



Université Mohamed Khider de Biskra  
Faculté des sciences et de la technologie  
Département de Génie Mécanique

# MÉMOIRE DE MASTER

Domaine : Sciences et Technologie  
Filière : Génie Mécanique  
Spécialité : Construction Mécanique

Réf. :

---

Présenté et soutenu par :

**Youcef Berbakh**

Le jeudi 27 septembre 2020

## **Minimisation du retour élastique lors du roulage (cintrage) de tôles pour la fabrication des Bouteilles à gaz**

---

**Jury:**

Dr.	<b>Begar Abdelhakim</b>	<b>MCB</b>	<b>Université de Biskra</b>	Président
Pr.	<b>Chebbah Mohamed-Saïd</b>	<b>Pr</b>	<b>Université de Biskra</b>	Rapporteur
Dr.	<b>Mhamedi Djemoui</b>	<b>MCB</b>	<b>Université de Biskra</b>	Examineur

Année universitaire: 2019 - 2020

# Remerciements

*J'ai tant attendu ce jour pour remercier du profond du cœur*

✓ *Mon encadreur le professeur Mohamed-Said Chebbah pour son aide précieuse Et judicieuse ainsi que pour son soutien le long de cette année.*

✓ *Tous mes professeurs que j'ai eus le privilège de rencontrer durant mon cursus*

✓ *Qui m'ont soutenu et toujours poussé à me surpasser et à donner le meilleur de moi-même jusqu'à mon arrivée à ce stade qui est :*

*Ce Diplôme de constructions mécanique.*

Youcef Berbakh

# *Dédicace*

*J'ai le grand honneur de dédier ce travail à :*

*Toute ma famille*

*A tous mes amis que j'ai connus dans ma vie*

*A tous ceux et celles qui me sont chers*

*A tous ceux et celles qui m'aiment*

*A tous ceux et celles que j'aime.*

Introduction générale.....1

## CHAPITRE I

# GÉNÉRALITÉ SUR LE PROCÉDÉ DE ROULAGE DE TÔLES

I.1. Roulage de tôle .....3

I.2. Principe de roulage (centrage).....3

I.3. Les différents types de rouleuses .....4

I.3.1. Rouleuses de type pyramidal .....4

I.3.2. Rouleuses de Type planeur à 4 rouleaux.....6

I.3.3. Rouleuses de Type planeur à 3 rouleaux.....7

I.3.4. Rouleuse de type croqueur.....7

1) Rouleaux inférieurs symétriques à déplacement vertical .....8

2) Rouleaux inférieurs symétriques à déplacement horizontal.....8

3) Rouleaux inférieurs asymétriques .....9

I.4. Calcul de la longueur développée .....10

I.5. Les phases de l'opération.....11

I.6. Les principaux défauts du procédé .....12

I.6.1. Erreur de tonneau.....13

I.6.2. L'erreur de tonneau inverse .....13

I.6.3. Erreur cylindrique .....14

I.6.4. Erreur d'ovalie.....16

I.6.5. Erreur d'entortillage.....16

I.6.6. Erreur de fausse trajectoire.....16  
I.6.7. Défauts de réglage de mouvement .....17

## CHAPITRE II

# PRESENTATION DE LA BOUTEILLE A' GAS B35Kg ET SA FABRICATION

II.1. Processus de fabrication de la bouteille à gaz type B35 Kg .....19  
II.1.1. Notice technologique pour la fabrication de Bouteille à gaz type B35Kg.....19  
II. 2. Caractéristiques techniques des bouteilles .....19  
II. 2.1.a. Marquage.....19  
II. 2.1.b. Dimensions.....20  
II. 3. Caractéristiques des matériaux utilisés .....20  
II.3.1.a. Corps.....20  
II. 3.1.b. Composition chimique.....20  
II.4.1. Caractéristiques mécaniques .....21  
1. Essai de traction .....21  
2. Limite élastique  $R_e$ .....22  
3. Résistance à la traction  $R_m$  .....22  
4. Allongement à la rupture .....22  
II.4.2. Courbes de traction .....23  
II.5 Le retour élastique .....25  
II.5.1 Présentation du retour élastique .....25  
II.5.2 Origine du retour élastique .....25  
Éprouvette et retour élastique correspondant. ....26

## CHAPITRE III

# SIMULATION DU RETOUR ÉLASTIQUE

III.1. Le code de calcul utilisé .....	29
III.2. La modélisation de roulage.....	30
III.2.1. Modélisation des géométries .....	30
III.2.2. Les propriétés du matériau.....	31
III.3. Choix du schéma de résolution.....	31
III.4. Niveau de masse .....	31
III.5. Formulation du contact .....	31
III.6. Les conditions aux limites.....	32
III.6. 1.Expliquez les étapes .....	33
III.7. Maillage du modèle .....	35
III.8. Résultats et discussion .....	35
III.8.1. Retour élastique de roulage .....	38
III.8.2 Observation .....	39
Conclusion générale.....	41
Bibliographies.....	43

## CHAPITRE I

# GÉNÉRALITÉ SUR LE PROCÉDÉ DE ROULAGE DE TÔLES

Tableau. I.1. Principe de cintrage.....3

Tableau. I.2 : Les différences entre les deux formes. ....4

## CHAPITRE II

# PRESENTATION DE LA BOUTEILLE A' GAS B35Kg ET SA FABRICATION

Tableau II. 1. Prescriptions technico-administratives de marquage.....20

Tableau II.2. Cotations dimensionnelle de la bouteille à gaz type B 35 .....20

Tableau II.3. Valeur de coulée et de produit spécifiant les principaux éléments alliés qui  
compose la BS2.....21

Tableau II.4. Données des paramètres mécaniques des tôles d'aciers BS2.....24

Tableau II.5. Fiche technique de la bouteille B35 .....24

## CHAPITRE III

# SIMULATION DU RETOUR ÉLASTIQUE

Tableau III.1 : Propriétés mécaniques et physiques de l'acier P245 NB.....31

# CHAPITRE I

## GÉNÉRALITÉ SUR LE PROCÉDÉ DE ROULAGE DE TÔLES

Figure I.1. Rouleuse de type pyramidal. ....	5
Figure I. 2. Déplacement vertical du rouleau supérieur .....	5
Figure I.3. Rouleuses de Type planeur à 4 rouleaux.....	6
Figure I.4. Rouleuses de Type planeur à 3 rouleaux.....	7
Figure I.5. Rouleaux inférieurs symétriques à déplacement vertical. ....	8
Figure I.6. Rouleuse de type croqueur à déplacement horizontal des rouleaux. ....	8
Figures I.7. Rouleaux inférieurs asymétriques. ....	9
Figure I.8. Calculer le diamètre du cylindre .....	10
Figure I.9. Étapes de formation.....	12
Figure I.10. Erreur de tonneau.....	13
Figure I.11. L'erreur de tonneau inverse .....	14
Figure I.12. Erreur cylindrique .....	14
Figure I.13. Erreur cylindrique.....	15
Figure I.14. Défauts de la position.....	15
Figure I.15. Erreur de fausse trajectoire.....	16
Figure I.16. Défauts de réglage de mouvement. ....	17



## CHAPITRE II

# PRESENTATION DE LA BOUTEILLE A' GAS B35Kg ET SA FABRICATION

Figure II. 1. La bouteille à gaz type B35.....	19
Figure II.2. Machine de traction ZWICK ROELLZ050 .....	21
Figure II.3. Échantillonnage de la bouteille B35 .....	22
Figure II.4. Graphe de traction pour l'acier BS2.....	23
Figure II.5. Exemple de courbe obtenue lors d'une sollicitation en traction d'une .....	26
Figure II.6. Exemple de pièce en flexion et retour élastique correspondant .....	27

## CHAPITRE III

# SIMULATION DU RETOUR ÉLASTIQUE

Figure III.1. Structure du logiciel ABAQUS.....	29
Figure III.2. La modélisation d'une rouleuse de type pyramidale.....	30
Figure III.3. La relation entre les surfaces de contact .....	32
Figure. III.4. Les conditions aux limites appliquées sur les rouleaux supérieurs et inférieurs au cours de la flexion et du roulage .....	33
Figure. III.5. Déplacement des rouleaux supérieur.....	33
Figure III.6. Rotation des rouleaux inférieurs. ....	34
Figure III.7 Vitesse de rotation des rouleaux supérieurs.....	34
Figure III.8. Maillage élément fini sur un assemblage.....	35
Figure III.9. (A, B, C, D, E, F) Les différentes étapes du roulage de la tôle.....	37
Figure III.10. Simulation 3D dans ABAQUS .....	38

**Figure III.11. Avant que la poulie supérieure ne monte .....38**

**Figure III. 12. Après que la poulie supérieure s'élève de 82 mm.....39**

**Figure III. 13. Simulation du retour élastique 3D dans ABAQUS .....39**

# **INTRODUCTION GENERALE**

# Introduction générale

Au début de notre travail, l'idée de faire une investigation dans le domaine du roulage et de ces effets est survenue suite à une proposition par professeur encadré et en coordination avec les membres responsables de SNS BAG Batna qui est une entreprise de fabrication de réservoirs GPL, B35 pour les véhicules et des bouteilles à gaz ménagères. Dans cette entreprise et dans la chaîne de fabrication de bouteilles de gaz B11/13.

Le procédé de roulage a pour objectif de transformer une surface plane métallique en une surface cylindrique ou conique. Les machines à rouler sont appelées simplement rouleuses. Les organes de roulage sont constitués par des cylindres d'une grande résistance à la flexion nommés rouleaux. Il existe trois principaux types de rouleuses, à deux, trois ou quatre rouleaux. Ce projet de recherche est Minimisation du retour élastique au procédé de roulage à trois rouleaux et plus précisément à rouleaux asymétriques. Une opération de roulage est définie par les paramètres du roulage suivant : i) les caractéristiques mécaniques du matériau de la tôle ; ii) l'épaisseur de la tôle ; iii) la largeur utile de roulage ; iv) le rayon de courbure.

La simulation numérique constitue un outil efficace et robuste pour prédire la faisabilité des produits avec les moindres dépenses. De nos jours il existe plusieurs logiciels industriels basés sur des approches incrémentales comme ABAQUS, ADINA, LS-DYNA, AUTOFORM, RADIOSS, STAMPACK, etc. qui sont basés sur des algorithmes de résolution de type statique implicite ou dynamique explicite.

Le présent travail comprend trois chapitres :

Le premier chapitre donne des Généralité sur le procédé de roulage de tôles.

Les différents types de rouleuses, Les principaux défauts du procédé, etc.

Dans le deuxième chapitre, on donne Présentation de la bouteille à gaz B35Kg et sa fabrication, Caractéristiques techniques des bouteilles, etc.

Le troisième chapitre. Simulation du retour élastique sur ABAQUS, présentation sur le logiciel ABAQUS

A l'issue de ce mémoire, une conclusion générale sera donnée.

**CHAPITRE I**  
**GÉNÉRALITÉ SUR LE PROCÉDÉ DE**  
**ROULAGE DE TÔLES**

## I.1. Roulage de tôle

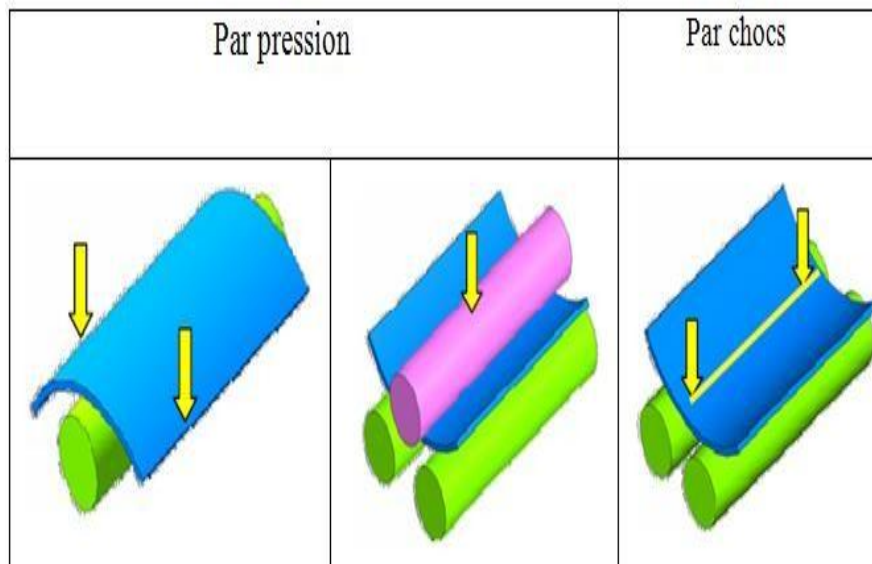
Le roulage de tôle (cintrage de tôle) est une technique de transformation d'une surface plane en surface cylindrique ou conique fermée (roulage fermé : virole) ou roulage ouvert. Le cintrage est obtenu par un effort de flexion provoqué soit par pression ou par choc [1].

