
Université ABBES LAGHROUR Khenchela



جامعة عباس لغرور خنشلة
Faculté de Sciences et Technologie
كلية العلوم و التكنولوجيا
Département de Génie Mécanique
قسم الهندسة الميكانيكية



Mémoire

de fin d'études Pour l'obtention du diplôme
MASTER (LMD)

Spécialité : Génie Mécanique

Option : Construction Mécanique

Thème

Conception et Simulation de la Répartition des
Contraintes en étirage-plier
(Emboutissage en U)

Réalisé par :

- ARAAR Seddik
- TEBBANI Abdelhak

Dirigé par : CHITOUR Mourad

Membres de jury

- KHEDRAOUI Faycel
- ALAOUI Abdelhalim

Année universitaire : 2018-2019

Remerciement

Après avoir rendu grâce à dieu le tout puissant et le miséricordieux, La réalisation de ce mémoire a été possible grâce au concours de plusieurs personnes à qui je voudrais témoigner toute ma gratitude.

Je voudrais tout d'abord adresser toute ma reconnaissance au directeur de ce mémoire, monsieur CHITOUR Mourad, pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter ma réflexion.

Je remercie également les membres du jury d'avoir accepté d'évaluer ce travail.

Je remercie également toute l'équipe pédagogique de l'université d'Abbes Laghrour et les intervenants professionnels responsables de ma formation, pour avoir assuré la partie théorique de celle-ci.

Je remercie mes très chers parents, qui ont toujours été là pour moi. Je remercie mon frère, et mes sœurs, pour leurs encouragements.

Enfin, je remercie mes Amis pour Leur soutien inconditionnel et leurs encouragements ont été d'une grande aide.

Je dédie ce mémoire

A ma très chère maman

Au meilleur des pères

Qui n'ont jamais cessé, de formuler des prières à mon égard, de me soutenir et de m'épauler pour que je puisse atteindre mes objectifs.

A mon frère

A mes chères sœurs

Pour ses soutiens moral et leurs conseils précieux tout au long de mes études, et qui je souhaite un avenir radieux plein de réussite.

A toute ma famille

Source d'espoir et de motivation.

A mes Amis

Pour leur aide et support dans les moments difficiles.

A tous ceux que j'aime et ceux qui m'aime

Table des matières

Introduction Général	1
<u>I Généralités sur la mise en forme des métaux</u>	2
I.1 Introduction.....	2
I.2 Généralités sur l'emboutissage.....	4
I.2.1 Définition et principe d'emboutissage	4
I.2.2 Mode d'emboutissage.....	10
I.2.3 Difficultés du procédé d'emboutissage.....	11
I.2.4. Outillages	11
I.2.4.1. Caractéristique et importance des dimensions des outils	12
I.2.4.2. Rayon du poinçon r_p	13
I.2.4.3. Rayon de matrice r_m	14
I.2.4.4. Jeu entre poinçon et matrice.....	15
I.2.4.5. Serre-flan	15
I.2.4.6. Effort de serrage.....	15
I.2.4.7. Propriétés du matériau	18
I.3. Défauts en mise en forme des tôles métalliques	20
I.3.1. Retour élastique.....	20
I.3.2. Striction.....	25
I.3.3. Plissement.....	27
<u>II Retour Elastique</u>	29
II.1. Introduction.....	29
II.2. le retour élastique	30
II.2.1. Définition.....	30
II.2.2 Calcul du retour élastique.....	32
II.2.3. Les paramètres influençant le retour élastique.....	35
II.2.3.1. Les paramètre du processus.....	36
II.2.3.1.1. Le dégagement.....	36
II.2.3.1.2. Le coefficient de frottement.....	37
II.2.3.1.3. La température.....	39
II.2.3.1.4. Le rayon de courbure	40
II.2.3.2. Les paramètre de matériau.....	42
II.2.3.2.1. L'épaisseur.....	42

Table des matières

II.2.3.2.2. La limite élastique	43
II.2.3.2.3. Le module de Young	43
III.2.3.2.4. Anisotropie	46
III Simulation Numérique	49
III.1. Introduction	49
III. 2.Conduite de la simulation.....	50
III. 2.1.Présentation générale d'Abaqus	50
III. 3. Étapes de la simulation sur Abaqus	52
III.4. Hypothèses Générale de la Modélisation	53
III.4.1. Représentation géométrique.....	53
III.4.2. Caractéristique de matériau.....	54
III.4.3.Assemblage	54
III.4.4 Les étapes de la simulation	55
III.5.Étude Numérique	56
III.5.1. Conditions aux limites.....	56
III.5.2. Discrétisation	57
III.6. Résultat et discussion.....	58
III.6.1. Déplacements sur différentes zone sur la tôle	58
III.6.2. Distribution des contraintes sur la surface interne de tôle	59
III.6.3. Distribution des contraintes sur la surface externe de tôle.....	61
III.6.4. Comparaison entre les contraintes interne et externe de la tôle.....	63
Conclusion Générale.....	67
Liste des Figures.....	68
Liste des Tableaux.....	71
Bibliographie.....	72

Introduction Générale

La transformation des tôles mécaniques en produits finis a une importance considérable dans de nombreuses industries telles que la construction mécanique, l'automobile ou l'aéronautique. Le déchirement prématuré de la tôle lors de la mise en forme (emboutissage, pliage) est l'un des grands problèmes posés actuellement au niveau de l'industrie mécanique. 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.

L'emboutissage, 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.

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. A cet effet, de nombreux modèles ont été développés pour traiter les problèmes inhérents à la mise en forme : retour élastique, localisation, plissement...

Le retour élastique est le changement dimensionnel de la partie formée après la suppression de l'outil, il résulte par le changement des déformations produites. Ceci a comme conséquence le composant formé étant hors de la tolérance et peut créer des problèmes dans l'assemblage ou l'installation, donc la prévision précise du retour élastique est impérative pour la conception robuste de l'outillage.

Le déroulement de notre travail se divisé en trois chapitre :

Le premier chapitre présente les procédés de la mise en forme des métaux avec les généralités d'emboutissage ainsi que les défauts en mise en forme des tôles métalliques.

Le deuxième chapitre nous présentons quelques travaux expérimentaux sur le retour élastique et les paramètres qui l'influent.

Introduction Générale

Pour le dernier chapitre nous détaillons la procédure expérimentale, l'analyse et l'interprétation des résultats obtenus. Ce travail sera finalisé par une conclusion générale précisant ainsi les résultats obtenus.

Chapitre I

Généralités sur la mise en forme des métaux

- I.1 Généralités sur la mise en forme des métaux
- I.2 Généralités sur l'emboutissage
- I.3 Défauts en mise en forme des tôles métalliques

Résumé :

Dans ce chapitre, nous allons dans un premier temps présenter la mise en forme des métaux. Ensuite, nous allons voir les principes d'emboutissage et leur outillage. Enfin nous terminerons en passant par les défauts en mise en forme des tôles métalliques.

I Généralités sur la mise en forme des métaux

I.1 Introduction :

Il existe trois voies principales de mise en forme selon l'état de départ du matériau métallique (le moulage, le façonnage et le frittage). La figure I.1 récapitule les principaux procédés de mise en forme des métaux utilisés actuellement. Parmi les techniques de formage sans enlèvement de matière des métaux en feuilles on trouve le procédé d'emboutissage. Il est l'un des procédés de mise en forme des tôles minces le plus ancien et le plus répandu dans le milieu industriel [1].

