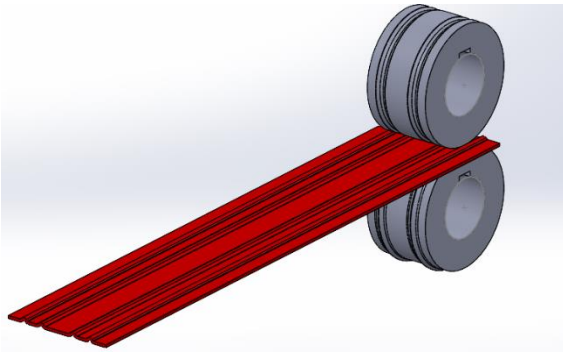


Figure : Assemblage Passe 06

Étape six : Les angles intérieurs deviennent clairement visibles à 150 degrés.

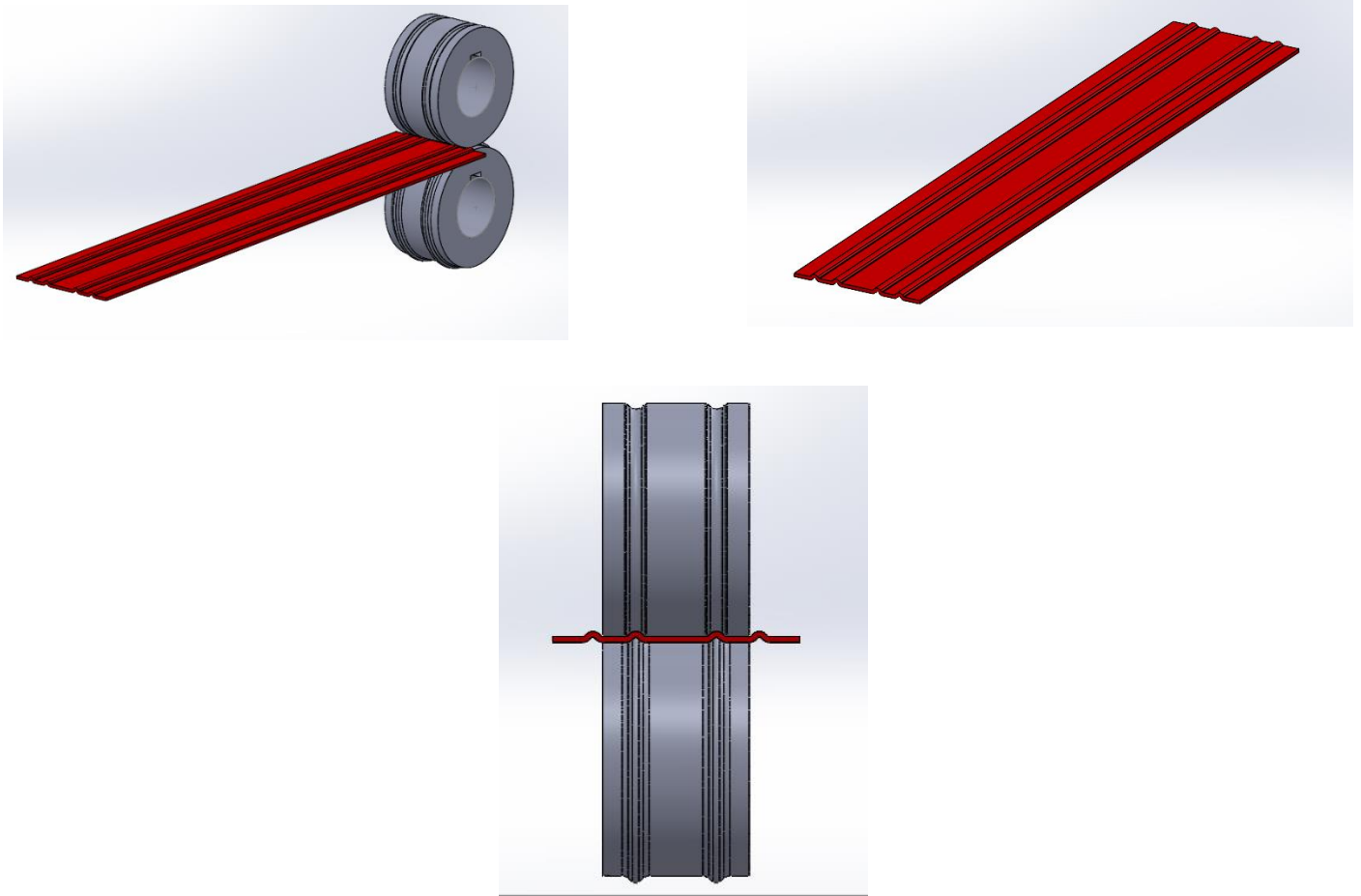
Passe 07 135°

Figure : Assemblage Passe 07

La septième étape consiste à achever la formation des angles des triangles à 135 degrés, après quoi commence le processus de cintrage du profil.

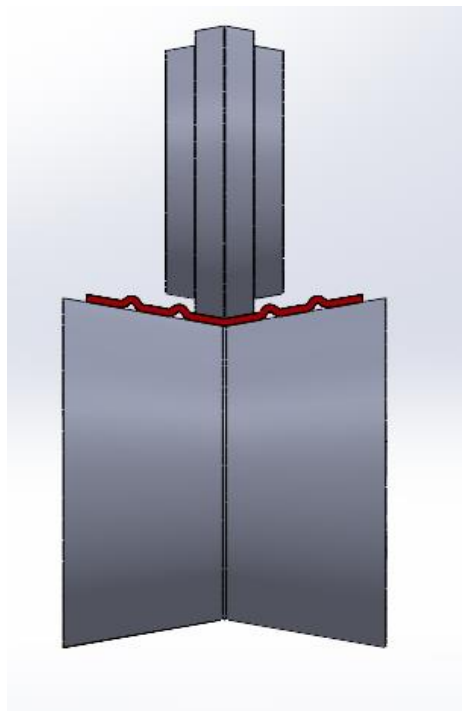
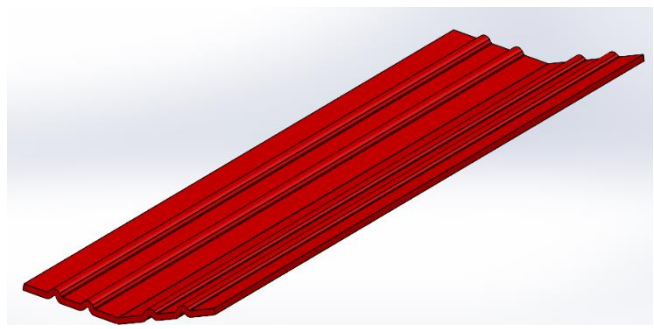
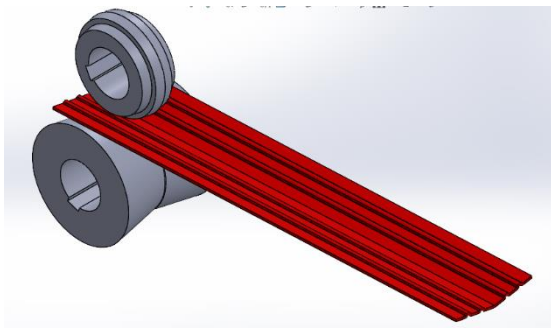
Passe 08 160°

Figure : Assemblage Passe 08

Dans la huitième étape, nous passons au pliage du profil à 165 degrés.

Passe 09 140°

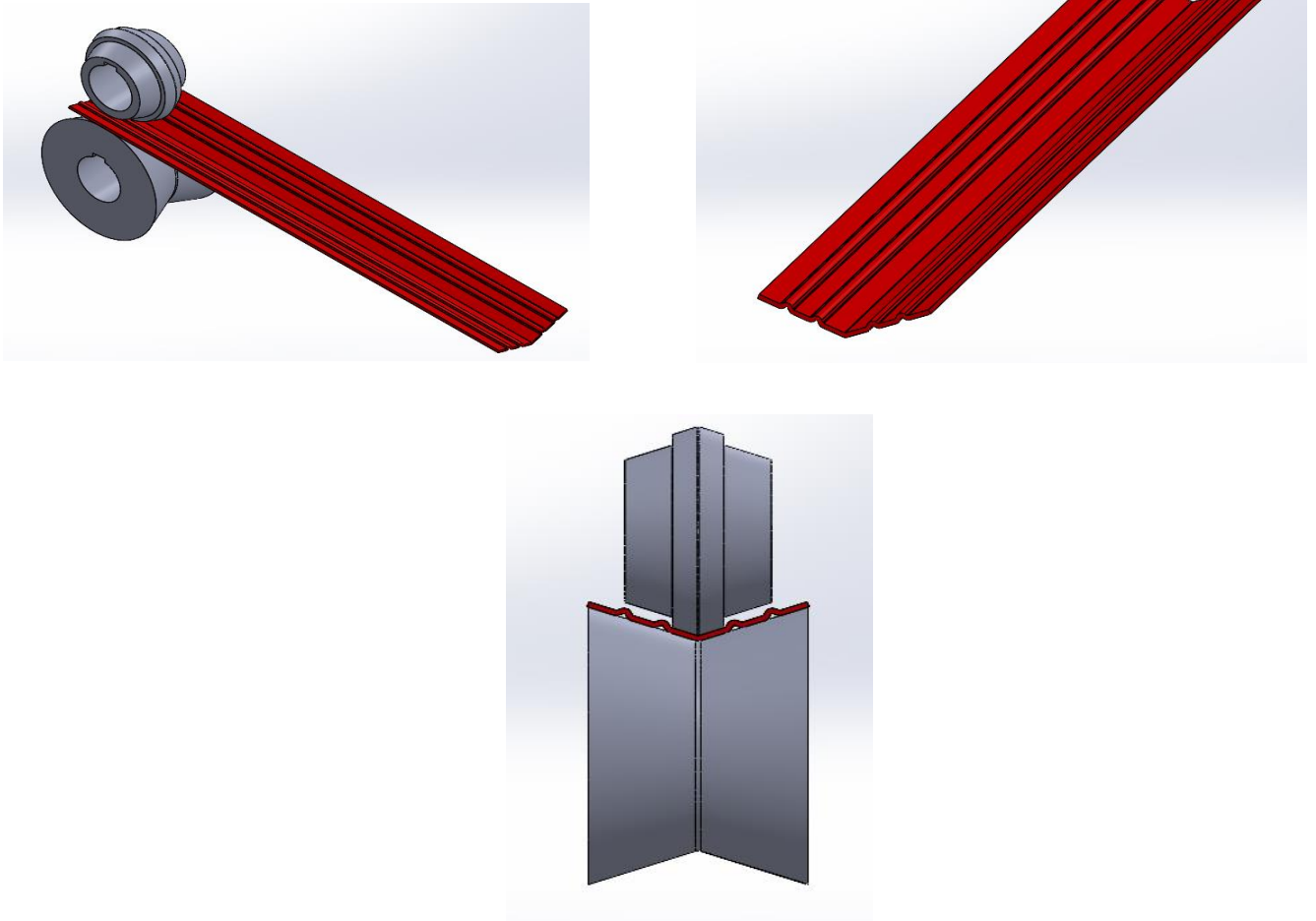


Figure : Assemblage Passe 09

Étape neuf : Courbure progressive du profil pour atteindre un angle de 150 degrés.