## I.2. Principe de roulage (centrage)

Le centrage des tôles s'obtient par un effort de flexion provoqué :

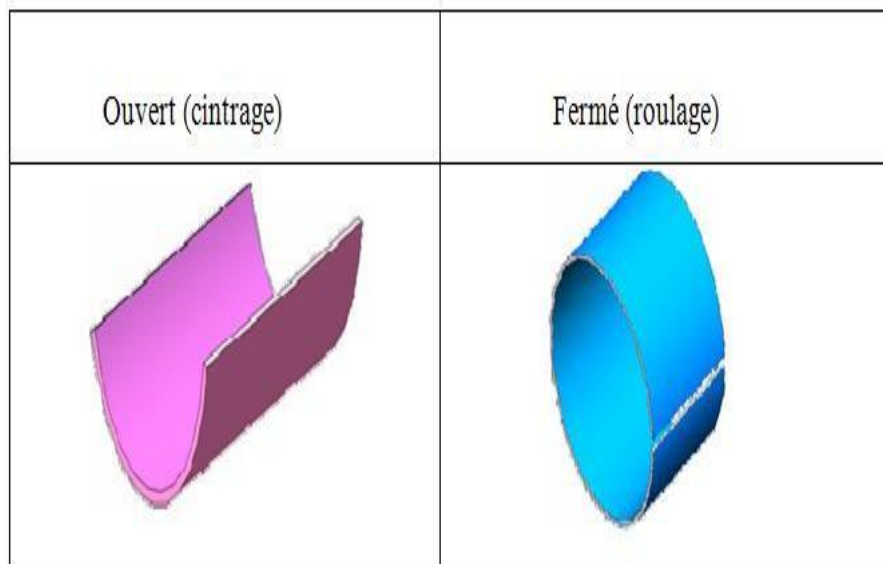
- Par pression (à la main ou à la machine)
- Par chocs (au marteau ou au maillet).

**Tableau. I.1.** Principe de cintrage.



Cintrer une tôle c'est lui donner, partiellement ou totalement une forme cylindrique ou conique

Le cintrage peut être:

**Tableau.I.2** : Les différences entre les deux formes.

La tôle est animée d'un mouvement de translation par deux rouleaux commandés mécaniquement et elle est soumise à un effort continu de flexion exercé par 1 ou 2 rouleaux [2].

Cintreurs. Selon la disposition des rouleaux, on distingue trois types de machines : **type pyramidal, planeur, croqueur**. Pour extraire les corps cintrés, complètement fermés, le rouleau supérieur peut être dégagé de l'un de ses paliers et pivoter dans un plan vertical ou horizontal. On dit que le rouleau est amovible. Pour tenir compte de l'élasticité résiduelle, on estime généralement que le diamètre mini de cintrage est égal au diamètre du rouleau supérieur (fonction de la nature du matériau et de la longueur à cintrer).

### I.3. Les différents types de rouleuses

#### I.3.1. Rouleuses de type pyramidal

La rouleuse pyramidale est composée de 3 rouleaux disposés en triangle isocèle ; un rouleau cintreur et 2 rouleaux entraîneurs. Elle est munie d'un mécanisme d'entraînement.

Fonctionnement : Les extrémités de la tôle ne subissent pas les effets du rouleau cintreur, il faut donc amorcer les extrémités pour avoir un cintrage total. Pour les tôles minces, l'amorçage se fait sur le rouleau

cintreur ou sur un tas. Pour les tôles épaisses, l'amorçage se fait à la presse, il existe des machines à rouleaux verticaux : suppression du problème de soutien des tôles épaisses [3].

La figure (I.1) montre la position des rouleaux sur une machine de type pyramidal. Les diamètres des rouleaux inférieurs sont généralement de 10 % à 50 % plus petit que celui du rouleau supérieur. L'entraînement est assuré par les rouleaux inférieurs qui sont immobiles en translation. Le rouleau supérieur tourne librement et est mobile en translation verticale ce qui permet de rouler la tôle au diamètre désiré.

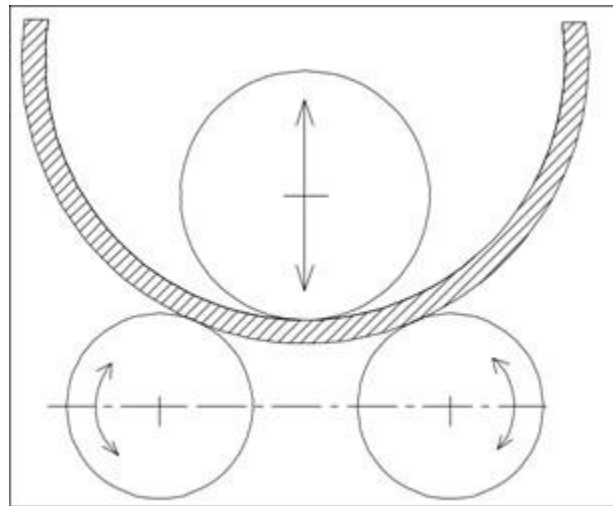


Figure I.1. Rouleuse de type pyramidal.

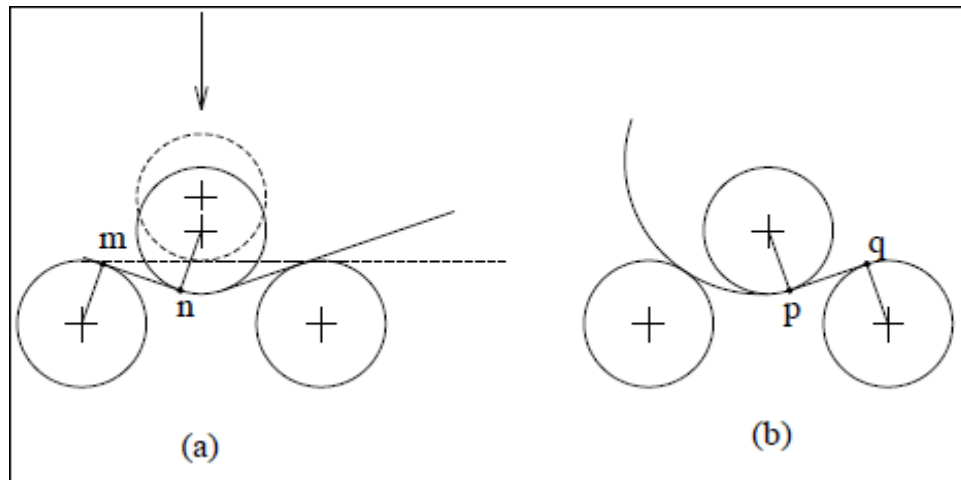


Figure I. 2. Déplacement vertical du rouleau supérieur



### I.3.2. Rouleuses de Type planeur à 4 rouleaux

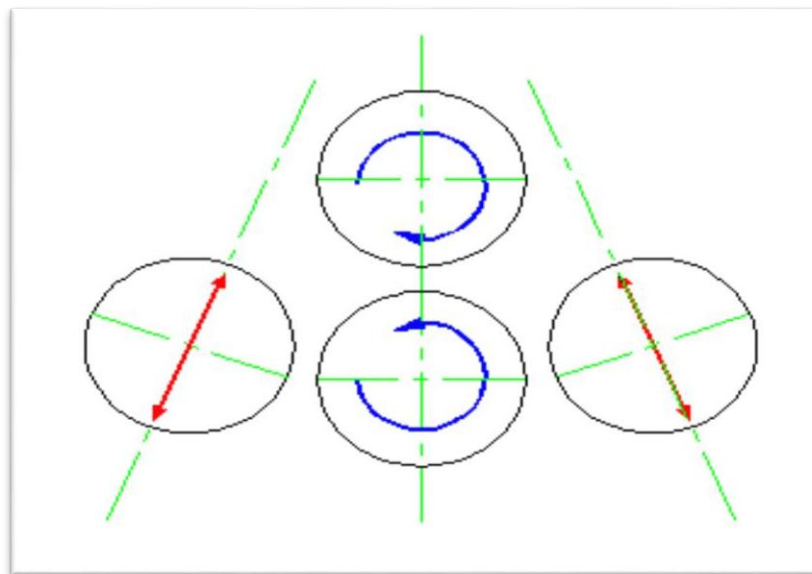
Le quatrième rouleau permet le roulage de sortie et évite ainsi le retournement pour le formage de l'extrémité. Les machines à rouler les plus courantes sont actuellement celles du type planeur avec adaptation d'amorçage. Un dispositif articulé du rouleau supérieur permet la sortie des pièces présentant un cintrage fermé.

Les rouleuses classiques ont une capacité limitée quant au rayon minimum pouvant être obtenu. En règle générale, ce rayon ne doit pas être inférieur à 3 fois le diamètre du cylindre supérieur

Domaine d'utilisation : de 6 à 200 mm

Avantage :

- Dégauchissement de la tôle par rapport à la génératrice d'un des rouleaux cintreurs
- Serrage de la tôle entre les rouleaux d'entraînement pendant les opérations de croquée et de Roulage.
- Croquée des deux extrémités sans retournement de la tôle
- Opération de calibrage après soudage facilité par la présence des deux rouleaux cintreurs.
- Formage des cônes en continu à trois rouleaux où l'un des rouleaux latéraux pour les Machines à quatre rouleaux.



**Figure I.3.** Rouleuses de Type planeur à 4 rouleaux.

### I.3.3. Rouleuses de Type planeur à 3 rouleaux

Les rouleaux entraîneurs E1 et E2 sont situés sur des plans verticaux et leur pression sur la pièce permet son entraînement. Le cylindre formeur F, entraîné par contact, permet d'obtenir le rayon de cintrage par suite de son déplacement oblique en translation. Ce type de roulage permet un amorçage dès la rentrée des pièces.

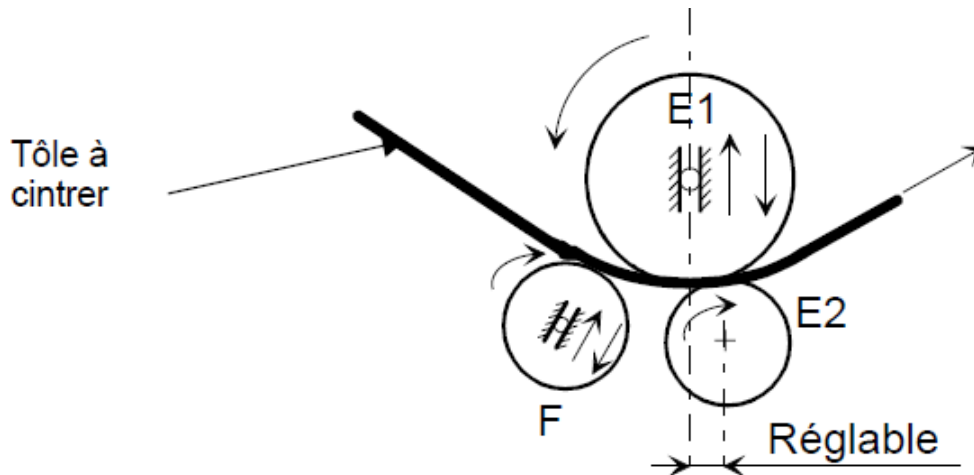


Figure I.4. Rouleuses de Type planeur à 3 rouleaux.

### I.3.4. Rouleuse de type croqueur

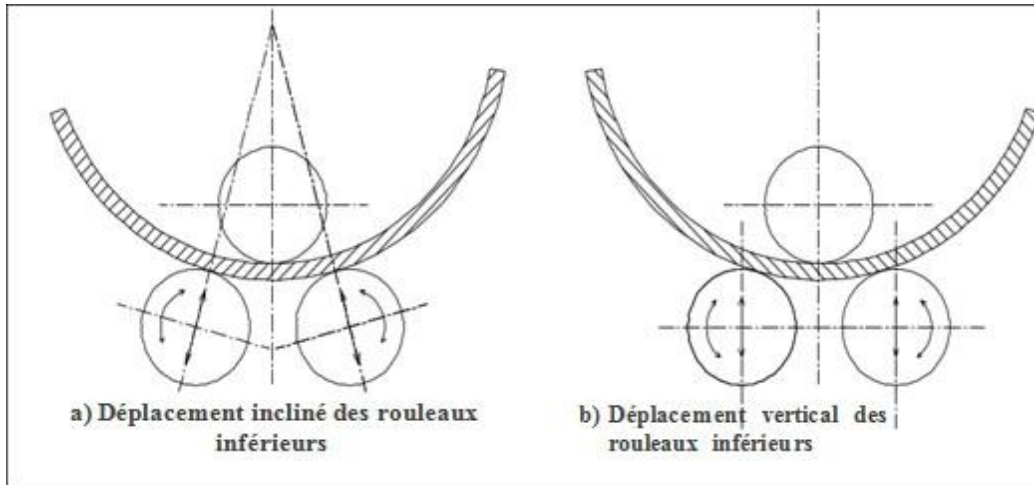
Ces machines ont l'avantage d'effectuer elles-mêmes le craquage des extrémités des tôles. La zone restant plate varie de 0,5 à 2 fois l'épaisseur selon la conception de la machine et de sa puissance. La disposition et le mouvement relatif des rouleaux varient selon le modèle de la machine.

Les trois principaux types de machines qu'on retrouve dans l'industrie sont :

- Rouleaux inférieurs symétriques à déplacement vertical ;
- Rouleaux inférieurs symétriques à déplacement horizontal ;
- Rouleaux inférieurs asymétriques.