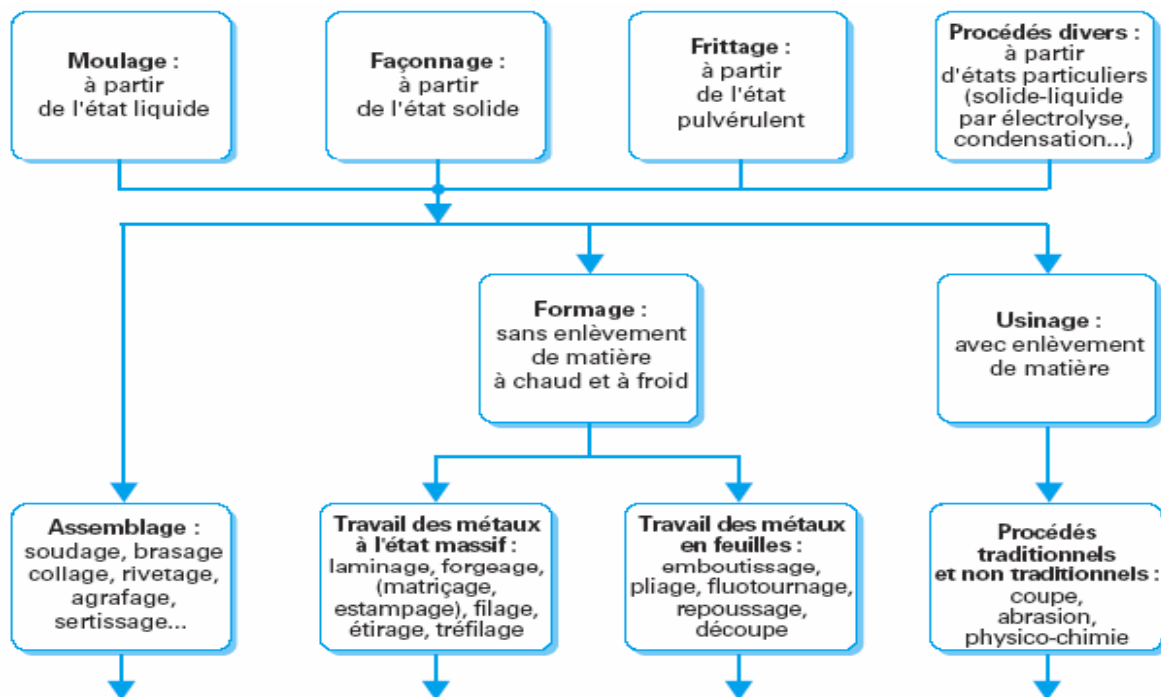


Figure. I.1. Principaux procédés de mise en forme des matériaux métalliques. [1]

I.2 Généralités sur l'emboutissage

I.2.1 Définition et principe d'emboutissage :

Emboutir : « Travailler une plaque de métal au marteau et sur une enclume, de manière à la rendre concave d'un côté et convexe de l'autre ». Par cette définition, nous sommes à même d'imaginer qu'il y a fort longtemps que l'on emboutit des tôles. Les temps modernes, nés de la société de consommation, ont mené aux développements de l'automobile et à l'équipement des foyers entre autres. Par là même, le marteau est devenu poinçon, l'enclume, matrice et, les pinces et étriers servant à maintenir la tôle, serre-flan. L'emboutissage consiste alors à fabriquer, à

partir d'un flan plan de faible épaisseur, une pièce de forme complexe généralement non développable figure I.2 et I.3, Le flan étant plaqué, avec une certaine force contre la matrice, par le serre-flan et, mis en forme par avancée du poinçon à l'aide d'une presse [2].

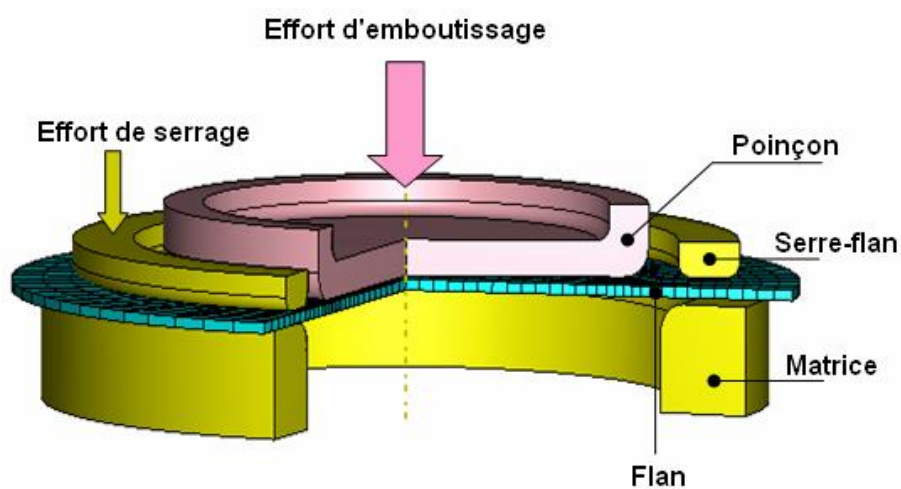


Figure I.2. Procédé d'emboutissage [3].

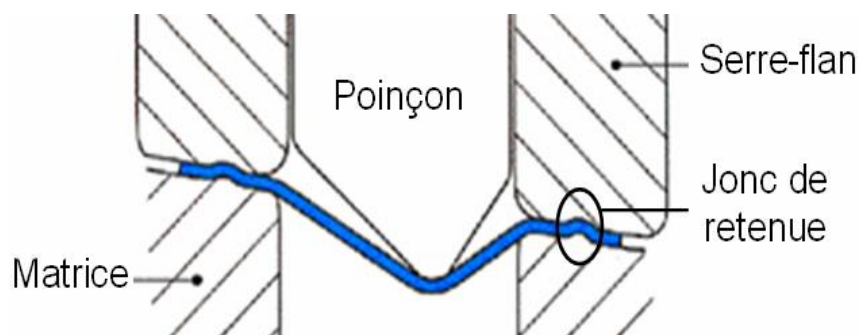


Figure I.3. Procédé d'emboutissage avec freinage de la tôle sous serre-flan. [4].

Les déformations engendrées par l'emboutissage conduisent en général à des modifications de l'épaisseur du flan, le volume total restant néanmoins constant. Du point de vue géométrique, l'emboutissage transforme donc une surface plane ou préformée (mais développable) en une surface non développable. Quatre étapes apparaissent au cours de l'opération d'emboutissage :

- Le positionnement du flan sur la matrice et les phénomènes de gravité qui peuvent en dérouler.
- Le serrage du flan par serre- flan.
- L'emboutissage proprement dit obtenu par descente du poinçon.
- L'ouverture de la presse et l'éjection de l'embouti. [4]

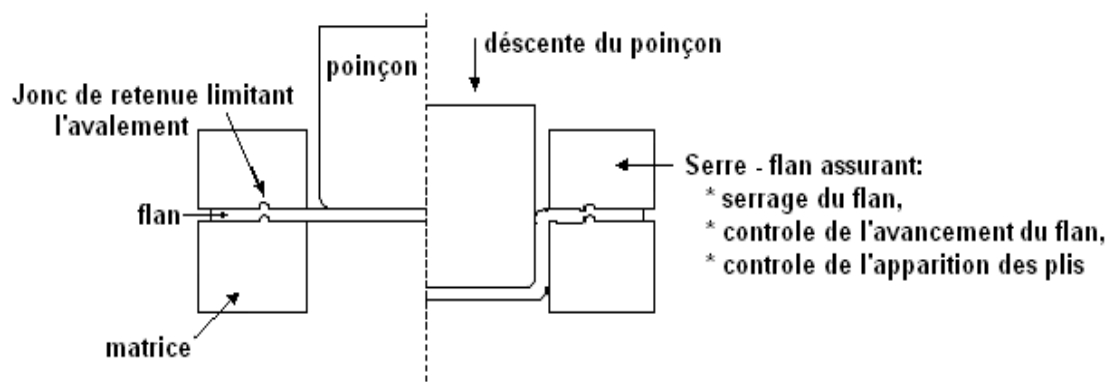


Figure I.4 : Description du procédé d'Emboutissage. [4]

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. Le processus d'emboutissage est comme suit [3]

1- Une coupe à travers l'installation d'outil montre le poinçon, la matrice et le feuillard (ou l'objet) sur la reliure. La reliure est en position élevée.

2- La reliure et le poinçon sont descendus. La reliure atteint la feuille en avant du poinçon et de ce fait une pression, la force de reliure, est appliquée sur la feuille. Par conséquent les parties périphériques de l'objet sont gardées en place. Si la reliure n'est pas plate une première formation a lieu.