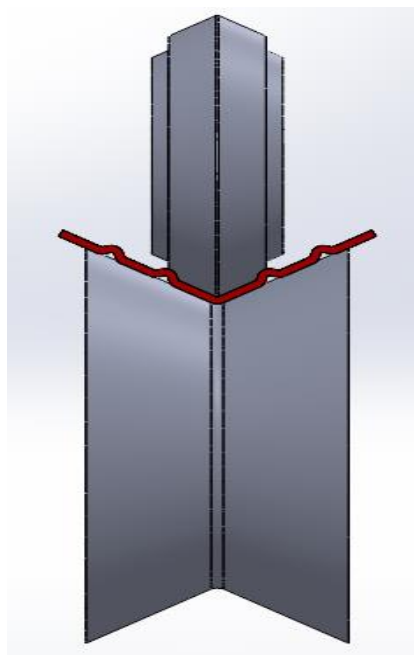
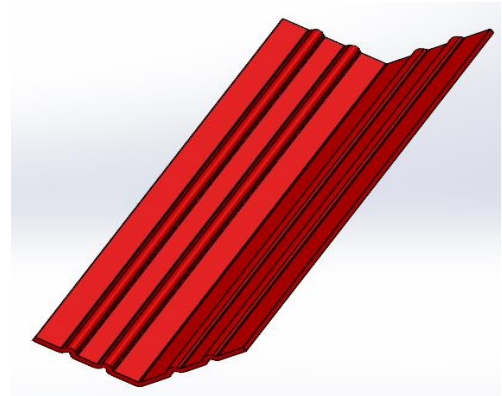
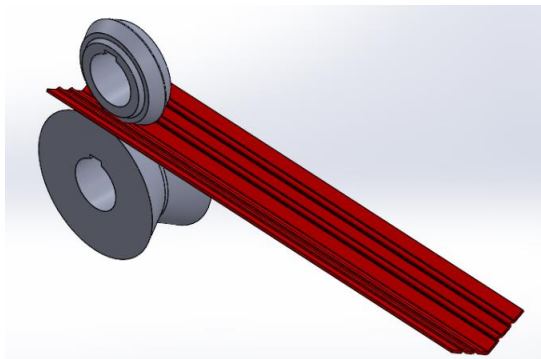
Passe 10 120°

Figure : Assemblage Passe 10

Étape dix : Pliez le profil pour atteindre un angle de 120 degrés.

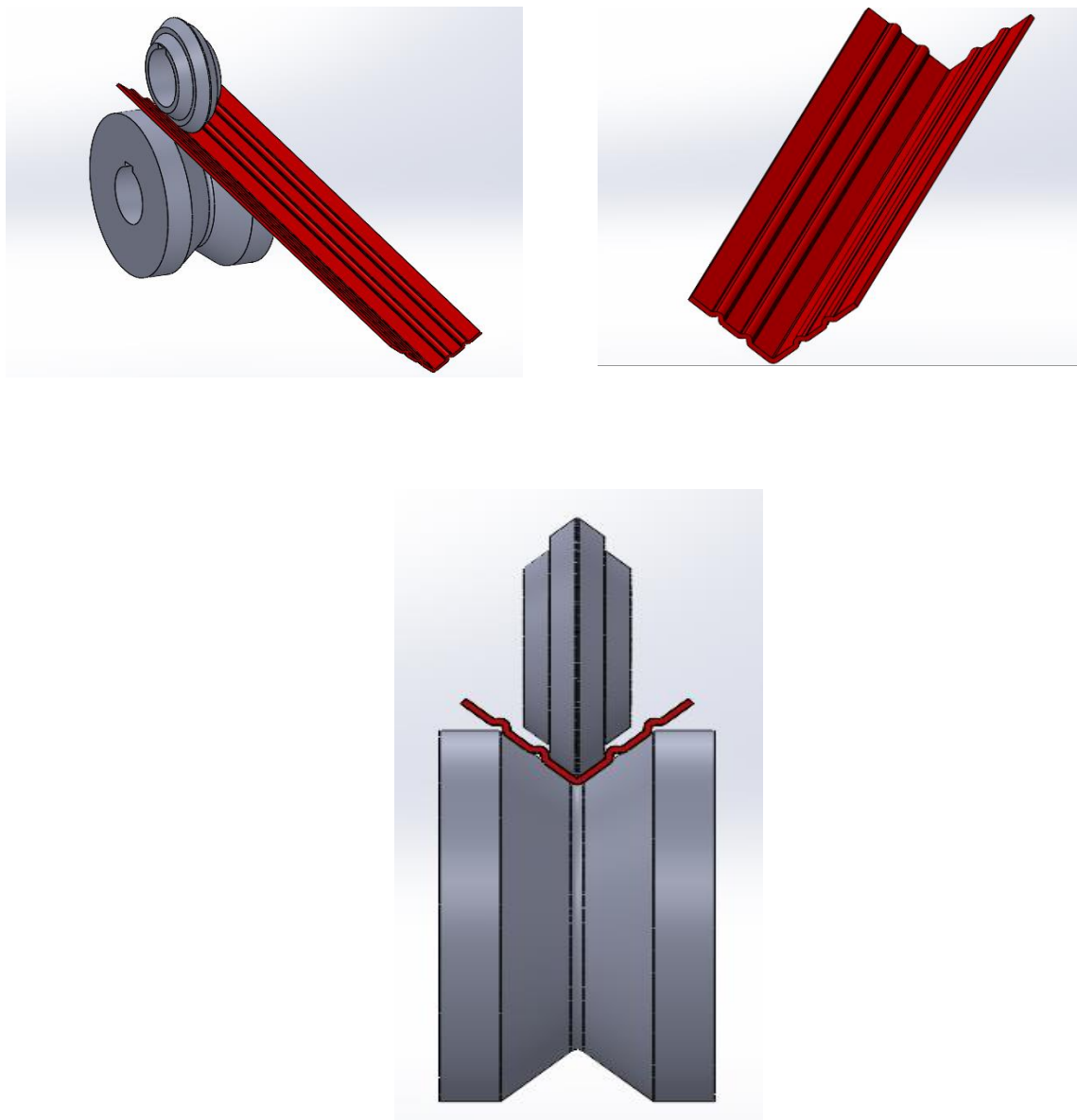
Passe 11 100°

Figure : Assemblage Passe 11

Onzième étape : Pliez le profil pour atteindre un angle de 100 degrés.

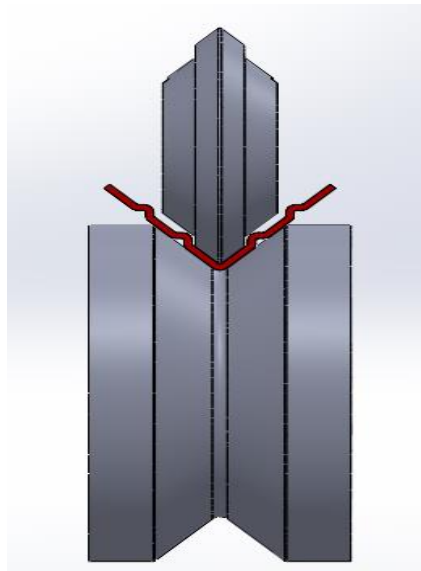
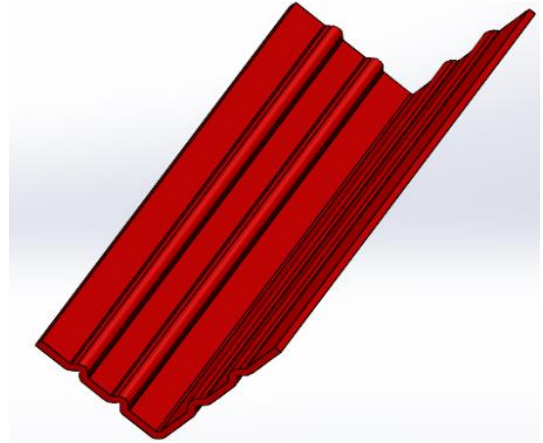
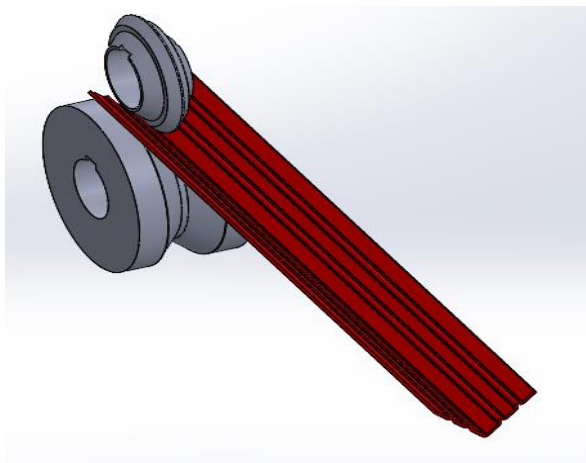
Passe 12 90°

Figure : Assemblage Passe 12

La douzième étape consiste à plier le profil à un angle de 90 degrés et à obtenir la forme finale.

3.4. Fabrication du jeu de galets

Après validation finale de la conception technique et des formes géométriques des rouleaux, il est essentiel de mettre en place un processus de fabrication précis et rigoureux. L'établissement des programmes d'usinage dépend directement des spécifications techniques et des tolérances dimensionnelles et d'usinage issues des spécifications des pièces. Ce processus vise à garantir le strict respect des dimensions fonctionnelles et de l'état de surface requis, tout en optimisant la rentabilité en minimisant les délais et les coûts de production.

Pour atteindre ces objectifs en atelier de fabrication, une méthodologie mixte de laminage-fraisage a été adoptée, divisée en deux étapes principales :

Ébauche sur un tour conventionnel : Cette étape permet d'éliminer rapidement et à moindre coût la majeure partie du métal excédentaire afin de préparer la forme initiale de la pièce.

Finition sur un tour CNC (2 axes) : Cette étape permet d'obtenir une précision dimensionnelle extrême et des tolérances serrées, et d'usiner les angles et courbes complexes des laminoirs afin de garantir la précision du profilage du métal.

3.4.1 Gamme d'usinage «Passe 12 inf»

➤ Informations générales

Désignation : Galet de profilage inférieur

Matière recommandée : Acier allié de haute qualité, résistant à la corrosion et aux pressions soudaines(**Z200C12**).