### 1) Rouleaux inférieurs symétriques à déplacement vertical

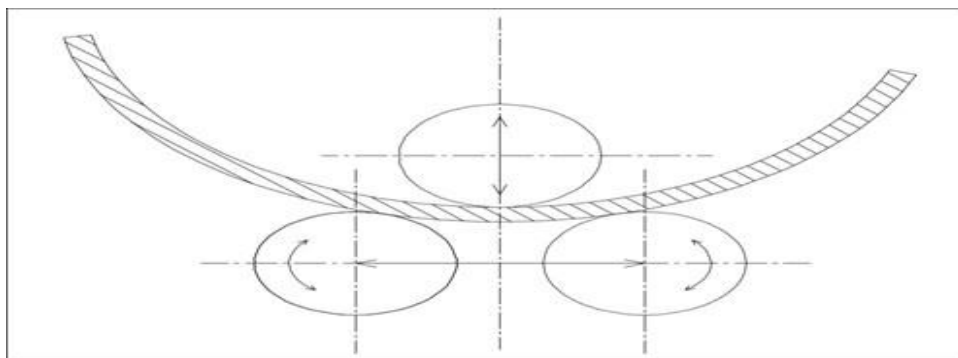
Les trois rouleaux sont de même diamètre. Le rouleau supérieur est fixe en translation et entraîné par friction. Le déplacement des rouleaux inférieurs est soit incliné par rapport à la verticale (figure 5.a), soit vertical (figure 5.b).



**Figure I.5.** Rouleaux inférieurs symétriques à déplacement vertical.

### 2) Rouleaux inférieurs symétriques à déplacement horizontal

Le rouleau supérieur est doté d'un mouvement vertical. Les rouleaux inférieurs sont moteurs et animés d'un mouvement de translation horizontale (figure I.6). La distance entre les rouleaux inférieurs reste fixe. Les rouleaux inférieurs ne sont pas toutefois aminés par un mouvement vertical.

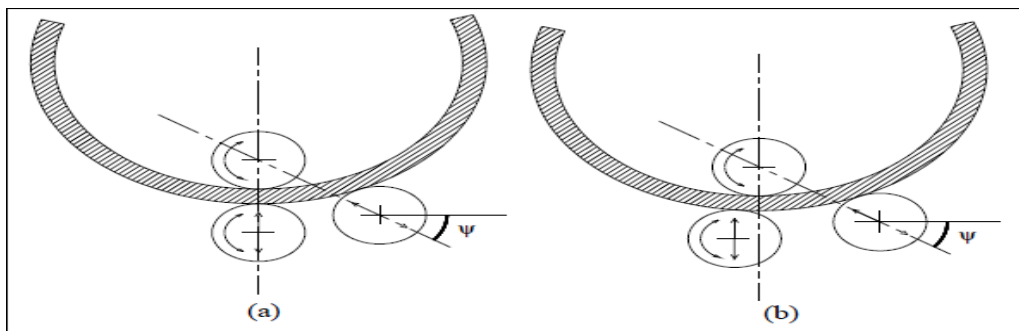


**Figure I.6.** Rouleuse de type croqueur à déplacement horizontal des rouleaux.

### 3) Rouleaux inférieurs asymétriques

La disposition des rouleaux est indiquée sur la figure I.7. Les rouleaux ont le même diamètre.

L'entraînement est assuré par deux rouleaux, un rouleau supérieur et un rouleau inférieur situé au-dessous de celui-ci. Les rouleaux d'entraînement sont situés soit dans un même plan vertical (figure I.7.a), soit légèrement décalés l'un par rapport à l'autre (figure I.7.b). Cette dernière disposition permet d'augmenter la capacité de craquage. Le rouleau inférieur d'entraînement est réglable verticalement. La rouleuse de type asymétrique permet d'obtenir une pièce de forme cylindrique plus précise du fait que la tôle est maintenue serrée entre rouleaux inférieurs et supérieur pendant le roulage [4].



**Figures I.7.** Rouleaux inférieurs asymétriques.

Le rouleau de roulage est réglable avec une inclinaison d'un angle  $\psi$  par rapport à la verticale. Le mouvement oblique de ce rouleau détermine le diamètre du cylindre formé. Le rouleau de roulage est entraîné par frottement. L'inconvénient principal de ce type de rouleuse est de nécessiter un retournement de la tôle pour croquer les deux extrémités.

### I.4. Calcul de la longueur développée

La longueur développée d'une virole se calcule à partir du  $\emptyset$  en fibre neutre,  $\emptyset$  passant par le milieu de l'épaisseur de la tôle de couleur rouge sur le croquis ci-contre.

Exemple :  $\emptyset$  extérieur de la virole = 1005mm  
 épaisseur de la tôle = 5mm  
 Longueur développée =  
 $(1005 - 5) \times 3,14 = 3140$  mm

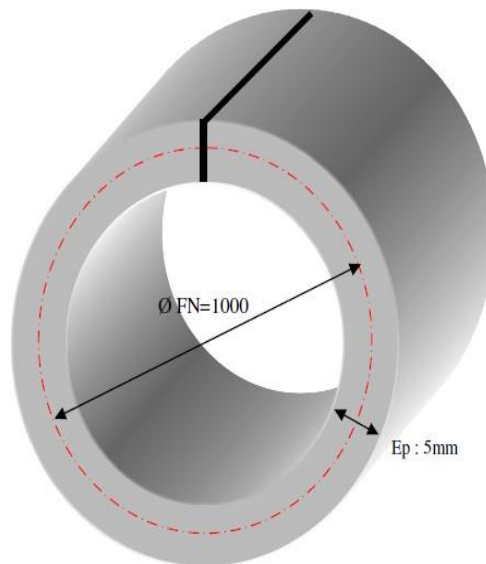


Figure I.8. Calculer le diamètre du cylindre.

$$LD = \text{Périmètre} = \Pi \times D = (\Pi \times 2 \times r)$$

## **I.5. Les phases de l'opération**

Le figure ci-dessous montre l'opération d'entortillage de cylindre normale. L'expertise de l'ouvrier et la durée d'entortillage aura un important impact sur la finalisation du produit.

- Avant de placer la tôle dans la machine, vérifiez que la balle de cylindre inférieure est au niveau le plus bas. Si elle n'y est pas, mettez-la dans cette position
- La tôle est placée dans la machine par le côté gauche. On peut la placer par la côté droite aussi. Toutes les opérations se font par le mouvement simultané des balles de cylindre latérales.
- Soulevez la balle de cylindre de droite. En appuyant la tôle sur la balle de cylindre, assurez qu'elle soit parallèle.
- Puis en soulevant la balle de cylindre inférieure coincer la tôle. Le réglage de la pression pour coincer la balle inférieure.
- Faites descendre la balle de cylindre droite. En faisant tourner les balles de cylindre rapprocher le matériau vers la trajectoire de ces balles. Plus la tôle sera proche de la trajectoire de la balle de cylindre mieux sera le tortillement devant.
- Soulevez la balle de cylindre gauche jusqu'à l'obtention du rayon souhaité. Cette valeur diffère suivant l'épaisseur nominale de la tôle, suivant son seuil de fluidité etc.
- Donner une forme à la tôle en faisant tourner les balles de cylindre.
- Lorsque la tôle est au-dessous de la balle de cylindre de droite soutenir la tôle en soulevant la balle. Faites descendre la balle gauche.

Continuer l'opération d'entortillage de la tôle en faisant tourner les balles.

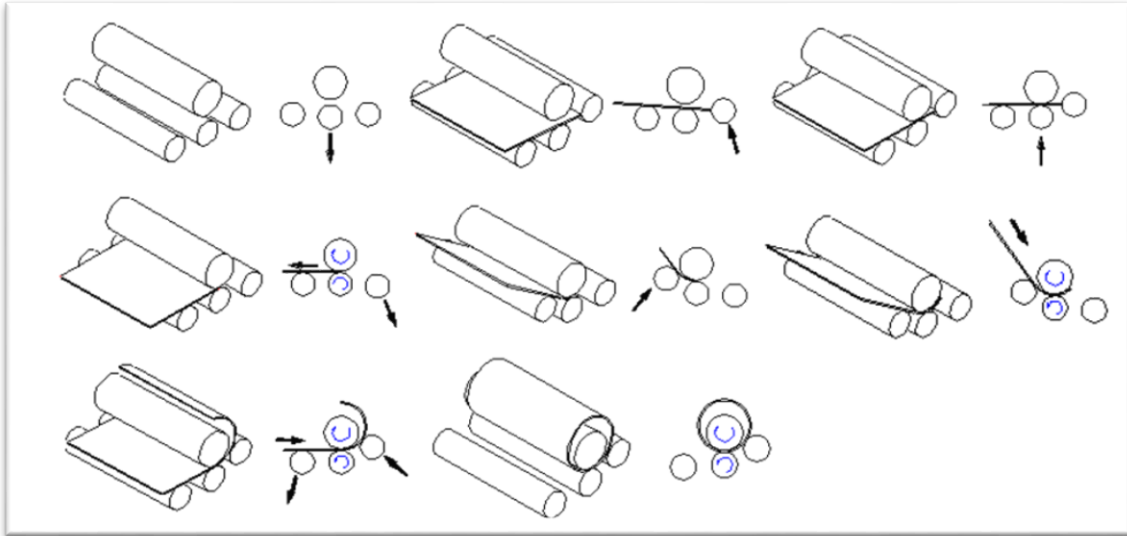


Figure I.9. Étapes de formation.

## I.6. Les principaux défauts du procédé

Dans certains cas il peut y avoir une déformation sur le matériau. Ces déformations

Peuvent être dues ;

1. À l'erreur de tonneau
2. À l'erreur de tonneau inversé
3. À l'erreur de cylindrique
4. À l'erreur de l'ovalie
5. À l'erreur d'entortillage
6. À l'erreur de trajectoire incorrecte Les machines sont produites en évitant ces erreurs.

La conicité des balles de cylindre est calculée, ainsi on peut obtenir une haute performance même dans les épaisseurs les plus élevées. r. Cependant une épaisseur extrême ou une finesse extrême peut donner lieu à des déformations.

### I.6.1. Erreur de tonneau

La forme obtenue est une forme où les extrémités sont proches des unes des autres mais il y a trop d'espace au milieu. Cette forme est la conséquence de l'inclinaison des balles de cylindre sous la pression du processus d'entortillage (Figure I.10).

CAUSE 1 = Le fait que la tôle soit trop épaisse pour la capacité de la machine.

SOLUTION 1= Sans utiliser une machine à haute capacité vous ne pouvez pas résoudre ce problème.

CAUSE 2= La pression de serrage de la balle inférieure peut être trop élevée.

SOLUTION 2= Faites baisser le niveau de pression de serrage de la balle inférieure. Mais dans ce cas, la rectitude du tortillement avant sera élevée.

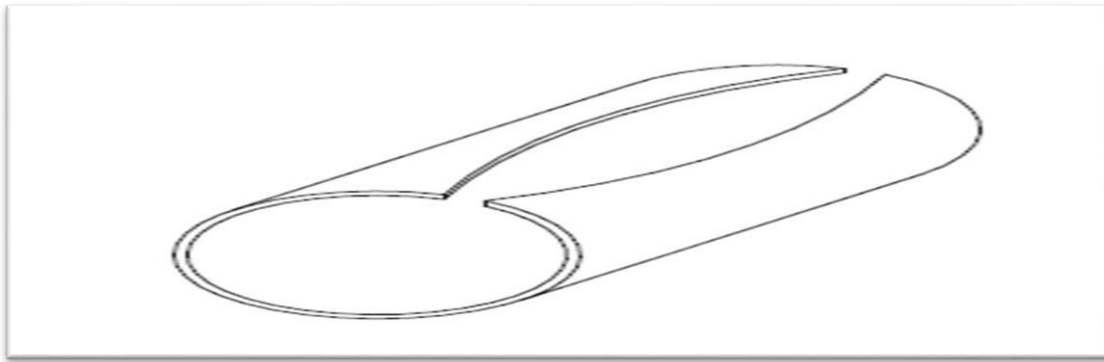


Figure I.10. Erreur de tonneau.

### I.6.2. L'erreur de tonneau inverse

La forme obtenue est ouverte au niveau des extrémités et fermée au milieu (Figure I.11).

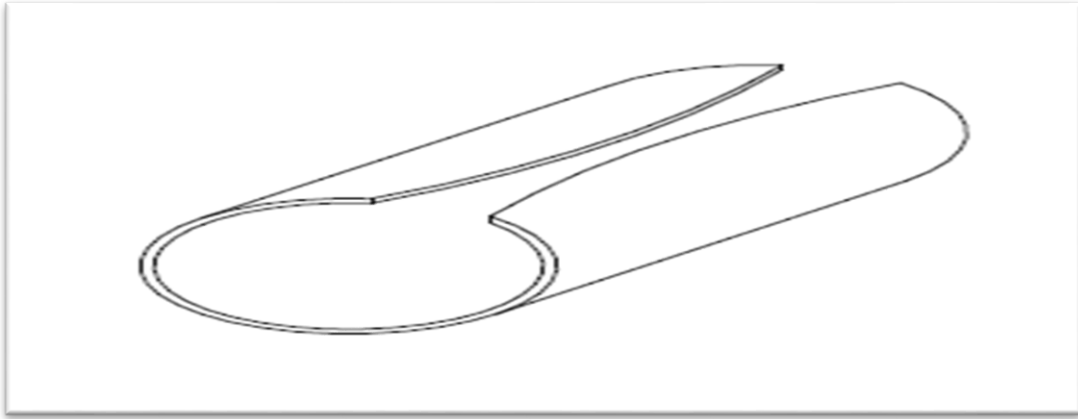
CAUSE 1= le fait que la tôle utilisée soit trop fine.