3- Le poinçon est maintenant en contact avec la feuille et la feuille est dessinée par l'ouverture dans la matrice. Elle glisse au-dessus du rayon de matrice. Pendant que le poinçon procède en 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.

4- Le poinçon s'écarte vers le haut et le composant formé est éliminé de l'outil.

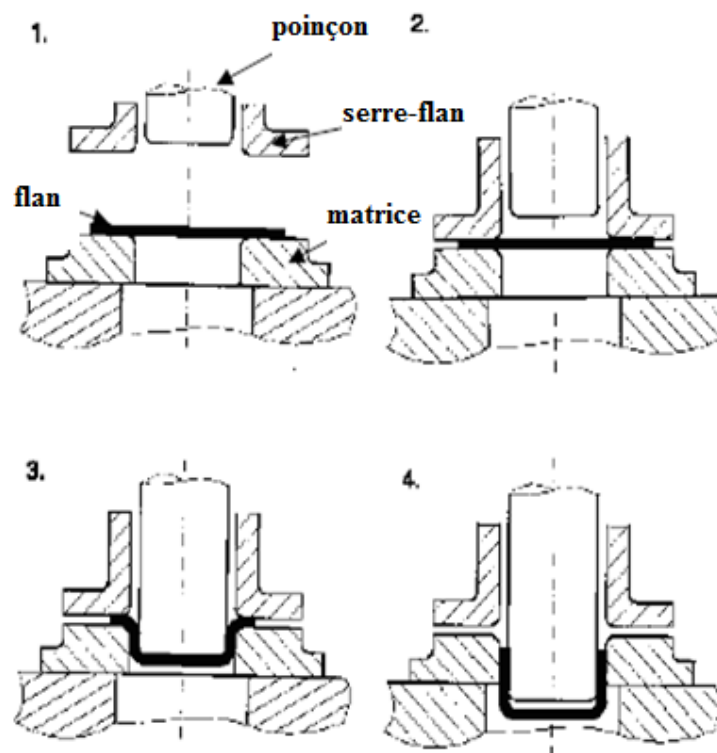


Figure I.5 Le processus d'emboutissage en quatre étapes [5].

Selon la profondeur ou la forme de la pièce, plusieurs passes dans des outils différents peuvent être nécessaires.

L'emboutissage peut aussi être pratiqué par d'autres procédés, comme l'application d'un fluide à haute pression (hydroformage) qui plaque la tôle contre la matrice. Cette haute pression peut être obtenue à l'aide de dispositifs hydrauliques figure I.5.

Sur certaines presses, la matrice peut se déplacer (emboutissage simple effet). De même une matrice fixe peut comporter des parties mobiles (triple effet etc..).

Le choix du procédé dépend du type de presse disponible en atelier (effort de serrage, dimension), de la forme de la pièce, du matériau (acier standard, acier à haute résistance, aluminium etc..), du nombre d'opération total pour obtenir la pièce finale etc.

La formabilité de l'acier est améliorée en le chauffant légèrement, attention il ne faut pas modifier la phase (état atomique) sinon les propriétés mécaniques sont modifiées (résistance, dureté etc..) Mais en général, l'emboutissage est une opération de formage à froid, la matrice étant généralement refroidie pour limiter l'échauffement

lié au contact. L'emboutissage ne plastifie pas entièrement la pièce, une étude de retour élastique est nécessaire pour assurer l'assemblage final.

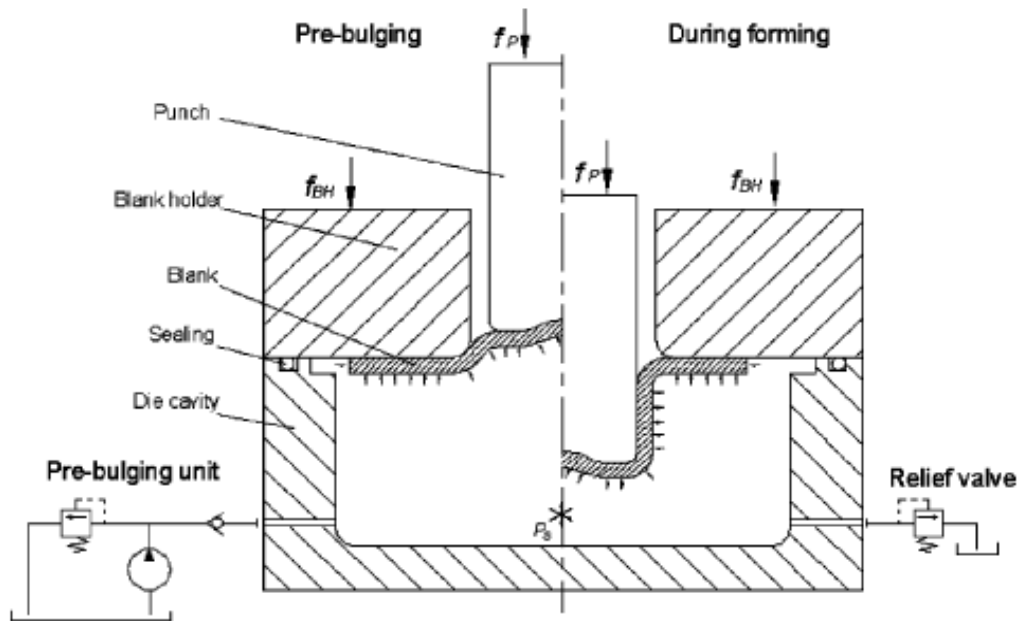


Figure I.6 Emboutissage hydromécanique [6].

Dans l'emboutissage, la qualité de la partie formée est affectée par la quantité de métal formé dans la cavité de matrice. Une fois choisi correctement, ce profil de la force de serrage BHF peut éliminer des rides et retarde la rupture dans la partie tirée.

Le procédé d'emboutissage est important dans les divers secteurs industriels : transport, carrosserie automobile figure I.7 et figure I.8, appareils électroménagers, emballages métalliques, etc. Un des intérêts principaux expliquant le succès de ce procédé réside dans la variété des composants réalisables et la cadence de production élevée.

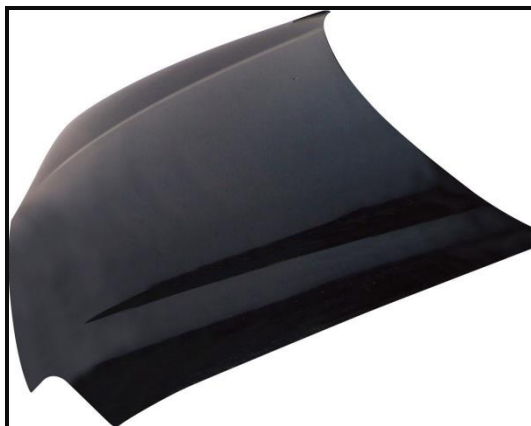


Figure I.7. Outils d'emboutissage d'un capot d'une voiture (Documentation STAMPACK, Société QUANTECH). [4].



Figure I.8. Outils d'emboutissage d'aile d'une voiture (Documentation STAMPACK, Société QUANTECH). [4].

D'après une étude du Service des Études et des Statistiques Industrielles en 2004 du

Ministère de l'Économie des Finances et de l'Industrie de France, les entreprises travaillant dans le secteur découpage emboutissage, occupent la première place des fournisseurs de pièces et d'équipements automobile, avec 47% des investissements, figure I.9, [5].

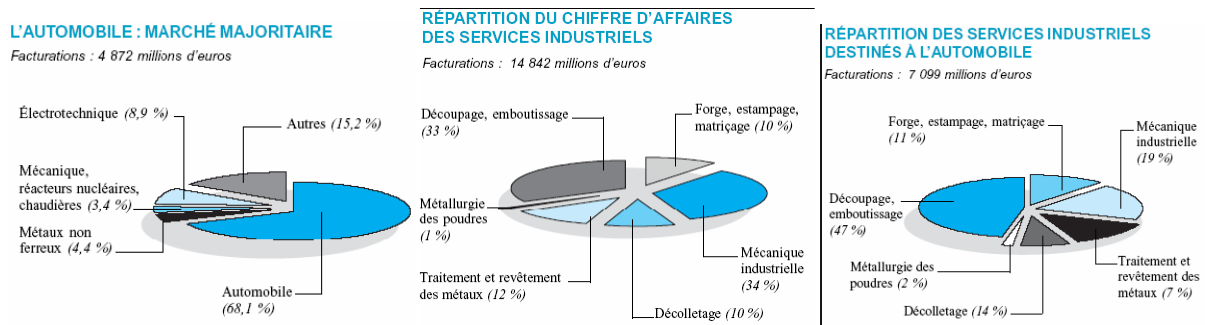


Figure I.9. Le procédé d'emboutissage en chiffres. [3].

