

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République algérienne démocratique et populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
جامعة عين تموشنت بلحاج بوشعيب
Université –Ain Témouchent- Belhadj Bouchaib
Faculté des Sciences et de Technologie
Département Génie mécanique



Projet de Fin d'Etudes
Pour l'obtention du diplôme de Master en : 2025/2026
Filière : Génie mécanique
Spécialité : Construction mécanique M2
Thème :

Influence de la forme du pliage sur la résistance des tôles

Présenté Par :

- 1) BENMENDIL Rizlane Meriem.
- 2) BENMECHTA Mama Imene.

Devant le jury composé de :

Dr DORBANE Abd El Hakim MCA UAT.B.B (Ain Temouchent)
Président.

Dr BELGHOUL Hakima MCB UAT.B.B (Ain Temouchent)
Examineur .

Dr El AHMAR kadi MCB UAT.B.B (Ain Temouchent) Encadrant.

Année Universitaire 2025/2026

Remerciement :

Avant tout, nous remercions Dieu Tout-Puissant de nous avoir accordé la force, le courage et la volonté nécessaires pour mener à bien ce travail modeste.

Nous exprimons notre profonde gratitude à nos familles, dont le soutien et l'aide précieuse ont été essentiels à l'achèvement de ce mémoire.

Nos remerciements les plus sincères s'adressent à notre encadrant, Monsieur **Dr. El AHMAR kadi**, que nous avons eu l'honneur et la chance de côtoyer. Nous avons bénéficié de ses connaissances, de ses compétences, de ses conseils avisés et de son suivi constant tout au long de notre parcours académique. Son sens du devoir, sa disponibilité et son écoute attentive nous inspirent respect et considération. Nous lui adressons nos remerciements les plus chaleureux.

Nos remerciements s'adressent également aux autres membres du jury, dont l'expertise et les observations pertinentes nous ont permis d'améliorer et de compléter notre réflexion.

Dédicace :

À nos merveilleux parents, sœurs bien-aimées et amis précieux, En ce moment solennel,

Nous tenons à exprimer nos profondes gratitude envers vous, car vous avez été les fondations solides sur lesquelles repose ce mémoire de fin d'études.

Votre amour inconditionnel, vos encouragements constants et votre soutien inébranlable ont été des sources d'inspiration inestimables tout au long de ce parcours académique.

À nos chers parents, vous avez été mes premiers enseignants et mes plus grands défenseurs. Votre dévouement et vos sacrifices ont rendu possible cette réalisation.

Vos conseils avisés ont éclairé ma route vers la réussite, et nous sommes honorés de porter votre héritage dans chaque ligne de ce mémoire.

À nos sœurs bien-aimées, vous avez été mes compagnes de joie et de peine.

Votre présence a rendu ce voyage plus coloré et significatif. Vos encouragements chaleureux ont été un moteur d'inspiration pour aller de l'avant, et nous vous sommes reconnaissants de l'amour inestimable que nous partageons.

Nous dédions ce travail à toute ma famille. Tous nos amis (es) et tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin.

Résumé :

Ce travail de recherche s'intéresse à l'impact de la géométrie de pliage sur les propriétés mécaniques des tôles utilisées dans les structures industrielles. L'étude compare trois configurations principales : la tôle simple, la tôle pliée en U et la tôle pliée en V.

À travers des simulations numériques réalisées sous **Abaqus** et en imposant des conditions aux limites réalistes, les résultats montrent que les formes pliées améliorent significativement la rigidité et réduisent les déformations par rapport aux tôles planes.

Cette étude met en évidence que l'optimisation de la forme du pliage constitue une solution efficace pour renforcer les tôles, améliorer leur stabilité et répondre aux exigences croissantes de l'industrie en matière de fiabilité et de performance.

Mots clés :

Abaqus : Logiciel d'analyse par éléments finis à usage général.

المخلص:

يركز هذا البحث على تأثير هندسة الانحناء على الخصائص الميكانيكية للصفائح المعدنية المستخدمة في الهياكل الصناعية. تقارن الدراسة ثلاثة تكوينات رئيسية: الصفائح المعدنية المستوية، والصفائح المعدنية المنحنية على شكل حرف U ، والصفائح المعدنية المنحنية على شكل حرف V.

من خلال عمليات المحاكاة العددية التي أجريت باستخدام برنامج **Abaqus** ، وبفرض شروط حدودية واقعية، تُظهر النتائج أن الأشكال المنحنية تُحسن الصلابة بشكل ملحوظ وتقلل التشوه مقارنةً بالصفائح المستوية. تُبرز هذه الدراسة أن تحسين شكل الانحناء يُعد حلاً فعالاً لتعزيز الصفائح المعدنية، وتحسين استقرارها، وتلبية متطلبات الصناعة المتزايدة فيما يتعلق بالموثوقية والأداء.

الكلمات المفتاحية:

Abaqus: برمجيات تحليل العناصر المحدودة للأغراض العامة.

Abstract :

This research focuses on the impact of bend geometry on the mechanical properties of sheet metal used in industrial structures. The study compares three main configurations: plain sheet metal, U-bent sheet metal, and V-bent sheet metal.

Through numerical simulations performed using **Abaqus** and by imposing realistic boundary conditions, the results show that bent shapes significantly improve stiffness and reduce deformation compared to flat sheets.

This study highlights that optimizing the bend shape is an effective solution for strengthening sheet metal, improving its stability, and meeting the industry's increasing demands for reliability and performance.

Keywords:

Abaqus : General-purpose finite element analysis software.

Sommaire :

Remerciement :	
Dédicace	
Résumé :	
المخلص :	
Abstract:	
Liste des figures :	
Nomenclature	
Introduction générale :	1
Chapitre 1 :	4
1. Introduction :	4
2. Définition des remorques agraire :	5
3. Historique de la remorque agraire :	5
4. Types de remorques agricoles et leur utilisation :	6
i. La remorque agricole à ridelles :	6
ii. Remorque à plateau :	7
iii. Remorque à ensilage :	8
iv. Remorque épandeur :	8
5. Les composants principaux :	9
a) L'attelage (fixation sur boule) :	9
b) Les châssis :	9
c) Les roues et les pneus :	10

d)Les freins :	10
e)L`éclairage:	11
f)La caisse et les ridelles :	11
g)Roue jockey :	11
6. Entretien pour une sécurité optimale :	12
7. Matériaux utiliser dans la fabrication des remorques agricole :.....	12
•Acier :.....	12
•Aluminium :	12
•Composites :	13
8. Contraintes mécaniques appliquées aux remorques:	14
1)La charge statique verticale :	14
2)La charge dynamique :	14
3)Vibrations :	14
4)Chocs:	14
9. Comment fabriquer une remorque agricole:	15
1)Matériaux nécessaires:.....	15
2)Étapes de fabrication :	15
10. Conclusion :	16
Chapitre 2 :	17
Chapitre 2: pliage des tôles	18
1. Introduction :	18
2. Les tôles métallique :	19
3. Types des tôles :	20
a.Tôle d'acier au carbone :	20
b. Tôle d'acier inoxydable :.....	20
c. Tôle d'aluminium :	20

d. Tôle galvanisée :	21
4. Procédés de mise en forme :	20
1) Découpage :	21
2) L'emboutissage :	21
5. La mise en forme des tôles :	22
I. Le cintrage :	23
II. Méthodes :	23
III. Le pliage :	23
6. Types de pliage :	23
a. Pliage en V :	23
b. Pliage en U :	23
c. Pliage en L :	24
d. Pliage en l'aire :	24
e. Pliage en frappe :	25
f. Pliage en Z :	25
g. Pliage sur élastomère :	26
7. Machines de pliage :	27
1) Plieuse universelle manuelle :	27
2) Plieuse presse universelle :	28
8. Les pertes aux plis :	29
1- Le pli :	29
2- Etude des déformations du pli :	30
9. Paramètres influents sur l'opération de pliage :	30
A. Le rayon de la matrice de pliage :	30
B. Le jeu de pliage :	31
C. Le retour élastique :	31

10. Défauts de mise en forme des tôles métalliques :	31
11. Endommagement des tôles :	32
12. les types d'endommagement :	33
13. Conclusion :	36
Chapitre 3 :	38
1. Introduction :	38
2. Logiciel de simulation Abaqus :	39
3. Comment créer un modèle dans Abaqus :	39
➤ Dessiner le modèle :	39
➤ Affecter les propriétés matériau à l'objet :	40
➤ Assembler le modèle :	40
➤ Définir les pas d'analyse :	40
➤ Créer les intersections entre les instances :	40
➤ Appliquer les conditions aux limites et les chargements :	40
➤ Créer et lancer un calcul :	41
➤ Visualiser les résultats :	41
4. Le matériau utilisé :	41
- Propriétés physiques à 20 °C :	41
5. Simulation numérique du pliage :	41
1) Forme de ridelle :	41
2) Maillage de la ridelle :	44
3) Les conditions aux limite :	47
4) Type de chargement :	49
6. Conclusion :	50
Chapitre 4 :	51
1. Introduction :	52
a. Les résultats de contraintes :	53

b.La différence entre les trois modèles :	55
c.Les résultats de déplacement entre simple U et V :	55
d.Par rapport U1 :.....	58
• Répartition des déformations :	59
2. Conclusion :	62
Conclusion générale :.....	64
Bibliographie :	65

Liste des figures :

Chapitre1 :

Figure 1-1 : remorque a ridelle	6
Figure 1-2:remorque a plateau	7
Figure 1-3:remorque a ensilage.....	8
Figure 1-4:remorque épandeur.....	8
Figure 1-5:L'attelage entre tracteur et remorque	9
Figure 1-6:le châssis de remorque	10
Figure 1-7:roue et pneus de remorque	10
Figure 1-8:ridelle de remorque agraire	11
Figure 1-9:roue jockey.....	11

chapitre2:

Figure 2-1:Pliage en V.....	23
Figure 2-2:Vé et contre-ve en pliage.....	23
Figure 2-3:pliage en U	24
Figure 2-4:pliage en U et V	24
Figure 2-5: Pliage en L	24
Figure 2-6:Pliage en L	24
Figure 2-7: Schéma de l'état de contrainte dans l'épaisseur du flan en flexion.	25
Figure 2-8: Outil de liage en Z.....	26
Figure 2-9: pliage sur élastomère.....	27
Figure 2-10: Plieuse à tablier manuelle	28
Figure2-11: Plieuse presse universelle.....	29
Figure 2-12:fibre neutre	30
Figure 2-13 : Diagramme de d'Ishikawa pour défaillances mécanique.....	32
Figure 2-14: Les principaux défauts pour les procédés de mise en forme.....	32
Figure 2-15: défaut de pliage.	33

Figure 2-16:corrosion.....	35
----------------------------	----

chapitre3:

Figure 3-1: Ridelle simple.....	42
Figure 3-2: Ridelle en V.	43
Figure 3-3: Ridelle en U.	43
Figure 3-4:Maillage de la ridelle simple.	44
Figure 3-5:Maillage de la ridelle en V.....	45
Figure 3-6:Maillage de la ridelle en U.....	46
Figure 3-7:Ridelle simple.	47
Figure 3-8:Ridelle en V.	48
Figure 3-9:Ridelle en U.	48

Chapitr4 :

Figure 4-1: Ridelle simple.....	54
Figure 4-2: Ridelle en V.....	55
Figure 4-3: Ridelle U	55
Figure 4-4: Ridelle simple.....	57
Figure 4-5: Ridelle en V	57
Figure 4-6: Ridelle en U.....	58
Figure 4-7: Présentation de champ déplacement U1 sur la forme simple.....	59
Figure 4-8: Présentation de champ déplacement U1 sur la forme V.....	60
Figure4- 9 : Présentation de champ déplacement U1 sur la forme U.....	61

Nomenclature

I'INSEE : Institut National de la Statique et des Etudes Economique.

ABAQUS : Logiciel d'analyse par éléments finis à usage général.

R : Rayon de la matrice(mm).

e : épaisseur de la tôle(mm).

J : Le jeu de pliage.

af : L'angle final.

ai : L'angle initial.

E : Module d'élasticité.

d : Densité.

η : Coefficient de poisson.

λ : Conductivité thermique.

V : Ouverture du Vé (mm).

F : Effort de pliage (N).

L : longueur de la ridelle (m).

h : hauteur de la ridelle (m).

P : Poids volumique(kN/m³).

Ka : Coefficient de poussée.

U : Déplacement.

Vé : Forme de poinçon.

P : Pression de pliage.

Introduction générale :

Introduction générale :

La fabrication mécanique est un domaine vaste et crucial pour la production d'une multitude de pièces et d'outils. Elle englobe un ensemble des techniques visant à transformer des matériaux bruts en pièces mécaniques fonctionnelles et conformes aux exigences de conception. Ses objectifs consistent à étudier, concevoir et fabriquer différents pièces et outils, mais aussi effectuer des contrôles, des réparations et des réglages multiples. La mise en forme des tôles par déformation est un procédé qui nous permet de transformer les tôles en pièces de formes tridimensionnelles. Cette technique est largement utilisée dans plusieurs domaines comme l'automobile, l'aéronautique et l'électroménager. C'est un procédé polyvalent et économique qui repose sur l'application des forces sur une tôle afin de la déformer plastiquement, autrement dit, après le retrait des forces, la tôle conserve sa nouvelle forme, c'est une opération irréversible.

Les scientifiques et les industriels cherchent donc toujours les meilleures conditions pour lesquelles l'aptitude à la déformation peut aller à son tour maximum afin de minimiser les rebuts. Le pliage, et plus généralement, tous les procédés d'obtention de pièces manufacturées par déformation des matériaux métalliques sont des procédés largement utilisés en fabrication mécanique et qui progressent technologiquement sans cesse pour s'accaparer des nouveaux marchés. Les intérêts économiques et technologiques du pliage sont indéniables : grandes cadences de production, qualité géométrique et mécanique des pièces et faible taux de chutes. La difficulté de mise en œuvre de ce procédé est liée, quant à elle, à la sensibilité du processus de mise en forme aux nombreux paramètres de production. De ce fait, la mise au point de l'opération est parfois longue et coûteuse. Elle est encore effectuée dans les entreprises par une méthode d'essais - erreurs qui montre rapidement ses limites tant sur le plan économique que sur le plan de la capitalisation de l'expérience. Dans le cadre des laboratoires de recherche, les simulations numériques par la méthode des éléments finis sont utilisées pour traiter les

différents problèmes afférents au problème de la mise en forme. Dans ce travail nous avons étudié l'influence de quelques paramètres géométriques tel que le rayon de courbure de la matrice, ainsi que le coefficient de frottement sur les déformations de différentes zones de ridelle, par une simulation numérique du pliage en utilisant le code de calcul ABAQUS. Le plan de rédaction de ce thème est le suivant : Le déroulement de notre travail se divisé en quatre chapitres : Le premier chapitre est consacré à l'étude bibliographique sur les types des remorques agraire, leur caractéristique. Dans le deuxième chapitre traite des généralités sur le pliage ; définition, différentes techniques du pliage, quelques exemples. Le troisième et le quatrième chapitre regroupe les résultats et discussions portant sur notre simulation de pliage en U, V et Simple. Enfin, ce travail sera achevé par une conclusion générale.

Chapitre 1 : Les remorques agraire :

Chapitre 1 :

1. Introduction :

Les remorques agraires occupent une place incontournable dans les exploitations modernes. Elles assurent le transport des récoltes, des intrants, des matériaux et des équipements, contribuant ainsi à améliorer la productivité et l'efficacité des opérations agricoles. Grâce à leur robustesse et à leur capacité d'adaptation, elles répondent aux exigences variées des agriculteurs, qu'il s'agisse de petites exploitations ou de grandes structures industrielles.

Avec l'évolution des techniques agricoles et l'augmentation des charges transportées, les remorques ont connu un développement considérable, tant au niveau de leur conception que des matériaux utilisés. Ce chapitre propose une étude générale des remorques agricoles, en abordant leur définition, leur historique, leurs différents types et leurs utilisations. Les principaux composants mécaniques, tels que les châssis, l'attelage, les roues, les freins et les systèmes d'éclairage, seront également détaillés.

Par ailleurs, une attention particulière sera portée aux contraintes mécaniques auxquelles ces équipements sont soumis-charges statiques, charges dynamiques, vibrations et chocs ainsi qu'aux étapes de fabrication qui permettent de comprendre leur conception et leur fonctionnement.

Enfin, l'analyse des matériaux comme l'acier, l'aluminium ou les composites mettra en évidence leurs avantages et limites dans la construction des remorques agricoles.

Ainsi, ce chapitre vise à offrir une vision globale et structurée de la remorque agricole, en soulignant son rôle central dans la logistique et la modernisation des exploitations.