Type de brut : tige cylindrique $\varnothing 145 \times 85$ mm

Machines utilisées

- Scie à ruban
- Tour parallèle conventionnel
- Tour CNC 2 axes

Dessin de définition du galet (Passe 12 Inf)

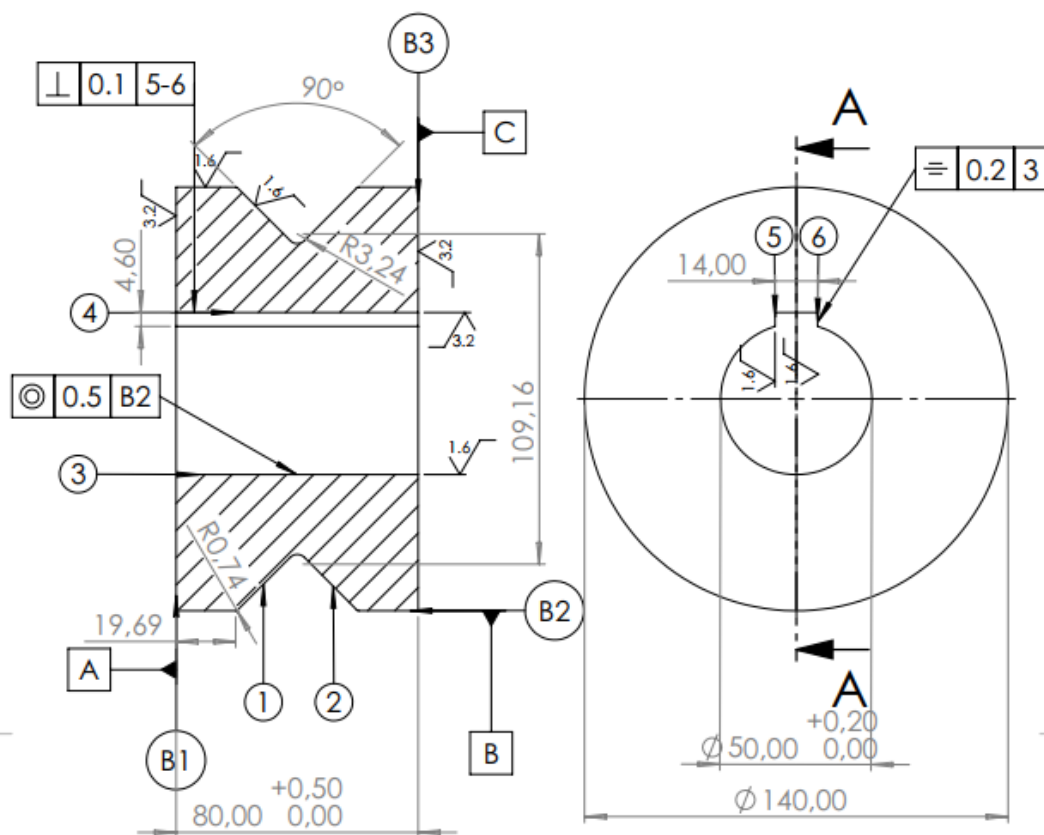


Figure III.10: dessin de définition de galet inférieur (Passe 12)

➤ Tableau de gamme d'usinage de galet

. Gamme d'usinage sur tour parallèle conventionnel

N° Phase	Désignation opération	Machine	Outils	Contrôle
10	Débit du brut $\varnothing 145 \times 85$	Scie à ruban	Lame bi-métal	Longueur brute et Planéité
20	Dressage face B	Tour parallèle	Outil à dresser carbure	Planéité
30	Retournement + dressage face 1		Outil à dresser	Longueur 80.5 mm
40	Pointage		Foret à centrer	Visuel
50	Perçage ébauche		Forets $\varnothing 20$ puis $\varnothing 40$	Diamètre
60	Alésage ébauche $\varnothing 50$		Barre d'alésage	$\varnothing$ intérieur
70	Chariotage extérieur		Outil à charioter $\varnothing 141$	$\varnothing$ extérieur
80	Pré-usinage des profils		Outil de forme	Contrôle gabarit laisser 0.5 mm de surépaisseur pour finition CNC

N° Phase	Désignation opération	Machine	Outils	Contrôle
90	Préparation des angles 90° et 135°		Outil orientable	Rapporteur
100	Chanfreins et ébavurage	Ajustage	Outil à chanfreiner	Visuel
110	Contrôle intermédiaire	Méetrologie	Micromètre	Validation

Gamme d'usinage sur tour CNC

120	Dressage finition	Tour CNC 2 axes	Outil CNMG	Longueur finale 80 ±0.05
130	Finition diamètre extérieur		CNMG finition	Micromètre Ø140 ±0.05
140	Finition alésage		Barre finition	Alésomètre Ø50H7
150	Usinage angle 90°		Outil profilage	Rapporteur
160	Usinage angle 135° et rayons R3.24 et R0.74		Outil profilage	Contrôle géométrique
170	Finition surface fonctionnelle		Plaquette finition	Rugosité
180	Chanfreins 0.5×45°		Outil chanfrein	Visuel
190	Ébavurage final	Ajustage	Manuel	Visuel
200	Contrôle final complet	Méetrologie	Méetrologie	Validation finale

3.4.2. Gamme d'usinage (Passe 12 SUP)

➤ Informations générales

Désignation : Galet de profilage supérieur

Matière recommandée : Acier allié de haute qualité, résistant à la corrosion et aux pressions soudaines(**Z200C12**).

Type de brut : tige cylindrique Ø110 × 40 mm

Machines utilisées

- Scie à ruban
- Tour parallèle conventionnel
- Tour CNC 2 axes

Dessin définition de galet

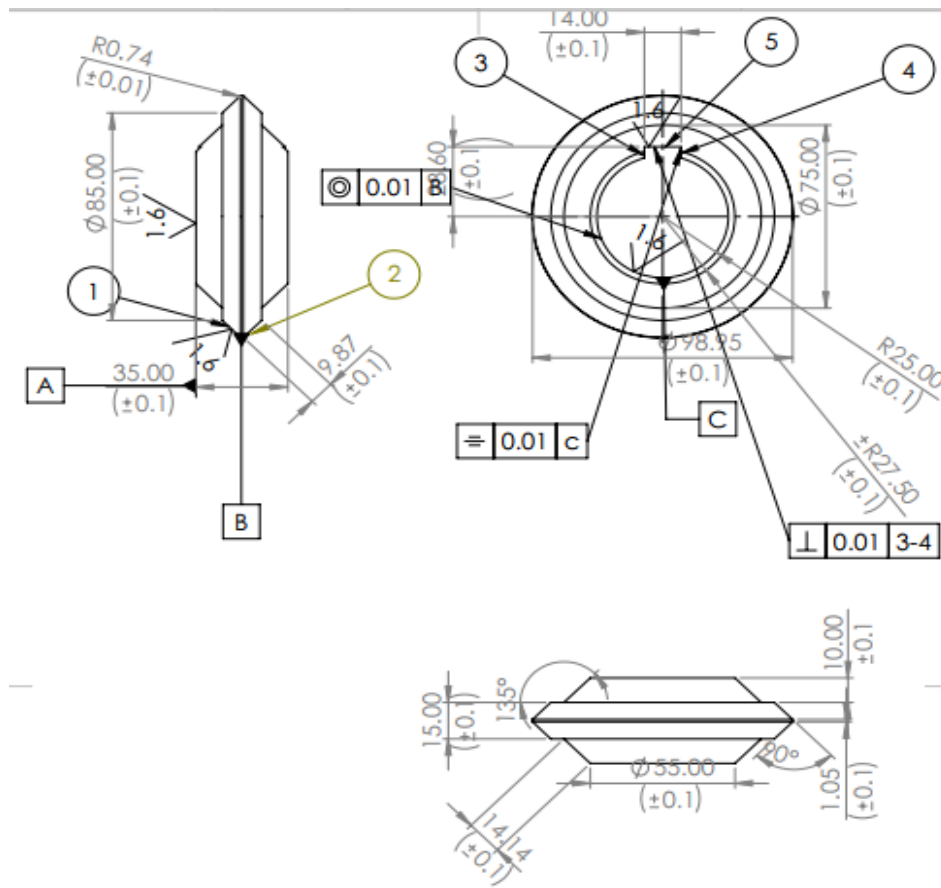


Figure VIII.11 : dessin de définition de galet supérieur (Passe 12)

➤ Tableau de gamme d'usinage de galet

. Gamme d'usinage sur tour parallèle conventionnel

N° Phase	Désignation opération	Machine	Outils	Contrôle
10	Débit du brut $\varnothing 110 \times 40$	Scie à ruban	Lame bi-métal	Longueur brute
20	Dressage face 1	Tour parallèle	Outil à dresser carbure	Planéité
30	Retournement + dressage face 2		Outil à dresser	Longueur 55.5 mm
40	Pointage		Foret à centrer	Visuel
50	Perçage ébauche		Forets $\varnothing 20$ puis $\varnothing 40$	Diamètre
60	Alésage ébauche $\varnothing 50$		Barre d'alésage	$\varnothing$ intérieur
70	Chariotage extérieur		Outil à charioter	$\varnothing$ extérieur
80	Pré-usinage des profils		Outil de forme	Contrôle gabarit
90	Préparation des angles 90° et 135°		Outil orientable	Rapporteur
100	Chanfreins et ébavurage	Ajustage	Outil à chanfreiner	Visuel
110	Contrôle intermédiaire	Méetrologie	Micromètre	Validation

. Gamme d'usinage sur tour CNC

N° Phase	Opération	Machine	Outil CNC	Contrôle
120	Dressage finition	Tour CNC 2 axes	Outil CNMG	Longueur finale
130	Finition diamètre extérieur		CNMG finition	Micromètre
140	Finition alésage		Barre finition	Alésomètre
150	Usinage angle 90°		Outil profilage	Rapporteur
160	Usinage angle 135°		Outil profilage	Contrôle géométrique
170	Finition surface fonctionnelle		Plaquette finition	Rugosité
180	Chanfreins $0.5 \times 45^\circ$		Outil chanfrein	Visuel

190	Ébavurage final	Ajustage	Manuel	Visuel
200	Contrôle final complet	Métrologie	Métrologie	Validation finale

3.4.3. Gamme d'usinage-pièce << Arbre de Transmission >>

➤ Informations générales

Désignation de la pièce :

Arbre de Transmission

Matière recommandée :

L'acier 42CD4 (42CrMo4)

Type de brut :

Rond laminé ou forgé Ø55 x 365 mm

Machines utilisées :

- Scie à ruban
- Tour parallèle conventionnel
- Tour CNC 2 axes
- Fraiseuse (pour rainure)