SOLUTION 1= La seule solution est d'entortiller la tôle avec une machine à capacité faible.

CAUSE 2= le fait que la pression de serrage soit faible.

SOLUTION 2= Augmentez la pression de serrage de la balle de cylindre inférieure.





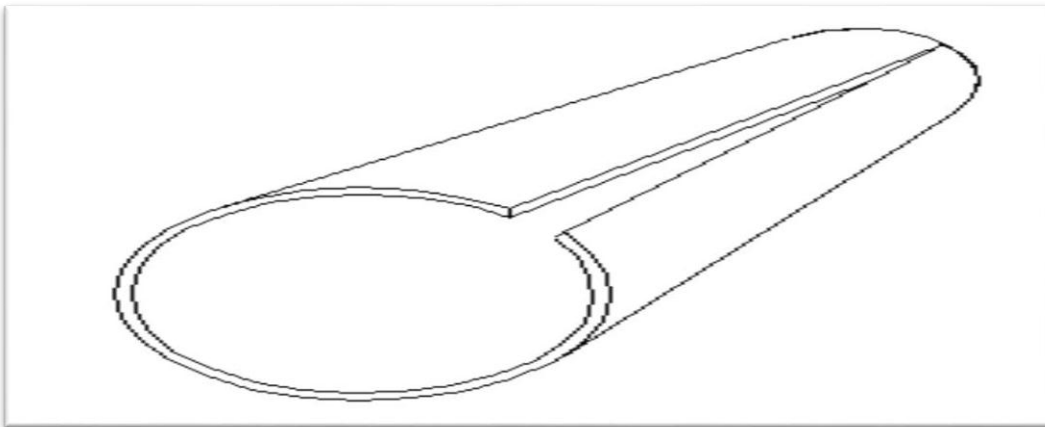
**Figure I.11.** L'erreur de tonneau inverse.

### I.6.3. Erreur cylindrique

Cette erreur est causée par le fait que l'un côté du tuyau soit plus fermé que l'autre côté (Figure I.12).

CAUSE 1= Le fait que les balles de cylindre ne soient pas parallèles.

SOLUTION 1= Vérifiez le parallélisme des balles de cylindre.

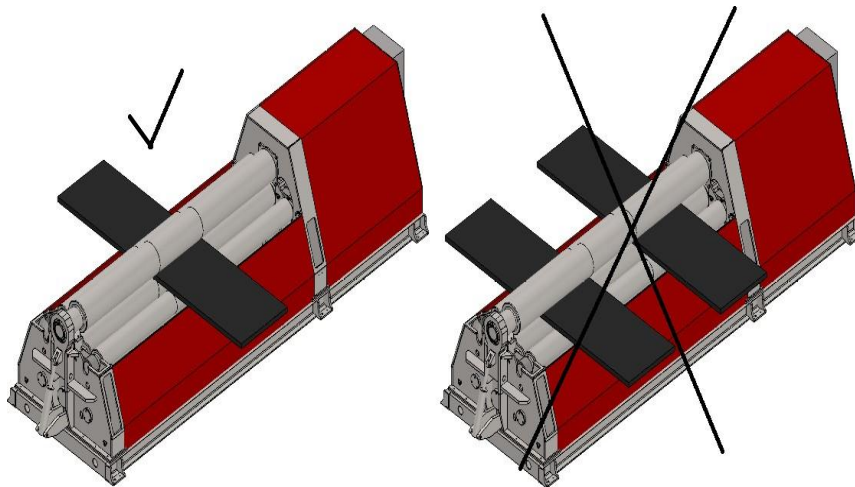


**Figure I.12.** Erreur cylindrique.



**Figure I.13.** Erreur cylindrique.

Une autre cause de cette erreur est le fait qu'on veuille entortiller des pièces ayant de faible épaisseur en les positionnant les unes à côté des autres. Quelle qu'elle soit l'épaisseur de la pièce, il faut entortiller de façon continue au milieu des arbres.



**Figure I.14.** Défauts de la position.

### I.6.4. Erreur d'ovalie

Dans cette erreur, la tôle entortillée n'est pas en forme de cercle mais en forme ellipse. La cause de cette erreur est le comportement de l'opérateur qui change la position des balles de cylindre lors de l'entortillage.

### I.6.5. Erreur d'entortillage

Dans cette déformation, malgré le fait que le développant du matériel soit correctement coupé, en entortillant un diamètre moindre que celle souhaitée les extrémités se chevauchent.

Il s'agit là d'une erreur d'opérateur. De plus, si la pression du serrage de la balle inférieure est réglée à un niveau supérieur à ce qui est effectivement nécessaire le matériau se prolongera et cette erreur apparaîtra.

### I.6.6. Erreur de fausse trajectoire

Cette erreur apparaît lorsque les balles de cylindre ne sont pas parallèles et lorsque des tôles ayant différentes épaisseurs sont utilisées. Vérifiez le parallélisme des balles de cylindre et l'emplacement de la tôle. Si cette situation est causée par une épaisseur irrégulière de la tôle, il n'y a pas de solution [5].

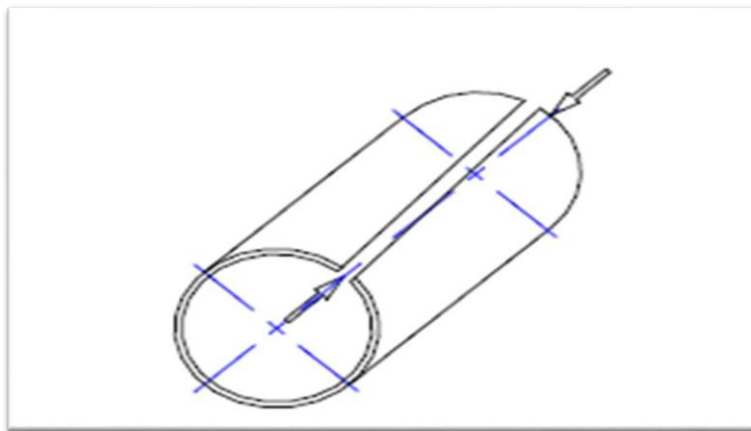


Figure I.15. Erreur de fausse trajectoire.

### **I.6.7. Défauts de réglage de mouvement**

Ces erreurs sont souvent causées par une mauvaise utilisation de la machine.



**Figure I.16.** Défauts de réglage de mouvement.

## **CHAPITRE II**

### **PRESENTATION DE LA BOUTEILLE A' GAS B35Kg ET SA FABRICATION**

## II.1. Processus de fabrication de la bouteille à gaz type B35 Kg

### II.1.1. Notice technologique pour la fabrication de Bouteille à gaz type B35Kg



**Figure II. 1.** La bouteille à gaz type B35

La notice technique qui suivra est destinée à préciser les caractéristiques techniques employées pour la fabrication des bouteilles à gaz mixte B35 (35Kg propane) avec collier de protection, et conforme à la spécification de construction de la bouteille standard de l'entreprise BAG / Batna et aux Normes NF EN 1442 et ISO 4706 [6].

## II. 2. Caractéristiques techniques des bouteilles

### II. 2.1.a. Marquage

Le tableau II.1 décrit les prescriptions technico-administratives que doit porter le marquage des bouteilles [7].

**Tableau II. 1.** Prescriptions technico-administratives de marquage [7].

Nom du constructeur / Client	Année de fabrication	Propane	Butane	Capacité	Pression d'épreuve
BAG/B/ (nom du client)	2020	35Kg	41Kg	84litres	30Bars

### II. 2.1.b. Dimensions

Le tableau II.2 comporte les cotations dimensionnelles de la bouteille à gaz.

**Tableau II.2.** Cotations dimensionnelle de la bouteille à gaz type B 35 [7].

Diamètre extérieur	Hauteur Totale	Epaisseur min de la paroi	Diamètre extérieur du pied	Pression d'épreuve
$300^{+03}_{-01}$ mm	avec collier 1435 mm	3.3 mm	$305^{+1}$ mm	30 Bars

## II. 3. Caractéristiques des matériaux utilisés

### II.3.1.a. Corps

Le corps de la bouteille est fabriqué en tôle d'acier de qualité commerciale BS2 de nomenclature 5 P245 NB Défini par la norme (NF.A.36.211) et (NF/EN 1020).

### II. 3.1.b. Composition chimique

Le tableau II.3 définit les valeurs de coulé et de produit des composés chimiques constituant la tôle de la bouteille à gaz de type B35Kg dont le corps de la bouteille à gaz est conçu [7].

**Tableau II.3.** Valeur de coulée et de produit spécifiant les principaux éléments alliés qui compose la BS2.

Qualité P265nb	C % max		Mn%	S % max		P % max		Si % max	
	coulée	produit	coulée	coulée	produit	coulée	produit	coulée	produit
BS2	0.19	0.21	0.4	0.015	0.04	0.025	0.04	0.25	0.25

## II.4.1. Caractéristiques mécaniques

### 1. Essai de traction

Dans une machine d'essai, une éprouvette est soumise à la traction jusqu'à sa rupture. On mesure la force de traction, l'allongement de l'éprouvette ainsi que la modification des sections au point de rupture. Ces valeurs permettent de calculer le diagramme contrainte-déformation caractéristique avec les valeurs de limite élastique, de résistance à la traction et de striction du matériau.

Tous les essais de traction sont réalisés sur Machine d'Essais de traction des matériaux de marque **ZWICK ROELL Z 050** avec PC Fig. II.2. [8].



**Figure II.2.** Machine de traction ZWICK ROELLZ050





**Figure II.3.** Échantillonnage de la bouteille B35

## 2. Limite élastique $R_e$

La limite élastique se détermine lors de l'essai de traction. La force ou la valeur s'exprime en MPa ou en N/mm<sup>2</sup>. Il s'agit de la traction maximale supportable par l'éprouvette sans qu'elle ne perde sa capacité à retrouver ses dimensions initiales après relâchement de la contrainte. La valeur de la limite élastique est toujours inférieure à celle de la résistance à la traction.

## 3. Résistance à la traction $R_m$

Cette valeur se détermine lors de l'essai de traction. C'est le sommet de la courbe contrainte-déformation, c'est-à-dire la force provoquant la rupture de l'éprouvette.

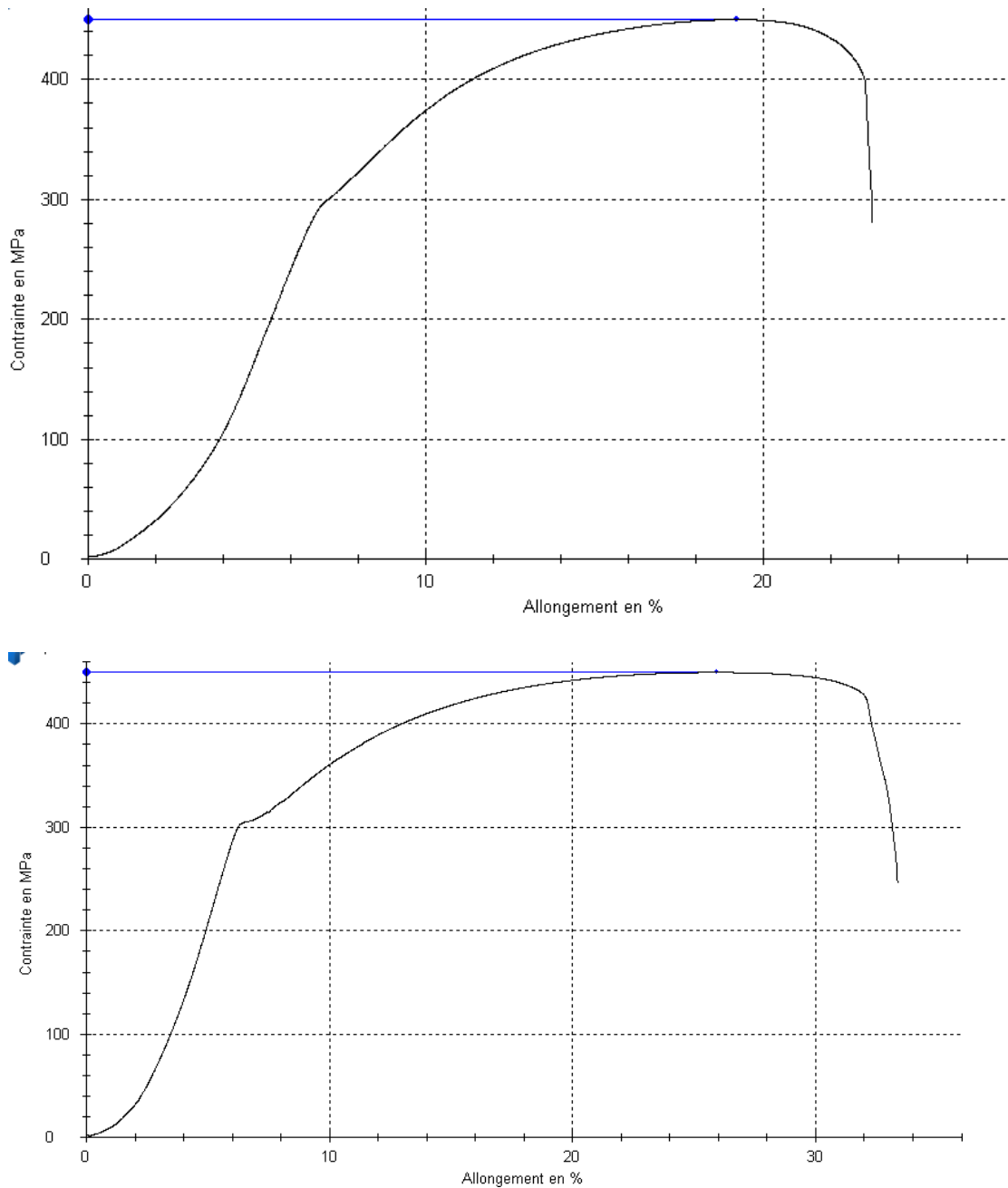
## 4. Allongement à la rupture

Cette valeur se détermine lors de l'essai de traction. Il s'agit de l'allongement que peut supporter l'éprouvette avant sa rupture. Mathématiquement, l'allongement est la modification de longueur mesurée par rapport à la longueur initiale. Il s'exprime en pourcentage de la longueur initiale.

$$A \% = (L - L_0) / L_0$$

Avec  $L_0$  longueur initiale et  $L$  la longueur après la rupture de l'éprouvette.