2. Définition des remorques agraire :

Une remorque agricole est un véhicule, généralement sans moteur, qui est attelé à un tracteur pour le déplacer. Les remorques agricoles sont utilisées pour transporter des produits, du matériel et des fournitures agricoles. [1]

Lorsque vous êtes à la recherche d'une remorque de ferme ou d'une remorque agricole, vous devez tenir compte de plusieurs facteurs importants, notamment la puissance de remorquage recommandée, la capacité de charge utile et le nombre d'essieux. [2]

3. Historique de la remorque agraire :

L'histoire des remorques agricoles remonte à plusieurs siècles, lorsque les agriculteurs utilisaient des charrettes rudimentaires tirées par des animaux. Ces premières versions, bien que primitives, ébauchaient déjà les caractéristiques essentielles des outils modernes : un espace de stockage, des roues robustes et un système d'attelage efficace. Alors que l'industrialisation gagnait du terrain à la fin du XVIIIe siècle, ces charrettes ont évolué pour s'adapter aux engins motorisés. Évolution au cours du XXe siècle Le XXe siècle a vu une transformation radicale des remorques agricoles, notamment grâce à l'essor des tracteurs. Cette période a été marquée par l'intégration de matériaux plus résistants comme le métal au lieu du bois et le développement de nouvelles fonctionnalités telles que les systèmes de freinage et de suspension. En outre, l'évolution de la législation, notamment en Europe et en Amérique du Nord, a conduit à des normes de sécurité et d'efficacité qui ont encore amélioré leur conception. Aujourd'hui les remorques agricoles incorporent des technologies innovantes, comme les systèmes de connectivité numérique qui permettent la gestion à distance et en temps réel de l'état de la remorque. Selon l'INSEE (Institut National de la Statistique et des Etudes Economique), plus de 80 % des nouvelles remorques agricoles vendues en 2025. Ces innovations facilitent une agriculture plus précise et efficace, essentielle sur un marché mondial de plus en plus compétitif. [3]

4. Types de remorques agricoles et leur utilisation :

i. La remorque agricole à ridelles :

La remorque agricole à ridelles constitue l'un des équipements les plus polyvalents utilisés dans les exploitations. Elle se distingue par la présence de parois verticales, appelées ridelles, qui permettent de contenir efficacement les produits transportés, qu'il s'agisse des céréales, des légumes, de bois ou des matériaux divers. Ces ridelles, généralement fabriquées en acier, en aluminium ou en bois. [4]



Figure 1-1 : remorque a ridelle.

a. Avantages des ridelles en acier :

- Résistance élevée aux chocs et à l'usure.
- Long vie.
- Capacité de charge importante.
- Adaptées aux conditions météorologiques extrêmes.

b. Avantages des ridelles en aluminium :

- Résistance à la corrosion.
- Rapport poids/résistance optimal.
- Facilité de nettoyage et d'entretien.
- Durée de vie prolongée.

c. Caractéristiques des ridelles en bois :

- Poids réduit.
- Coût d'acquisition inférieur.
- Facilité de remplacement des panneaux endommagés.
- Esthétique naturelle appréciée par certains utilisateurs.
- Peuvent être fixes, rabattables ou amovibles, offrant ainsi une grande modularité. Grâce à cette conception, la remorque peut être utilisée aussi bien comme benne fermée que comme plateau ouvert, selon les besoins de l'agriculteur. Elle est souvent équipée d'un système de binage arrière ou latéral facilitant le déchargement, et sa capacité varie de quelques tonnes pour les petites exploitations à plus de vingt tonnes pour les modèles industriels. La remorque à ridelles est donc un outil essentiel, combinant sécurité, adaptabilité et efficacité, et elle occupe une place centrale dans la logistique agricole moderne. [4]

ii. Remorque à plateau :

Remorques à plateau sont probablement ce que la plupart des gens imaginent lorsqu'ils pensent aux remorques agricoles. Elles sont dotées d'un plateau entièrement plat, sans côtés, ce qui les rend parfaites pour transporter des machines lourdes comme les tracteurs, les charrues et les motoculteurs. Leur conception ouverte permet un chargement et un déchargement rapides, ce qui en fait l'une des remorques agricoles les plus populaires dans toutes les exploitations. [5]



Figure 1-2:remorque a plateau.

iii. Remorque à ensilage :

Une ensileuse est une machine servant à récolter du fourrage destiné à être conservé par un silo d'ensilage.

Les ensileuses peuvent se présenter sous forme de machines traînées ou portées par un tracteur, ou bien sous forme de machines automotrices. L'ensileuse peut être équipée de différents matériels à l'avant de la machine pour récolter le maïs, l'herbe. [6]



Figure 1-3:remorque a ensilage.

iv. Remorque épandeur :

Est un type de remorque agricole spécialement conçu pour l'épandage de fumier, compost ou autres fertilisants organiques sur les champs.



Figure 1-4:remorque épandeur.

5. Les composants principaux des remorques :

Les remorques agricoles constituent un maillon essentiel dans la chaîne logistique des exploitations. Elles permettent le transport des récoltes, des intrants et du matériel, tout en garantissant une efficacité et une sécurité adaptées aux conditions de travail intensives. Leur conception et leur fonctionnement reposent sur des principes mécaniques et hydrauliques qui assurent robustesse et fiabilité. [7]

a) L'attelage (fixation sur boule) :

L'attelage constitue le lien entre la remorque et le véhicule tracteur. Il est essentiel pour garantir une connexion stable et sécurisée. Vérifiez régulièrement son état pour détecter des signes d'usure ou de corrosion, et lubrifiez-le pour un fonctionnement fluide. Une maintenance adéquate prolonge sa durée de vie et assure une utilisation en toute sécurité.

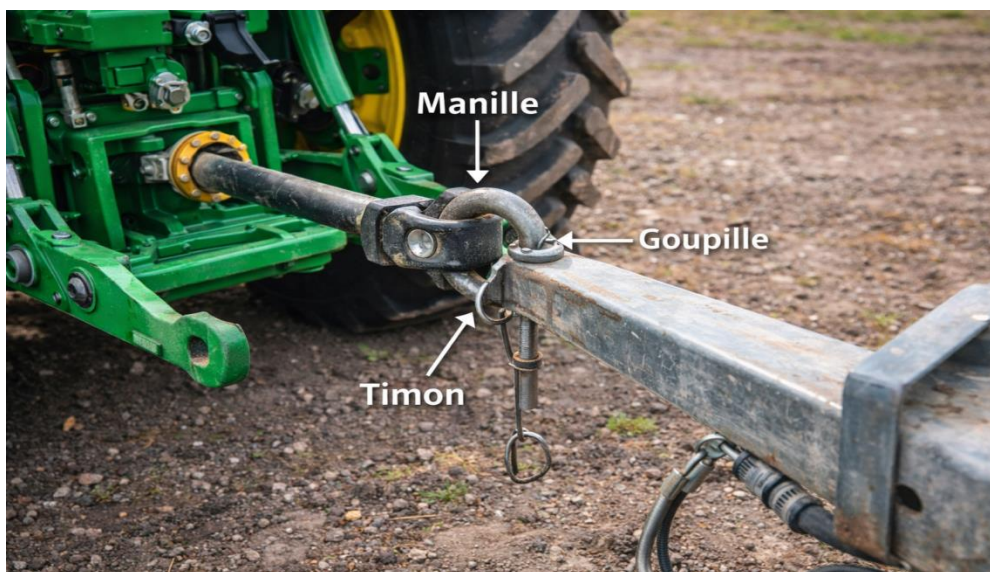


Figure 1-5:L'attelage entre tracteur et remorque.

b) Les châssis :

Le châssis est la base structurelle de la remorque, conçu pour supporter le poids de la charge. Généralement fabriqué en acier ou en aluminium, il doit être robuste et résistant aux intempéries. Cependant, il peut être sujet à la rouille, surtout dans des environnements difficiles. Inspectez-le régulièrement pour éviter les dommages qui pourraient compromettre la solidité de la remorque.



Figure 1-6:le châssis de remorque.

c) Les roues et les pneus :

Les roues et les pneus jouent un rôle essentiel dans la stabilité et la sécurité de la remorque. Assurez-vous que les pneus sont en bon état et que leur pression est correcte. Des pneus spécifiques, comme ceux conçus pour des conditions hivernales, offrent une meilleure adhérence et réduisent le risque de glissement, en particulier sur des routes mouillées ou verglacées.



Figure 1-7:roue et pneus de remorque.

d) Les freins :

Les remorques plus lourdes sont souvent équipées de freins à inertie. Ce système s'active automatiquement lorsque le véhicule tracteur ralentit, garantissant un freinage progressif. L'amortisseur intégré dans le système de freinage aide à éviter les à-coups, ce qui améliore le confort et la sécurité. Contrôlez régulièrement les freins pour vous assurer de leur bon fonctionnement.

e) L'éclairage :

Un éclairage fonctionnel est obligatoire pour toutes les remorques et essentiel pour garantir votre sécurité sur la route. Les feux arrière, les feux stop, les clignotants et le feu de brouillard permettent aux autres conducteurs de voir vos intentions. Remplacez rapidement toute ampoule défectueuse pour éviter les situations dangereuses et respecter les réglementations.

f) La caisse et les ridelles :

La caisse est la plateforme où les marchandises sont transportées. Les ridelles maintiennent la charge en place et peuvent être fixes, amovibles ou rabattables pour faciliter le chargement. Vérifiez leur état régulièrement pour détecter d'éventuelles fissures ou signes d'usure, en particulier si vous utilisez souvent la remorque pour des charges lourdes.



Figure 1-8:ridelle de remorque agraire.

g) Roue jockey :

La roue jockey facilite le déplacement de la remorque lorsqu'elle n'est pas attelée. Cet accessoire est particulièrement utile pour les manœuvres d'attelage ou de dételage. Assurez-vous qu'elle est en bon état et bien fixée pour éviter tout problème lors de son utilisation.



Figure 1- 9:roue jockey.

6. Entretien pour une sécurité optimale :

Un entretien régulier est essentiel pour garantir la durabilité et la sécurité de votre remorque. En vérifiant et en maintenant des éléments comme l'attelage, les freins, les pneus et l'éclairage, vous réduisez les risques de panne et optimisez ses performances. Une remorque bien entretenue vous accompagnera dans toutes vos activités, qu'elles soient professionnelles ou personnelles.

Avec une remorque bien équipée et entretenue, vous pouvez transporter vos charges en toute tranquillité, peu importe la tâche à accomplir. Pour une bonne gamme de pièces. [7]

7. Matériaux utilisés dans la fabrication des remorques agricole :

- **Acier :**

L'acier a toujours été un bon choix de matériau pour la construction de remorques. La bonne connaissance de ses propriétés mécaniques, sa disponibilité, son coût relativement faible ainsi que sa maniabilité (facile à souder et à former) en ont fait le matériau de prédilection dans le domaine. L'acier offre de bonnes performances mécaniques : module de Young et limite d'élasticité élevés, bonne résistance en fatigue, etc. Il est toutefois sensible à son environnement et se corrode rapidement. Des traitements de surface (peinture, galvanisation, etc.) sont donc nécessaires afin d'assurer une durée de vie convenable aux éléments en acier.

Consommant temps et main-d'œuvre, ces traitements contribuent au prix de vente des remorques et nécessitent des entretiens réguliers afin de prévenir leur détérioration. Les performances mécaniques de l'acier en permettent l'utilisation dans la fabrication de remorques « heavy duty » destinées au transport de charges lourdes. Son rapport poids / performances assure d'obtenir des remorques aux dimensions acceptables tout en répondant aux besoins de l'industrie. Les remorques conçues pour des usages hors-normes doivent offrir des performances exceptionnelles en raison de la nature de leur charge. L'acier est donc prédominant dans ce type de remorques. [8]

- **Aluminium :**

Les principaux avantages de l'aluminium sur l'acier sont sa légèreté (près de trois fois plus léger que l'acier), sa résistance à la corrosion et sa malléabilité. Contrairement à l'acier, la corrosion de l'aluminium forme une couche d'oxyde stable de 5 à 10 nanomètres d'épaisseur, agissant comme couche protectrice en empêchant la progression de l'oxydation. La couleur naturelle de

L'aluminium étant attrayante, les remorques ne nécessitent pas l'application de peinture. L'aluminium est toutefois plus coûteux que l'acier et ses propriétés mécaniques en font un matériau moins performant. Pour des structures identiques, celle en aluminium admet des déformations beaucoup plus importantes que celle en acier. Les structures en aluminium doivent donc se baser sur des géométries naturellement plus rigides afin de limiter ces déformations. La résistance de l'aluminium à la fatigue est aussi plus faible que celle de l'acier. Ces caractéristiques limitent son application en l'excluant de la fabrication de remorques « heavy duty ». Le soudage de l'aluminium est plus difficile que celui de l'acier. Pour cette raison, l'emploi de rivets est très répandu comme méthode d'assemblage.

Malgré ses performances mécaniques plus modestes, l'aluminium est de plus en plus employé dans la fabrication des remorques destinées au transport général de marchandises. La majorité des fabricants offrent au moins un modèle en aluminium. Étant donné les limitations de charge, ces modèles sont généralement des plates-formes et des remorques pour le transport d'animaux. [8]

- **Composites :**

Un matériau composite est constitué d'une ossature appelée « renfort » qui assure la tenue mécanique et d'une protection appelée matrice qui est généralement une matière plastique (Résine thermoplastique ou thermodurcissable) qui assure la cohésion de la structure et la retransmission des efforts vers le renfort. Ces matériaux offrent des propriétés mécaniques comparables à celles des aciers communs. Leurs principaux avantages sont leur force et leur rigidité par rapport à leur masse. Les matériaux composites les plus communs sont les fibres de verre, les fibres de carbone, les fibres d'aramide (kevlar) et le béton armé. L'industrie étant à la recherche de la diminution des temps de production, des coûts et de la masse de leurs produits, l'utilisation de matériaux composites est une avenue pleine de promesses. Dans l'industrie automobile, comparativement à l'emploi de métaux, l'emploi de matériaux composites permet une réduction moyenne de 35% du poids des éléments tout en économisant sur les coûts de production [4]. Les éléments en FRP (Fiber Reinforced Polymer) ne sont pas sensibles à la corrosion et sont malléables, ce qui permet l'obtention de géométries complexes. L'emploi de plastiques renforcés par des fibres (FRP) fait le sujet de beaucoup de recherche et de développement. Depuis les années 1990, nous avons vu l'apparition de quelques modèles de remorques entièrement conçues en FRP. [8]

8. Contraintes mécaniques appliquées aux remorques :

1) La charge statique verticale :

Charge verticale résultant des charges produites par la masse d'une semi-remorque, exercée au centre du point d'accouplement dans des conditions statiques

Note 1 à l'article : La charge statique verticale maximale admissible est spécifiée par le fabricant. [9]

2) La charge dynamique :

Est le poids maximal qu'une palette peut supporter lors de son déplacement ou manipulation par des engins mécaniques. [10]

- **Différence avec la Charge Statique :**

La charge dynamique est généralement inférieure à la charge statique, car elle prend en compte les mouvements et les chocs subis par la palette lors du transport. Importance : Il est crucial de respecter cette limite pour éviter les ruptures de palettes et les accidents lors de la manutention. [10]

3) Vibrations :

Afin de limiter l'exposition de l'opérateur, il est nécessaire d'identifier les principales sources de vibrations et la manière dont elles se transmettent, naturellement, à la position de conduite. Les principales sources internes de vibrations sont liées à la présence sur le tracteur lui-même d'un moteur thermique, de transmissions et parfois de systèmes hydrauliques ou pneumatiques qui génèrent des vibrations à haute fréquence. Selon l'avis des experts de l'Iniali, le moteur n'est généralement pas un problème, sauf s'il fonctionne à basse vitesse, car les pièces mobiles sont équilibrées et le moteur est fixé au châssis par des supports antivibratoires. [11]

4) Chocs :

Les remorques agricoles subissent des chocs violents tout au long de leur utilisation. Ces impacts proviennent de l'environnement de travail, des matériaux transportés et du mode de conduite.

9. Comment fabriquer une remorque agricole :

La construction d'une remorque agricole peut sembler une tâche ardue, mais avec les bonnes instructions et un peu de savoir-faire, cela devient tout à fait réalisable. Sur le site remorque á bras.fr, vous trouverez de nombreuses ressources pour vous aider dans votre projet. Cet article va vous guider à travers les étapes essentielles de la fabrication d'une remorque agricole. [12]

1) Matériaux nécessaires :

- Tôles en acier** : pour la structure.
- Essieux** : pour la mobilité.
- Roues** : adaptées au poids.
- Vis et boulons** : pour l'assemblage.
- Peinture antirouille** : pour la protection.

2) Étapes de fabrication :

Désigne une phase précise et définie dans le processus de transformation d'une matière première (ou de composants) en un produit fini :

a) Conception de la remorque :

Avant de commencer, il est important de dessiner un plan de votre remorque. Pensez à ses dimensions en fonction de son usage.

b) Découpe des matériaux :

Utilisez les plans pour découper les tôles en acier aux bonnes dimensions.

c) Assemblage de la structure :

Assemblez les différentes pièces à l'aide de vis et boulons, en vous assurant que la structure soit stable et durable.

d) Installation des essieux et des roues :

Fixez les essieux à la structure et veillez à ce qu'ils soient bien alignés pour assurer un bon fonctionnement

e) Finition :

Appliquez de la peinture antirouille pour protéger votre remorque agricole des éléments.

La construction d'une remorque agricole peut sembler une tâche ardue, mais avec les bonnes instructions et un peu de savoir-faire, cela devient tout à fait réalisable. [8]

10.Conclusion :

Dans ce premier chapitre, une étude générale des remorques agricoles a été présentée afin de mieux comprendre leur rôle et leur importance dans le domaine agricole. Les différents types de remorques et leurs utilisations ont permis de mettre en évidence la diversité des applications selon les besoins de transport et les conditions d'exploitation.