Le secteur découpage emboutissage, qui est la deuxième grande composante des services industriels en termes de chiffre d'affaires (33%), est caractérisé par sa forte corrélation avec l'industrie automobile qui représente plus des deux tiers de ses débouchés (68.1%). Les fournisseurs de cette branche bénéficient tout naturellement de la demande en provenance de ce secteur. Mais ils doivent suivre les orientations stratégiques des constructeurs automobiles et les nouveaux besoins des consommateurs [5].

Comme pour tous les procédés de mise en forme des matériaux métalliques (estampage, découpage, pliage, forgeage, fonderie, etc.) les exigences actuelles sont de plus en plus grandes, et la compétition industrielle se joue désormais en grande partie sur la qualité des produits et la fiabilité du procédé.

A cet égard, les entreprises se tournent de plus en plus vers les innovations du procédé afin d'identifier les technologies clés pour :

- Améliorer la qualité des pièces embouties et la flexibilité des outils ;

- Réduire les coûts de la production ;
- Améliorer la productivité et la compétitivité.

Les principaux paramètres du procédé sont :

- L'épaisseur initiale de la tôle ;
- La loi de comportement du matériau et l'anisotropie de ce dernier ;
- La vitesse du poinçon ;
- La position du flan initial et le dimensionnement du contour initial ;
- La force de serrage serre-flan et les coefficients de frottement, ainsi qu'éventuellement la forme et la position de joncs. [4].

I.2.2 Mode d'emboutissage :

La mise au point consiste à déterminer les conditions de formage pour lesquelles la partie utile de la pièce ne comporte aucun défaut marqué en volume : rupture, amincissement local excessif, plis, cloques et d'une manière générale, non-respect des tolérances dimensionnelles, ni en surface : rayure, grippures, perte de revêtement pour les tôles revêtues, etc. Les moyens d'action possibles à mettre en œuvre, concernant le choix :

- de la géométrie et la position du flan,
- de la force de serrage exercée par le serre-flan, et de la position et de la géométrie des joncs,
- de la géométrie de l'outil.
- du lubrifiant (nature, quantité),

- du matériau de la tôle (le plus souvent en vertu d'un critère expérimental de formabilité),
- de la nature de l'outil, etc. [4].

I.2.3 Difficultés du procédé d'emboutissage :

Les cadences de production, souvent très intenses (voisines de 100 à 200 pièces /heure, pour les très grosses pièces de carrosserie d'automobiles) font du procédé d'emboutissage, une opération de mise en forme très attractive du point de vue des coûts de production. Pourtant la mise en point des outils d'emboutissage nécessite un savoir-faire que seuls, souvent pour l'instant, les emboutisseurs détiennent. En effet les principales difficultés rencontrées pour obtenir une forme finale correcte sont nombreuses :

- L'état de la surface des tôles doit être parfaitement lisse,
- Les zones de faibles épaisseurs doivent être contrôlées,
- Les plis et les ruptures (par striction) doivent être évités,
- Le retour élastique de la tôle après emboutissage doit être pris en compte.

Les interactions superficielles de la tôle avec les outils ont évidemment une influence sur la qualité de la pièce formée et la maîtrise de l'opération requiert une connaissance au moins qualitative de l'effet des paramètres sur leur intensité. [4].

I.2.4 OUTILLAGE :

L'emboutissage peut comporter une ou plusieurs opérations dans chacune le flan ou pièce de l'opération précédente est préalablement plaquée contre la matrice par la serre flan. Avec une certaine force, plus au moins constante puis mise en forme par avancée du poinçon. [8] L'outillage d'emboutissage se compose généralement de trois éléments figure I.3 :

- un poinçon pour appliquer l'effort d'emboutissage et délimitant le contour intérieur de la tôle,
- une matrice délimitant le contour extérieur de la tôle.
- un serre-flan qui, en pressant la tôle métallique contre la matrice contrôle son écoulement lors de la descente du poinçon

La pénétration du poinçon dans la matrice nécessite un jeu fonctionnel entre ces deux éléments afin d'éviter l'écrasement de la tôle. [8]

L'opération d'emboutissage d'une tôle se déroule en deux phases : une phase d'emboutissage et une phase de retour élastique.

La phase d'emboutissage est elle-même composée de deux étapes :

La première consiste à faire descendre le serre-flan jusqu'au contact avec la tôle et lui appliquer une pression de serrage plus ou moins élevée.

La seconde étape est la descente du poinçon tout en maintenant la pression appliquée sur la serre flan.

La phase du retour élastique concerne le retrait des outils et l'extraction de la tôle emboutie. Cette étape consiste à annuler la pression de serrage, retirer le poinçon, enlever le serre-flan et éjecter la tôle hors de la matrice.

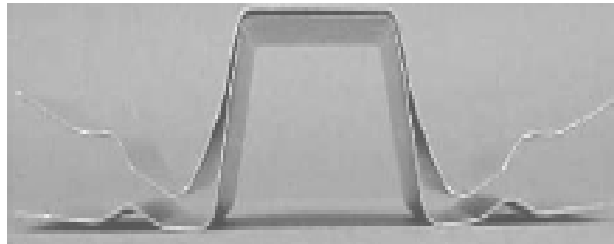


Figure I.10. Retour élastique [3].

I.2.4.1 Caractéristique et importance des dimensions des outils :

L'outil qui exécute une opération dans la gamme de fabrication d'une pièce peut être monté seul ou groupé sur une même presse. Dans tous les cas de groupage d'outils, on détermine les efforts nécessaires à chacun d'eux ; cela permet d'une part de vérifier que l'effort nominal de la presse est suffisant, et d'autre part de disposer ces outils de façon que le point d'application de l'effort résultant soit le plus près possible de l'axe du coulisseau de la presse [9].

La fabrication des outillages d'emboutissage est généralement assurée sur machines – outils conventionnels tout en prenant en considération le critère

économique qui est le coût horaire machine et le coût de la matière, assurant ainsi la facilité des opérations d'usinage.

L'outil ne doit pas être une source d'accident pour l'opérateur. Il faut donc lui assurer une alimentation aisée et une extraction facile des pièces, de sorte que le temps de l'action manuelle sous l'outillage soit très court.

I.2.4.2 Rayon du poinçon :

Le rayon du poinçon r_p (figure I 11) ne doit pas être trop faible pour éviter le décalage du fond de la pièce (amincissement local de la tôle traduisant une déformation locale en expansion) ni trop important pour éviter les risques de plis; en principe il ne doit pas être inférieur au rayon de la matrice. Dans le cas où la pièce exigerait un faible rayon, il faut prévoir une opération supplémentaire de conformation. [10]