Dessin définition d'Arbre de Transmission

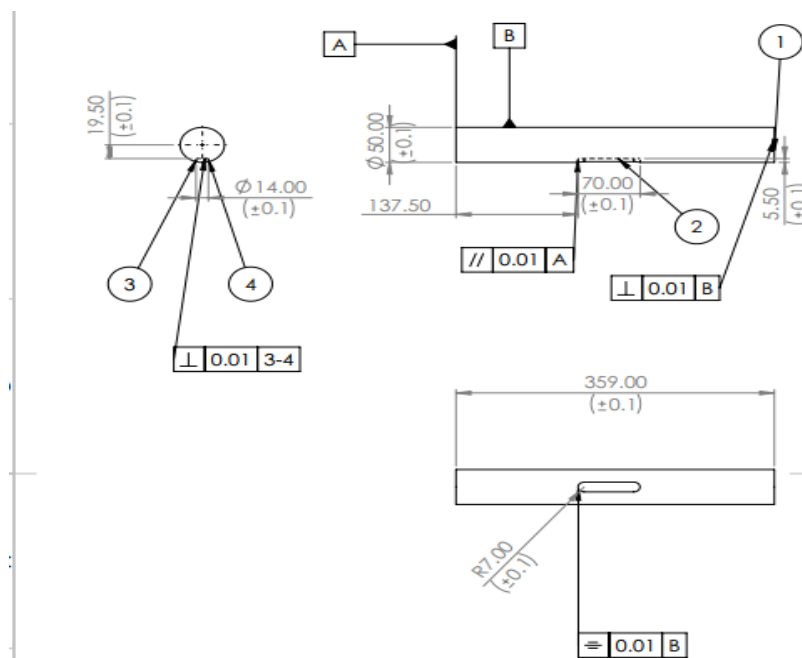


Figure III.12: dessin de définition d'arbre

➤ Tableau de gamme d'usinage d'arbre

. Gamme d'usinage sur tour parallèle conventionnel

N° Phase	Désignation opération	Machine	Outils	Contrôle
10	Débit du brut Ø55 × 365 mm	Scie à ruban	Lame bi-métal	Mètre ruban Réglet
20	Dressage de la face A	Tour parallèle	Outil à dresser carbure	Planéité
30	Retournement + Dressage face B		Outil à dresser	Longueur brute ébauche
40	Pointage axial des deux cotes		Foret à centre	Visuel
50	Chariotage extérieur (ébauche)		Outil charioter Ø 52 mm	Ø extérieur (2mm)
60	Pre-usinage des épaulements		Outil de forme	Contrôle gabarit laisser 0.5 mm pour finition CNC
70	Chanfreins et ébavurage	Ajustage	Outil a chanfreiner	Visuel
80	Contrôle intermédiaire	Métrieologie	Micromètre	Validation

. Gamme d'usinage sur tour CNC

N° Phase	Operation	Machine	Outils	Contrôle
90	Fraisage rainure de clavette (70x14x5.5)	Fraiseuse	Fraise 2 tailles	Pied à coulisse / Jauge
100	Ébavurage final	Ajustage	Manuel	Visuel
110	Contrôle final complet	Métrieologie	Métrieologie	Validation finale

Gamme d'usinage de la rainure de clavette

N° Phase	Opération	Machine	Outil CNC	Contrôle
120	Dressage finition	Tour CNC 2 axes	Outil CNMG	Longueur finale
130	Finition diamètre extérieur		CNMG finition	Micromètre Ø50 (m6 ou k6)
140	Usinage des épaulements		Outil profilage	Contrôle géométrique
150	Finition surface fonctionnelle		Plaquette finition	Rugosité
160	Chanfreins 0.5×45°		Outil chanfrein	Visuel

3.4 coût de fabrication

Fabriquer quelque chose demande de payer pour chaque étape, depuis le début jusqu'à ce que l'objet soit prêt à servir son usage. Quand on considère si un projet peut exister vraiment des dépenses, ceux-ci donnent une réponse claire sur sa viabilité concrète et chiffrée.

Fabriquer quelque chose demande souvent plusieurs types de dépenses. Parmi celles - ci se trouvent les matériaux utilisés pour produire l'objet. Les machines qui taillent ou façonnent prennent aussi une part dans le total. Chaque personne travaillant sur la chaîne ajoute un montant au compte final. Même l'électricité nécessaire pèse sur le bilan financier global. Sans oublier ce que coûte l'usage régulier des outils industriels. Connaître chaque poste avec exactitude changement tout. Cela aide à ajuster comment on conçoit avant même de commencer. Moins gaspiller devient possible quand on voit où l'argent passe. Le produit fini peut alors mieux tenir tête aux autres sur le marché.

L'étude examine combien coûte la fabrication des pièces clés du système de profilage : les galets, les arbres, ainsi que le profil métallique conçu spécifiquement. Grâce à cela, sur mesure l'effet sur le budget d'une telle solution, sans jamais sacrifier la solidité attendue ni nuire à son usage en milieu industriel.

3.4.1 Cout des galets

Des galets formés dans un acier spécial très appelé **Z200C12**. Ce matériau tient bien face aux frottements répétés sans s'abimer vite.

Pour évaluer combien cela coûte à produire, on suit une série d'étapes précises les unes après les autres.

➤ **Calcul du volume du galet**

$$V = \frac{\pi D^2}{4} L$$

D : diamètre du galet (mm)

L : largeur du galet (mm)

$$V = \frac{\pi \times (145)^2}{4} \times 85$$

$$V = 1.40 \times 10^6 (\text{mm}^3) = 0.00140 (m^3)$$

➤ **Calcul de la masse**

$$m = \rho \cdot V$$

ρ : Densité (7850 Kg/m³)

$$m = 7850 \times 0.00140$$

$$m = 10.99 \text{ kg}$$

➤ **Calcul du cout matière**

$$Cm = m \times Pm$$

Pm : prix du kilogramme d'acier Z200C12 (DA/kg)

$$Cm = 10.99 \times 450$$

$$Cm = 4945.5 \text{ DA}$$

➤ **Calcul du cout d'usinage**

$$Cu = Tu \times Rh$$

Tu : temps d'usinage (h)

Rh : cout horaire machine (DA/h)

$$Cu = 3 \times 2000$$

$$Cu = 6000 \text{ DA}$$

➤ **Calcul du cout traitement thermique et rectification (Ct= 2000 DA)**

Alors les couts du galet totalement :

$$Cg = Cm + Cu + Ct$$

$$Cg = 4945.5 + 6000 + 2000$$

$$Cg = 12945.5 \text{ DA}$$

Les couts de 24 galets sont :

$$C_{total} = 24 \times 12945.5$$

$$C_{total} = 310692 \text{ DA}$$

Remarque :

Tous les prix pratiqués dans le secteur et pour le suivi des produits sont des valeurs approximatives issues du marché algérien .Date : (10 /05/2026)

3.4.2 Cout de l'arbre

Les arbres assurent le support et la transmission du mouvement de rotation aux galets. Leur fabrication nécessite généralement l'utilisation d'aciers mécaniques présentant **(42CD4)** une résistance élevée aux efforts de torsion et de flexion.

L'estimation du coût de fabrication des arbres repose sur les mêmes principes que ceux appliqués aux galets. Le coût global comprend le coût du matériau ainsi que le coût des différentes opérations d'usinage telles que le tournage, le rainurage des clavettes et le filetage lorsque celui-ci est nécessaire.

➤ **Cout de matière**

$$V = \frac{\pi D^2}{4} L \quad (D= 55\text{mm} ; L= 365\text{mm})$$

$$V = 0.00087(\text{m}^3)$$

$$m = \rho \cdot V \quad (\rho = 7850 \text{ Kg/m}^3)$$

$$m = 6.8(\text{kg})$$

$$Cm = m \times Pm \quad (Pm = 380 \text{ DA})$$

$$Cm = 2600 \text{ DA}$$

➤ **Calcul du cout d'usinage**

$$Cu = Tu \times Rh \quad (Tu = 2.5 \text{ h ; } Rh = 2000 \text{ DA})$$

$$Cu = 5000 \text{ DA}$$

➤ **Calcul du cout traitement thermique et rectification (Ct= 2000 DA)**

Alors les cout d'arbre totalement :

$$Ca = Cm + Cu + Ct$$

$$Ca = 2600 + 5000 + 2000$$

$$Ca = 9600 \text{ DA}$$

Les couts de 24 arbres sont :

$$Ctotal = 230400 \text{ DA}$$

3.4.3 Cout de profil 08 (S235MC)

Pour calculer le coût de fabrication du **Profil 08**, la démarche d'ingénierie mécanique s'appuie sur deux composantes principales : le **coût de la matière première** (lié directement à la laize et à l'épaisseur) et le **coût de transformation par profilage** (lié à la longueur de la ligne et à l'énergie).

➤ **Calcul du Coût de la Matière Première ($C_{matière}$):**

Pour évaluer le coût d'un mètre linéaire du Profil 08, nous appliquons les constantes physiques de l'acier de construction laminé à froid S235MC :

- Désignation normalisée : S235MC (NF EN 10149-2)
- Limite élastique minimale (R_e) : 235 MPa
- Masse volumique (ρ) : 7850 kg/m^3
- Laize développée du Profil 08 (L) : $107,55 \text{ mm} = 0,10755 \text{ m}$
- Épaisseur nominale (e) : $2,5 \text{ mm} = 0,0025 \text{ m}$

a. Volume d'un mètre linéaire (V_{1m}):

$$V_{1m} = L \times e \times 1m$$

$$V_{1m} = 0.10755 \times 0.0025 \times 1$$

$$V_{1m} = 0.00026888 \text{ m}^3$$

b. Masse Linéaire ($M_{linéaire}$):

$$M_{linéaire} = V_{1m} \times \rho = 0.00026888 \times 7850 = 2.111 \text{ Kg/m}$$

c. Formule du Coût Matière :

En se basant sur les tarifs actuels des produits plats en acier sur le marché industriel algérien pour la nuance **S235MC**, nous adoptons le coût unitaire moyen suivant :

Prix de l'acier P_{S235MC} : 160 DA / kg

$$C_{matière} = M_{linéaire} \times P_{acier} = 2.111 \times 160 = 337.76 \text{ DA/m}$$

➤ **Calcul du Coût de Transformation ($C_{transformation}$):**

Le profilage est un procédé continu à haute cadence. Le coût de transformation par mètre dépend de la vitesse de la ligne et de son coût horaire d'exploitation.

$$C_{transformation} = \frac{T_{horaire}}{60 \times V_{profilage}}$$

Où :

$T_{horaire}$: Taux horaire de la ligne de profilage (intègre l'amortissement de la machine, le salaire de l'opérateur et la consommation électrique des moteurs de 12 stations de formage).

Dans l'industrie de la transformation métallique, le taux horaire global d'une machine (**$T_{horaire}$**) s'articule autour de **4 grands postes de coûts** :

$$T_{horaire} = \text{Coût Énergie} + \text{Coût Main – d'œuvre} + \text{Coût Amortissement} + \text{Coût Maintenance}$$

$V_{profilage}$: Vitesse de défilement de la ligne (généralement entre **10 m/min** et **30 m/min** selon la complexité des nervures du Profil 08).

Simulation Numérique Industrielle (Exemple avec valeurs types du marché):

Pour ancrer cette étude dans une réalité économique concrète au sein de notre mémoire, nous injectons des valeurs moyennes du marché de la tôlerie industrielle

Hypothèses de simulation :

- Prix du S235MC (P_{S235MC}) = **160 DA / kg** (Valeur type de la tonne d'acier de bobine)
- Taux horaire de la ligne ($T_{horaire}$) = **5500 DA / heure**.
- Vitesse de la ligne ($V_{profilage}$) = **15 m/min**.

$$C_{\text{transformation}} = \frac{T_{\text{horaire}}}{60 \times V_{\text{profilage}}} = \frac{5500}{60 \times 15} = \frac{5500}{900} = 6.11 \text{ DA}$$

Le cout total est :

$$C_{\text{total}} = C_{\text{matière}} + C_{\text{transformation}}$$

$$C_{\text{total}} = 337.76 + 6.11 = \mathbf{343.87 \text{ DA/m}}$$

Afin de valider la rentabilité macro-économique de notre démarche d'optimisation, nous avons confronté nos calculs théoriques aux prix pratiqués sur le marché de détail des profilés marchands en Algérie.