L'analyse des principaux composants a montré que la performance et la sécurité d'une remorque dépendent de la qualité de ses éléments mécaniques, tels que le châssis, l'attelage, les roues et les systèmes de freinage. De plus, les matériaux utilisés dans leur fabrication, notamment l'acier, l'aluminium et le bois, influencent directement la résistance, la durabilité et le coût de la remorque.

Les différentes contraintes mécaniques appliquées aux remorques agricoles, comme les charges statiques et dynamiques, les vibrations et les chocs, démontrent l'importance d'une conception robuste capable de résister aux conditions de travail sévères. Enfin, les étapes de fabrication présentées dans ce chapitre permettent de mieux comprendre les techniques de réalisation et les exigences nécessaires pour obtenir une remorque fiable et performante.

Ce chapitre constitue ainsi une base théorique importante pour la suite du mémoire, notamment pour l'étude de conception, d'analyse mécanique ou de simulation des remorques agricoles.

Chapitre 2 : pliage des tôles :

Chapitre 2: pliage des tôles

1. Introduction :

Le pliage constitue l'un des procédés de mise en forme à froid les plus essentiels et les plus répandus dans l'industrie de la transformation des tôles métalliques. Cette opération de formage, qui s'applique à une immense variété de pièces allant des structures massives du secteur des transports aux composants micromécaniques de précision, repose sur la déformation plastique irréversible du matériau par dépassement de sa limite élastique. Bien que le principe fondamental consiste à modifier brusquement la direction des fibres d'un flan selon un angle défini, la maîtrise industrielle de ce procédé exige une compréhension rigoureuse des interactions entre la géométrie des outillages, le comportement mécanique du matériau et la cinématique de mise en forme. L'objectif de ce chapitre est de présenter les fondements technologiques et mécaniques qui régissent l'opération de pliage. Dans un premier temps, nous classifions les différents modes de pliage (en V, en U et en L) en mettant en évidence les autres types du pliage en l'air et du pliage en frappe en Z, et élastomère. Dans un second temps, nous analyserons les phénomènes géométriques et physiques induits, tels que le comportement de la fibre neutre pour le calcul des pertes aux plis, ainsi que l'impact critique du rayon minimal de pliage. Enfin, nous identifierons les principaux paramètres opératoires influant sur la qualité du produit fini, tout en dressant une typologie des défauts de mise en forme, qu'ils soient d'ordre global comme le retour élastique ou d'ordre local comme la striction et la rupture.

2. Les tôles métalliques :

La tôle est un métal qui a été transformé en pièces minces et plates, généralement par un procédé industriel. Elle est généralement produite sous forme de feuilles de moins de 6 mm d'épaisseur. La tôle est l'une des formes fondamentales utilisées en métallurgie et peut être découpée et pliée en une variété de formes différentes. [13]

3. Types des tôles :

Les plaques et tôles métalliques sont de fines feuilles de métal fabriquées par un processus de laminage à chaud ou à froid. En raison de leurs propriétés mécaniques et de leur polyvalence, elles sont utilisées dans une grande variété d'applications industrielles.

Comme on peut s'y attendre, il existe plusieurs types de tôles métalliques, chacun étant conçu pour répondre à des besoins différents. Voici les plus courants. [14]

a. Tôle d'acier au carbone :

Les tôles d'acier au carbone sont idéales pour les applications structurelles en raison de leur capacité à supporter de lourdes charges et pressions. Leur durabilité parfaite pour la fabrication de portes métalliques d'habitations et de structures d'éclairage, telles que des poteaux.

De plus, elles sont largement utilisées dans les processus de découpe laser et de pliage, ce qui permet de créer des pièces géométriques et des composants moulés pour des secteurs tels que l'automobile et l'aéronautique, entre bien d'autres.

b. Tôle d'acier inoxydable :

L'acier inoxydable est un alliage de fer, de chrome et de nickel, connu pour sa haute résistance à la corrosion et sa capacité à supporter des températures élevées. Cette tôle est largement utilisée dans la fabrication d'équipements pour l'industrie alimentaire et nautique, en raison de sa surface non poreuse. Parallèlement, ses propriétés anticorrosives la rendent idéale pour les projets en milieux humides ou agressifs, constituant un matériau fiable pour les structures exposées aux intempéries et les processus industriels exigeants.

De plus, c'est un matériau 100 % recyclable, ce qui en fait une option plus durable pour la fabrication de pièces et d'équipements.

c. Tôle d'aluminium :

L'aluminium est un métal léger, résistant à la corrosion et facile à travailler. C'est pourquoi la tôle d'aluminium est très polyvalente et est utilisée dans les cas où la légèreté est requise. Elle est couramment utilisée dans la fabrication de composants d'aéronefs et d'éclairage, car elle dissipe très bien la chaleur.

d. Tôle galvanisée :

La tôle galvanisée est une feuille d'acier revêtue de zinc par un processus de galvanisation à chaud, ce qui lui confère une excellente protection contre la corrosion. Ce revêtement métallique garantit une durabilité et une résistance accrues, en particulier dans les environnements exposés aux conditions atmosphériques et aux agents externes. Malgré sa couche protectrice, elle conserve la capacité d'être découpée, perforée et moulée.

Grâce à sa résistance, la tôle galvanisée est utilisée dans des industries telles que la construction, l'automobile et la fabrication de machines.

4. Procédés de mise en forme :

1) Découpage :

La première étape à réaliser est la découpe. Diverses techniques sont utilisées pour couper la tôle, telles que le cisailage, la découpe laser, la découpe au plasma et la découpe au jet d'eau. Le cisailage est un processus mécanique simple qui utilise une lame pour ajuster les bords ou effectuer des coupes droites. En revanche, la découpe au laser emploie un faisceau laser focalisé qui fait fondre facilement le métal, produisant des coupes précises et un minimum de perte de matière. [15]

2) L'emboutissage :

Est un procédé de formage des corps creux par déformation plastique des tôles à partir d'un flan plan de faible épaisseur [16]. Le principe est basé sur la déformation plastique du matériau (en général un métal), déformation consistant en allongement ou rétreint local de la tôle pour obtenir la forme désirée. Par suite de la conservation globale (au moins approximative) du volume du matériau, les zones d'étirement subissent un amincissement (qui doit rester limité pour éviter la rupture) et les zones de rétreint (compression) subissent une combinaison d'épaississement et de plissement :

On cherche en général à éviter ce dernier effet, mais il ne peut jamais être complètement absent et on cherche donc à le provoquer dans des parties de tôle qui seront éliminées dans la suite du processus de fabrication [17]. L'emboutissage se pratique à l'aide de presses à emboutir de fortes puissances munies d'outillages spéciaux qui comportent, dans le principe, trois pièces :

- Une matrice, en creux, épouse la forme extérieure de la pièce.
- Un poinçon, en relief, épouse la forme intérieure en réservant l'épaisseur de la tôle.
- Un serre - flan entoure le poinçon, s'applique contre le pourtour de la matrice et sert à coincer la tôle pendant l'application du poinçon.
- . • Des jones sont parfois utilisés pour freiner le glissement de la tôle.

L'entrée de la matrice doit être très arrondie et polie pour éviter toute déchirure du métal et pour optimiser le comportement des zones de rétreint aucun angle ne doit être vif et un parfait état de surface est primordial : la mise au point de tels outils est une opération très spécialisée et très coûteuse notamment sur les pièces d'aspect complexe. [18]

5. La mise en forme des tôles :

Une coupe à travers l'installation d'outils montre le poinçon, la matrice et la tôle (ou le l'objet) sur le serre-flan. Le serre-flan et le poinçon descendent en même temps avec une certaine avance du premier. Le formage sous l'action du poinçon ne peut se faire qu'après application d'une pression sur la tôle par l'intermédiaire du serre-flan. Par conséquent les parties périphériques de la tôle sont gardées en place. Si le serre-flan n'est pas plat une première formation aura lieu.

Le poinçon est maintenant en contact avec la tôle. La tôle glisse au-dessus du rayon de matrice. Pendant que le poinçon avance vers le bas le rayon externe de l'objet circulaire est réduit. Dans ce processus l'objet est formé par l'étirage dans la direction de déformation, accompagné par compression et l'aplatissement dans la circulaire direction.

Le poinçon s'écarte vers le haut et le composant formé est écarté de l'outil. [19]

I. Le cintrage :

Est un procédé mécanique de déformation d'un tube ou d'une barre, ou plus généralement, d'un profilé (creux ou non), selon un rayon et un angle définis. Pour les produit plats (feuilles ou tôles), dont la section est plus fine que large par rapport au sens de pliage, on parle généralement de pliage. Il est effectué avec une cintreuse. Le terme cintrage est aussi utilisé pour désigner la transformation globale d'un produit cintré. Il existe plusieurs techniques : par enroulement, par poussée, par roulage et par emboutissage.

II. Méthodes :

Il faut distinguer le cintrage « à chaud », méthode artisanale ou réalisée par induction, du cintrage « à froid », la méthode industrielle. Dans l'industrie mondiale, on utilise essentiellement le cintrage à froid. Cette opération de déformation est réalisée, soit avec des machines manuelles, soit avec des machines numériques de très haute technologie, certaines étant équipées de 13 axes. [20]

III. Le pliage :

Le pliage est une opération de mise en forme à froid d'un matériau plat avec ou sans lubrification en changeant la direction de ses fibres de façon brusque suivant un angle, par dépassement de sa limite élastique, Après recul des outils et relâchement des contraintes, il se produit un retour élastique à l'issue duquel persiste une déformation permanente dépendant des paramètres du pliage utilisé. Ce travail constitue une analyse de ce procédé par la méthode des éléments-finis (EF). On se contente dans l'étude de présenter une méthode numérique fiable pour la prédiction de l'effort de pliage et la distribution de champs des contraintes dans la tôle déformée. La fiabilité d'une telle prédiction dépend de plusieurs paramètres tels que le frottement, les propriétés de matériau et de l'endommagement. Le modèle proposé est développé selon un critère élasto-plastique de type Von Mises intégrant le mécanisme d'endommagement tel que formulé par Lemaître en 1985. Le comportement du matériau à l'interface tôle/poinçon est modélisé par la loi de frottement de Coulomb. L'influence du rayon de la matrice et du jeu tôle-poinçon a été analysée. Les résultats ont été analysés par la méthode des surfaces de réponse. L'utilisation des surfaces représentatives pour toutes les combinaisons considérées a pour objectif d'optimiser le procédé et d'identifier le paramètre le plus influant sur la qualité finale de la pièce. La technique d'optimisation par les plans d'expériences qui a été adoptée a conduit à minimiser les contraintes de traction et de compression localisées dans

Les zones les plus endommagées. Les résultats obtenus montrent la robustesse du modèle proposé et sont analysés en détail dans cette étude. [21]

Le pliage est une opération de formage à froid de tôles planes par déformation permanente. Pour cela, il faut tout d'abord placer la tôle sur une matrice (ou vé), appuyée contre des butées réglées auparavant, puis on applique une force sur une partie de la tôle grâce à un poinçon (ou contre-vé). L'effort nécessaire à l'obtention du pli dépend de la limite élastique du métal, de l'épaisseur de la tôle, et de la longueur et de la direction du pli. [22]

6. Types de pliage :

Suivant la géométrie des poinçons et matrices, trois types de pliage sont distingués : en forme V, en forme U et en forme L en l'aire en frappe en Z, élastomère. [23]

a. Pliage en V :

Le schéma du pliage pour ces deux méthodes est assimilé à un schéma de flexion (Figure 2). Les points d'appuis du schéma représentent les arêtes du vé, et une flèche qui symbolise une force. C'est le réglage de la descente du poinçon qui donnera l'angle final du pli.

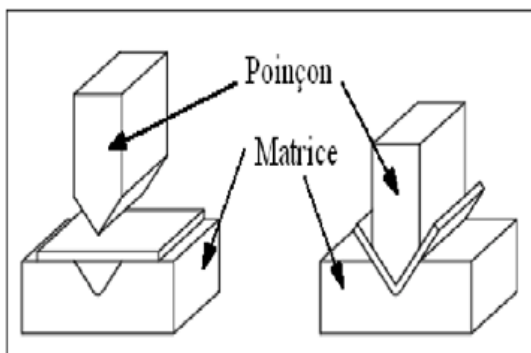


Figure 2-1:Pliage en V .

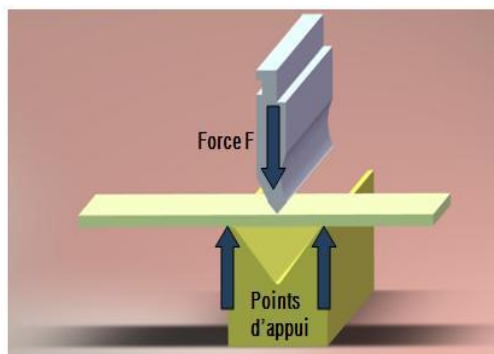


Figure 2-2:Vé et Contre-Vé en pliage.

b. Pliage en U :

Le principe est voisin de celui du pliage en vé. Seuls les outils (poinçons et matrices seront différents). Cela ressemble cependant à de l'emboutissage. On peut obtenir avec cette méthode une infinité de formes pliées, si les outils sont disponibles.

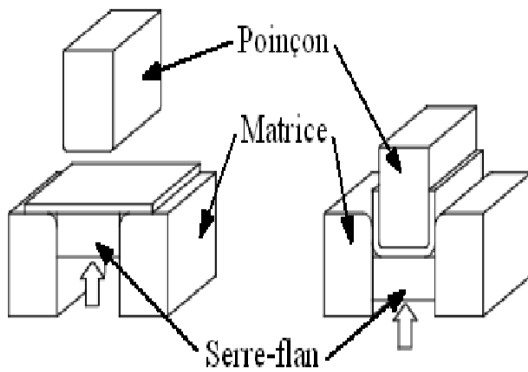


Figure 2-3: pliage en U.

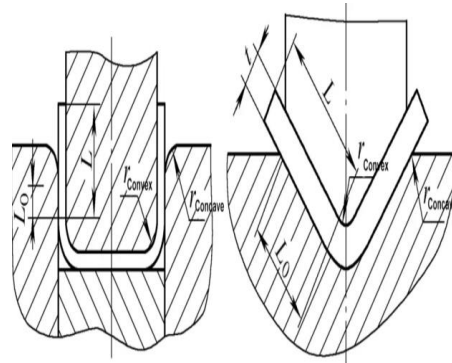


Figure 2-4: pliage en U et V.

c. Pliage en L :

Le pliage en forme L ou en tombée de bord consiste à plier un flan en porte-à-faux à 90° maintenu entre la matrice et le serre-flan.

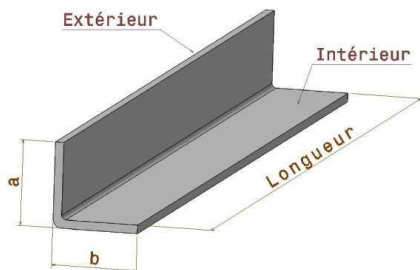


Figure 2-5: Pliage en L.

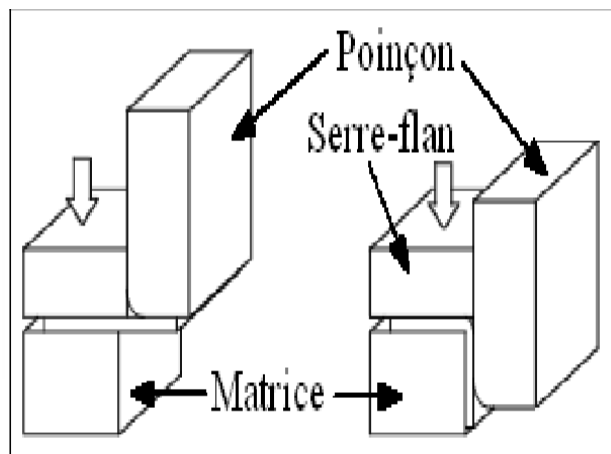


Figure 2-6: Pliage en L.

d. Pliage en l'aire :

Les branches libres du pli ne viennent pas au contact des faces intérieures du vé. La limitation de la descente du poinçon et l'écartement du vé, permettent d'obtenir les plis aux angles désirés.