## II.4.2. Courbes de traction



**Figure II.4.** Graphe de traction pour l'acier BS2

A chaque livraison de rouleaux de tôles d'aciers acquis pour la fabrication de la bouteille à gaz de type B 35Kg une identification mécanique bien détaillé par le fournisseur doit toujours accompagner son produit voir annexe et la résistance moyenne à la traction à l'état normalisée doit

être comprise entre  $R = 410$  à  $500 \text{ N/mm}^2$  avec un allongement minimum  $A = 24\%$ , comme le montre le tableau II.4 [7].

**Tableau II.4.** Données des paramètres mécaniques des tôles d'aciers BS2 [7].

Qualité	Re mini en Kg / mm <sup>2</sup>	R en Kg /mm <sup>2</sup>	A % min
BS2 (P265nb)	27	24 à 50	24

### II.4.3. Identification technique de la bouteille B35

L'identification technique de la bouteille à gaz B35 est résumée dans le tableau II.5 par une fiche signalétique des principaux paramètres qui caractérise cette bouteille.

**Tableau II.5.** Fiche technique de la bouteille B35 [7].

Désignation	Appellation commerciale BAG11/13 Kg
Matériau	Acier BS2
Poids en Kilogramme	26.374
Charge maxi de propane	35
Charge maxi de butane	41
Couleur	Bleu / Blanc / Vert / Gris
Diamètre nominal en millimètre	300
Diamètre du socle en millimètre	303
Epaisseur de la paroi en millimètre	3.3
Hauteur totale en millimètre	1435
Température de service °C	0 à 60°C
Fluide contenu	Propane / Butane
Pression maxi de service en Bar	20
Pression d'épreuve en Bar	30
Position en service	Verticale

## II.5 Le retour élastique

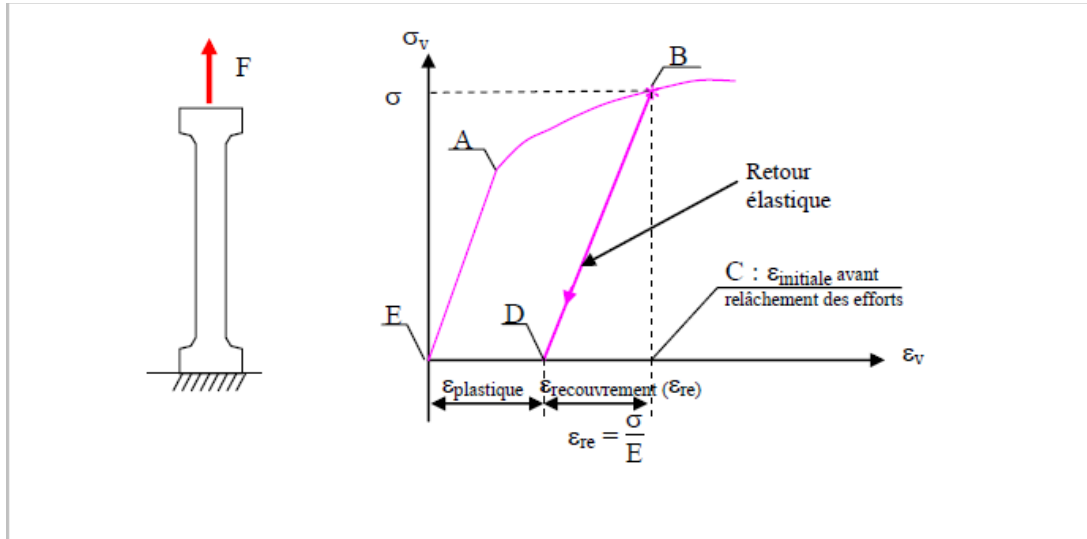
### II.5.1 Présentation du retour élastique

Le retour élastique est un des problèmes le plus couramment rencontré dans le travail des tôles. Il se manifeste par un changement géométrique de la pièce lorsqu'elle est retirée de l'outillage. Son intensité dépend de plusieurs facteurs comme la géométrie de la pièce, le frottement, les propriétés du matériau utilisé, la conception de l'outillage. Une solution possible pour le compenser consiste à réaliser des formes particulières dans l'outillage permettant de sur-déformer la pièce (en anglais : d'over-bending). On parle alors de conception d'outillage faux afin d'obtenir un embouti géométriquement correct

### II.5.2 Origine du retour élastique

Lorsque les efforts qui ont généré une déformation plastique du métal sont supprimés, on voit apparaître une légère déformation. Ce phénomène s'appelle le retour élastique, on parle aussi de recouvrement élastique. Ceci peut être facilement montré sur la courbe de contrainte-déformation obtenue à partir d'une éprouvette de traction (figure II.5). En roulage, le flan est déformé afin d'atteindre un état de contrainte supérieur à la limite d'élasticité du matériau (point A). La déformation contient alors deux composantes :

La déformation élastique qui sera récupérée après déchargement, La déformation plastique qui correspond à la déformation permanente du métal. Sur la figure II.6, la déformation élastique est représentée par la zone C-D et la déformation plastique par D-E.



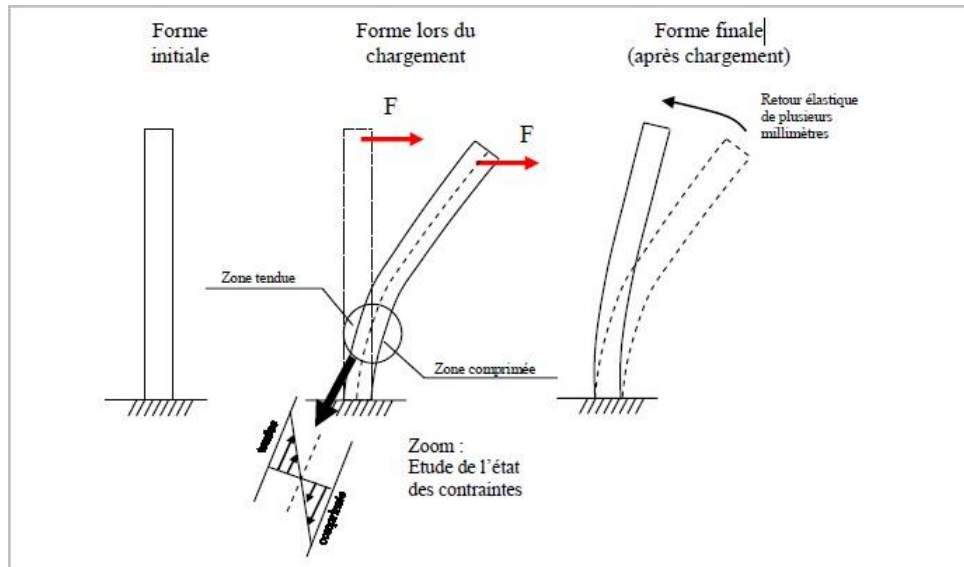
**Figure II.5.** Exemple de courbe obtenue lors d'une sollicitation en traction d'une Éprouvette et retour élastique correspondant.

Le recouvrement élastique est égal au rapport de la contrainte au point B divisé par le module d'Young du métal. Par exemple, une contrainte de 210MPa produit un recouvrement élastique de 0,1% pour un acier dont le module de Young vaut 210000MPa. Pour ce même état de contrainte, le recouvrement serait de 0,3% avec un aluminium dont le module Young vaut 70000MPa. L'amplitude de ce recouvrement peut être calculée à partir de la valeur du module d'Young à condition de connaître avec précision l'état de contrainte dans le matériau.

En utilisant ce type d'analyse, on a vu qu'il est possible de calculer l'amplitude du recouvrement élastique. Il est alors facile de le compenser en déformant davantage l'éprouvette de la valeur du recouvrement élastique. On obtiendra la forme finale souhaitée (après recouvrement).

Malheureusement, les pièces roulage ont des formes et des modes de déformation complexes. Les retours élastiques produisent rarement une composante linéaire uniforme de déformation des diverses zones de la pièce. A titre d'illustration de ce phénomène, citons le cas d'une opération de pliage. L'état de contrainte le long de l'épaisseur de la tôle après la flexion n'est pas uniforme, comme le montre la figure II.6. En effet, la surface intérieure de la courbure a des contraintes de compression, alors que l'extérieur est en traction. Lorsque les efforts de mise en forme sont retirés,

Chacune des deux zones doit s'équilibrer. Bien que la déformation de recouvrement soit très petite, des écarts de plusieurs degrés apparaissent et sont combinés à des bras de leviers plus ou moins importants engendrant des déplacements de plusieurs millimètres.



**Figure II.6.** Exemple de pièce en flexion et retour élastique correspondant

A titre d'illustration de ce phénomène, citons le cas d'une opération de roulage. L'état de contrainte le long de l'épaisseur de la tôle après la flexion n'est pas uniforme, comme le montre la figure II.6. En effet, la surface intérieure de la courbure a des contraintes de compression, alors que l'extérieur est en traction. Lorsque les efforts de mise en forme sont retirés, chacune des deux zones doit s'équilibrer. Bien que la déformation de recouvrement soit très petite, des écarts de plusieurs degrés apparaissent et sont combinés à des bras de leviers plus ou moins importants engendrant des déplacements de plusieurs millimètres [9].

## **CHAPITRE III**

# **SIMULATION DU RETOUR ÉLASTIQUE**

### III.1. Le code de calcul utilisé

Plusieurs codes utilisent les approches incrémentales tels que : ABAQUS, STAMPACK IS-DYNA PAM-STAMP, RADIOSS, etc. Nous avons choisi d'utiliser le code EF ABAQUS, qui nous permet de manipuler facilement tous les paramètres du modèle EF (les caractéristiques géométriques, les propriétés du matériau, les paramètres du procédé, etc.). Afin de comparer les résultats de l'approche inverse avec ceux de la méthode incrémentale.

ABAQUS est un logiciel généraliste de simulation par éléments finis de problèmes très variés en mécanique. Il est connu et répandu dans le milieu universitaire, en particulier pour ses traitements performants de problèmes non-linéaires. A partir d'un fichier de données, qui décrit l'ensemble du problème mécanique, le logiciel analyse les données, effectue les simulations demandées, et fournit les résultats dans un fichier.odb (Figure III.1).

Le module CAE est l'interface graphique d'ABAQUS, il propose dix sous-modules : Sketch, Part, Property, Assembly, Step, Interaction, Load , Mesh, Job et Visualisation. Les huit premiers sous-modules servent à définir le problème mécanique à simuler. Le module Job est celui qui gère le passage du calcul de simulation proprement dit. Enfin, le dernier module regroupe tout ce qui concerne l'exploitation des résultats sous forme de diverses visualisations.

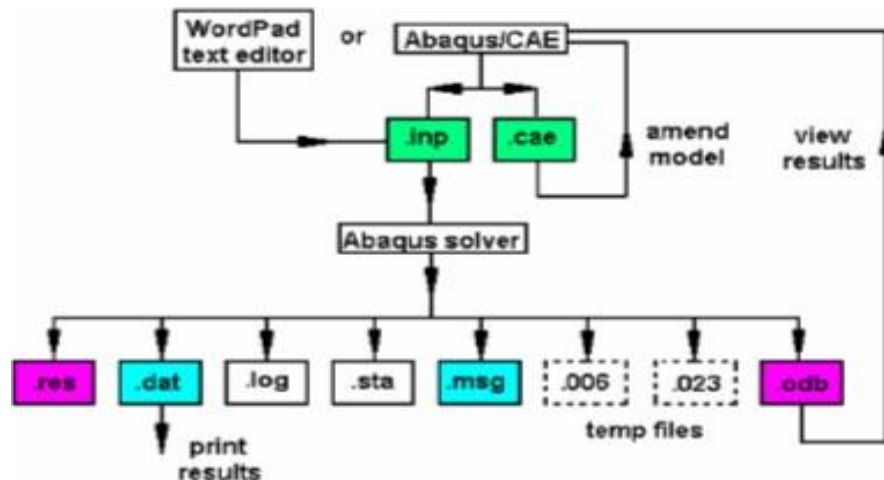


Figure III.1. Structure du logiciel ABAQUS.