- Prix moyen d'une barre commerciale de cornière de base (50x50x5 mm) de 6 m :
4000 DA / barre
- Coût linéaire réel du profil de base sur le marché :

$$C_{\text{total_base}} = \frac{4000 \text{ DA}}{6 \text{ m}} = 666.67 \text{ DA/m}$$

1. Coût d'une barre de 6 mètres du Profil 08 optimisé

En repartant du coût de revient total calculé pour le Profil 08, le coût de fabrication d'une barre équivalente de 6 mètres est de :

$$C_{\text{Barr-Profil 8}} = 343.87 \text{ DA/m} \times 6 \text{ m} = 2\,063.22 \text{ DA}$$

2. Tableau de synthèse économique pour une barre de 6 mètres

COMPARAISON ÉCONOMIQUE POUR UNE BARRE DE 6 MÈTRES			
Indicateur Économique	U.M	Cornière de Base	Profil 08
Epaisseur	mm	Commerciale 5mm	Optimisé 2.5
Masse d'une barre de 6 m	kg	23.55	12.67
Coût au mètre linéaire	DA/m	666.67	343.87
Prix d'une barre de 6 m	DA	4 000.00	2 063.22
Gain Économique par barre	DA	0	1 936.78
Pourcentage d'économie global	%		-48.42%

En intégrant les réalités du marché algérien, l'achat d'une cornière standard de 5 mm revient à **4 000 DA** la barre de 6 m. La fabrication sur site du **Profil 08** à partir d'une bobine de nuance supérieure **S235MC** ne revient qu'à **2 063.22 DA** par barre (matière et usinage compris).

Grâce à cette préconception mécanique, l'entreprise économise **1 936.78 DA par barre de 6 mètres**. À l'échelle d'une charpente métallique légère ou d'une ligne de production nécessitant 1 500 barres, **le gain net s'élève à près de 2,9 millions de DA**, prouvant de manière irréfutable l'impact positif de l'optimisation géométrique dans l'industrie nationale.

3.5 Conclusion

En conclusion, ce troisième chapitre nous a permis de dépasser la phase de conception virtuelle et de procéder à la vérification industrielle et économique du profilé métallique amélioré (section 08), garantissant ainsi la faisabilité pratique d'une fabrication en interne.

Dans un premier temps, une analyse approfondie du laminoir existant et l'application de modèles expérimentaux issus de l'ouvrage de référence (George T. Halmos) nous ont permis d'adopter et de mettre en place une configuration machine à 12 stations de formage (24 cylindres de laminage), espacées de 500 mm et dotées d'un arbre de support de 50 mm de diamètre en acier 42CrMo4. De plus, les résultats des simulations numériques par éléments finis de la cinétique de formage (déformation progressive de la bande d'acier S235MC) ont démontré qu'un gradient angulaire constant de 15° par station permet d'obtenir la géométrie finale du profilé sans défauts de fabrication majeurs, tels que des ondulations de bord ou des concentrations de contraintes excessives.

Côté production, le procédé d'usinage hybride (tournage conventionnel pour l'ébauche et tournage CNC pour la finition de haute précision) garantit le strict respect des tolérances dimensionnelles et géométriques requises pour les barres d'acier Z200C12, tout en optimisant la durée du cycle de traitement thermique (trempe) à 45 minutes précises.

Enfin, l'étude économique comparative, basée sur les conditions et les réalités du marché algérien, a révélé un retour sur investissement substantiel. La réduction du poids du profilé par l'intégration de renforts triangulaires a permis de diminuer le coût au mètre linéaire de 666,67 DZD (pour les cornières commerciales standard) à 343,87 DZD (pour le profilé innovant 08), soit une économie globale de 48,42 % par barre de 6 mètres.

Chapitre 4 :

Validation, exploitation et perspectives

4.1. Comparaison entre l'ancien et le nouveau profil :

Dans cette section, nous établissons une comparaison technique directe entre l'ancien profil (Cornière standard du commerce en acier L 50×50×5 mm) et le nouveau profil développé à partir d'une tôle optimisée en acier S235MC. L'objectif est d'évaluer l'impact géométrique et mécanique de la redistribution de la matière induite par l'opération de profilage

4.1.1. Comparaison géométrique et dimensionnelle

Paramètres Géométriques	Ancien Profil (Cornière L)	Nouveau Profil	Impact / Gain Technique
Forme de La section	En L (Angel droit)	En L avec triangle	Meilleure inertie face a la torsion
Dimensions globales	50*50 mm	50*50 mm	
Epaisseur de La tôle	5.0 mm	2.5 mm	Réduction de 50% de l'épaisseur
Distribution de La matière	Concentrée sur deux axes	Repartie sur plusieurs plans	Optimisation du moment d'inertie
Poids de La structure	Élevé (Epaisseur 5 mm)	Très léger (Epaisseur 2.5 mm)	Gain de masse hautement significatif

Tableau IV.01 : Comparaison géométrique et dimensionnelle

4.1.2. Synthèse des caractéristiques mécaniques et chimiques du matériau

Le nouveau profil est conçu à partir d'un acier non allié à usage général S235MC, optimisé pour le formage à froid et le profilage. Le tableau suivant récapitule les propriétés chimiques et mécaniques fondamentales issues des fiches techniques :

Propriétés / Paramètres	Valeur Spécifiée	Unité
Composition chimique (Carbone C)	0.12%	Max % de masse
Composition chimique (Manganèse Mn)	1.20%	Max % de masse
Module d'élasticité (E)	$2.1 \cdot 10^{11}$	MPa
Coefficient de Poisson (ν)	0.394	/
Masse volumique	7850	Kg/m ³

Limite élastique a la traction (Re)	235	MPa
Résistance à la rupture / traction (Rm)	360-510	MPa

Tableau IV.02 : les propriétés chimiques et mécaniques fondamentales

4.1.3. Analyse du comportement mécanique lie a la forme

1. Gain de Masse et Économie de Matière :

L'ancien profil utilise une épaisseur de 5.0 mm, ce qui alourdit considérablement la structure. Le passage à un nouveau profil d'une épaisseur de seulement 2.5 mm (S235MC) permet un allègement majeur de la structure tout en réduisant considérablement la consommation de matière première brute.

2. Optimisation de la Rigidité (Moment d'Inertie) :

Bien que l'épaisseur soit réduite de 50%, la géométrie du nouveau profil introduit plusieurs plis successifs. Ces plis agissent comme des raidisseurs naturels structurels. Ils déplacent le matériau loin de l'axe neutre,

Ce qui augmente considérablement le moment d'inertie de la section et compense la diminution d'épaisseur.

3. Résistance au Flambement et à la Torsion :

La cornière en L (ancien profil) présente une section ouverte hautement vulnérable aux forces de torsion et au flambement asymétrique. Le nouveau profil, de par sa géométrie symétrique et sa configuration semi-fermée en chapeau, offre une rigidité tensionnelle nettement supérieure, assurant une excellente stabilité sous contraintes d'exploitation (flexion et cisaillement).

4.2 Validation mécanique du nouveau profil

Dans la conception de structures métalliques allégées, l'étape de validation mécanique s'avère absolument cruciale. Ce processus permet de passer au crible le comportement structurel de la pièce face à diverses contraintes opérationnelles, garantissant ainsi qu'elle remplit toutes ses fonctions et exigences de résistance malgré son poids réduit.

Pour ce faire, nous avons mis en œuvre une modélisation numérique approfondie via le logiciel SolidWorks Simulation. Cette démarche scientifique vise à cartographier précisément la distribution des contraintes, à évaluer les déformations potentielles et à valider la stabilité globale du profil innovant qui a été développé.

Géométriquement, l'élément sous étude se présente comme un profilé en L affichant des dimensions de 50 × 50 mm pour une épaisseur de 2.5 mm, entièrement façonné dans un acier de nuance S235MC. La grande particularité de cette nouvelle géométrie réside dans l'incorporation stratégique de formes ondulées et de nervures longitudinales. Ces modifications morphologiques ont été expressément pensées pour maximiser la rigidité mécanique du composant tout en contenant strictement l'augmentation de sa masse globale.

4.2.1 Propriétés du matériau

Le choix s'est porté sur l'acier S235MC, un matériau de référence particulièrement plébiscité dans les opérations de formage à froid en raison de sa haute formabilité, de son excellente aptitude au pliage et de ses performances mécaniques fiables.

Les caractéristiques intrinsèques retenues pour ce matériau sont répertoriées ci-dessous :

- Module d'Young : 210 GPa
- Limite élastique : 235 MPa
- Coefficient de Poisson : 0.3
- Masse volumique : 7850 kg/m³

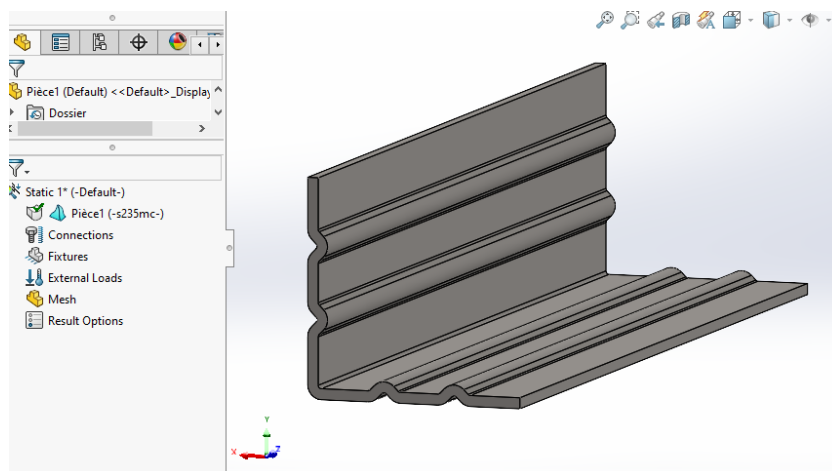


Figure IV.01 : nouveau cornière avec (S235MC)

4.2.2 Mise en place de l'étude numérique

Pour modéliser fidèlement les réactions mécaniques de la structure, nous avons configuré une étude statique linéaire reposant sur la méthode des éléments finis (FEA). Conditions aux limites : Le profilé subit un encastrement parfait à l'une de ses extrémités, alors qu'une charge verticale vient solliciter l'extrémité libre opposée, simulant ainsi les conditions réelles d'exploitation opérationnelle.

Discrétisation (Maillage) : Le modèle numérique emploie un maillage tétraédrique. Une attention particulière a été portée aux zones sensibles — notamment les plis, les angles et les zones nervurées — où la maille a été localement affinée afin de garantir une convergence optimale et une précision accrue des résultats calculés.