Ce mode de pliage est couramment utilisé car les forces appliquées sont environ 5 fois Moins importantes que pour du pliage en frappe. [23]

e. Pliage en frappe :

Le poinçon entraîne les deux branches libres du pli jusqu'au contact des faces intérieures de la matrice, il en résulte un écrouissage de la zone pliée et l'angle obtenu est sensiblement égale à celui du vé. Cette technique permet d'obtenir des pièces précises, mais elle nécessite des efforts de pliage importants. Il faut un outillage pour chaque angle et il est limité aux tôles jusqu'à 2 mm d'épaisseur. Le fait de matricer l'intérieur du pli permet d'obtenir des angles très précis ($\pm 0,5^\circ$). [24]

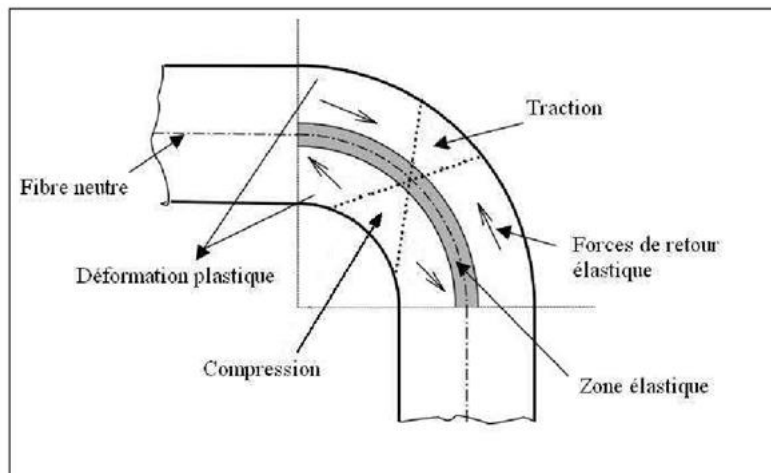


Figure 2-7: Schéma de l'état de contrainte dans l'épaisseur du flan en flexion.

f. Pliage en Z :

L'outil utilisé est simple et peu coûteux mais fournissant des pièces peu précises. L'outil est présenté en fin de course. Les ressorts sont calculés pour qu'au cours de la descente, le pliage s'effectue en premier lieu en (a) sur l'arête de l'éjecteur, puis en (b) lorsque la serre flan vient en butée sur son support. Les parties flottantes sont rapportées en acier dur. [25]

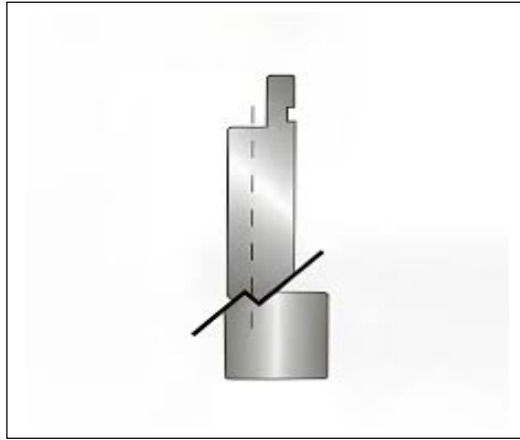


Figure 2-8 : Outil de liage en Z.

- **Avantages et inconvénients :**

Avantages :

- Outillage simple.
- Pièces réalisées de formes complexes.
- Cintrage de tôles de forte épaisseur (faibles plis régulièrement espacés).

Inconvénients :

- Longueur de pli limité à la longueur des machines.
- Elasticité résiduelle difficilement contrôlable. [25]

g. Pliage sur élastomère :

Ce procédé consiste à remplacer la matrice en métal par un coussin élastique en caoutchouc enchâssé dans un support métallique. Le pliage à l'aide d'un outil élastique convient particulièrement à la mise en œuvre des tôles minces ayant reçues un traitement superficiel. Cette technique a l'avantage de ne jamais marquer la tôle, et nécessite des efforts très importants. [26]



Figure 2-9: pliage sur élastomère.

7. Machines de pliage :

1) Plieuse universelle manuelle :

Cette machine est utilisée pour les petites pour des tôles de dimension importantes, avec séries, elle permet des pliages assez complexes une qualité et précision moyenne. [19]



Figure 2-10: Plieuse à tablier manuelle .

2) Plieuse presse universelle :

La presse-plieuse est une machine qui applique les lois de la flexion pour plier des tôles. Les tôles sont placées sur une matrice (ou vé), appuyée contre des butées réglées auparavant. En actionnant une pédale, l'opérateur fait descendre le poinçon ou (contre-Vé) et va grâce à une force, plier la tôle jusqu'à un degré choisi. Les réglages s'effectuent en fonction de l'épaisseur, du matériau, des longueurs à plier et des outils choisis. Les limites des presse-plieuses sont surtout la longueur de pliage et la force de pliage. [28]



Figure 2-11: Plieuse presse universelle.

3) Outils spéciaux :

Les outils utilisés pour le pliage sont en acier traité, et ils sont classés en deux catégories :

- Outils simples : de formes très variées, ils sont les plus utilisés en tôlerie, chaudronnerie.
- Outils combinés : ils peuvent effectuer plusieurs opérations simultanées (plusieurs plis, des poinçonnages, découpages...). Ces outils sont très spécialisés et coûteux. [29]

8. Les pertes aux plis :

1- Le pli :

Lors du pliage, la tôle subit une pression qui change l'orientation des fibres. Les fibres intérieures sont comprimées alors que celles extérieures subissent un étirement. L'angle obtenu est appelé « angle de pliage ». Entre les deux zones de déformations, la fibre neutre qui ne subit aucun allongement ni raccourcissement sera la base de notre calcul de la longueur développée. En effet, si nous savons déterminer la longueur de cette fibre qui ne subit aucune déformation après pliage, nous trouverons la longueur de la tôle avant pliage. [30]

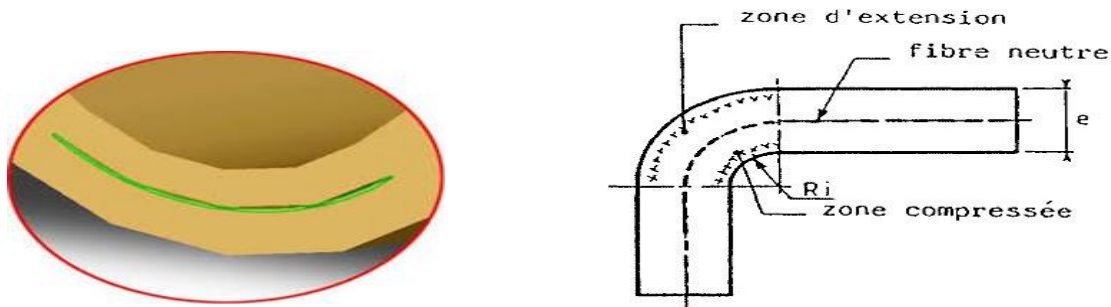


Figure 2-12: fibre neutre.

2- Etude des déformations du pli :

Lors du pliage d'une tôle se produit une déformation plastique, cette déformation est de type allongement de la partie extérieure et compression de la partie intérieure. Cette déformation doit assurer la non rupture du matériau dans cette zone, autant le rayon de pliage est grand, autant la déformation est minime, la fibre neutre est une fibre qui ne subit pas de déformation. [31]

3- Rayon minimale de pliage :

Le rayon minimal de pliage est le plus petit rayon pour lequel il n'y a pas apparition de fissures lors du pliage. Il dépend de :

- La nature et de l'état du métal (recuit, écroui).
- L'angle du pliage : Pour une épaisseur donnée le rayon de pliage croît avec l'angle de pliage.
- L'épaisseur le rayon minimal. [30]

9. Paramètres influents sur l'opération de pliage :

On distingue deux paramètres principaux à définir pour obtenir une pièce finie :

A. Le rayon de la matrice de pliage :

Afin d'éviter le découpage ou l'étrépage de la pièce à plier, le rayon de la matrice doit être supérieur à deux fois l'épaisseur de la tôle. [32]

$$R \geq 2e$$

B. Le jeu de pliage :

Lors de la conception de l'outil de pliage, il faut prévoir un jeu de pliage entre l'arrête verticale extérieure du poinçon et l'arrête intérieure de la matrice. Le jeu doit être égal à l'épaisseur de la tôle plus une tolérance maximale. [30]

$$J \geq e + \text{Tolérance max}$$

C. Le retour élastique :

Lors du pliage d'une pièce à un angle par l'outillage (angle du vé), il y a un retour élastique lors du retrait du poinçon. Imposé L'angle final α_f obtenu diffère de celui imposé par l'outillage α_i de la valeur correspondant à ce retour élastique. Plus la limite élastique de l'alliage est grande plus le retour élastique sera grand. On peut vouloir estimer ce retour élastique qui dépend aussi du Rayon de pliage et de l'épaisseur de la tôle. [33]

10.Défauts de mise en forme des tôles métalliques :

Au cours des opérations de mise en forme des tôles métalliques et parfois postérieurement, divers défauts peuvent apparaître sur les pièces, Ces défauts peuvent être classés en deux catégories : les défauts globaux et les défauts locaux, que nous définissons comme suit :

- Un défaut global concerne la géométrie finale de la pièce. Deux phénomènes sont essentiellement à l'origine de ces défauts : le retour élastique et le plissement. - Un défaut local concerne des zones plus ou moins réduites de la pièce, où une diminution nette de l'épaisseur, voire rupture, peut apparaître. La striction localisée en est un exemple. D'autres phénomènes plus rares, comme la rupture différée en est un autre. [34]

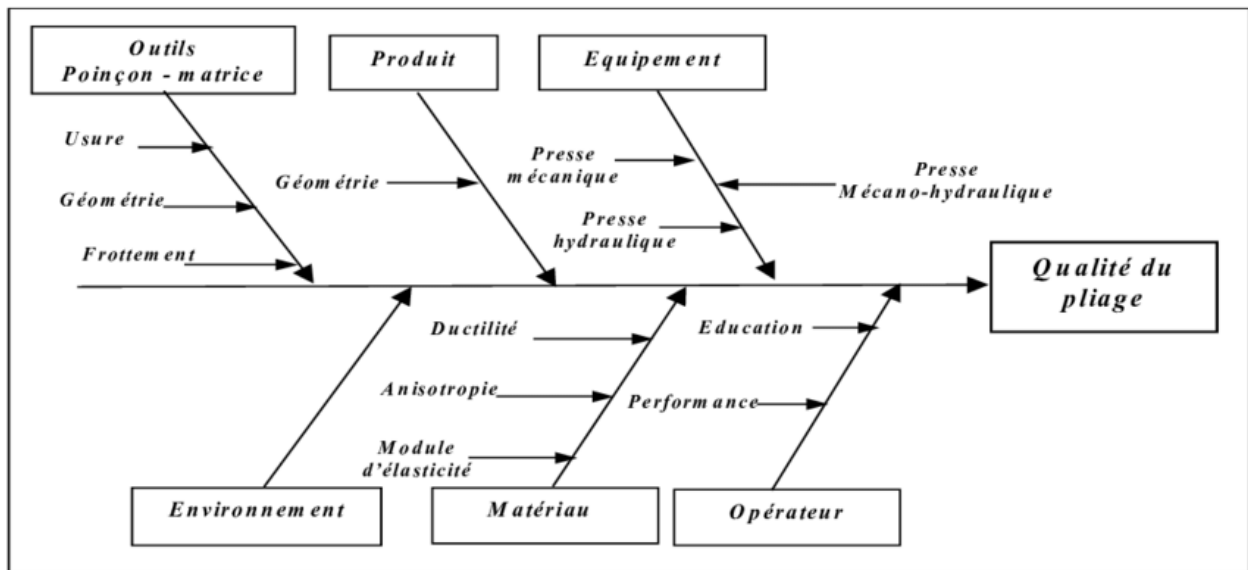


Figure 2-13 : Diagramme de d'Ishikawa pour défaillances mécaniques.

OPTIMISATION en Mise en FORME

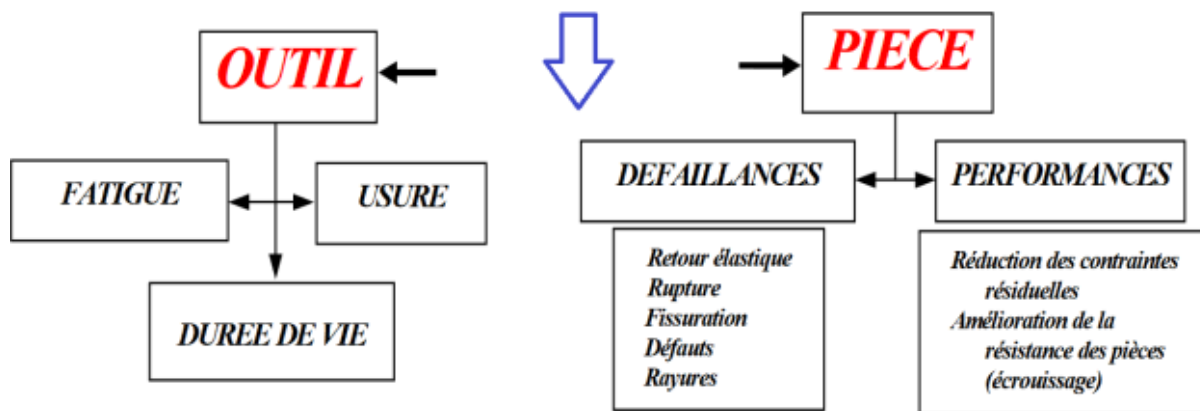


Figure 2-14: Les principaux défauts pour les procédés de mise en forme.

11.Endommagement des tôles :

Le phénomène étudié correspond à une usure progressive des surfaces métalliques, se traduisant par l'apparition de stries pouvant évoluer jusqu'à la rupture de la pièce. Ce mécanisme, largement documenté dans les recherches sur le frottement en emboutissage, survient lorsque le métal plus tendre de la tôle s'introduit dans les irrégularités de l'outil sous l'effet de la pression. Cette interaction provoque l'arrachement de fragments métalliques qui

se logent dans les défauts de surface et forment des excroissances aggravant les altérations. L'accumulation de ces dépôts entrave le passage du métal et peut, à terme, conduire à la défaillance de la pièce. [35] 2-

12. Les types d'endommagement :

1. Déformation :

Le gauchissement est la flexion ou la torsion inattendue de la tôle pendant le processus de pliage, ce qui entraîne des pièces de forme irrégulière. Ce défaut peut compromettre la fonctionnalité et la qualité esthétique du produit final. [36]

- **Causes:**

-**Épaisseur inégale du matériau et contraintes** : Les variations d'épaisseur de la tôle et l'application inégale de contraintes lors du pliage peuvent provoquer un gauchissement.

-**Outillage inadéquat** : Des outils incorrects ou mal alignés peuvent entraîner des forces de flexion inégales et provoquer des déformations. [36]

-**Fissuration** :

La fissuration est un défaut grave qui se produit lorsque le matériau est étiré au-delà de ses limites de traction, et qui apparaît généralement sur la surface extérieure du pli. Cela peut affaiblir considérablement l'intégrité structurelle de la pièce. [36]



Figure 2-15: défaut de pliage.

- **Causes des fissures :**

-**Ductilité des matériaux** : Les matériaux fragiles comme la fonte ou certains alliages d'acier sont plus susceptibles de se fissurer.

-Rayon de courbure aiguë : Le pliage de matériaux dont la ductilité est insuffisante dans des rayons aigus augmente le risque de fissuration.

-Outillage incorrect : Un mauvais alignement ou un outillage inadéquat peut créer des concentrations de contraintes qui entraînent des fissures. [36]

-Cintrage excessif ou insuffisant :

L'angle de cintrage est trop prononcé (cintrage excessif) ou trop faible (cintrage insuffisant) par rapport aux spécifications de conception. [37]

- **Causes :**
- Programmation incorrecte de la presse plieuse.
- Hypothèses incorrectes concernant les propriétés du matériau.
- Compensation incorrecte du retour élastique.
- Mauvais choix de matériau :

Le choix du matériau pour la tôlerie est important pour garantir la qualité et la durabilité des pièces pliées. Certaines tôles sont plus adaptées à certaines applications que d'autres, en fonction de leurs propriétés mécaniques, de leur résistance à la corrosion et de leur ductilité. Il est donc essentiel de choisir le matériau approprié en fonction des exigences spécifiques du projet. [38]

2. Surcharge :

Les suspensions s'écrasent sous l'excès de charge et perdent leur rôle de tampon. Les chocs de la route remontent alors directement dans le châssis en acier, fragilisant toute la structure.

Le système de freinage surchauffe rapidement sous la contrainte. Une surcharge allonge les distances d'arrêt de façon dramatique et dangereuse, augmentant le risque d'accident.

L'usure invisible des roulements est particulièrement traître. Ces petites pièces encaissent des pressions folles et finissent par casser net sans prévenir, souvent en plein trajet. [39]

3. Corrosion :

La corrosion est une interaction physico-chimique entre un métal et son environnement entraînant des modifications dans les propriétés du métal et souvent une dégradation fonctionnelle du métal lui-même, de son environnement. L'endommagement des matériaux par corrosion est affecté par de nombreux facteurs tels que le matériau, les conditions de chargement et l'environnement. [40]

Bien que toutes les attaches de remorque soient dotées d'un revêtement protecteur, celui-ci peut s'user avec le temps en cas d'utilisation intensive, d'entretien inapproprié et de surexposition aux éléments. Recherchez la corrosion autour des trous des tiges d'attache de remorque et à l'intérieur de l'ouverture du receveur. Si vous remarquez des taches qui ont usé le revêtement en poudre, vous voudrez les retoucher avec une peinture antirouille pour refermer le métal en dessous. S'il a déjà commencé à rouiller, vous voulez enlever cette rouille avec un antirouille fait maison ou acheté en magasin, puis appliquer la peinture dessus. Ne peignez pas sur la rouille car la corrosion se poursuivra en dessous. [39]



Figure 2-16:corrosion.

4. La fatigue :

Est un paramètre important pour caractériser le comportement des matériaux métalliques fonctionnant sous des charges variables qui modifie les propriétés locales d'un matériau après un certain temps. Ce phénomène est notamment caractérisé par une variation de contrainte inférieure à la limite élastique du matériau.