Le logiciel ABAQUS comprend deux solveurs, le premier est ABAQUS /Standard qui utilise une méthode de résolution basé sur un algorithme statique implicite et le second est ABAQUS /Explicit qui utilise une méthode de résolution par un algorithme dynamique explicite. ABAQUS renferme une grande bibliothèque d'éléments finis qui peuvent moduler pratiquement la majorité des géométries. Il a également une liste étendue de modèles de matériaux qui peuvent simuler le comportement de la plupart des matériaux d'ingénierie, avec la possibilité de programmer de nouveaux éléments en FORTRAN et de nouvelles lois de comportement ainsi que la possibilité de remaillage automatique.

## III.2. La modélisation de roulage

Nous proposons dans cette partie de lister les différentes étapes nécessaires à la modélisation de l'opération de roulage.

### III.2.1. Modélisation des géométries

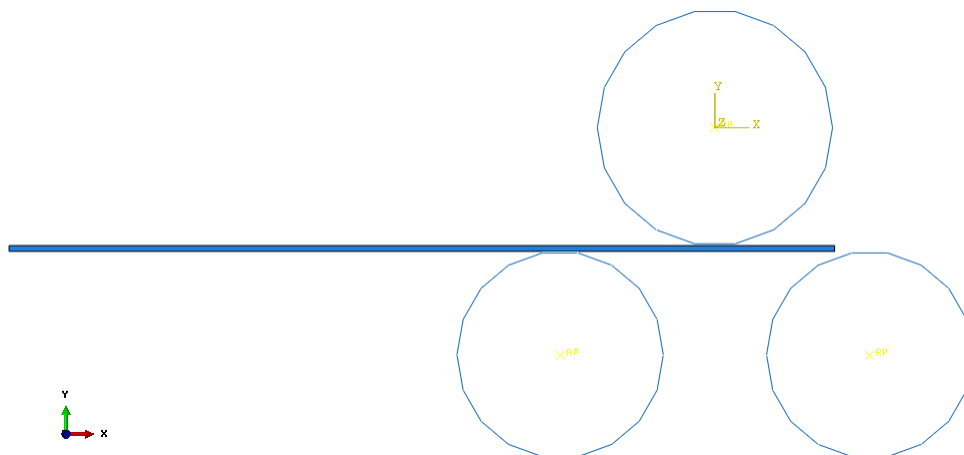
Le modèle numérique est produit par des géométries 2D afin de minimiser le temps de calcul.

La tôle est déformée à l'aide de trois rouleaux : deux inférieurs  $D = 500$  mm un supérieur  $D = 570$  mm

L'épaisseur :  $e = 14$  mm

Longueur de la tôle :  $L = 3000$  mm

Tous les rouleaux sont modélisés par des corps rigides discrets de forme circulaire tandis que la tôle est représentée par un corps déformable.



**Figure III.2.** La modélisation d'une rouleuse de type pyramidale.

### III.2.2. Les propriétés du matériau

Tableau III.1 : Propriétés mécaniques et physiques de l'acier P245 NB

Module d'Young $E$	Coefficient de Poisson $\nu$	Limite d'élasticité $\sigma$	Résistance à la Traction $\sigma$	Allongement à la rupture $A$	Densité
210 GPa	0,3	290 MPa	450MPa	0.24	7780 Kg/m <sup>3</sup>

### III.3. Choix du schéma de résolution

Deux méthodes de résolution explicites et implicites sont utilisées dans la simulation. La méthode implicite est utilisée pour des modèles où on peut utiliser des temps d'incrément larges [10]. Dans notre cas (modèles avec des contacts sévères), plusieurs tentatives sont lancées en utilisant la méthode implicite mais le calcul diverge après rotation du rouleau supérieur de quelques degrés. Cependant la méthode explicite est utilisée avec un grand succès

### III.4. Niveau de masse

L'augmentation du niveau de masse "mass scaling" diminue le temps de calcul et donne une solution instable. Pour notre modèle nous avons choisi une valeur de 3000 pour ce paramètre permettant d'obtenir une solution stable et un temps de calcul raisonnable. Ce choix est fait après une étude d'optimisation de ce paramètre.

### III.5. Formulation du contact

Cette étape s'avère la plus importante de toute la modélisation puisque la validité du modèle dépend énormément de la formulation des contacts. Pour notre modèle nous avons défini trois contacts :

- Le premier est établi entre la tôle et le rouleau supérieur. Au cours de la descente du rouleau supérieur le contact est considéré de type Coulomb avec un coefficient de frottement nul (l'effort tangentiel est pratiquement nul).
- Pendant le roulage le coefficient de frottement est égal à 1 (l'effort tangentiel devient très important)

- Le deuxième et le troisième sont définis entre tôle et rouleau inférieur droit et gauche, respectivement. Ils sont modélisés avec un contact de type Coulomb avec un coefficient de frottement  $\mu=0.2$  (acier/acier) [11].

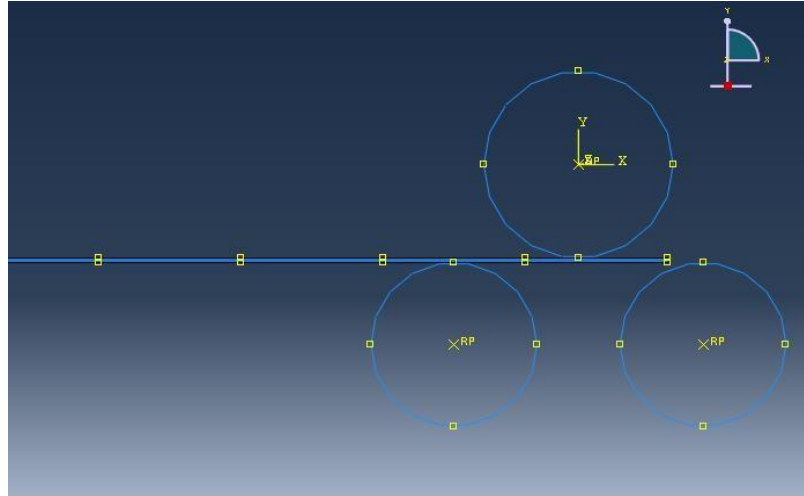


Figure III.3. La relation entre les surfaces de contact

### III.6. Les conditions aux limites

Les conditions aux limites différentes selon l'étape de simulation. Au cours de la première étape (flexion de la tôle), le rouleau supérieur ne doit être libre que selon la direction 2 alors que les deux rouleaux inférieurs ne sont libres qu'en rotation selon l'axe 3. Dans la deuxième étape les deux rouleaux inférieurs restent libres en rotation et on applique une vitesse de rotation de 0.23 rad./s sur le rouleau supérieur.

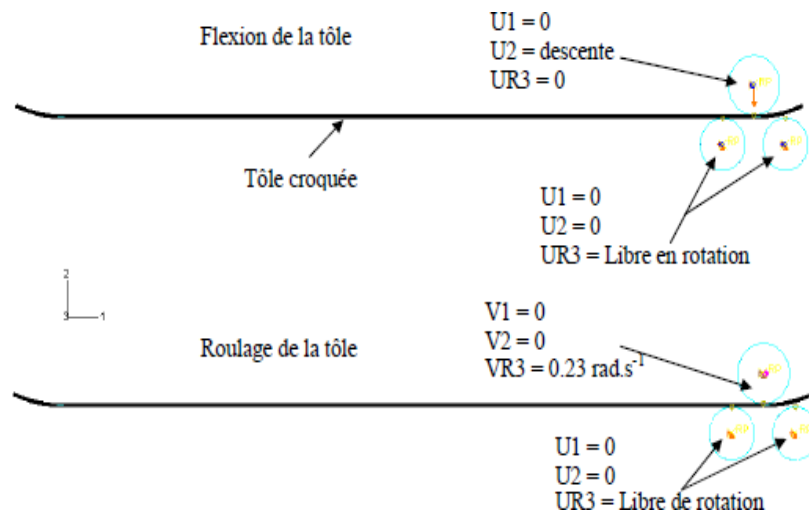


Figure. III.4. Les conditions aux limites appliquées sur les rouleaux supérieurs et inférieurs au cours de la flexion et du roulage

### III.6. 1.Expliquez les étapes

A-

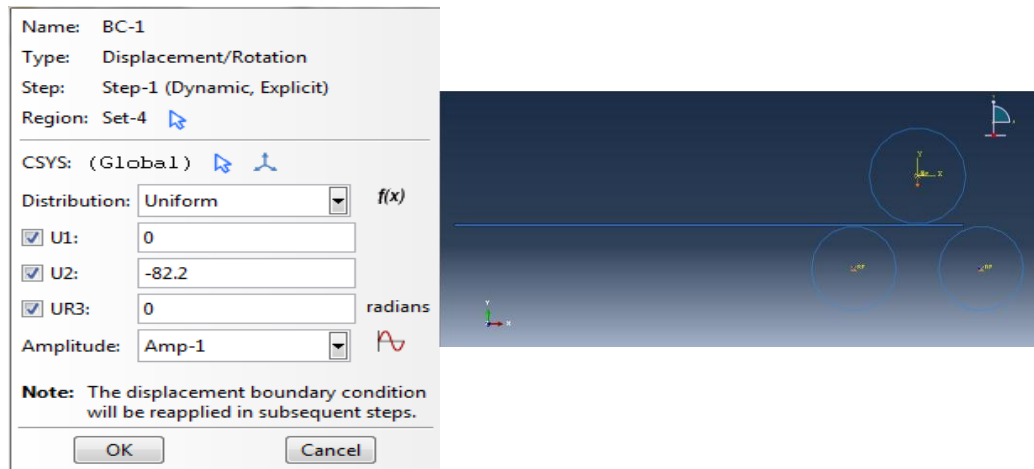


Figure. III.5. Déplacement des rouleaux supérieur.

B-

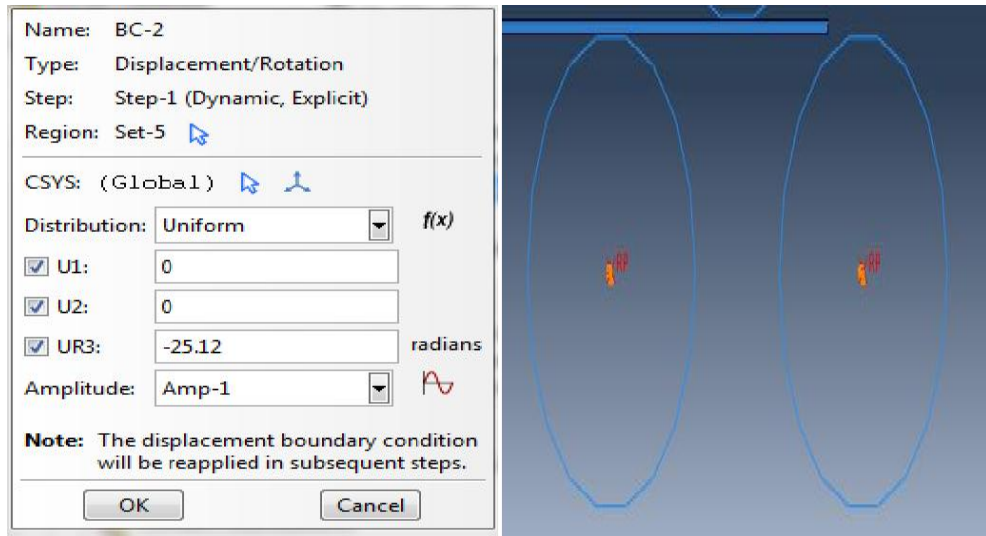


Figure III.6. Rotation des rouleaux inférieurs.

C-

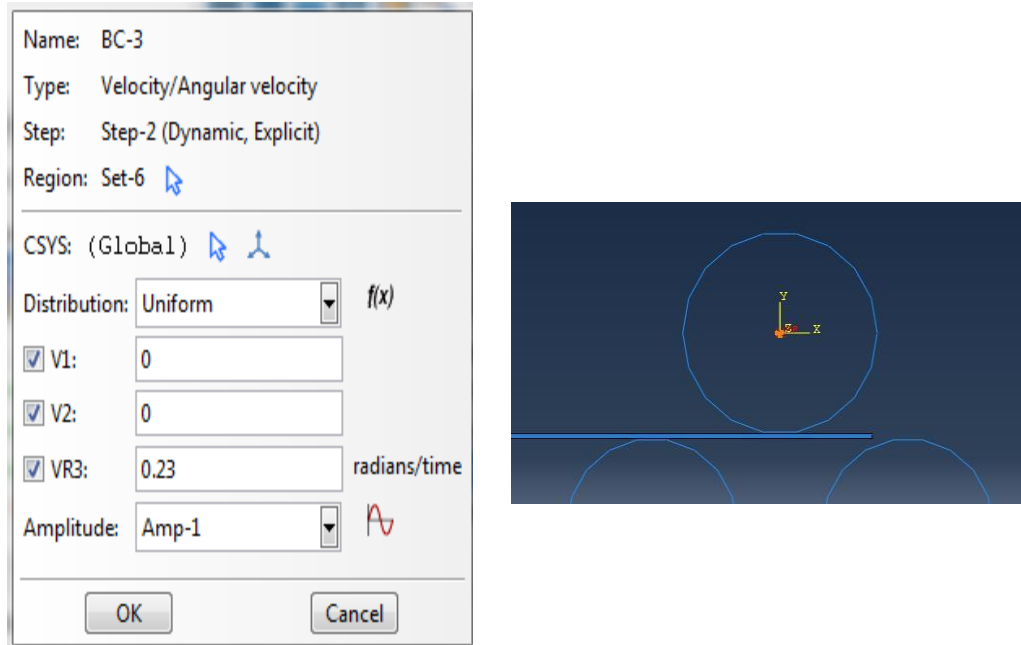


Figure III.7 Vitesse de rotation des rouleaux supérieurs.