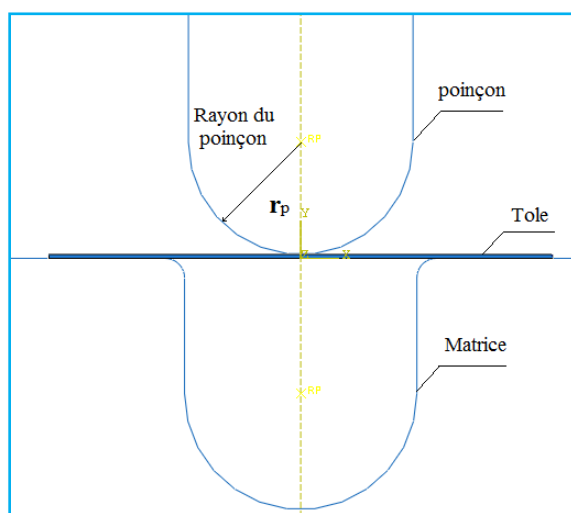
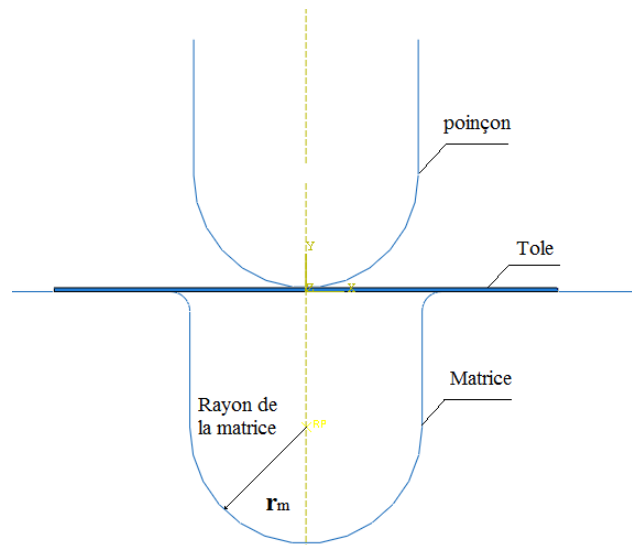


Figure I.11. Rayon du poinçon r_p **I.2.4.3 Rayon de matrice r_m :**Figure I.12. Rayon de matrice r_m

D'une manière générale, le rayon de la matrice r_m est :

$$5e \leq r_m \leq 10e \quad [10] \quad (1)$$

Une valeur plus précise d' r_m est donnée par [10] est :

En première passe :

$$r_m = K * D - d * e \quad (2)$$

Avec :

$K = 0.8$ pour un acier doux,

$K = 0.9$ pour l'aluminium.

En deuxième passe :

$$r_m = \frac{(d_1 - d_2)}{2} \quad (3)$$

Avec :

$d_1 : \emptyset$ En première passe.

$d_2 : \emptyset$ En deuxième passe.

I.2.4.4 Jeu entre poinçon et matrice :

Le jeu radial entre poinçon et matrice doit être plus grand que l'épaisseur nominale du métal embouti, pour tenir compte des tolérances sur l'épaisseur des métaux en feuilles.

$$e < j < e \times \frac{D}{d} \quad (4)$$

Avec $\frac{D}{d} = B$ tient compte de l'épaississement de la tôle en fin d'emboutissage (déformation en retraite) $j \leq 1, 2 \cdot e$ [11]

I.2.4.5. Serre-flan :

D'une manière générale, la surface de la serre flan doit être développable. Le serre flan de première passe d'un outil d'emboutissage profond est plan et les pressions à appliquer pour éviter la formation de plis ne peuvent être déterminées avec précision qu'expérimentalement.

L'emboutissage des pièces peu profondes (expansion) et des pièces à grandes parois peu déformées entraîne la formation des plis ou une mauvaise conformation (ventre des parois droites). Le serre flan comporte alors des joncs qui empêchent ou diminuent le glissement de la tôle sous serre flan. Pour contrôler l'écoulement du métal dans la matrice plusieurs joncs peuvent être disposés les uns à la suite des autres [10]. Des joncs de retenue sont également utilisés lors des opérations de calibrage par étirage des pièces, types cônes, paraboles, etc.

I.2.4.6. Effort de serrage :

Les développements actuels et les futures recherches de la technologie d'emboutissage ont comme objectif principal l'amélioration de la fiabilité du procédé. En conséquence, beaucoup d'efforts ont été faits pour mieux adapter les presses mécaniques aux besoins des formages compliqués surtout pour les opérations d'emboutissage profond les plus délicates. Le développement le plus significatif est la segmentation élastique du serre-flan Figure I.13. Ce type de serre-flan a été utilisé dernièrement dans de nombreux travaux de recherche ([13], [14], [15], [16] et [17]). Sous l'effet des efforts exercés par des vérins hydrauliques et grâce à son comportement élastique, une augmentation de la pression dans un vérin engendrera une augmentation locale de l'effort de serrage, qui ralentit localement l'écoulement de la matière.

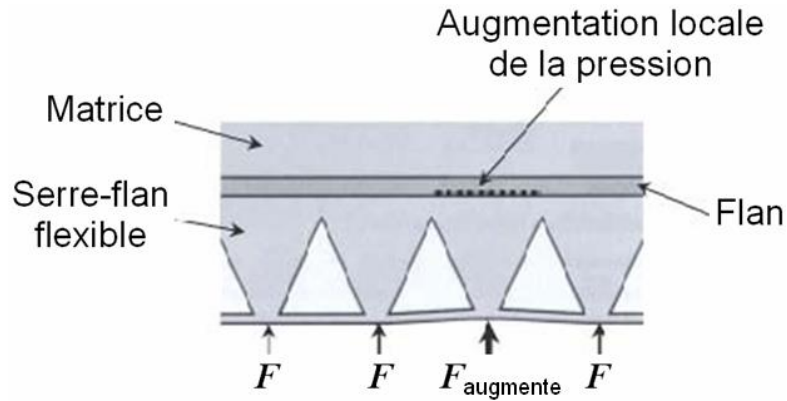


Figure I.13. Principe de la segmentation élastique du serre-flan.

Selon les difficultés rencontrées et les buts recherchés, les auteurs ont utilisé différentes stratégies de serrages. Ils considèrent généralement que le serrage est optimal "parfait" lorsque la pièce ne présente pas de défauts. Siéger et al [16] ont étudié une pièce industrielle (Figure I.14) présentant de nombreux défauts, des ruptures, des plis sous serre-flan et dans la partie active de la pièce et un manque de déformations plastiques dans certaines zones (n'ont pas été suffisamment tendues).

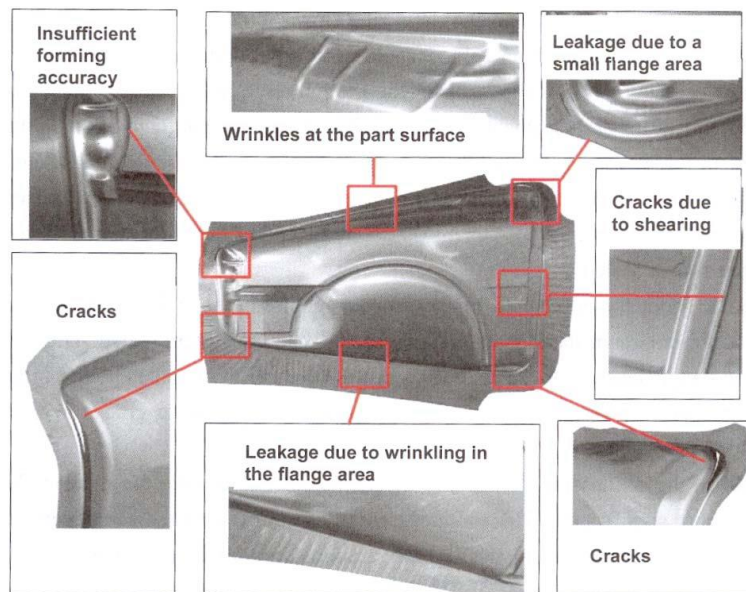
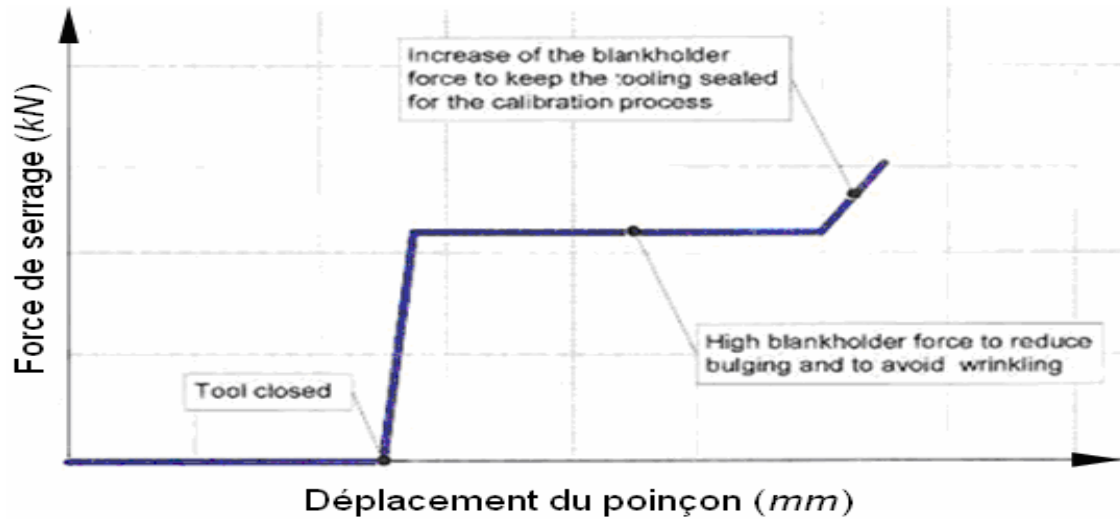