Les étapes principales de la rupture par fatigue :

Sont l'amorçage, la propagation de fissures et la rupture finale. Le comportement à la fatigue d'un matériau est affecté par des facteurs métallurgiques et environnementaux. La fatigue est la principale cause pour 80-90% de ruptures techniques. [41]

13. Conclusion :

Ce chapitre a permis de mettre en lumière la complexité mécanique et technologique qui caractérise l'opération de pliage des tôles. À travers l'étude des différentes configurations d'outillages, il apparaît que le choix d'un mode de pliage notamment le compromis technico-économique entre la flexibilité du pliage en l'air et la précision géométrique du pliage en frappe conditionne directement l'état de contrainte et de déformation dans l'épaisseur du matériau. La modélisation de la fibre neutre s'impose comme l'outil indispensable pour anticiper la longueur développée des flans avant leur mise en forme. Cependant, l'obtention d'une pièce conforme aux exigences industrielles reste intimement liée à la maîtrise des paramètres clés que sont le rayon de la matrice, le jeu de pliage et, de manière plus critique, le retour élastique. Comme nous l'avons souligné, les défaillances mécaniques lors de cette opération se séparent en défauts globaux d'ordre géométrique et en défauts locaux d'ordre structurel. Cette classification des anomalies met en évidence la nécessité d'anticiper le comportement post-formage du matériau. Les notions fondamentales développées tout au long de ce chapitre serviront de socle théorique pour la suite de notre étude, qui se focalisera sur la modélisation et l'optimisation des procédés afin de prédire et de corriger ces instabilités de mise en forme.

Chapitre 3 : Logiciel de simulation

Abaqus :

1. Introduction :

Ce troisième chapitre est dédié à la validation mécanique et à l'analyse comparative des différentes configurations de ridelles envisagées dans cette étude. L'objectif principal est d'évaluer quantitativement l'apport des modifications géométriques par pliage (en U et en V) par rapport à la conception rectiligne traditionnelle (ridelle simple), afin d'optimiser la résistance structurelle face aux sollicitations en conditions réelles d'utilisation.

Pour mener à bien cette évaluation, nous avons recours à la méthode des éléments finis via une démarche de simulation numérique rigoureuse.

À travers cette approche numérique intégrée, ce chapitre mettra en relief l'influence directe de la géométrie sur les chemins d'efforts, guidant ainsi le choix du design le plus performant et le mieux adapté aux exigences de l'industrie de construction de remorques.

2. Logiciel de simulation Abaqus :

Abaqus est un logiciel de simulation reconnu pour sa capacité à modéliser des phénomènes complexes en **mécanique des solides**. Il te permet de créer des modèles 3D précis, intégrant des matériaux variés, des **géométries complexes** et des **conditions aux limites** réalistes. Grâce à son moteur puissant, tu peux simuler des comportements non linéaires, comme la **plasticité**, la rupture ou le contact entre pièces, ce qui est essentiel pour des analyses fiables en ingénierie.

Matériaux non linéaires : Abaqus gère des lois de comportement sophistiquées, incluant l'élasticité, la plasticité, la viscoélasticité, et même la rupture progressive.

Contact et interactions : Il simule les interactions entre surfaces, comme le **frottement** ou le glissement, indispensables pour des assemblages mécaniques.

Maillage adaptatif : Le logiciel ajuste automatiquement la finesse du maillage pour optimiser la précision sans alourdir inutilement le calcul.

Cette flexibilité te donne un contrôle total sur la simulation, te permettant d'explorer des scénarios réalistes et complexes avec une grande confiance. [42]

L'approche numérique est aujourd'hui reconnue étant un outil pouvant largement faciliter la conception de pièce produits. La généralisation de l'utilisation des outils virtuels pour l'optimisation des pièces mécaniques a été possible grâce à l'apparition de logiciels performants et flexibles. Pour mener à bien notre étude, nous avons retenu le code de calcul Abaqus. Ce choix résulte surtout d'une question d'opportunité. Dans ce qui suit nous décrivons ce logiciel, sans discuter des intérêts respectifs des codes concurrents. Nous donnons donc essentiellement la définition des quantités exigées par le code et les expressions, notamment tensorielles, qui permettent de calculer certaines grandeurs souvent exprimées sous forme incrémentale. [43]

3. Comment créer un modèle dans Abaqus :

- **Dessiner le modèle** : le module PART de créer tous les objets géométriques nécessaires au problème, soit en les dessinant dans Abaqus CAE, soit en les important d'un autre logiciel de dessin.
- Dessiner le profil 2D de la forme voulue
- Le développer en 3D
- Rajouter les détails manquants.

- **Affecter les propriétés matériau à l'objet :** le module PROPERTY Permet, comme son nom l'indique, de définir toutes les propriétés matérielles d'un objet géométrique ou d'une partie de ces objets.
- Créer le matériau.
- Créer les sections sur lesquelles appliquer les matériaux.
- Affecter les matériaux aux sections correspondantes.
- **Assembler le modèle :** le module ASSEMBLY permet d'assembler les différents objets géométrique Abaqus contient un seul assemblage.
- Créer les instances.
- Les positionner dans le repère général.
- **Définir les pas d'analyse :** le module STEP permet de définir toutes les requêtes pour le post traitement. Notamment le (temps) à partir duquel une force est appliqué et jusqu'à quand, il est aussi possible de créer des forces ou des conditions limites qui s'activent à des moments donnés.
- **Créer les intersections entre les instances :** le module INTERACTION Permet de spécifier toutes les interactions entre les différentes parties et régions du modèle, elles peuvent être de différents natures mécaniques, thermiques ou autres. Il faut savoir qu'Abaqus ne prend en compte que les interactions explicitement définies, la proximité géométrique n'étant pas suffisantes.
- Créer les surfaces.
- Définir les types de contacts.
- Associer des surfaces avec des types de contact.
- **Appliquer les conditions aux limites et les chargements :** le module LOAD permet de spécifier tous les chargements, conditions aux limites et champs. Il faut que les chargements et les conditions limites sont dépendent des steps, par exemple une force est appliquées au step 1 mais inactive au step 2.
- Définir les pas d'application.
- Définir les types de CL ou chargement nécessaires pour générer un maillage éléments finis sur une pièce ou un assemblage.
- Partitionner le modèle.
- Choisir les types de maille (éléments).
- Discrétiser le modèle.

- **Créer et lancer un calcul** : une fois que toutes les tâches de définition du modèle ont été réalisées, il faut utiliser le modèle JOB pour analyser ce modèle. Abaqus va alors réaliser tous les calculs nécessaires et post-traiter les résultats demandés.
- **Visualiser les résultats** : le mode VISUALIZATION permet de visualiser le modèle et les résultats, les courbes de charges, les déformations. [42]

4. Le matériau utilisé :

Acier S235 est une nuance d'acier de construction au carbone non allié, selon la norme EN 10025-2, le matériau S235 a principalement 3 degrés de qualité : S235JR (1.0038), S235JO (1.0114), S235J2 (1.0117). [44]

Matériau S235 a de bonnes caractéristiques mécaniques, telles que la plasticité, la ténacité et la soudabilité, une certaine résistance et de bonnes propriétés de flexion à froid.

Propriétés physiques à 20 °C :

- Densité : $\rho=7,85$.
- Module d'élasticité : $E=210\,000\text{ N/mm}^2$.
- Coefficient de poisson : $\nu=0,3$.
- Conductivité thermique λ : à 20 °C en W (m.k) : 45 W/m.k.

5. Simulation numérique du pliage :

La fabrication des pièces à partir des tôles, est généralement réalisée sur des presses, à l'aide d'un poinçon et d'une matrice. Les critères de qualité du produit étant de plus en plus sévères en termes de précision géométrique et de performance mécanique, l'optimisation du procédé de mise en forme est très souvent rendue nécessaire.

1) Forme de ridelle :

Dans le cadre de l'évolution du design des ridelles, les modèles anciens étaient généralement réalisés sous forme simple et rectiligne, privilégiant la facilité de fabrication mais offrant une résistance limitée face aux contraintes mécaniques.

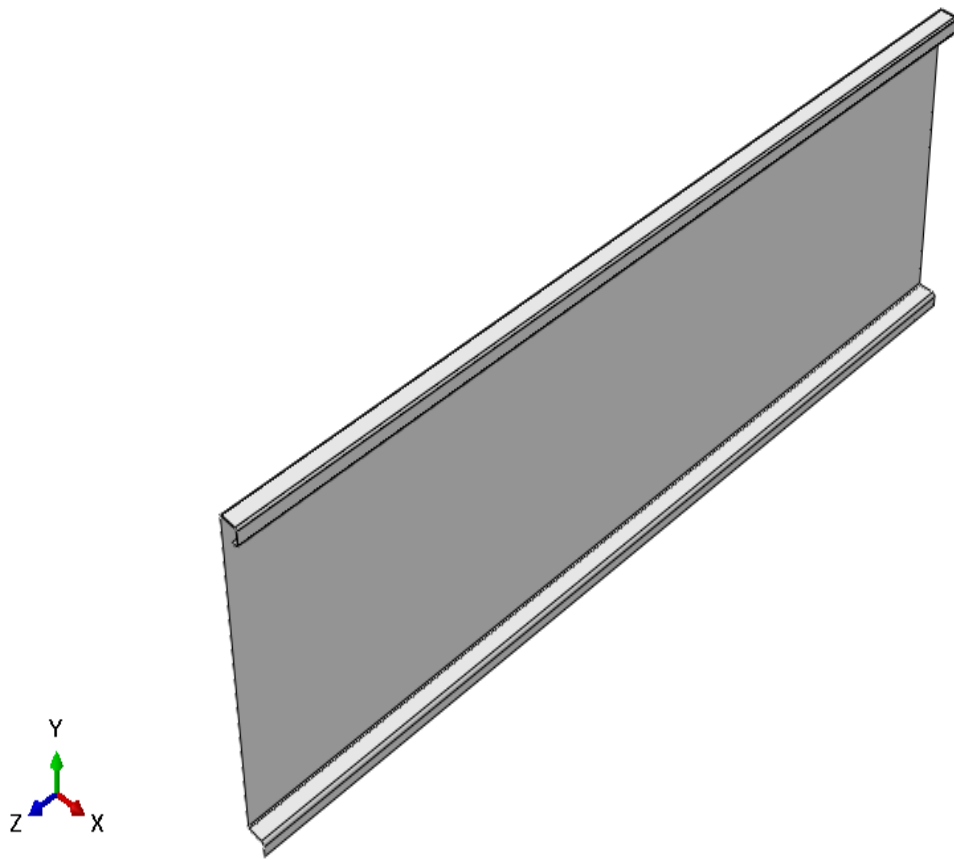


Figure 3-1: Ridelle simple.

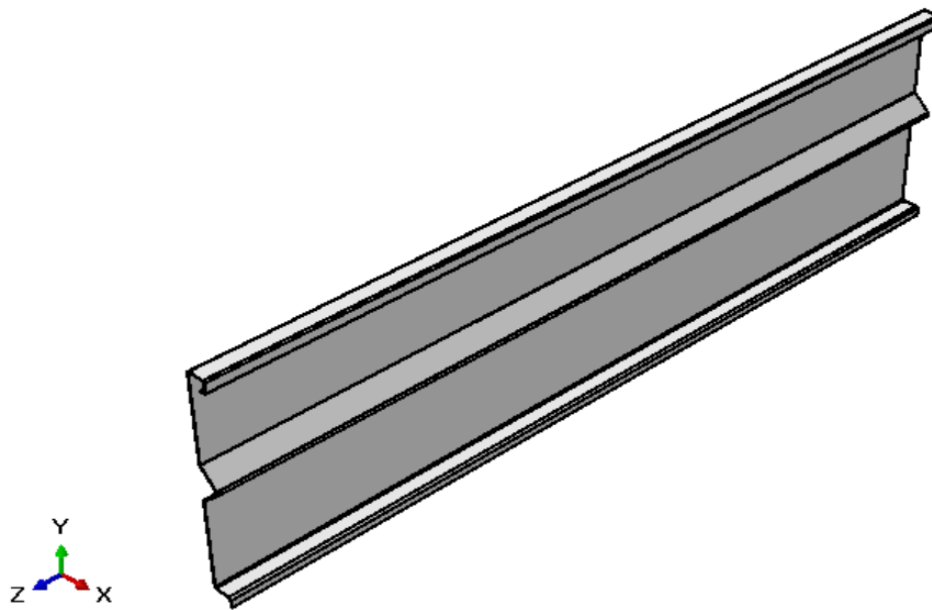


Figure 3-2: Ridelle en V.

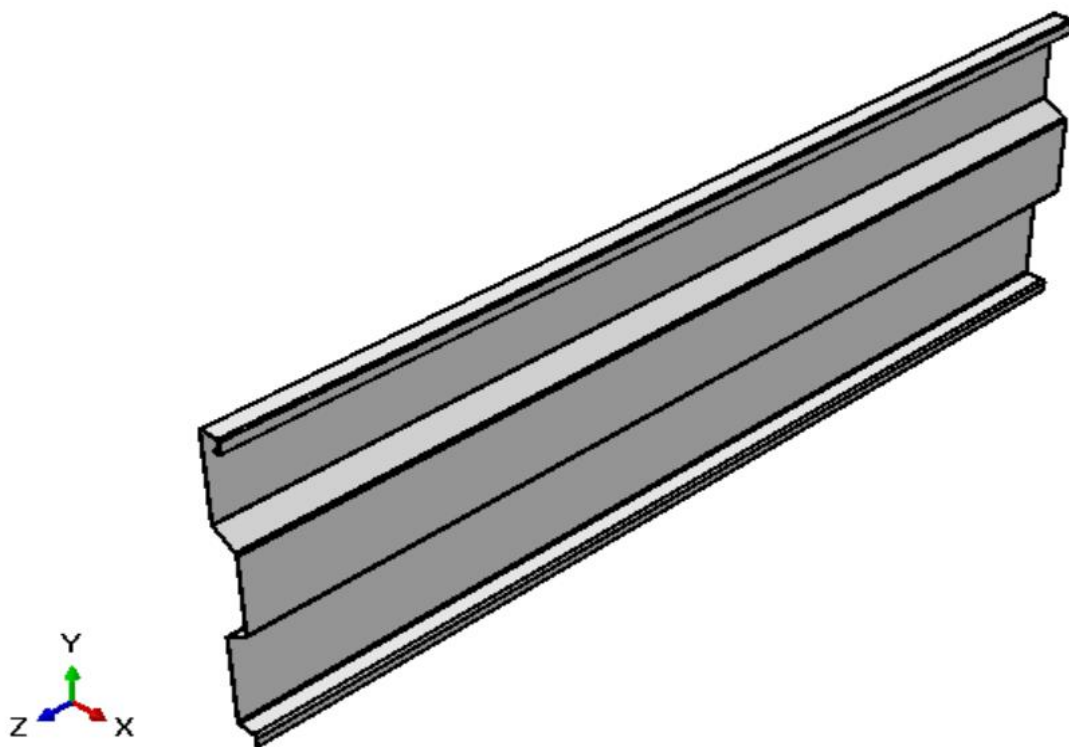


Figure 3-3:Ridelle en U.

Afin d'améliorer la performance et la durabilité, nous avons étudié deux nouvelles configurations basées sur le pliage en U et le pliage en V. Ces géométries permettent une meilleure répartition des efforts et augmentent la rigidité globale de la pièce.

Pour valider cette hypothèse, une simulation numérique a été réalisée sur les deux formes proposées, mettant en évidence leur comportement sous différentes sollicitations.

Les résultats montrent que ces pliages augmentent considérablement la résistance des ridelles contre la déformation. Cette conception représente une nette amélioration par rapport aux ridelles traditionnelles, ouvrant ainsi la voie au développement et à l'optimisation des structures utilisées dans le secteur industriel.

2) Maillage de la ridelle :

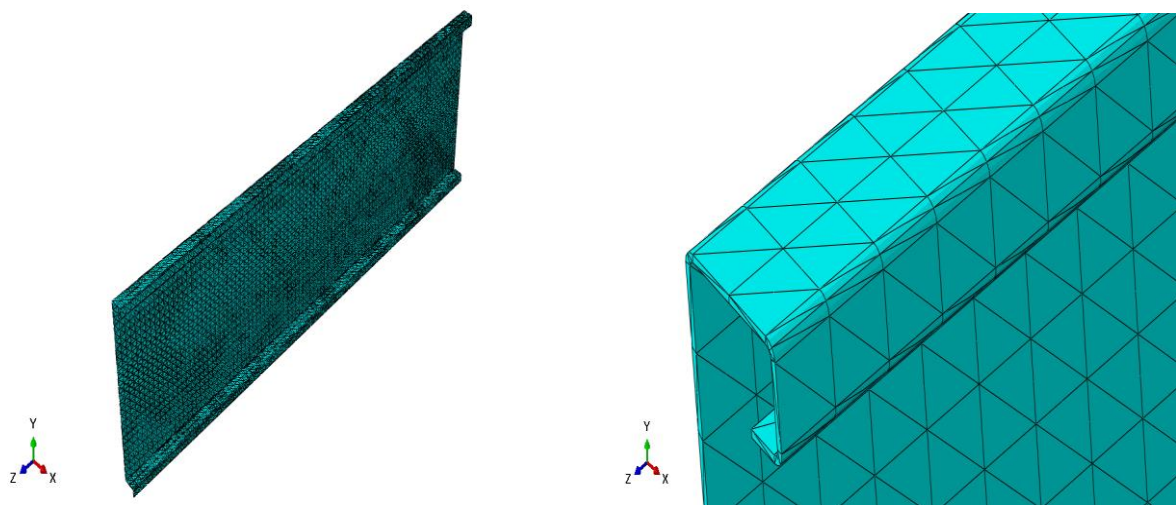


Figure3-4: Maillage de la ridelle simple.