### II.7. Maillage du modèle

Ce module contient tous les outils nécessaires pour générer un maillage élément fini sur un assemblage. La tôle est un corps déformable, maillée par des éléments quadrangles de types CPS4R.

L'hypothèse des contraintes planes est adoptée pour cette modélisation.

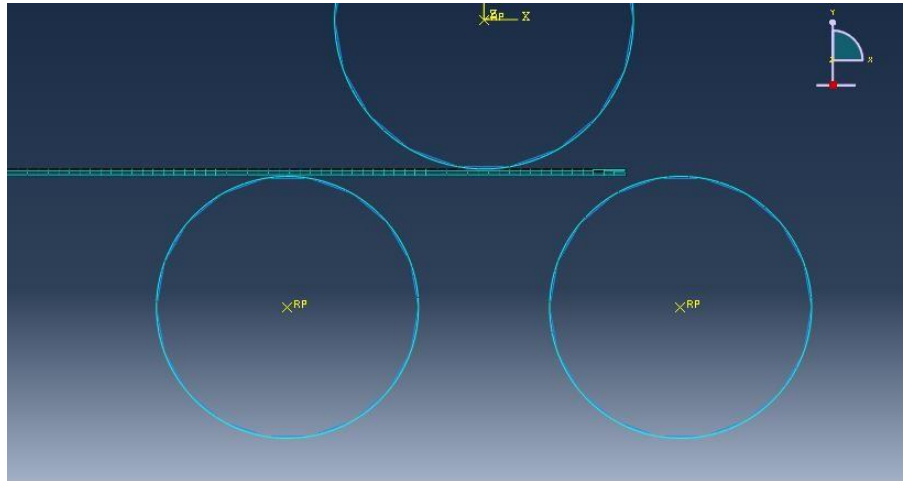
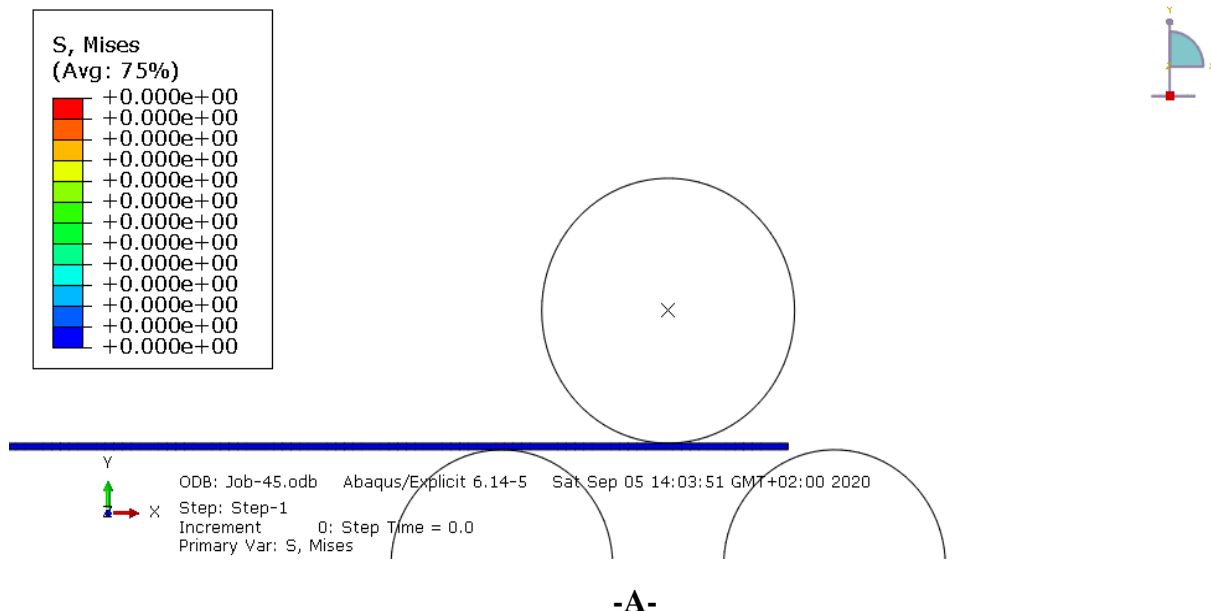
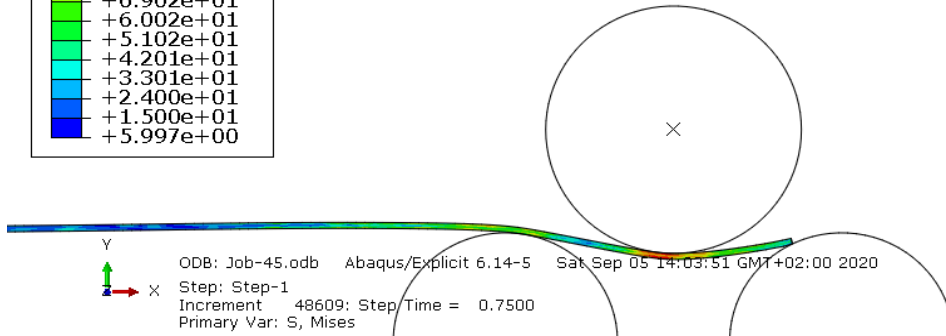
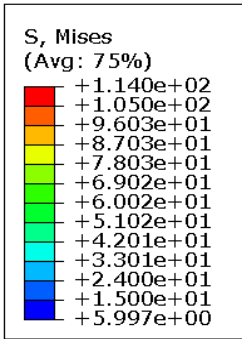


Figure III.8. Maillage élément fini sur un assemblage.

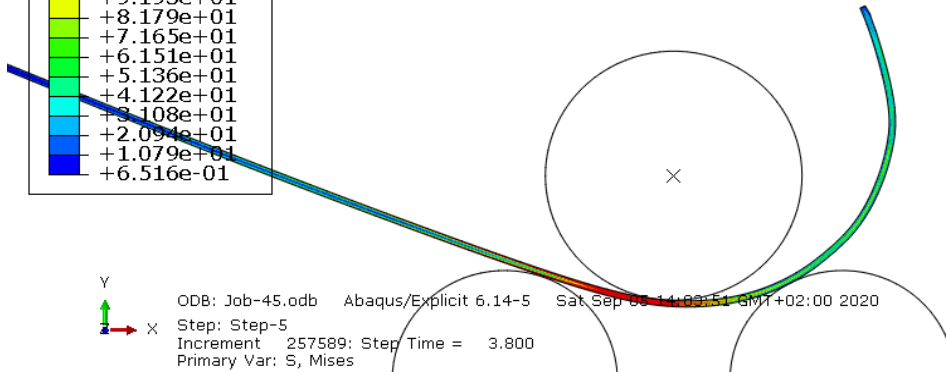
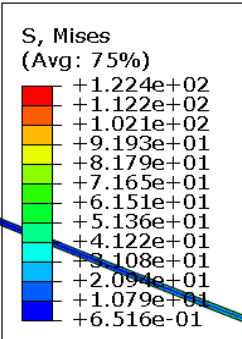
### III.8. Résultats et discussion

La Figure III.9 présente les différentes étapes de roulage d'une tôle plate montre les différentes étapes du processus de roulage obtenues via le calcul numérique.

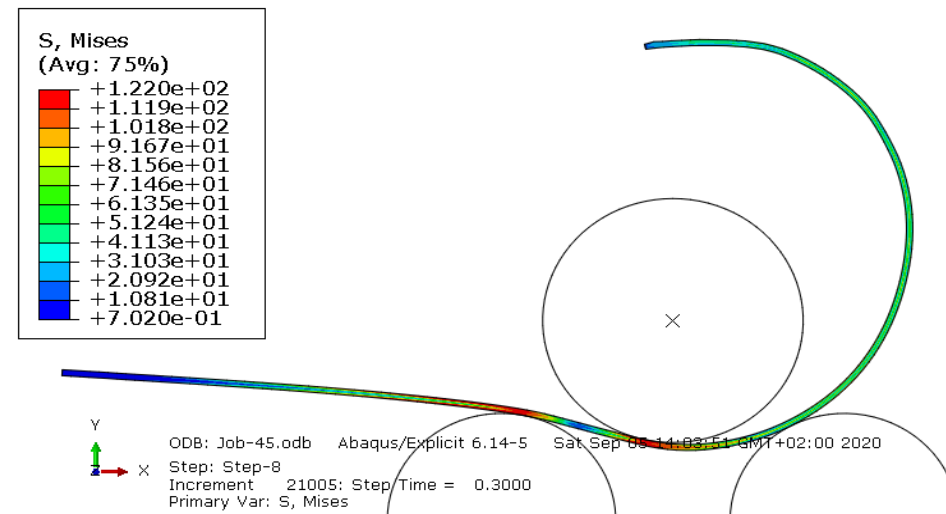
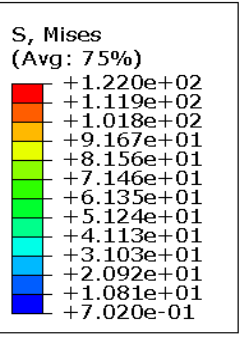




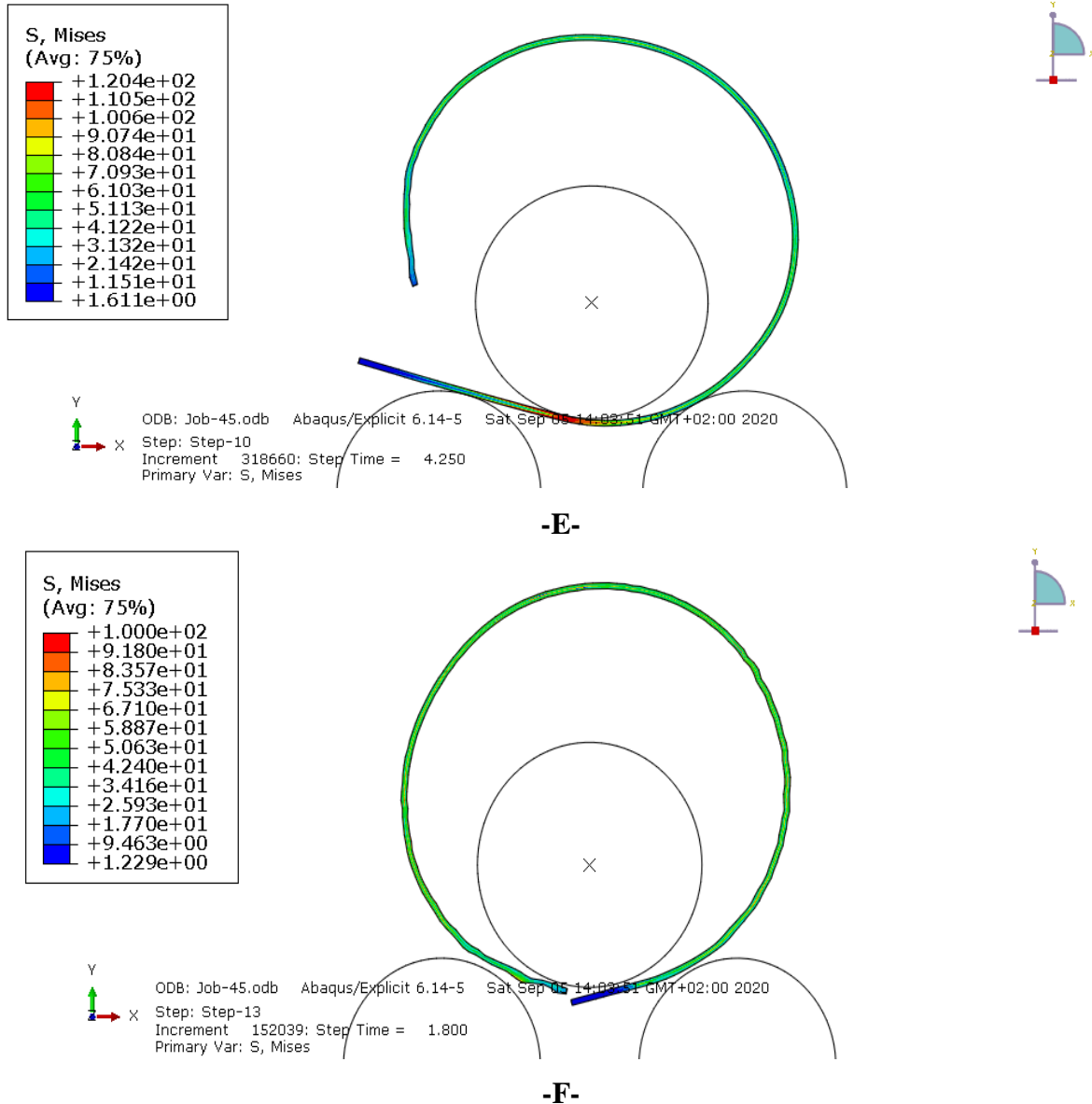
-B-



-C-



-D-



**Figure III.9.** (A, B, C, D, E, F) Les différentes étapes du roulage de la tôle.

L'examen de la contrainte résiduelle au niveau d'une tôle déformée montre que le maximum de ces contraintes est localisé au niveau du centre de la tôle (100 MPa), ces contraintes diminuent progressivement pour atteindre un minimum de (9 MPa) au niveau des bords.