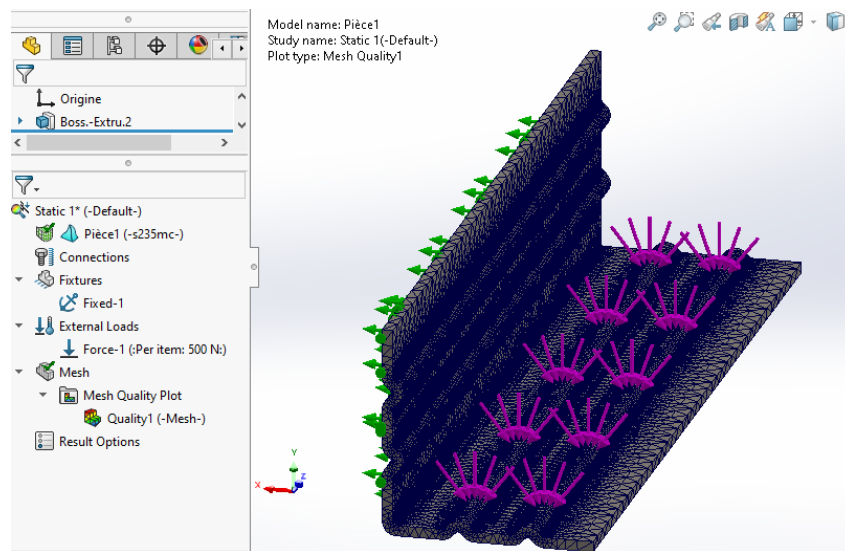


Figure IV.02 : Maillage contrainte de profil

4.2.3 Analyse des contraintes mécaniques

L'évaluation de l'état de contrainte de la structure s'appuie sur le critère de la contrainte équivalente de Von Mises, une approche standard et éprouvée pour caractériser la réponse des métaux sous des chargements combinés. La validation de la tenue mécanique impose que la contrainte de Von Mises maximale calculée demeure strictement inférieure à la limite d'élasticité de notre acier :

$$\sigma_{VM} < Re$$

σ_{VM} : La contrainte équivalente de Von Mises

Re : La limite d'élasticité d'un matériau

L'examen de la cartographie des contraintes révèle que les pics de sollicitation se concentrent essentiellement au droit des zones de pliage ainsi que dans les ruptures de continuité géométrique. Néanmoins, toutes les valeurs maximales relevées se situent bien en deçà de la limite élastique de l'acier S235MC, apportant la preuve rigoureuse que le profilé tolère parfaitement les charges de calcul sans subir la moindre déformation plastique irréversible. Par ailleurs, l'introduction des nervures longitudinales joue pleinement son rôle en homogénéisant la distribution des efforts sur toute la longueur de la pièce, atténuant de fait les phénomènes néfastes de concentration locale de contraintes.

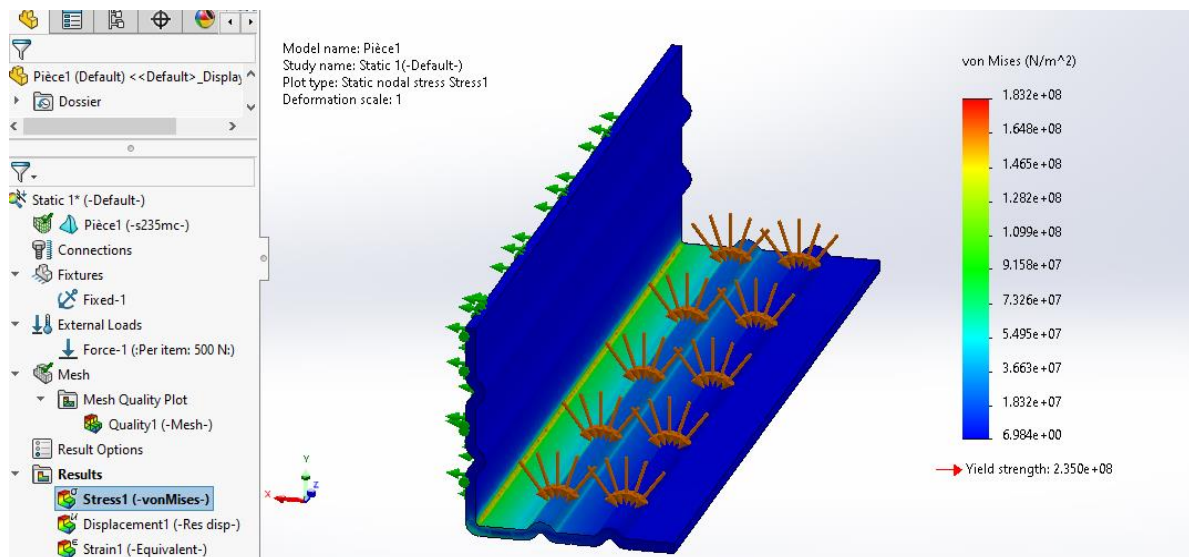


Figure IV.03 : Von Mises stress de profil

4.2.4 Analyse des déplacements

L'analyse des flèches et des déplacements numériques a servi d'indicateur direct pour quantifier la rigidité flexionnelle de la structure. Il est établi que l'amplitude de la déformation maximale est intimement liée à la rigidité intrinsèque de la pièce et au moment d'inertie de sa section transversale.

En intégrant les nervures, on accroît de manière significative ce moment d'inertie, une stratégie géométrique payante qui limite drastiquement les flèches induites sous charge. Les simulations confirment cette tendance : en dépit d'un allègement notable de matière, le

nouveau profil conserve une excellente rigidité structurelle et affiche des déplacements extrêmement contenus.

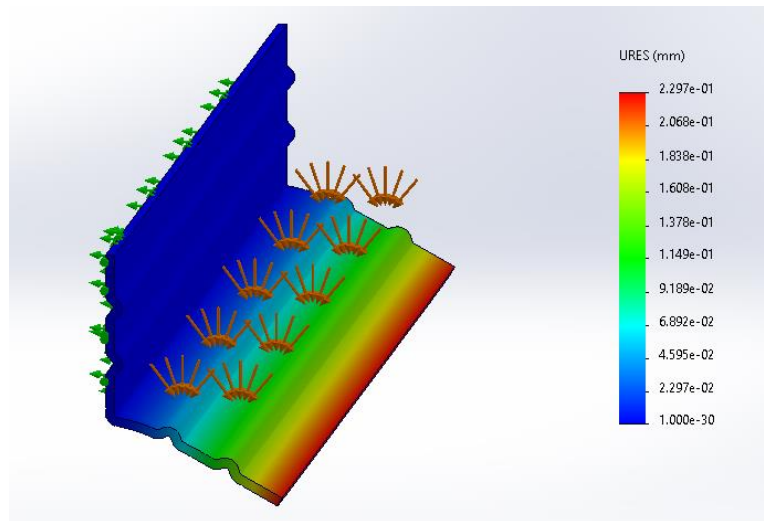


Figure IV.04 : déplacements de profil

4.2.5 Étude du flambement

Pour compléter ce panorama mécanique, une analyse de flambement linéaire (Buckling Analysis) a été menée dans le but de statuer sur la stabilité de la structure lorsqu'elle est soumise à des efforts de compression axiale. Les simulations indiquent clairement que l'apport des nervures renforce de façon spectaculaire la résistance des parois minces vis-à-vis du flambement local. Grâce à cette optimisation géométrique, la stabilité globale de la pièce se trouve nettement consolidée, éliminant ainsi les risques de défaillance par instabilité de forme lors de son exploitation en milieu industriel.

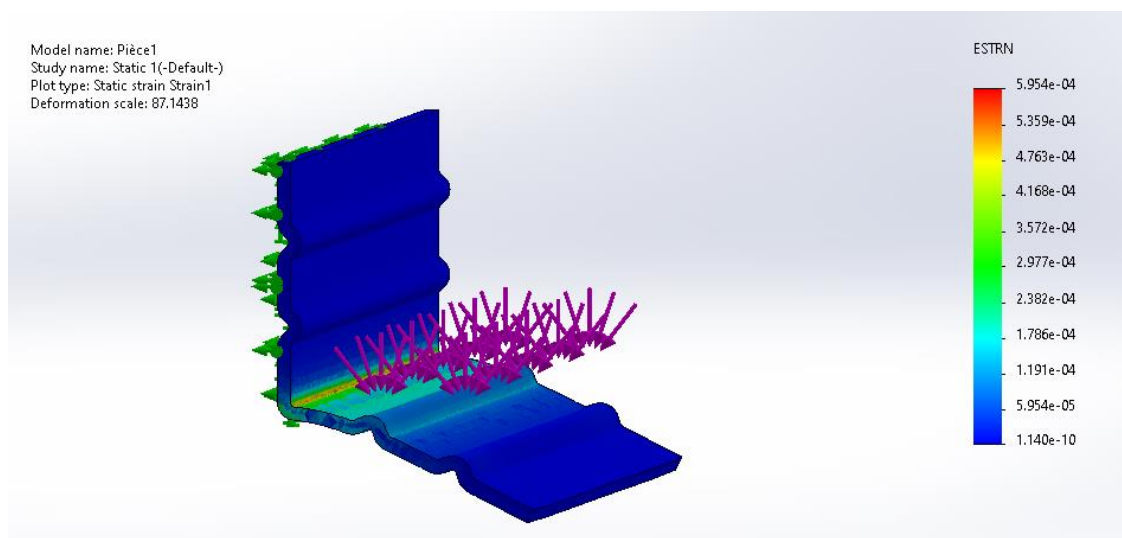


Figure IV.05 : flambement de profil

4.3. Validation industrielle

Le succès d'un design mécanique ne s'arrête pas aux frontières des simulations numériques et des calculs théoriques, mais il est intrinsèquement lié à sa fabricabilité réelle (Manufacturability) au sein de l'environnement industriel. Cette section vise à analyser la compatibilité du nouveau profilé Oméga (épaisseur 2.5 mm) avec les lignes de profilage continu à galets disponibles, tout en garantissant une transition fluide depuis l'ancienne solution sans investissements lourds.

4.3.1. Analyse de formabilité de l'acier S235MC :

L'utilisation de l'acier S235MC repose sur ses caractéristiques métallurgiques hautement favorables lors du formage à froid :

➤ **Ductilité du matériau et absence de fissures :**

Ce matériau se caractérise par une teneur en carbone très faible, ne dépassant pas 0.12 %. Ce taux confère à l'acier une grande ductilité qui empêche l'apparition d'un écrouissage excessif lors du passage de la tôle entre les galets successifs, éliminant ainsi le risque de microfissures au niveau des angles vifs du profilé.

➤ **Taux de Manganèse (1.20 %) :**

Il contribue à l'amélioration de la structure cristalline du métal et à sa cohésion lorsque la tôle est soumise à des contraintes combinées de cisaillement et de traction lors du formage des ailes inférieures

4.3.2. Maîtrise de la géométrie et cinématique des galets :

Le passage d'une bande de tôle plane à une section finale complexe nécessite un pliage progressif à travers plusieurs stations de profilage :

➤ **Limites du rayon de pliage minimal :**

Les rayons de pliage au niveau des angles ont été dimensionnés en respectant les règles technologiques de l'acier S235MC (où la règle industrielle $R_{\min} \geq 1.5 \cdot e$). L'épaisseur étant de 2.5 mm, le rayon de pliage interne conçu garantit un écoulement homogène du métal sans retour élastique brusque qui pourrait altérer les dimensions finales de la pièce.