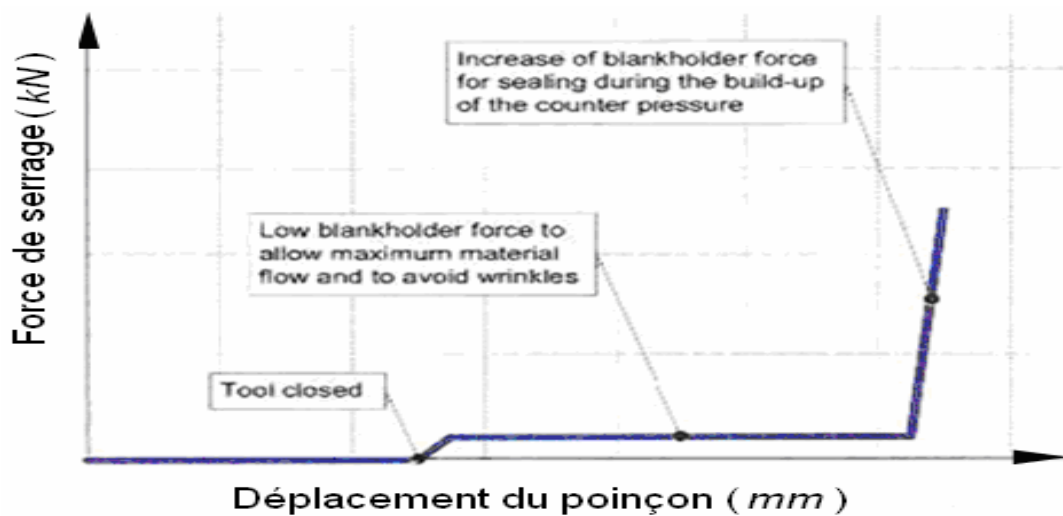
Figure I.14. Difficultés en emboutissage et intérêt du contrôle des efforts serre-flan.

Ces défauts ont été évités par le contrôle du profil de douze efforts de serrage en fonction de l'avancement du poinçon. Leurs résultats d'optimisation (Figure II.15) ont permis d'améliorer la formabilité du métal et d'obtenir ainsi une pièce sans défauts. Dans certaines

zones il faut faciliter l'écoulement de la matière en appliquant un effort de serrage faible et l'augmenter brusquement à la fin de l'opération afin de réduire le retour élastique. En revanche, dans d'autres parties ils appliquent un effort assez important dès le début dans le but d'obtenir une pièce suffisamment tendue et rigide.



(a)



(b)

Figure I.15. Contrôle des efforts de serrage : (a) sur le segment 3, (b) sur le segment 4.

La détermination de la force de serrage (ou pression de serrage) optimale pour des emboutis de formes simples ou complexes a fait l'objet de nombreux travaux. Descamps, Chaumont et Kegen [18] ont étudié et analysé la formabilité des deux matériaux (*DDQ* et

HSLA1) en utilisant un serre-flan conventionnel et un serre-flan flexible. Ils ont combiné différents profils de serrage pour le serre-flan flexible :

- Force constante (pression uniforme et constante).
- Profil global de la force de serrage.
- Profil local de la force de serrage (par zone).

A travers cette étude ils ont montré qu'avec un serre-flan flexible et en ajustant localement la force de serrage on peut atteindre des profondeurs de plus en plus élevées même pour des matériaux très résistants (Figure I.16).

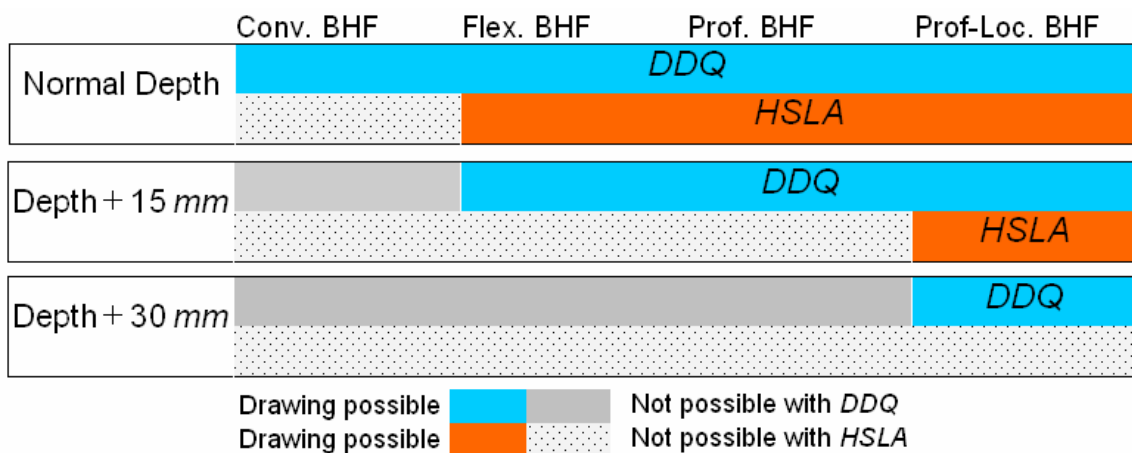


Figure I.16. Avantage de la flexibilité du serre-flan et du contrôle local de la force de serrage.

I.2.4.7. Propriétés du matériau :

Concernant les propriétés du matériau, les travaux menés cherchent à trouver un matériau qui permet de réaliser la géométrie étudiée.

Delamézière [19] utilise les courbes limites de formage pour détecter les risques de rupture et un indicateur de plissement sur la partie utilisée de la pièce. La simulation du procédé est effectuée par Approche Inverse. L'indicateur de plissement est calculé en fonction de l'état de contraintes sur chaque élément. La courbe limite de formage dépend du matériau et du chemin de déformation. Pour chaque nouveau matériau utilisé lors de l'optimisation une courbe est déterminée en utilisant le modèle de Marciniuk et Kuczynski.

Les variables de conception sont n l'exposant d'écroutissage de la loi d'Hollomon ($\sigma = K\varepsilon^n$) et le coefficient d'anisotropie moyen de Lankford r .

La méthode est appliquée sur le cas-test de la boîte carrée de *Numisheet'93*. Deux matériaux, un acier et un alliage d'aluminium, étaient proposés pour effectuer des tests expérimentaux et des simulations numériques. Or il fut trouvé que l'aluminium proposé ne permet pas de dépasser une profondeur de 20 mm sans rupture. Une boîte d'une profondeur de 23 mm est alors étudiée.

Pour ce cas deux méthodes d'optimisation ont été utilisées. La première, fait appel à une surface de réponse calculée par approximation diffuse, la seconde est un algorithme de type BFGS.

Le Tableau 1 présente les résultats. Les valeurs initiales sont les propriétés de l'aluminium qui présente des points au-dessus de la courbe limite de formage (non représenté). L'indicateur de plissement $w R$ vaut 10.4. L'objectif est de n'avoir aucun point au-dessus de la courbe limite de formage et un indicateur de plissement de 5. Cela est atteint par les deux méthodes d'optimisation. Les propriétés obtenues tendent vers les valeurs de l'acier, qui était proposé à *Numisheet'93*. On note également une diminution des valeurs minimale et maximale de la variation d'épaisseur Δh_{min} et Δh_{max} [19].