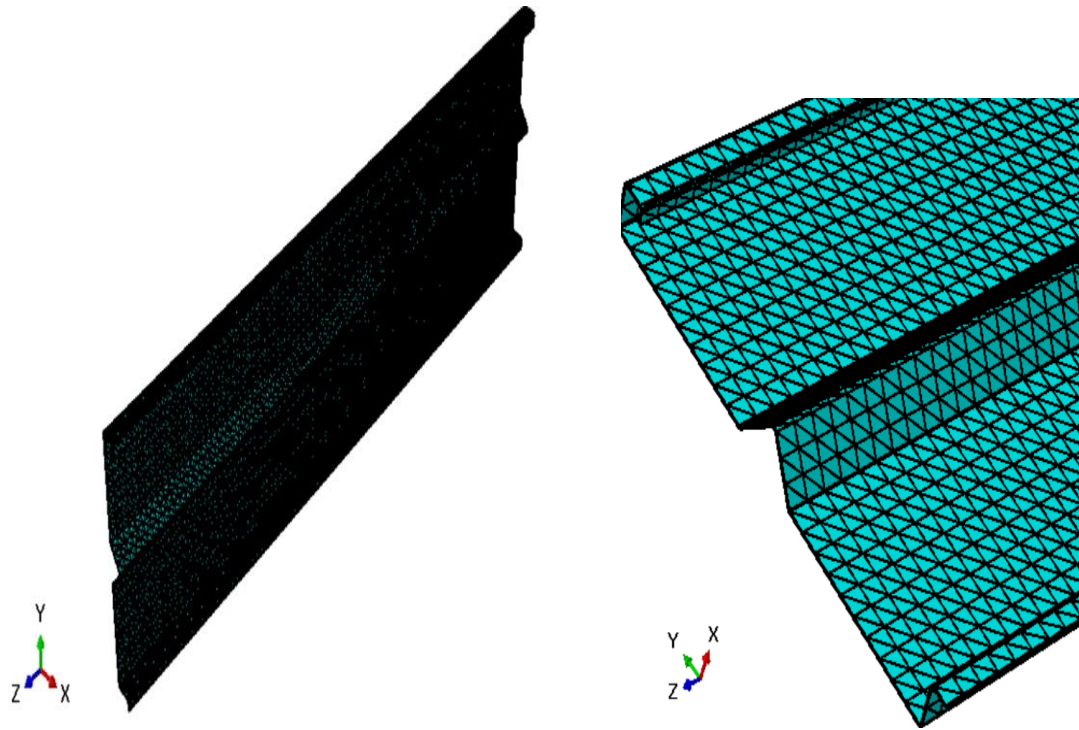


Figure 3- 5: Maillage de la ridelle en V.

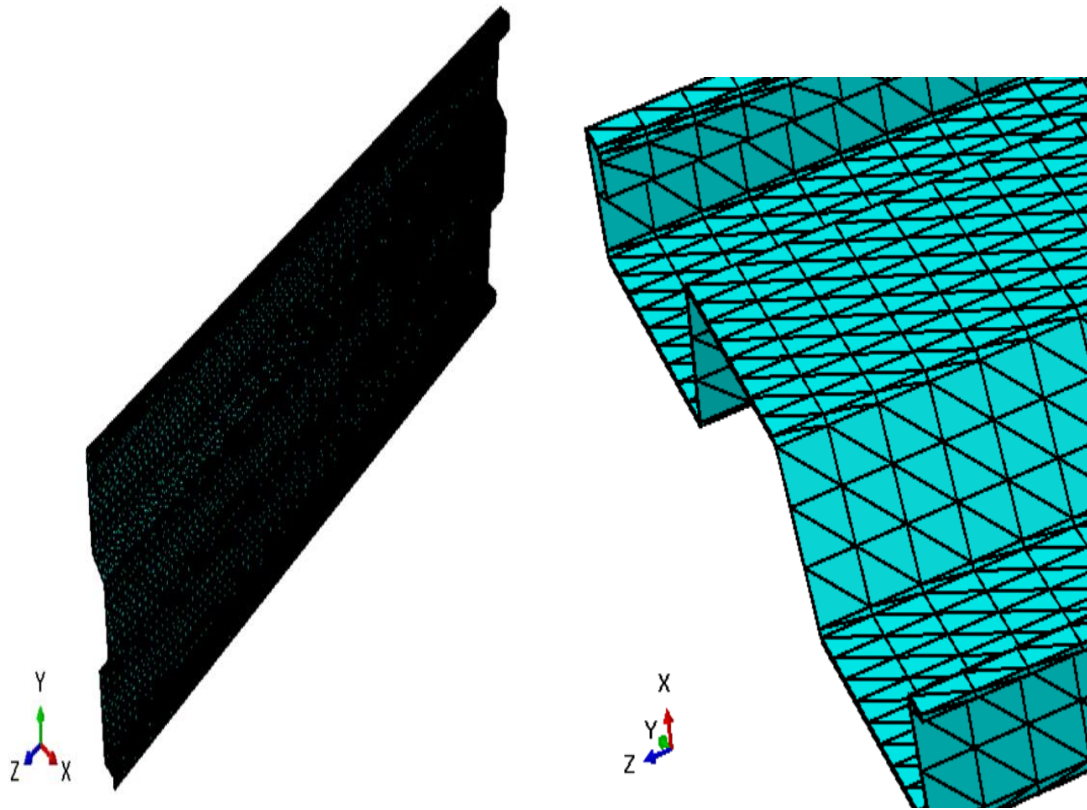


Figure 3-6: Maillage de la ridelle en U.

Dans le cadre de la modélisation numérique des ridelles, le choix du type de maillage joue un rôle déterminant dans la précision des résultats obtenus. Pour les ridelles simples, un maillage triangulaire a été adopté, car il permet de représenter efficacement les surfaces planes et de garantir une bonne stabilité numérique tout en réduisant le temps de calcul.

En revanche, pour les ridelles pliées en **U** et en **V**, le recours au maillage triangulaire s'avère encore plus pertinent : la géométrie complexe des plis nécessite une discrétisation fine afin de capter correctement les concentrations de contraintes au niveau des zones de courbure.

Ce type de maillage offre une flexibilité supérieure par rapport aux maillages quadrangulaires, puisqu'il s'adapte aisément aux formes irrégulières et assure une meilleure convergence des calculs. Ainsi, l'utilisation systématique du maillage triangulaire pour les trois configurations étudiées garantit une comparaison cohérente et fiable des performances mécaniques entre les ridelles simples et celles renforcées par pliage.

3) Les conditions aux limite :

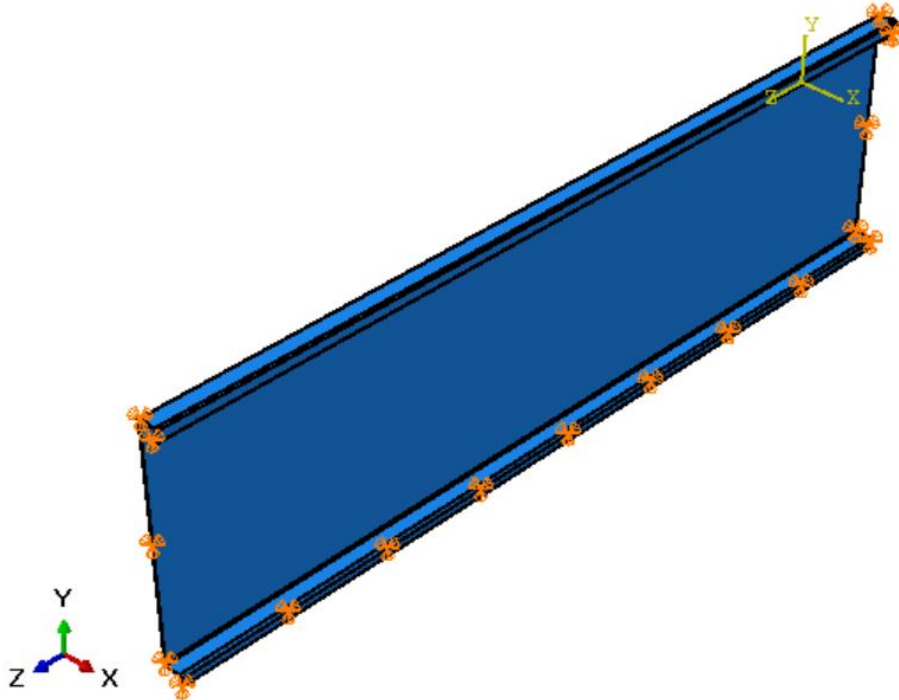


Figure 3-7: Ridelle Simple.

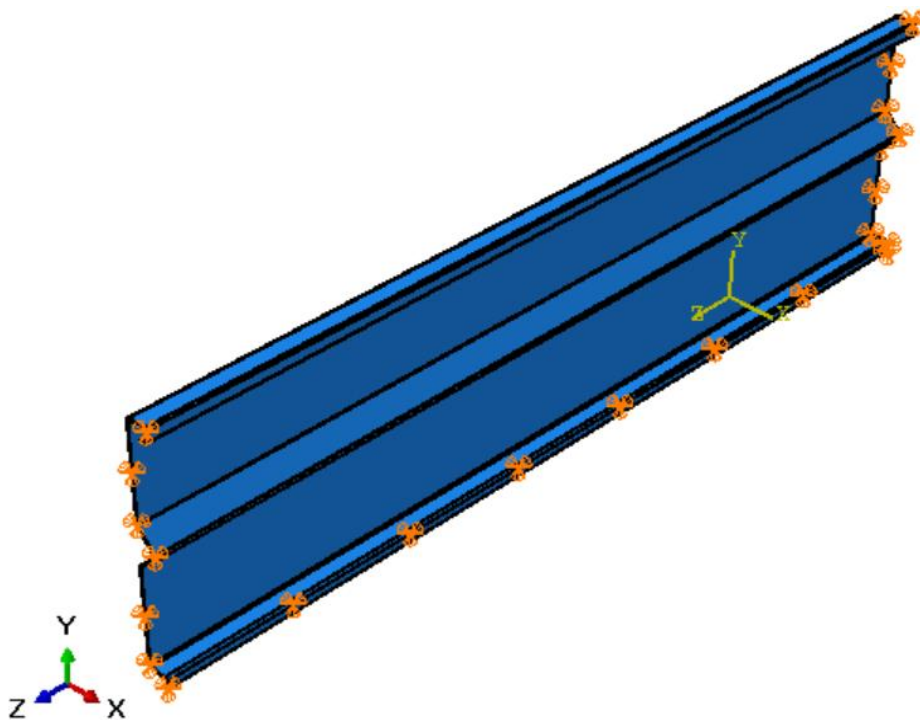


Figure 3-8: Ridelle en V.

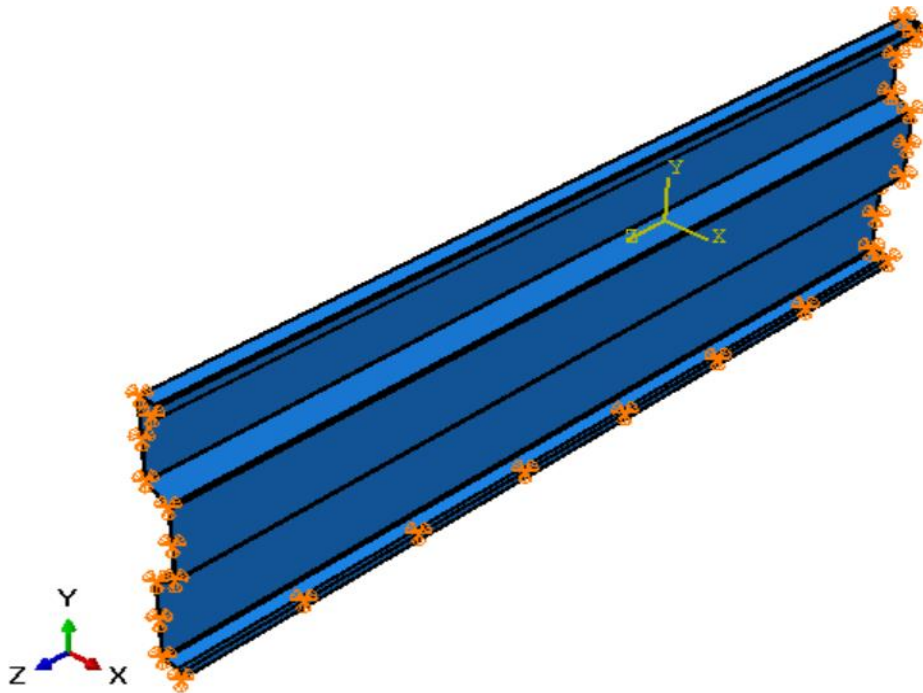


Figure 3-17:Ridelle en U.

Dans le cadre de la définition des conditions aux limites appliquées aux simulations numériques des ridelles, nous avons retenu une configuration en appui fixe sur le côté de la pièce, correspondant au maintien rigide assuré par la plateforme. Concrètement, cette condition se traduit par l'annulation des déplacements dans les trois directions principales

Soit :

$$U1=0, U2=0, U3=0.$$

Ainsi, aucune translation n'est permise au niveau des zones de fixation, ce qui reflète fidèlement la réalité physique du montage. L'imposition de ces contraintes garantit que la simulation reproduit correctement le comportement mécanique de la ridelle sous charge, qu'il s'agisse du modèle simple ou des variantes pliées en **U** et en **V**.

Cette approche permet d'obtenir des résultats cohérents et comparables, en mettant en évidence l'influence des conditions de blocage sur la répartition des contraintes et la rigidité globale de chaque configuration

4) Type de chargement :

Dans le cadre de la simulation numérique des ridelles, nous avons proposé l'application d'une pression de **$P=2,6 \text{ KPa}$** , afin de représenter de manière réaliste les sollicitations auxquelles la pièce peut être soumise en conditions d'utilisation.

Ce choix se justifie par la nécessité de reproduire un scénario de charge critique, correspondant aux efforts maximaux transmis par la plateforme lors du transport ou du maintien des charges.

L'application de cette force permet d'évaluer la résistance structurelle de la ridelle et de mettre en évidence les zones de concentration des contraintes.

Ainsi, la comparaison entre la ridelle simple et celles pliées en **U** et en **V** devient pertinente, car elle révèle l'influence directe de la géométrie sur la capacité de la pièce à supporter des efforts élevés. Cette approche garantit une analyse fiable et cohérente, essentielle pour valider le choix du design le plus performant dans un contexte industriel.

Dans le cas d'une remorque agricole de 4 tonnes remplie de sable sec, les dimensions de la ridelle considérées sont une longueur de **$L= 1,08 \text{ m}$** et une hauteur de **$h= 0,487 \text{ m}$** . En utilisant un poids volumique du sable de **$P= 16 \text{ kN/m}^3$** et un coefficient de poussée active **$Ka=0,33$** , la pression maximale au bas de la ridelle est calculée selon la relation **$P=Ka \cdot P \cdot h$** . Le calcul donne **$P=0,33 \times 16 \times 0,487 \approx 2,6 \text{ kPa}$** , soit environ **$260 \text{ kg/m}^2$** . Ce résultat montre que la poussée latérale du sable, bien que modérée, exerce une contrainte significative sur la ridelle, ce qui justifie l'importance de renforcer sa conception pour garantir la sécurité et la durabilité de la remorque.

6. Conclusion :

Ce chapitre est consacré à la présentation détaillée des trois modèles géométriques et mécaniques retenus pour l'étude approfondie du processus de pliage. La sélection de ces configurations spécifiques n'est pas fortuite ; elle résulte d'une analyse préliminaire rigoureuse fondée sur des calculs théoriques et des simulations exploratoires visant à assurer la représentativité des phénomènes physiques observés. Chaque modèle a été rigoureusement défini en intégrant un ensemble précis de conditions aux limites, lesquelles assurent une continuité cohérente entre les interactions mécaniques aux interfaces et les contraintes imposées par l'environnement de simulation.

Pour valider ces modèles et quantifier le comportement élasto-plastique des matériaux soumis aux sollicitations, nous avons exploité les capacités avancées du logiciel **ABAQUS**. Cet outil de calcul par éléments finis a joué un rôle déterminant dans notre analyse, nous permettant d'extraire des données critiques sur l'état de sollicitation interne de la structure. Plus précisément, les simulations ont permis de cartographier avec précision la répartition des contraintes de Von Mises, offrant ainsi une vision claire des zones de concentration de contraintes susceptibles d'initier une défaillance ou une déformation permanente. Parallèlement, l'exploitation des champs de déplacements a permis de caractériser l'évolution cinématique du pliage, fournissant ainsi une corrélation directe entre les efforts appliqués et la géométrie finale obtenue après déchargement.