➤ **Distribution des passes de profilage :**

Les dimensions du profilé permettent de répartir les angles de pliage de manière progressive sur les lignes de profilage standards, sans nécessiter de stations d'étirage spéciales, ce qui assure une excellente compatibilité géométrique avec les machines existantes.

4.3.3. Optimisation des coûts d'outillage et CAPEX

Dans une perspective de génie industriel, le déploiement de ce nouveau profil réduit considérablement les coûts d'investissement et de changement de production :

➤ **Utilisation des mêmes arbres de la profileuse :**

L'encombrement hors-tout du profilé Oméga (50*50 mm) s'inscrit parfaitement dans la plage de fonctionnement nominale des arbres mécaniques qui produisaient l'ancienne cornière (50*50 mm). Cela signifie que la reconversion de la ligne se limite au changement des galets interchangeables sans modifier la structure des moteurs ou des transmissions.

➤ **Effort de cisaillement en bout de ligne :**

En fin de ligne de profilage, la coupe à longueur est assurée par une cisaille hydraulique. Le passage d'une épaisseur de 5.0 mm (ancienne cornière) à une épaisseur de 2.5 mm (nouveau profilé) réduit drastiquement la force mécanique nécessaire à la coupe. Cette baisse protège les lames contre l'usure prématurée, prolonge la durée de vie de l'unité de coupe et diminue la consommation d'énergie électrique.

4.3.4. Stabilité dimensionnelle et maîtrise du voilage :

Un des défis majeurs du profilage en continu réside dans le risque d'apparition de défauts longitudinaux tels que le cambrage ou le voilage des bords.

Grâce à la symétrie rigoureuse de la section, les forces de compression exercées par les galets sont parfaitement équilibrées par rapport à l'axe vertical du profilé. Cette compensation mécanique des contraintes résiduelles garantit une rectitude optimale de la pièce en sortie de machine, facilitant ainsi les opérations d'assemblage ultérieures sans aucun traitement correctif thermique ou mécanique.

4.4. Plan d'industrialisation

L'industrialisation représente le lien crucial entre la conception technique et la production concrète et commerciale. En ce qui concerne votre jeune entreprise, la mission ne consiste pas uniquement à créer le nouveau profilé métallique. Elle englobe aussi la stabilisation du processus de production, la minimisation des déchets et l'amélioration de l'efficacité de la ligne de profilage (roll-forming) actuelle.

4.4.1. Conception et production d'outils de précision élevée

- Sélection des matériaux pour les galets : Production de nouveaux galets de profilage en employant des alliages d'acier résistant à l'usure (comme l'acier D2 ou 1.2379), combinée à l'application de traitements thermiques et de surface (tels que la nitruration) dans le but d'accroître la longévité de l'outil et minimiser son abrasion lors d'une production continue.
- Ajustement de la ligne de profilage : Mise en place de systèmes de mesure précis pour régler les espacements des rouleaux et définir la pression idéale afin d'éviter une contrainte excessive sur le matériau ou un amincissement excessif, surtout que le nouveau profilé présente un poids et une épaisseur inférieurs comparés à l'ancien.
- Amélioration du dispositif de coupe : Changement des cisailles en bout de ligne pour les ajuster précisément au nouveau profil transversal, assurant ainsi une coupe propre sans altération des bords ni bavures.

4.4.2. Mise en œuvre pilote et suivi cinématique (Phase de pré-série)

- Amélioration de la cadence de fabrication : Mise en marche de la chaîne à une vitesse minimale pour surveiller le passage du ruban métallique entre les postes, puis accroissement graduel jusqu'à l'obtention de la vitesse standard de l'appareil afin de repérer et consigner toute vibration inhabituelle.
- Analyse des défauts de mouvement : Observation minutieuse des phénomènes de déformation métalliques tels que le retour élastique, la torsion du profilé ou le flambement des bords, en notant leur position et leur instant d'apparition afin d'intervenir sans délai.
- Mesure de la consommation énergétique : Surveillance de la tension et de la puissance absorbée par les moteurs de l'équipement pour effectuer une comparaison avec

l'ancien profilé, dans le but de garantir que le nouveau design ne représente pas un surcroît d'effort mécanique pour les appareils.

4.4.3. Normalisation et entretien préventif

- Ajustement précis : En se basant sur les données du lancement pilote, des modifications minutieuses sont appliquées aux angles de formage et à la distribution de la pression entre les différentes stations afin d'obtenir la géométrie parfaite et les dimensions précises.
- Élaboration des procédures opératoires normalisées (SOP) : Mise en place et documentation des processus opérationnels, des techniques d'ajustement de la machine et des critères de lubrification dans des guides compréhensibles et simplifiés afin d'éliminer les fautes humaines et assurer la constance de la qualité.
- Plan de maintenance : Mise en place d'un programme rigoureux de maintenance préventive pour les roulements, les galets et les moteurs, dans le but de garantir un flux de production ininterrompu et d'éviter des interruptions inattendues susceptibles de générer des pertes monétaires pour la jeune entreprise.

4.4.4. Politique de contrôle qualité intégrale

- Inspection équipée et gabarits : Élaboration et incorporation de modèles de contrôle rapide à la fin de la ligne de production, permettant aux opérateurs d'assurer rapidement la conformité des angles et dimensions sans arrêter le processus de travail.
- Essais mécaniques sur place : Sélection aléatoire d'échantillons de chaque série de production et réalisation de tests rapides de traction et de flexion pour garantir leur respect des normes exigées et vérifier que la réduction du poids n'a pas eu un impact négatif sur la solidité mécanique.
- Statistical Process Control (SPC): Monitoring dimensional variability over various timeframes using statistical control charts facilitates proactive measures before producing non-compliant parts.

4.4.5. Qualification des employés et sécurité au travail

- Formation des techniciens : Mise en place d'ateliers pour les opérateurs de production afin de les initier aux spécificités du nouveau profilé, à l'exploitation du système modernisé, ainsi qu'à la gestion des problèmes fréquents et leur résolution efficace.
- Amélioration des procédures de sécurité : Révision des processus de sécurité en milieu de travail pour assurer la protection des opérateurs, en particulier face à d'éventuelles modifications de vitesses de ligne ou l'emploi de nouveaux instruments de découpe et façonnage.

4.4.6. Management économique et chaîne logistique (Durabilité de la Start-up)

- Gestion des matières premières : Discussions avec les fournisseurs de rouleaux d'acier pour assurer une fourniture constante de matériaux présentant des caractéristiques mécaniques uniformes et une épaisseur stable, étant donné que les conceptions améliorées (légères) sont plus réceptives aux fluctuations de la qualité du métal primaire.
- Calcul de la rentabilité des investissements (ROI) : Élaboration d'une analyse financière finale qui confronte le coût de production antérieur au coût actuel (suite à la diminution du poids de la matière première), afin de démontrer la rentabilité du projet et sa disposition à s'imposer sur le marché avec un avantage concurrentiel considérable.

4.5 Perspectives, évolutions possibles, gamme élargie

La vérification expérimentale et numérique de la section 08 (une équerre de 2,5 mm d'épaisseur avec contreventement triangulaire longitudinal, réalisée en acier de construction allié de précision S235MC) apporte une validation scientifique rigoureuse du concept d'ingénierie proposé. Ce travail démontre clairement qu'il est tout à fait possible, d'un point de vue scientifique, de remplacer les cornières en acier standard du commerce (5 mm d'épaisseur) par une géométrie innovante et améliorée, caractérisée par un moment d'inertie spécifique élevé, tout en assurant une compatibilité cinématique et de fonctionnement complète avec une ligne de laminage à froid existante composée de 12 passe de formage consécutifs.

Toutefois, dans le cadre de la vision stratégique pour les startups et les méthodologies d'ingénierie avancées, cette réalisation technologique ne doit jamais être considérée comme un aboutissement figé du projet. Afin d'assurer la pérennité technologique de l'entreprise, d'accroître l'efficacité globale des machines et de s'adapter à l'évolution rapide de la dynamique structurelle du secteur de la construction métallique en Algérie, trois axes majeurs de développement et de modernisation technologique ont été définis et modélisés :

4.5.1 Perspectives de développement technologique et de numérisation

L'amélioration des lignes de laminage à froid modernes ne se limite plus à la conception statique des outils et des matrices ; elle exige désormais une intégration étroite des technologies de l'information, des systèmes intelligents et des technologies de l'information connectées. À cet égard, deux axes principaux de recherche et développement ont été identifiés au sein de l'organisation :

- **Architecture de maintenance prédictive pilotée par l'IA**

Bien que les 24 rouleaux de formage aient été dimensionnés et conçus en acier à outils fortement allié Z200C12 (qui présente une résistance exceptionnelle à l'usure par frottement grâce à sa structure martensitique riche en carbures de chrome) et aient subi un traitement thermique de trempe optimal de 45 minutes, ils restent soumis à d'intenses contraintes de contact et cinétiques en fonctionnement. Lors du passage de la bande métallique (acier S235MC), le contact entre les rouleaux et la tôle génère d'énormes contraintes de contact hertziennes localisées, ainsi qu'un glissement relatif, entraînant une usure par adhérence et une fatigue de surface microscopique.

La vision technologique future prévoit d'équiper les 24 paliers de l'arbre de transmission (en acier 42CrMo4) d'un réseau de potentiomètres piézoélectriques et d'accéléromètres industriels haute fréquence pour la mesure des vibrations. Les signaux vibratoires (analyse spectrale de fréquence par FFT) et les fluctuations du couple moteur seront collectés en continu grâce à un système d'acquisition de données. Ces données massives alimenteront un modèle d'apprentissage automatique supervisé sophistiqué (tel qu'un réseau de neurones convolutif (CNN) ou une machine à vecteurs de support (SVM)). Ce système basé sur l'IA prédira avec précision le schéma d'usure des rouleaux, planifiera les opérations de réaffûtage et d'usinage correctif avant toute panne soudaine et reliera l'état des outils à l'apparition de

défauts géométriques tridimensionnels sur le produit final, tels que le gauchissement hélicoïdal, la flexion verticale ou l'ondulation du bord libre.

- **Système dynamique automatisé pour le contrôle de l'écart entre les poulies**

Dans le mode de fonctionnement actuel de la machine, l'écart vertical entre les rouleaux supérieur et inférieur est réglé manuellement par les opérateurs à l'aide de vis micrométriques. Cette méthode conventionnelle est manifestement inadaptée aux variations aléatoires des propriétés de la matière première. Les bobines de tôle (acier S235MC) présentent des variations d'épaisseur le long de la bande (pouvant atteindre $\pm 0,15$ mm), auxquelles s'ajoute l'hétérogénéité de la limite élastique (ΔRe) due aux conditions initiales de laminage à chaud. Ces variations engendrent une instabilité du phénomène de rebond élastique, modifiant ainsi les angles de pliage finaux de la section 08.