Matériaux	n	r	R_w	Δh_{min}	Δh_{max}
Aluminium	0.3593	0.6425	10.4	-35.60%	16.16%
Diffus	0.1943	1.9339	3.81	-9.730%	11.07%
BFGS	0.2390	1.9500	5.00	-9.960%	10.84%
Acier	0.2637	1.7700	5.85	-10.08%	9.460%

Tableau. I. 1. Optimisation des propriétés matériau.

Les deux méthodes d'optimisation sont déterministes, les résultats sont différents car il existe une infinité de couple (n, r) mettant de réaliser une géométrie.

La principale hypothèse de ce travail est de considérer que les propriétés du matériau sont continues, que n'importe quel couple (n, r) existe. Ceci n'est pas complètement absurde car l'anisotropie provient essentiellement de l'opération de laminage. En jouant sur la gamme de laminage et sur les traitements thermiques qui s'y trouvent, il est possible d'obtenir le matériau souhaité, mais le prix d'obtention risque d'être prohibitif.

I.3. Défauts en 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. A l'issue de l'opération de mise en forme d'une tôle, par exemple par emboutissage, la géométrie finale obtenue après enlèvement des outils peut ne pas correspondre exactement à la forme recherchée. Deux phénomènes sont essentiellement à l'origine de ces défauts : le retour élastique et le plissement.

– Un défaut local concerne des zones plus ou moins réduites de la pièce, où une diminution nette de l'épaisseur, voire rupture, peut apparaître. La striction localisée en est un exemple. D'autres phénomènes plus rares, comme la rupture différée en est un autre.

Nous décrivons ces principaux défauts dans les paragraphes suivants.

I.3.1. Retour élastique :

Lors de la mise en forme d'une tôle métallique par emboutissage, la forme recherchée est celle définie par le profil des outils à la fin de l'étape d'emboutissage. Cependant, après extraction de la pièce, à cause du comportement élastique du matériau, elle se relâche et la forme de la pièce évolue vers un nouvel état d'équilibre jusqu'à relaxation des contraintes. La (Figure I.17) montre un exemple d'une déformée obtenue juste à la fin de l'étape d'emboutissage puis après enlèvement des outils. Elle illustre clairement la différence entre les deux déformées. Ce phénomène n'apparaît, heureusement, pas sur toutes les pièces, mais uniquement sur certaines formes où des degrés de liberté en rotation de la tôle sont possibles.

C'est la raison pour laquelle ce phénomène n'apparaît pas par exemple sur des pièces de forme tubulaire (godets, bouteilles, tubes etc.).

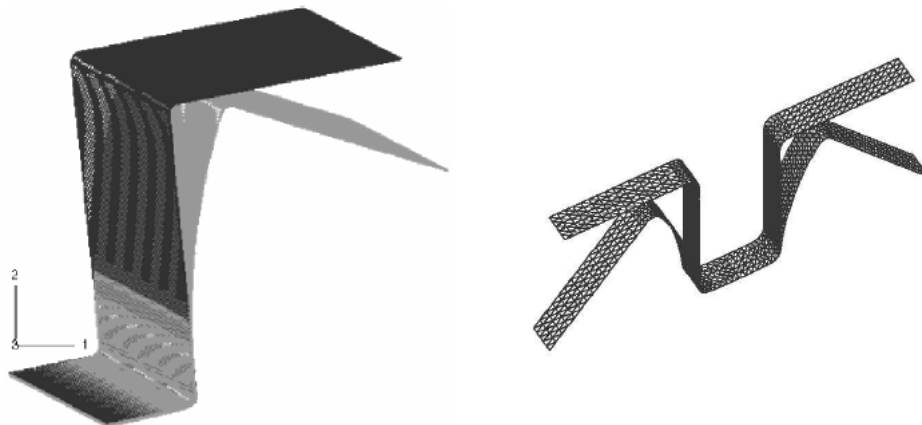


Figure I.17. Simulation numérique du phénomène de retour élastique [20]

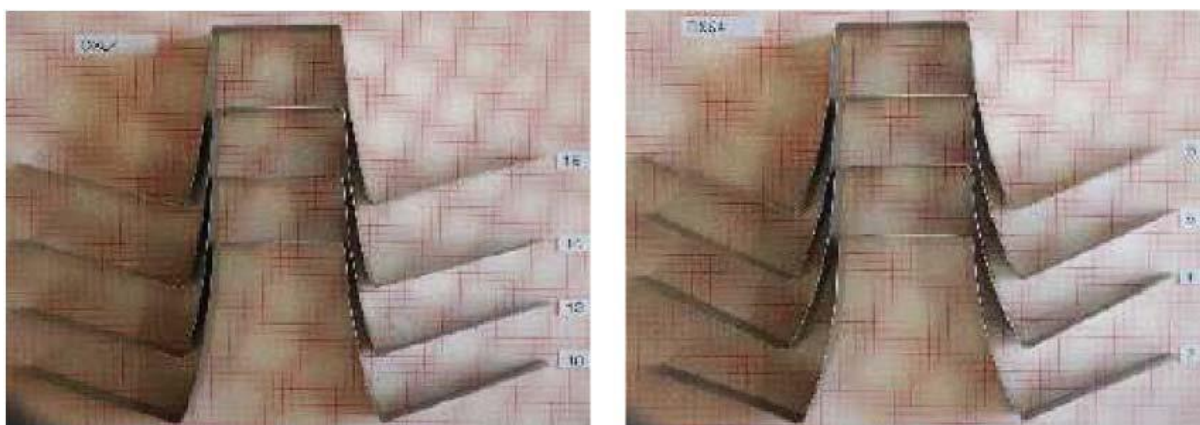


Figure I.18. Retour élastique pour différents efforts de serrage sur un acier doux (4ème Rapport CECA, Voest Alpine). A gauche : efforts de serrage élevés. [21]

Les figures II.18 montrent, par exemple, l'influence de l'effort de serrage de la serre flan sur le niveau du retour élastique pour la géométrie en « Oméga ». Sur chaque figure, la déformée située à gauche correspond à l'effort de serrage élevé. Ces figures montrent que le retour élastique est beaucoup plus prononcé pour de faibles efforts de serrage, tel que constaté dans plusieurs travaux (Pourboghrat et Chu, 1995 ; Carden et al. 2002 ; Geng et Wagoner, 2002 ; Lee et al. 2005a, 2005b ; Haddag et al. 2004, 2005 etc.).

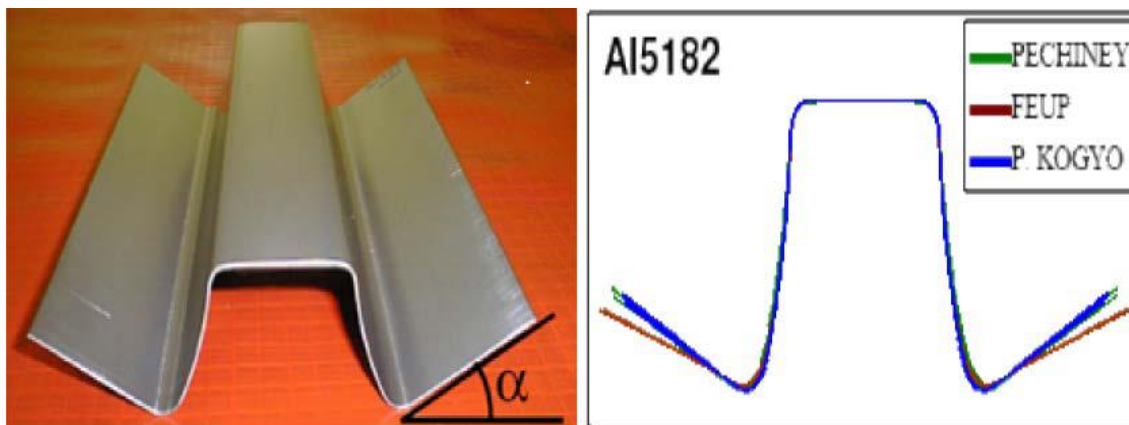


Figure I.19. Dispersion des résultats du retour élastique sur une nuance d'aluminium obtenue Par différents partenaires dans le cadre du projet 3DS de la conférence Numisheet2005 D'après Col et Santos (2003). [22].