Chapitre 4 : Les résultats :

1. Introduction :

Ce chapitre est dédié à l'analyse approfondie des résultats numériques issus de notre étude, laquelle s'appuie sur la simulation par éléments finis du procédé de mise en forme par pliage en U, réalisée à l'aide du logiciel **ABAQUS**. L'enjeu principal de ce travail consiste à évaluer avec précision l'influence de divers paramètres géométriques et numériques sur la réponse mécanique de la structure, notamment sur l'évolution de l'effort de pliage.

Pour ce faire, notre démarche s'articule autour de deux axes d'investigation majeurs. D'une part, nous examinons la sensibilité du modèle au maillage, en analysant la convergence des résultats pour garantir la fiabilité des solutions calculées. D'autre part, nous étudions l'impact des caractéristiques dimensionnelles de la pièce, plus précisément l'épaisseur de la ridelle, sur le comportement élasto-plastique du matériau durant le formage. À travers cette approche comparative, nous cherchons à établir des corrélations claires entre ces paramètres et la performance du procédé, permettant ainsi d'optimiser les conditions opératoires du pliage en U.

a. Les résultats de contraintes :

- **La ridelle simple :**

Soumise à une charge perpendiculaire, sa section transversale rectiligne engendre un moment quadratique extrêmement faible. En l'absence de barrière géométrique, sa raideur initiale est quasi nulle, ce qui provoque dès l'amorce du calcul un gradient de déplacement brutal au centre de la plaque.

Cet état initial s'avère hautement critique vis-à-vis du risque de voilement ou de bombement précoce.

Step1 :

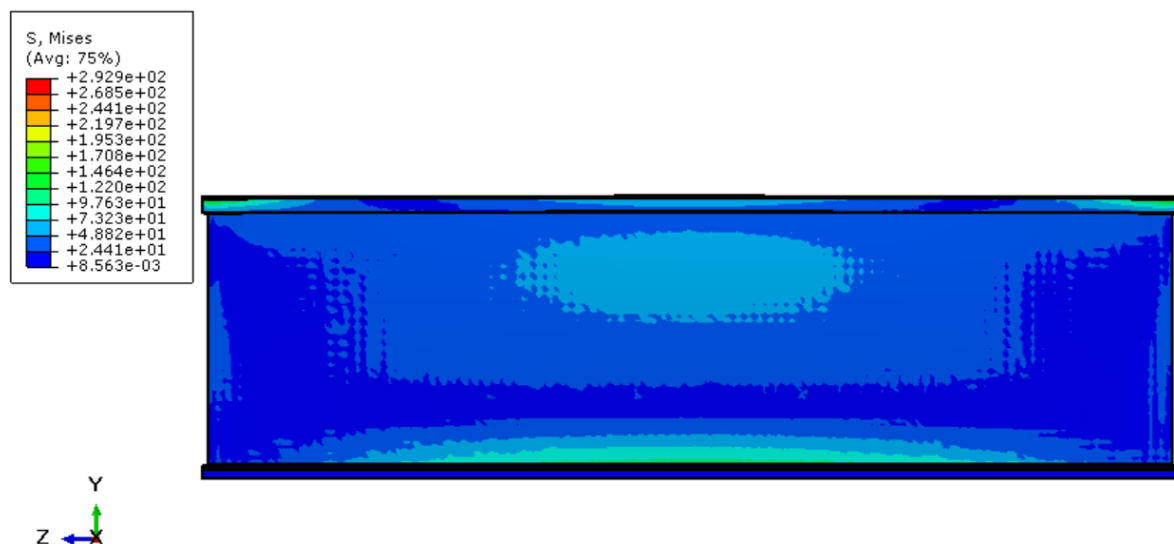


Figure 4-1: Ridelle simple.

- **La ridelle en V :**

L'introduction d'un pli longitudinal central modifie la répartition des contraintes en éloignant la matière de l'axe neutre, augmentant ainsi localement l'inertie de la section.

À l'état initial, ce pli agit comme une poutre rigide virtuelle qui bride la déformation.

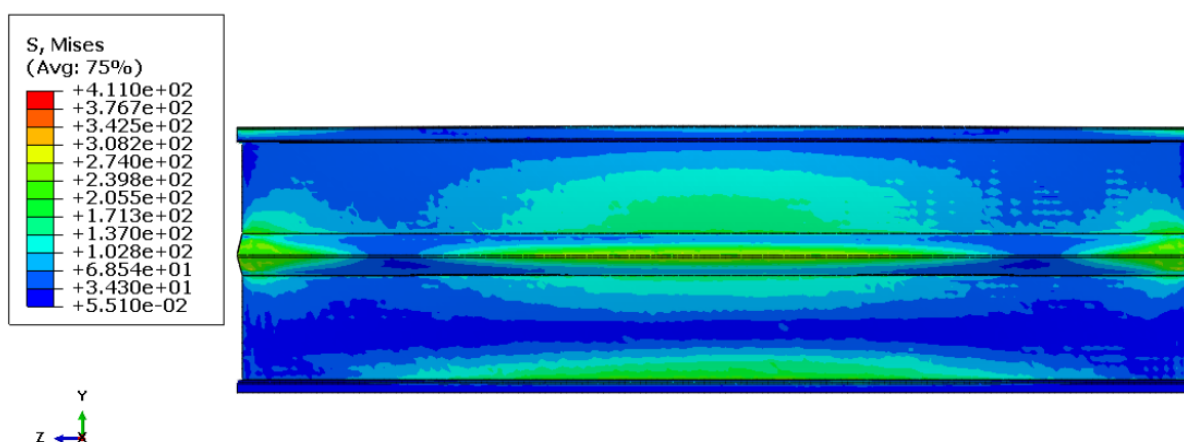


Figure 4- 2: Ridelle en V.

- **La ridelle en U :**

Cette configuration optimise au maximum la raideur initiale de la structure. Les plis multiples font office de raidisseurs intégrés successifs qui segmentent la surface. Sous la charge initiale, le champ de déformation reste confiné à des micro-déplacements locaux entre les ondulations. En annulant l'effet de « plaque souple », cette géométrie permet d'encaisser l'amorce des efforts sans fléchissement global visible.

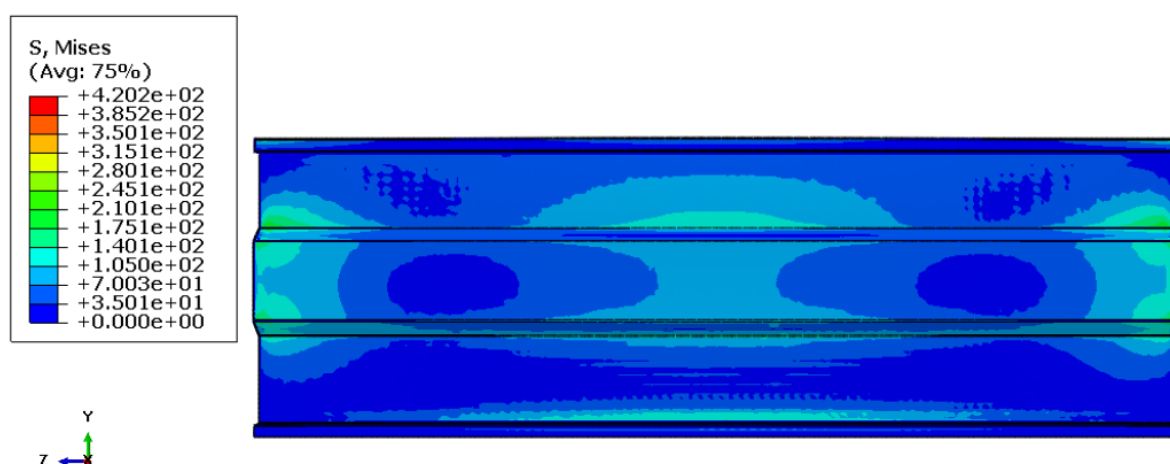


Figure 4-3: Ridelle en U.

b. La différence entre les trois modèles :

Sur la ridelle simple : La charge est absorbée par de grands déplacements. Le panneau se déforme globalement pour travailler en membrane tendue. La charge est ainsi répartie de manière diffuse et homogène sur toute la surface de la plaque (large zone verte), mais elle engendre des réactions géométriques très lourdes et directes sur les fixations d'extrémités.

Sur la ridelle en V : La charge est articulée et sectorisée. Le pli central agit comme une barrière rigide qui coupe la charge en deux. La pression n'est plus subie par le centre, mais elle est transférée et encaissée localement par les deux sous-panneaux (supérieur et inférieur). Cela crée une répartition hétérogène avec des pics d'efforts localisés aux lignes de transition du pli.

Sur la ridelle en U : La charge est fragmentée et canalisée. Grâce aux plis successifs qui agissent comme des micro-poutres, la charge est interceptée localement et transformée immédiatement en efforts de compression/cisaillement le long des arêtes. La structure refuse le déplacement global, ce qui engendre une répartition discontinue : l'effort est hautement concentré sur les sommets des plis et les ancrages, tandis que les flancs intérieurs de la tôle (zones bleues) restent totalement déchargés et au repos.

c. Les résultats de déplacement entre simple U et V :

L'analyse des résultats de simulation sous Abaqus révèle des comportements structurels distincts pour les différentes configurations étudiées. Ces variations de déplacement maximal ($U_{\text{magnitude}}$) illustrent comment la géométrie globale et le nombre de ridelles (Simple, U, V) influencent la rigidité de la structure face à une charge donnée. Lorsque l'on compare cette base aux variantes de conception.

La ridelle simple :

Cette simulation affiche un déplacement maximal. La distribution des couleurs montre une zone de déformation centrale étendue, typique d'une plaque soumise à une flexion uniforme sur ces bords.

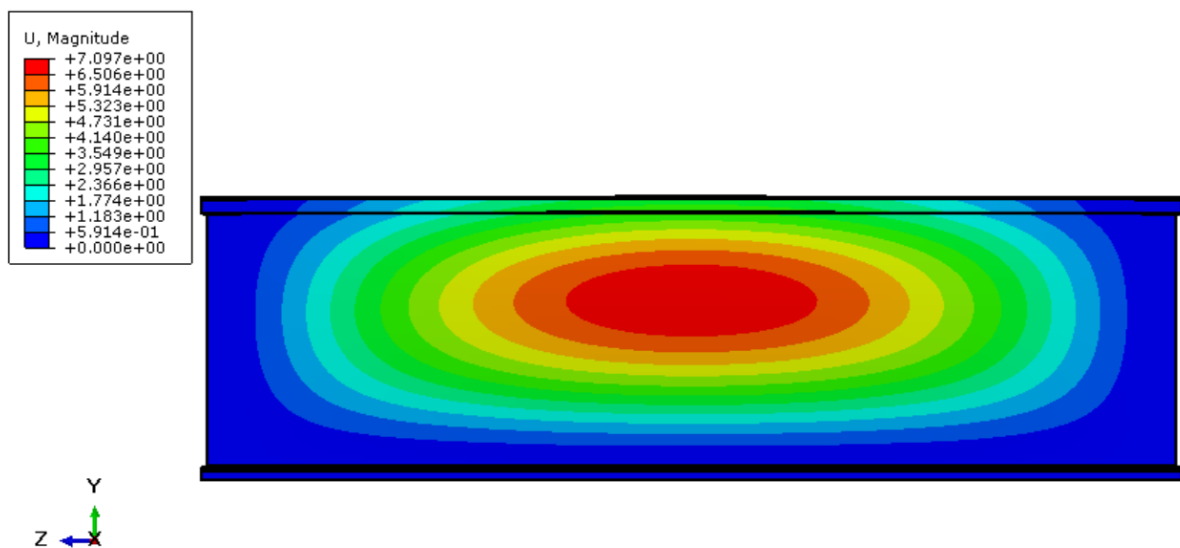


Figure 4-4: Ridelle Simple.

La ridelle en V :

Le modèle V affiche le déplacement le plus élevé. Cette augmentation significative suggère que la géométrie en "V" induit une plus grande flexibilité ou une concentration de déformation qui réduit la raideur globale du système.

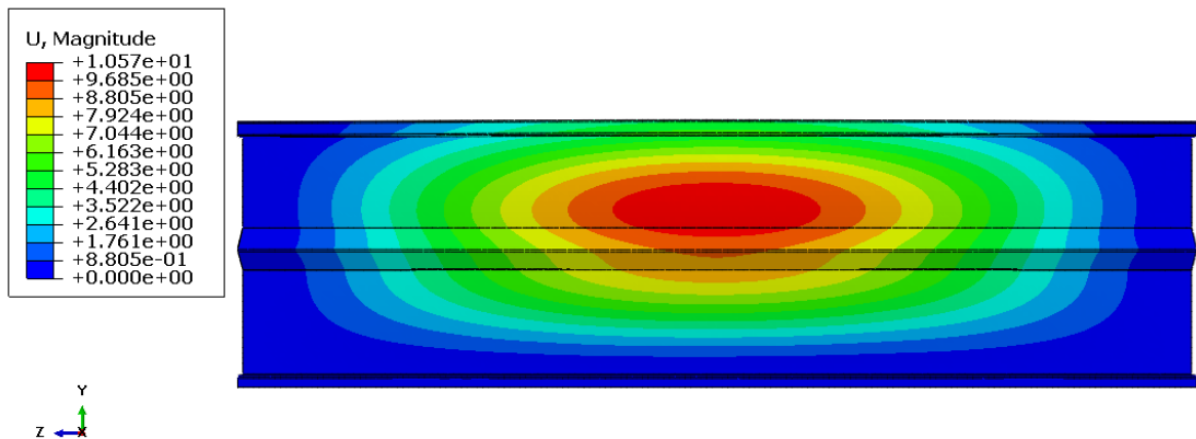


Figure 4-5: Ridelle en V.

La ridelle en U :

À l'opposé, le modèle U démontre une performance supérieure en termes de rigidité, avec un déplacement maximal. Cette réduction notable, comparativement aux deux autres modèles, indique que la forme en "U" offre une meilleure résistance à la flexion, permettant une meilleure répartition des efforts et une limitation efficace des déformations locales.

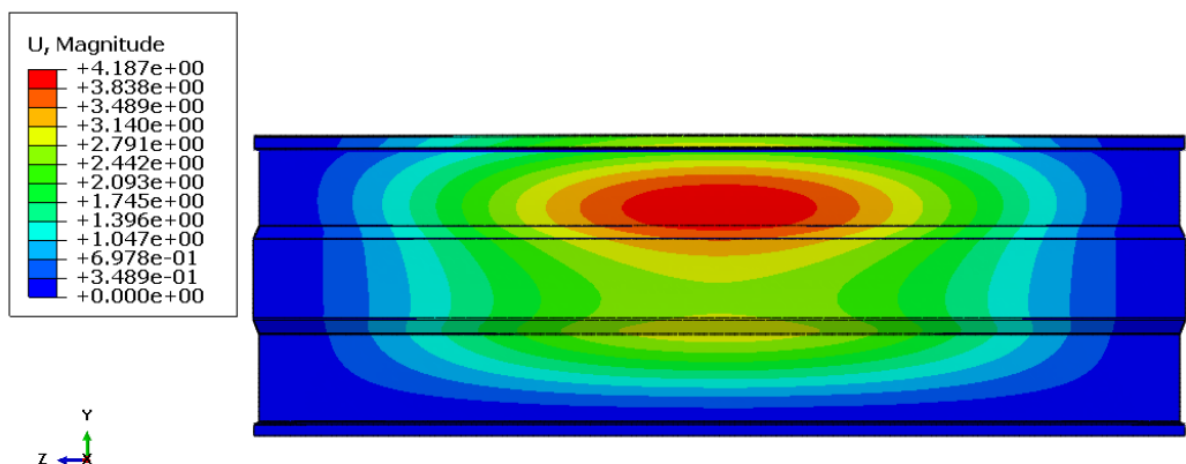


Figure 4-6: Ridelle en U.

Ces résultats mettent en évidence l'importance critique de la forme des ridelles dans la conception mécanique, le choix d'une géométrie adaptée étant essentiel pour optimiser la tenue en service et la stabilité de la pièce.

d. Par rapport U1 :

Le paramètre U1 représente généralement la composante du déplacement dans une direction spécifique (souvent l'axe X ou la direction transversale, selon le système de coordonnées global).

- **Répartition des déformations :**

Sur les trois images, on observe une concentration des déplacements maximaux (zones rouges) au centre de la face. Cette forme elliptique indique que la structure subit une flexion typique d'une paroi soumise à une pression uniforme. Les zones bleues aux extrémités suggèrent que les bords sont probablement encastres ou fixés, limitant ainsi leur mouvement. Sur le pliage simple on remarque un petit déplacement, sur le U déplacement moyen, sur le V montre un déplacement très élevé.

Ces résultats sont essentiels pour valider la rigidité de votre conception. Si les déplacements calculés dépassent les limites admissibles fixées par vos critères de conception ou les normes de sécurité, il sera nécessaire d'augmenter la raideur de la ridelle.

Ridelle "Simple" :

On montre une répartition de déplacement beaucoup plus uniforme et diffuse. Le gradient de couleur entre le rouge (maximal) et le bleu (minimal) est plus étendu. Sans l'élément structurel de renfort (comme dans le "U" ou le "V"), la ridelle subit une déformation plus homogène sur toute sa surface, ce qui peut signifier une rigidité globale moindre, rendant la structure plus sensible au voilement ou à la flexion globale sous charge.