La même figure montre que la distribution de la déformation plastique est opposée à celle des Contraintes résiduelle c.-à-d, sont maximum est localisé au niveau des bords de la tôle.



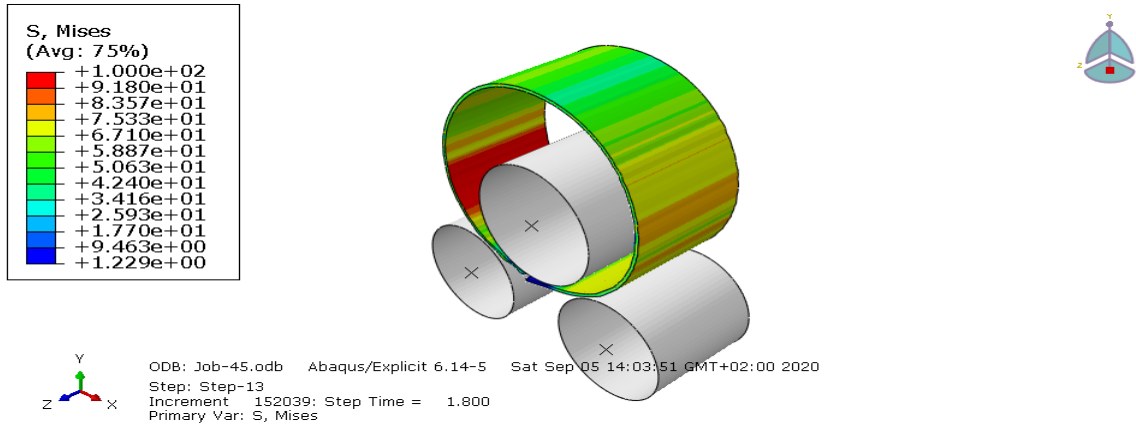
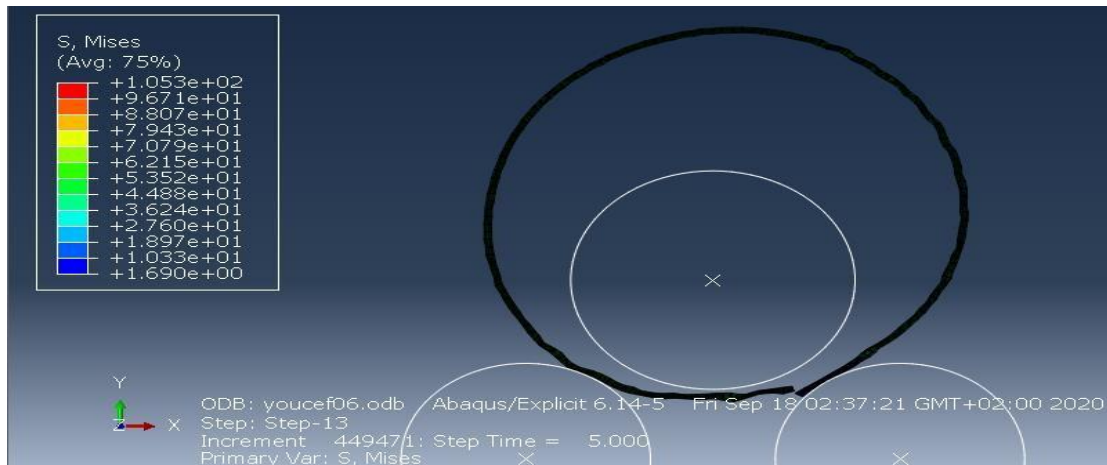


Figure III.10. Simulation 3D dans ABAQUS

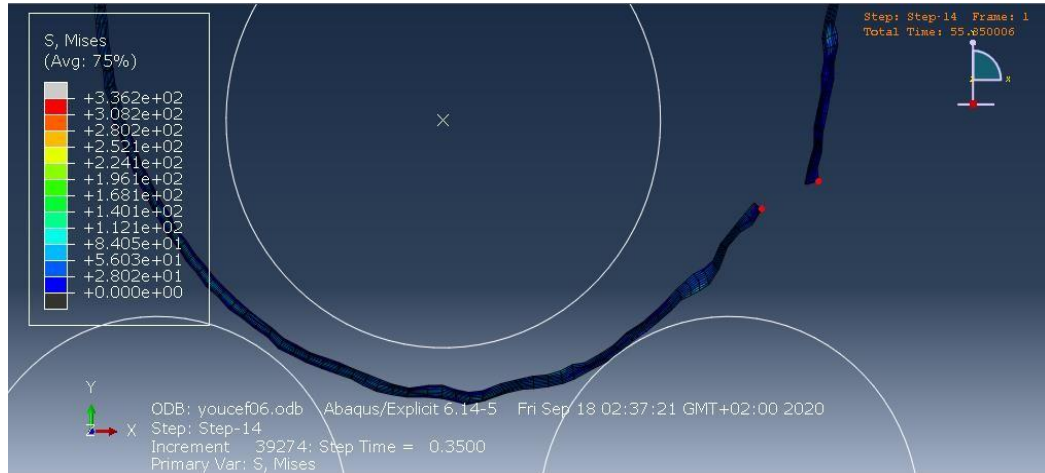
### III.8.1. Retour élastique de roulage

En utilisant le code ABAQUS, les résultats du retour élastique sont illustrés dans le figure III.11 ; III.12.



Nodes for distance: TOLE-1.1209, TOLE-1.1359				
	1	2	3	Magnitude
Base distance:	-3.00000e+003	0.00000e+000	0.00000e+000	3.00000e+003
Scale:	1.00000e+000	1.00000e+000	1.00000e+000	-
Deformed distance (unscaled):	5.40637e+000	-9.48486e+000	0.00000e+000	1.09175e+001
Deformed distance (scaled):	5.40637e+000	-9.48486e+000	0.00000e+000	1.09175e+001
Relative displacement (unscaled):	3.00541e+003	-9.48486e+000	0.00000e+000	3.00542e+003

Figure III.11. Avant que la poulie supérieure ne monte.



	1	2	3	Magnitude
Base distance:	3.00000e+003	-1.75000e+000	0.00000e+000	3.00000e+003
Scale:	1.00000e+000	1.00000e+000	1.00000e+000	-
Deformed distance (unscaled):	-3.89898e+001	7.93018e+000	0.00000e+000	3.97881e+001
Deformed distance (scaled):	-3.89898e+001	7.93018e+000	0.00000e+000	3.97881e+001
Relative displacement (unscaled):	-3.03899e+003	9.68018e+000	0.00000e+000	3.03901e+003

Figure III. 12. Après que la poulie supérieure s'élève de 82 mm.

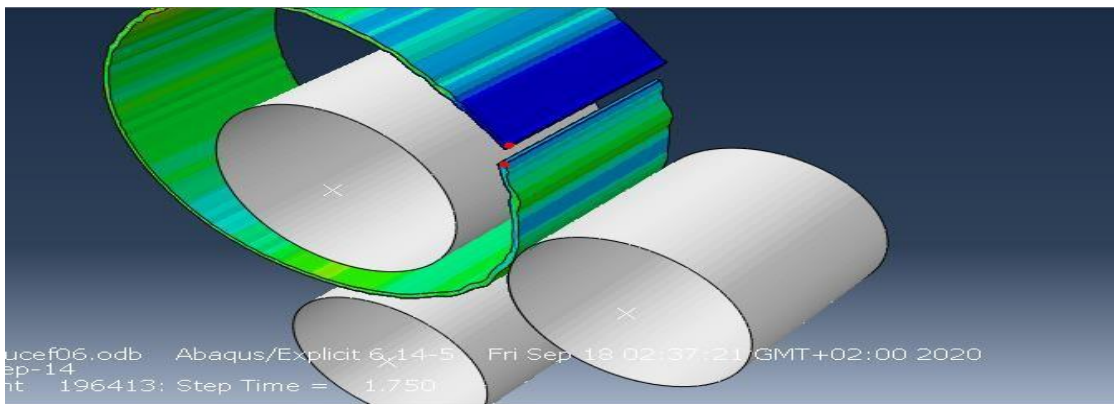


Figure III. 13. Simulation du retour élastique 3D dans ABAQUS

### III.8.2 Observation

Le retour élastique est un problème important dans le processus de la mise en forme des tôles. Quand les outils sont libérés après l'étape de formage, le produit jaillit en arrière à cause de l'action des contraintes internes. Dans beaucoup de cas la déviation de forme est trop grande et la compensation du retour élastique est nécessaire. Après des tests vérifiés pour une propriété retour élastique de roulage. Nous avons trouvé la valeur du retour élastique égal 2.887cm.

## **CONCLUSION GENERALE**

### Conclusion générale

Dans ce travail, nous avons abordé la simulation numérique du processus de roulage de tôle. Nous avons essayé de résoudre un problème, dans lequel nous pouvons déterminer les meilleurs paramètres de formage pour obtenir la meilleure formabilité de la tôle. Pour la simulation, notre choix a été porté sur le logiciel commercial ABAQUS en raison de sa fiabilité dans le domaine de mise en forme.

Les résultats obtenus concernant la simulation du roulage sont en bonne concordance avec les visualisations expérimentales vues dans l'entreprise des bouteilles à gaz de Batna. Ce travail peut être utilisé comme modèle pour résoudre d'autres problèmes mécaniques.

## **Bibliographes**

# Bibliographes

1. Disponible sur :  
<https://prezi.com/p/femhzevrrc6o/roulage/> .
2. Sfar, A. (2015). Implantation d'un système de management de la qualité d'une formation intégrale au sein de l'UVT selon la norme ISO 9001 (Doctoral dissertation, Université Virtuelle de Tunis).
3. Disponible sur :\_  
<https://www.marocetude.com/file/104463> .
4. Salem, J. (2012). Influences des paramètres du roulage à trois rouleaux asymétriques sur la qualité de la pièce formée (Doctoral dissertation, École de technologie supérieure).
5. Disponible sur : manuel d'utilisation et de maintenance pour hydraulique a 4 rouleaux cylindre fraiseuse Société anonyme akyapak commerce extérieur internationale de l'industrie de machine, akçalar/ bursa / turquie.
6. DERFOUF, C. E. (2011). Effet de la soudure sur la structure de l'acier (Doctoral dissertation, UNIVERSITE MOHAMED KHIDER BISKRA).
7. Documents techniques de fabrication de la bouteille à gaz B35 SNS BAG Batna
8. Disponible sur :\_  
<https://www.rocdacier.com/essai-de-traction-2/>.
9. Yann, L. (2005). Optimisation des procédés d'emboutissage par caractérisation géométrique et essais numériques (Doctoral dissertation, PhD thesis, Université de Savoie).
10. H. Karlsson, 2007Abaqus/CAE user's manuel, version 6.4, Abaqus, Inc,
11. KTARI, A., ANTAR, Z., HADDAR, N., & ELLEUCH, K. Simulation numérique des paramètres de roulage.

## الملخص :

التشكيل باللف هو أحد الطرق المستخدمة في تشكيل الصفائح المعدنية حيث المحاكات الرقمية تلعب دورا هاما في مرحلة الدراسة الأولية للقطع الصناعية المعقدة كما هو الحال في إمكانية التشكيل.

هذا العمل يركز على المحاكات العددية بواسطة البرنامج العددي ABAQUS لأجل تشكيل الصفائح المعدنية عن طريق اللف. حاولنا صياغة مسألة الرجوع المرن و حلها لأجل إيجاد أهم المعطيات الهندسية و المادية والتي تؤدي إلى الحصول على افضل شكل نهائي للمنتوج .

**الكلمات المفتاحية : البرنامج العددي ABAQUS , الرجوع المرن , اللف .**

## RESUME:

Le roulage fait partie de nombreux procédés de mise en forme où la modélisation numérique joue un rôle important dans la conception de pièces industrielles complexes, ceci aussi bien au niveau de l'avant-projet qu'au niveau vérification de la faisabilité du produit. Ce travail est consacré à la simulation numérique du procédé de roulage de tôles à l'aide du logiciel commercial ABAQUS. Nous avons formulé et résolu le problème du retour élastique pour déterminer les meilleurs paramètres géométriques et matériels donnant la meilleure formabilité de la tôle.

**Mots-Clés : logiciel commercial ABAQUS, retour élastique, roulage.**

## ABSTRACT:

Rolling is part of many forming processes where numerical modeling plays an important role in the design of complex industrial parts, both at the preliminary design and for the product feasibility. This work is devoted to the numerical simulation of the sheet rolling process using the commercial software ABAQUS. We have formulated and solved a Springback problem to determine the best geometric and material parameters giving the best formability of the sheet .

**Keywords: ABAQUS commercial code, Springback, rolling.**