Le développement futur prévu comprend le remplacement des vis de réglage manuelles par un système de vis à billes électromécanique de haute précision à commande numérique ou par des pistons hydrauliques. Ce système en boucle fermée sera relié à des capteurs de déplacement laser et à des appareils de mesure d'épaisseur par rayons X installés en amont de la première station. Un ordinateur industriel traitera les données et décodera en temps réel les équations de plastification inverse de l'acier, commandant instantanément aux presses l'ajustement de la position verticale des rouleaux supérieurs à chaque station en fonction de l'épaisseur réelle mesurée. Cette automatisation avancée permettra un réglage précis de la tolérance dimensionnelle des ailes de section 08 à $\pm 0,05$ mm près, réduisant ainsi les rebuts lors des transitions de fonctionnement de la machine de 8 % à moins de 0,5 % et minimisant le temps de préparation de la ligne de production entre les lots.

4.5.2 Extension polymorphe (multiforme) de la gamme de produits

Afin de garantir la stabilité financière et la rentabilité élevée de la start-up, il est essentiel de réduire les coûts fixes du laminoir en optimisant son taux d'utilisation et en évitant de limiter la production à un seul produit. L'innovation méthodologique présentée dans ce document, qui consiste à réduire l'épaisseur nominale de la tôle tout en compensant la perte de rigidité en flexion et en torsion par la conception de profilés robustes, adaptés au transport et à la fabrication de pièces de support, est pleinement applicable à d'autres familles de profilés formés à froid présentant une demande stratégique sur le marché national.

- **Sections en U (sections formées à froid UPN) et sections en C améliorées :**

Ces profilés constituent les éléments de base pour la fabrication de piles de toiture, de poutres de façade et de supports de plancher dans le secteur de la construction industrielle (entrepôts à ossature métallique, usines). Notre méthodologie permet la conception de profilés en C et en U intégrant une compression longitudinale périodique (micro-emboutissages) au niveau de l'âme, complétée par des renforts latéraux au niveau des ailes. La simulation de la stabilité élastique par la méthode des poutres finies (MPF) démontre qu'une tôle mince, d'une épaisseur maximale de 1,8 mm, dotée de ces renforts, possède un moment d'inertie de flexion (I_x) égal ou supérieur à celui d'un profilé lisse standard de 3 mm d'épaisseur. Cette supériorité garantit une excellente résistance à la flexion oblique et aux moments de torsion induits par des charges climatiques extrêmes (efforts de compression et d'absorption du vent calculés selon la norme nationale RNV99).

- **Profilés Omega(Ω) et Sigma (Σ) haute performance pour le secteur de l'énergie solaire :**

L'Algérie mène un programme de transition énergétique ambitieux et intensif (incluant des projets de centrales solaires d'une capacité de **1 000 MW**), engendrant une demande considérable en structures métalliques pour supporter les panneaux solaires et les récepteurs. Installées dans des environnements désertiques arides, ces structures sont exposées à de violentes tempêtes de sable, ce qui provoque des déformations aérodynamiques, des gauchissements complexes et une corrosion mécanique. L'optimisation topologique des sections ' Ω ' et ' Σ ' par l'intégration de nervures de renfort triangulaires permettra le développement de structures de montage ultralégères. Cette innovation technologique réduira le poids des structures de **35 %**, diminuant ainsi les coûts de logistique et de transport et le coût global de production par kilowatt extrait, tout en garantissant une résistance mécanique robuste aux phénomènes de flambage localisé et général sous l'effet des vents du désert.

- **Adaptable à de multiples matériaux (aciers AHSS et alliages d'aluminium)**

Dans le prolongement naturel des sciences, les modèles par éléments finis (MEF) développés avec SolidWorks Simulation seront étendus aux matériaux alternatifs de pointe, tels que les

aciers à haute résistance (AHSS, comme l'acier biphasé **DP600** ou **DP800**) et les alliages d'aluminium structuraux (**Série 6000-T6**). L'intégration de ces matériaux à l'algorithme de nervures triangulaires ouvrira à la start-up des marchés à très forte valeur ajoutée, notamment dans le secteur de la fabrication de carrosseries et de remorques légères pour camions commerciaux, où chaque kilogramme économisé se traduit directement par une réduction de la consommation de carburant et des émissions des véhicules.

Conclusion générale

Conclusion générale

Ce projet de recherche représente une démarche scientifique et technique approfondie visant à relever un défi majeur du secteur de la construction métallique en Algérie : l'impératif d'améliorer l'efficacité de la consommation de matières premières tout en préservant les performances structurelles et mécaniques. Notre étude nous a permis de passer de l'analyse théorique des profilés commerciaux conventionnels à l'innovation technique, grâce à la conception et au développement du « profilé 08 » (profilé triangulaire), un profilé optimisé formé à froid intégrant une armature triangulaire longitudinale. Cette armature permet de réduire de 50 % l'épaisseur de la tôle utilisée (de 5 mm à 2,5 mm) sans compromettre la rigidité en flexion et en torsion.

Ce protocole d'accord a permis de franchir plusieurs étapes clés :

➤ Sur le plan technique :

La méthodologie employée pour la conception des galets de laminage en acier de haute qualité (Z200C12) a démontré son efficacité, sa compatibilité totale avec la ligne de production existante ayant été vérifiée. Ceci confirme la faisabilité du transfert de technologie sans nécessiter d'investissements massifs dans les infrastructures de machines.

➤ Sur le plan économique :

Les analyses de coûts ont révélé des économies directes supérieures à 48,42 % par mètre linéaire, faisant de cette innovation un outil stratégique pour renforcer la compétitivité de l'entreprise sur un marché très sensible aux prix, tout en garantissant des marges bénéficiaires élevées.

Les perspectives présentées à l'issue de ce travail – de l'intégration des technologies de la révolution industrielle à la maintenance prédictive basée sur l'IA, en passant par l'automatisation intelligente du jeu des poulies, et même l'élargissement de la gamme de produits aux panneaux solaires (Omega et Sigma) – confirment que ce projet n'est pas seulement l'aboutissement d'un parcours académique, mais bien une pierre angulaire pour une véritable entreprise industrielle.

En conclusion, nous espérons que cette thèse servira de référence scientifique pour étayer les stratégies de modernisation de l'industrie du fromage à froid en Algérie, et que la méthodologie employée incitera les chercheurs et les entrepreneurs industriels à privilégier l'innovation technique comme seule solution pour relever les défis du marché mondial. L'alliance de l'expertise universitaire et du dynamisme des start-ups est la voie optimale pour faire progresser l'industrie nationale et atteindre la souveraineté technologique et économique.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] Landowski, M., & Lemoine, B. (2005). *Concevoir et construire en acier*. Arcelor
- [2] Alkamel, A., & Laib, H. (2019). *Etat de déformation de contrainte des profilés formés à froid type Sigma et Double Sigma [Mémoire de Master]*. Université Badji Mokhtar – Annaba
- [3] Hamza, O. (2013). *Initiation à l'étude d'une structure simple en profilés formés à froid en utilisant l'Eurocode et l'AISI [Mémoire de Master]*. Université Abou Bakr Belkaid – Tlemcen
- [4] Fekkane, W. (2019). *Contribution à la conception et la réalisation d'une profileuse de tôles à galets [Mémoire de fin d'étude]*. Ecole Nationale Polytechnique d'Alger
- [5] Missoum, M. A. (2020). *Exercices avec solutions: Des assemblages en constructions métalliques selon l'Eurocode 3 [Document pédagogique]*. Université Abou Bakr Belkaid – Tlemcen
- [6] Haniche, S. (2022). *Étude et conception de galets d'une profileuse pour profilé C [Mémoire de master, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou]*. Faculté de Génie de la Construction, Département de Génie Mécanique.
- [7] Halmos, George T. 2005. *Roll Forming Handbook*. Crc Press
- [8] MEHANI, Djamila, and Amel TOUAT. 2019. 'Conception d'une Profileuse et Étude Du Procédé de Profilage – Simulation d'un Galet Soumis à La Fatigue'. *Mémoire de fin d'étude, Tizi Ouzou: Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou*.

الملخص

تتناول هذه المذكرة تصميم وتحسين المقاطع المعدنية خفيفة الوزن القابلة للتصنيع على خط التشكيل بالدرفلة الموجود مسبقاً. ويتمثل الهدف الرئيسي في تقليل وزن المقطع المعدني مع المحافظة على الخصائص الميكانيكية المطلوبة للاستعمال الصناعي.

في البداية تم إجراء دراسة ببلوغرافية حول تقنيات التشكيل على البارد، وأنواع المقاطع المعدنية المختلفة، والمعايير الميكانيكية المعتمدة في التصميم. بعد ذلك تم اقتراح عدة أشكال هندسية وتصميمها باستخدام أدوات التصميم بمساعدة الحاسوب.

تم تقييم النماذج المقترحة بواسطة المحاكاة العددية لمقارنة مقاومتها الميكانيكية وصلابتها واستقرارها. وقد سمحت النتائج المتحصل عليها باختيار تصميم مُحسَّن يوفر نسبة أفضل بين المقاومة والوزن مع ضمان توافقه مع خط الإنتاج الحالي. أظهرت الدراسة أن التحسين الهندسي للمقاطع المعدنية يمثل حلاً فعالاً لتقليل استهلاك المادة الخام وتكاليف التصنيع دون التأثير على الأداء الميكانيكي للمنتج.

الكلمات المفتاحية: التشكيل على البارد، المقاطع المعدنية، التحسين الهندسي، تخفيف الوزن، المحاكاة العددية، العناصر المحددة، التصميم الميكانيكي.

Abstract

This dissertation focuses on the design and optimization of lightweight metal profiles intended for manufacturing on an existing roll-forming production line. The main objective is to reduce the profile weight while maintaining the mechanical performance required for industrial applications.

First, a literature review was conducted to study cold roll-forming processes, different types of metal profiles, and the main mechanical design criteria. Several profile geometries were then developed and modeled using computer-aided design tools.

The proposed profiles were evaluated through numerical simulations to compare their mechanical strength, stiffness, and stability. Based on the obtained results, an optimized profile was selected, providing an improved strength-to-weight ratio while remaining compatible with the existing production line.

The study demonstrates that geometric optimization is an effective approach for reducing material consumption and manufacturing costs without compromising the mechanical performance of the final product.

Keywords: Cold roll forming, metal profile, optimization, lightweight design, numerical simulation, finite element analysis, mechanical design.

Résumé

Ce mémoire porte sur la conception et l'optimisation de profils métalliques allégés destinés à être fabriqués sur une ligne de profilage existante. L'objectif principal est de réduire la masse du profil tout en conservant les performances mécaniques exigées par son utilisation industrielle.

Dans un premier temps, une étude bibliographique a été réalisée afin d'analyser les procédés de profilage à froid, les différents types de profils métalliques et les critères mécaniques de conception. Plusieurs solutions géométriques ont ensuite été développées et modélisées à l'aide d'outils de conception assistée par ordinateur.

Les profils proposés ont été évalués par simulation numérique afin de comparer leur résistance mécanique, leur rigidité et leur stabilité. Les résultats obtenus ont permis de sélectionner une configuration optimisée offrant un meilleur rapport résistance/poids tout en restant compatible avec la ligne de production existante.

L'étude montre que l'optimisation géométrique constitue une solution efficace pour réduire la consommation de matière et les coûts de fabrication sans compromettre les performances mécaniques du produit.

Mots-clés : Profilage à froid, profil métallique, optimisation, allègement, simulation numérique, éléments finis, conception mécanique.