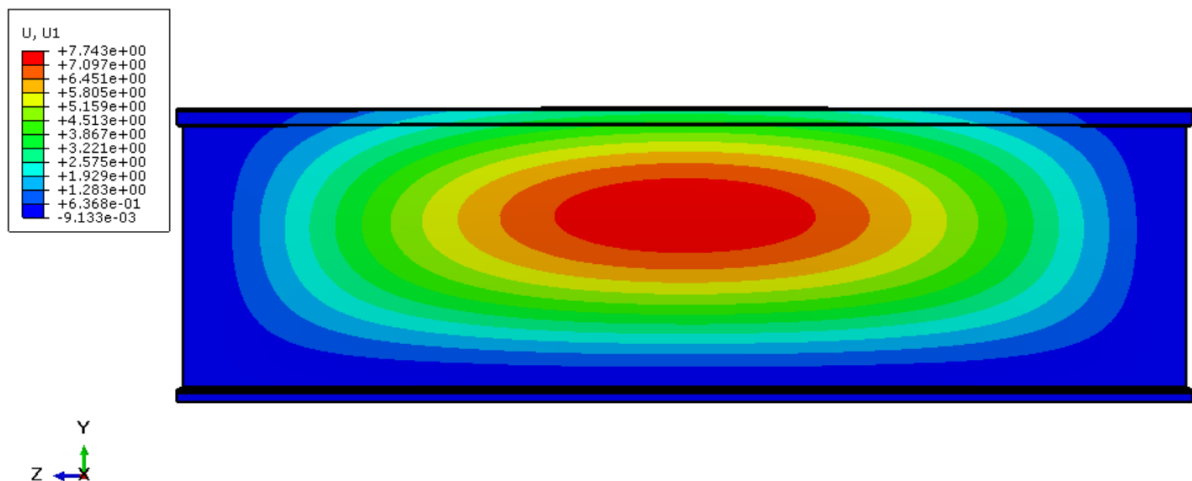


Figure 4-7: Présentation de champ déplacement U_1 sur la forme simple.

Ridelle type "V" :

Cette variante présente un comportement distinct, marqué par une influence notable de la nervure centrale (la forme en V). Le déplacement maximal en haut est encore présent, mais la zone bleue sombre (déplacement minimal ou opposé) est plus prononcée au niveau du creux de la nervure. Cela indique que la géométrie en "V" modifie la raideur locale, créant une zone de contrainte ou de rigidité différente qui limite la déformation globale par rapport à un profil plat, tout en concentrant le déplacement vers la partie supérieure.

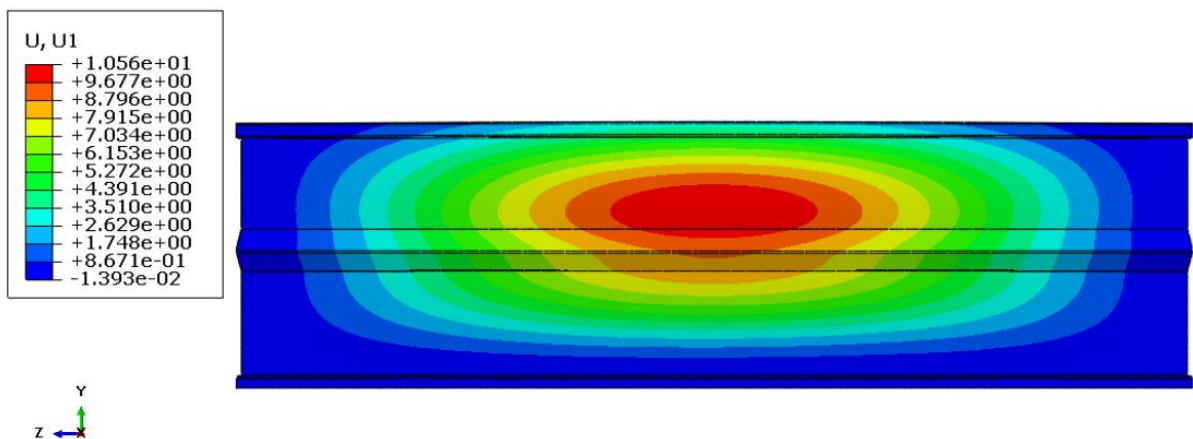


Figure 4-8: Présentation de champ déplacement U1 sur la forme V.

Ridelle type "U" :

On observe une concentration de déplacement maximale située au centre de la partie supérieure. La répartition des couleurs montre une déformation assez étendue vers le bas, suggérant une certaine souplesse de la structure sous la charge appliquée. La transition graduelle vers le bleu indique que la rigidité est répartie, mais que le centre reste le point critique de fléchissement.

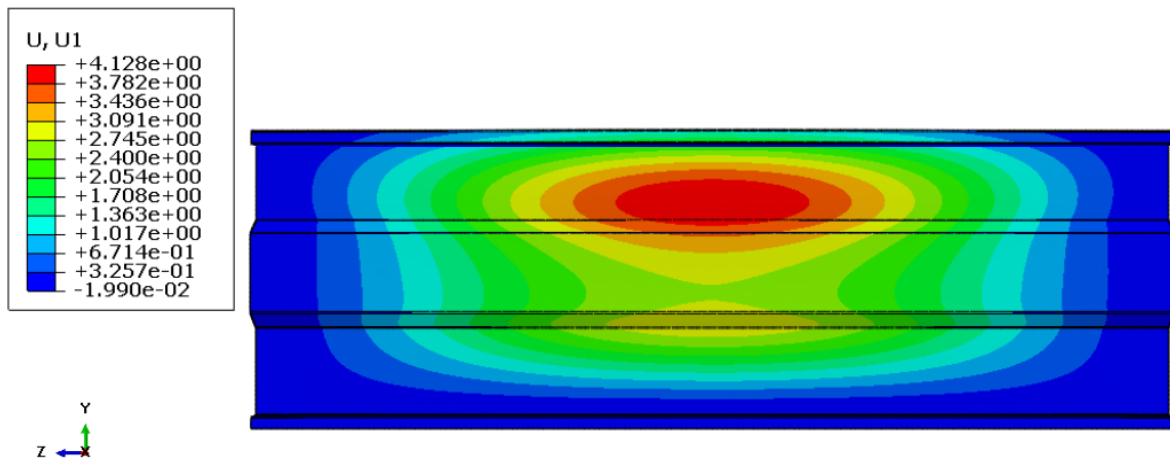


Figure 4-9: Présentation de champ déplacement U1 sur la forme U.

En résumé, ces modèles montrent comment le choix du profil de la ridelle influence directement sa capacité à résister à la déformation verticale. Tandis que le profil "Simple" offre une réponse globale plus uniforme, les profils "U" et "V" introduisent des raideurs locales qui modifient la distribution des déplacements, cherchant un compromis entre masse, rigidité et résistance structurelle.

2. Conclusion :

Ce chapitre a été consacré à l'exploration approfondie des modèles de comportement mécanique spécifiquement les variantes Simple, en forme V et en forme U dérivés de la loi de Von Mises, lesquels ont été rigoureusement couplés à une analyse de déformation statique. Cette étude a débuté par une phase cruciale de calibrage numérique visant à déterminer les paramètres caractéristiques de ces modèles. À travers une analyse de sensibilité systématique, nous avons pu mettre en évidence la manière dont chaque paramètre conditionne la réponse mécanique du système, notamment en ce qui concerne la relation force-déplacement. Les résultats obtenus démontrent sans équivoque que chacun des paramètres investigués exerce une influence déterminante sur les mécanismes complexes de pliage ainsi que sur la distribution des déformations au sein de la ridelle. En somme, cette démarche a permis de confirmer que la précision de la modélisation repose sur une compréhension fine de l'interaction entre ces paramètres et le comportement structurel global de l'élément étudié.

Conclusion générale :

Conclusion générale :

Le travail effectué dans le cadre de ce mémoire, a permis de voir l'influence de la forme du pliage sur la résistance des tôles, dans le domaine pratique de l'optimisation de formation des pièces, tout en veillant à minimiser les dommages et les pertes économiques, pendant l'opération de mise en forme.

Dans le but de déduire l'influence de quelques paramètres sur la force du pliage (maillage de ridelle, épaisseur de ridelle, coefficient du frottement, jeu entre poinçon et matrice et le rayon des outils), on a simulé un pliage en U d'une ridelle en acier S235 avec le logiciel de simulation ABAQUS. On a conclu sur les force-déplacement que ses paramètres étudiés influencent sur la déformation de ridelle : le maillage, le frottement et le jeu montrent une influence peu considérable contrairement à l'épaisseur et au rayon qui montrent une influence considérable. Les paramètres étudiés, s'avèreront d'une utilité pertinente pour la conception des pièces à partir des tôles, à travers le procédé de mise en forme par pliage. La simulation numérique présente bon outil d'aide à la décision au niveau des entreprises de fabrication de pièces. Comme perspective pour finaliser les observations obtenues dans cette étude numérique, nous estimons qu'une étude expérimentale de tous ses paramètres est envisagée et une confrontation des résultats obtenus à ceux de la simulation réalisée ci-dessus, est nécessaire.

Bibliographie :

- [1] :Choisir la bonne remorque agricole - Buying Guides AgriExpo .
- [2] : The Ultimate Farm Trailer Guide: Types & Benefits .
- [3] :Historique des remorques agricoles à travers le temps .
- [4] :Ridelle pour remorque agricole : guide complet 2024 .
- [5] : The Ultimate Farm Trailer Guide: Types & Benefits .
- [6] :nsileuse - Vikidia, l'encyclopédie des 8-13 ans .
- [7] :Les principaux composants d'une remorque - Les clefs de bagnole .
- [8] : Parenteau,Charles.pdf .
- [9] :ISO 17900:2002(fr), Remorques agricoles — Remorques à avant-train et semi-remorques — Détermination de la charge utile, de la charge statique verticale et de la charge par essieu .
- [10] :Comprendre définition de la charge dynamique maximale .
- [11]: How to reduce vibrations in agricultural machinery - Agri Machines World .
- [12] :comment fabriquer une remorque agricole .
- [13]Qu'est-ce que la tôle métallique : types, caractéristiques et applications | MachineMFG
- [14] : Types de tôles métalliques : caractéristiques et utilisations | Ripleg
- [15] Qu'est-ce que la tôle métallique : types, caractéristiques et applications | MachineMFG
- [16]. R.Quatremer, «Déformation plastique des tôles», Librairie de Lagrave, 1981.
- [17] Eric Folder, «effet thermique de la mise en forme», Technique de l'ingénieur, 2001, MC1, M 3 012.
- [18] : A. Andersson, «Numerical and experimental evaluation of springback in a front side member», Journal of Materials Processing Technology, vol. 169, 2005, pp. 352–356.
- [19] UNIVERSITE DE SETIF
- [20] Cintrage — Wikipédia
- [21] :Ben-Elechi, S., Bahloul, R., & Potiron, A. (2006). Optimisation des paramètres du procédé de pliage .

tombé de bord par plan d'expériences numérique et méthode des surfaces de réponse.

Mécanique & Industries, 7(5-6), 475-485. <https://doi.org/10.1051/meca:2007005>

[22]:Découpe Métallerie Services (DMS).Guide technique sur « Le pliage » .

[23]: Académie de Nancy-Metz (Ressources pédagogiques nationales - Génie Mécanique).Le Pliage des Tôles / Les Procédés de Pliage .

[24]: Le Guide du Chaudronnier (ou cours officiels du Bac Pro Réalisation de Produits Industriels / TCI).Généralement issu des manuels édités par Casteilla (par R. Paslier) ou les guides techniques Nathan.

[25]: Mourad JERBI « Procédés de mise en forme »,2017/2018 .

[26]: Le Pliage - Les Procédés de Formage.Académie de Nancy-Metz (et diffusé sur plusieurs plateformes académiques de Génie Mécanique).

[27]: Le Pliage - Les Procédés de Formage.Académie de Nancy-Metz (et diffusé sur plusieurs plateformes académiques de Génie Mécanique).

[28]: Le Pliage - Les Procédés de Formage.Académie de Nancy-Metz (et diffusé sur plusieurs plateformes académiques de Génie Mécanique).

[29]: Les manuels de Génie Mécanique (Collection A. Capliez ou Mémo-guide Productique) .

[30]: Stiti Meziane ; Modélisation Et Optimisation De La Mise En Forme Des Matériaux Application Au Laminage ; Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou, Année 2012\2013 .

[31]: un mémoire de l'Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou .

[32]: procédés de mise en forme des métaux en feuilles (le pliage).

[33]: Technologie professionnelle pour les mécaniciens. Tome 1 ; auteur : A. CAMPA ingénieur .

[34]:Mémoirede Master en Génie Mécanique (Spécialité : Mécanique des matériaux).Université Badji Mokhtar - Annaba (Algérie), Faculté des Sciences de l'Ingénieur, Département de Génie Mécanique.

[35]: Endommagement de la surface des tôles | Cairn.info .

[36]: Comprendre et prévenir les défauts dans les pièces pliées | Artizono .

[37]: problèmes courants liés au pliage des métaux et leurs solutions - Anhua Machining .

[38]: Les dix erreurs les plus courantes à éviter lors du pliage de tôle - Guide B2B .

[39]: Remorque et surcharge - 3 règles vitales [Guide 2026] .

[40]: Entretien et prévention de la rouille des attaches de remorque | U-Haul .

[41]: These-Adjel-Samir-1.pdf .

[42] Comprendre fonctionnalités d'Abaqus

[43] ben abdesselam siham (1).pdf

[44] <https://matieredumonde.com/acier-s235-s235jr-matiere-1-0038/>

[45] <https://lugand-aciers.fr/etires-doux-s235jr-acier-de-construction-pret-a-lemploi-2/>

Chapitre1:

Figure 1-1 : <https://www.deves.fr/remorques/gv-100-br/>

Figure 1-2 : Remorque plateau agricole Isel 11506 - goldpais - longueur de caisse 11500 mm - ptac 26000 kg devis sous 24h

Figure 1-3: <https://www.record-trailers.com/fr/trailer/oogstvervoer/silagewagens>

Figure 1-4: <https://www.remorques-chevance.com/sniper/>

Figure 1-5: <https://www.tomberdanslespoires.com/schema-attelage-tracteur.html>

Figure 1-6: <https://www.hellopro.fr/chassis-de-remorque-2018207-fr-1-feuille.html>

Figure 1-7: <https://www.hellopro.fr/chassis-de-remorque-2018207-fr-1-feuille.html>

Figure 1-8: <https://www.hellopro.fr/rmg-3-remorque-agricole-a-ridelles-gourdon-sa-charge-3-t-2011117-6560538-produit.html>

Figure 1.9: amazon.co.uk/s?k=jockey+wheel+uk&adgrpid=1181976870906969&hvadid=73873773392581&hvbmt=bp&hvdev=c&hvlocint=188&hvlocphy=3&hvnetw=o&hvqmt=p&hvtargid=kwd-32740 | Lider Trailers

Chapitre2:

Figure 2-1: <https://www.semanticscholar.org/paper/Optimisation-d%27op%C3%A9rations-industrielles-de-plier-Pouzols/90789af18a395476e712856e0e423ee83d87e3e7/figure/2>

Figure 2-2: <https://www.rocdacier.com/cours-plier-toles/>

Figure 2-3: <https://www.gouttiere-online.com/pliage-en-l-a-configurer/1296-pliage-en-aluminium-noir-ral-905-07-mm-2-metres.html>

Figure 2-4: <https://artizono.com/fr/procedes-de-plier-des-metaux/>

Figure 2-5: <https://www.dmytolerie.fr/moyennes-pieces-dimensions-largeur-300300-x-longueur-1900-mm-maxi/1015-pliage-en-l-corniere-tole-en-acier-decape-dkp-.html?srsId=AfmBOorMewg6eqrAOqE-mNTkAIKXAl2iSFnV7TGWsCPAcX4KRwO1r1Mp>

Figure 2-6: <https://www.semanticscholar.org/paper/Optimisation-d%27op%C3%A9rations-industrielles-de-plier-Pouzols/90789af18a395476e712856e0e423ee83d87e3e7/figure/51>

Figure 2-7: <https://www.notionsstructures.be/les-notions/moment-de-flexion-contrainte/comprendre/>

Figure 2-8 : <https://www.chaoero.com/fr/z-bending-tools/>

Figure 2-9: <https://www.solutions-elastomeres.com/fr/131-coussins-de-plier>

Figure2-10 :<https://www.pro-dis.fr/plieuses-de-toles-horizontales/plieuse-de-tole-manuelle/plieuse-manuelle-hs-2as-hm-machinery.html>.

Figure2-11:<https://www.epple-maschinen-france.fr/produits/presses/303-presse-plieuse-hydraulique-universelle-ap-1-520-150.html>.

Figure 2-12: <https://fr.slideshare.net/slideshow/pliage-toles/92294094>

Figure2-13:https://blog-gestion-de-projet.com/diagramme-dishikawa/?srltid=AfmBOoqvlfBuQpQ77k-3rccuKK8RGDf45wy_gVu47g8dVQADfKnHrl1m

Figure2-214:http://ressources.unit.eu/cours/MediaMef3/simulation-forgeage/co/Optimisation_en__forgeage.html

Figure 2-15: défauts courants de pliage de tôle et solutions - Anhua Machining

Figure 2-16 : <https://www.haydencorp.com/defeating-the-ravages-of-corrosion-how-to-stop-saltwater-and-freshwater-corrosion>