La sensibilité à la vitesse de déplacement du poinçon en emboutissage peut également avoir un effet sur le retour élastique. En comparant différents résultats sur le même essai de retour élastique effectué par plusieurs partenaires, on a souligné l'effet de la vitesse de déplacement du poinçon afin d'expliquer la dispersion entre leurs résultats. Ils attribuent ceci à l'effet que peut avoir cette vitesse sur le frottement entre les outils et la tôle, qui lui-même a un effet sur les efforts transmis à la tôle lors de la mise en forme. La variation de l'effort de serrage ainsi induite fait varier le niveau du retour élastique. Par contre, Mori et al. (2005) ont montré sur une géométrie en "V", comme illustré sur la figure II.18, que le niveau du retour élastique est faiblement affecté par la vitesse de mise en forme. Ceci laisse à penser que les grandes déformations plastiques générées localement dans la tôle par la pointe de l'outil ne sont pas affectées par la vitesse du poinçon.

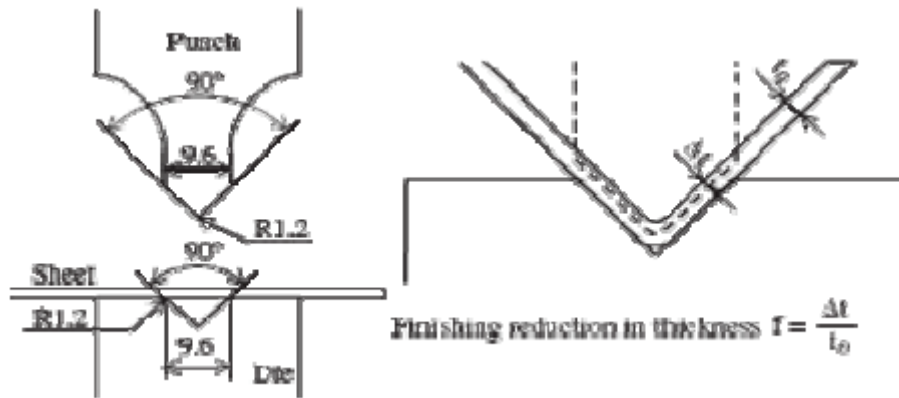


Figure. I. 20. Essai en “V” pour caractériser la sensibilité du retour élastique à la vitesse de Mise en forme. D’après Mori et al. (2005).

Le choix du matériau a une grande influence sur le retour élastique. Les matériaux à très haute résistance exhibent souvent un retour élastique plus élevé par rapport aux matériaux ductiles. En effet, comme le montre la (Figure I.21), par la comparaison de deux matériaux ayant des limites d’élasticité différentes et un module de Young quasi-identique, lorsqu’on effectue une décharge élastique au même niveau de déformation on obtient des niveaux de déformation résiduelle différents. C’est le fait que $Y_{HLE} > Y_{FLE}$ qui rend les matériaux à très hautes résistances.

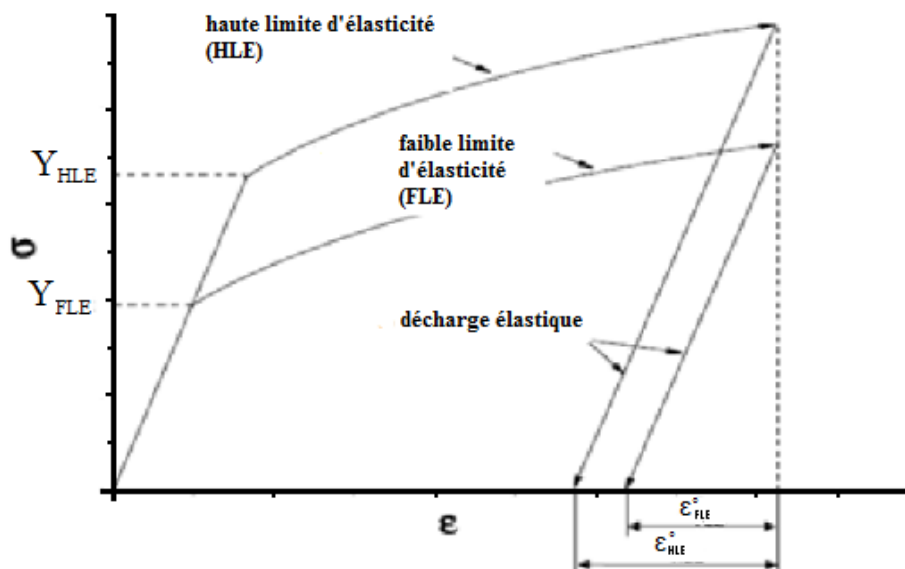


Figure I.21: Illustration par une courbe rhéologique de la sensibilité au retour élastique de deux matériaux ayant le même module de Young et des limites d’élasticité différentes.

D’après Carden et al. (2002).

Du fait que les tôles métalliques sont obtenues généralement par le procédé de laminage, elles exhibent souvent une texture qui leur procure une anisotropie initiale de plasticité. Ainsi, l'orientation de la direction de laminage de la tôle dans le dispositif de mise en forme peut avoir une influence directe sur le retour élastique. En effet, ceci induit des différences entre les contraintes d'écoulement atteintes lors de la mise en forme et influe directement sur le retour élastique comme indiqué précédemment.

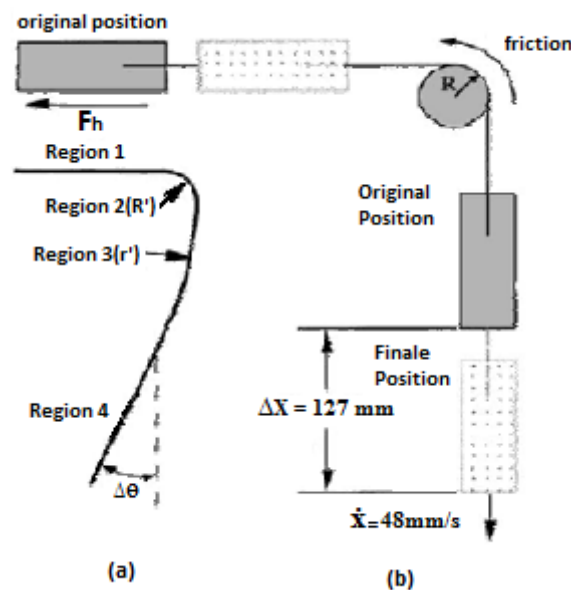


Figure I.22: Essai d'enroulement d'une tôle : (a) forme finale après l'essai (b) formes initiale et finale durant l'essai. Trois matériaux testés, trois conditions de frottement et différents rayons de l'outil. D'après Carden et al. (2002).

Sur un essai de pliage/dépliage par enroulement d'une tôle sur un outil circulaire, Carden et al. (2002) ont examiné l'effet du rapport entre le rayon de l'outil et l'épaisseur de la tôle $\frac{R}{e}$. Ils ont montré que le retour élastique décroît avec l'augmentation du rapport $\frac{R}{e}$.

Egalement, en variant les conditions de frottement (à sec, avec lubrifiant et avec rotation libre de l'outil) pour trois matériaux différents (un acier doux, un acier à haute résistance et un alliage d'aluminium), ils ont conclu que le frottement a un faible effet sur le niveau du retour élastique (dans le cas étudié).

I.3.2. Striction:

Le phénomène de striction en mise en forme des tôles métalliques pose un problème délicat pour l'industrie, du fait qu'il limite le domaine de formabilité de la tôle. La faisabilité de la pièce par grandes déformations plastiques dépend de l'aptitude de la tôle à se déformer d'une manière quasi-homogène. Cette striction est caractérisée par la diminution de l'épaisseur de la tôle. Deux types de striction peuvent être définis : diffuse et localisée. La striction diffuse est caractérisée par une large zone de concentration des déformations et la striction localisée est caractérisée par une concentration des déformations dans des zones étroites, principalement sous forme de bandes. Ces bandes sont le lieu de rupture par fissuration lors de la mise en forme du matériau.

D'une manière générale, la striction diffuse précède la striction localisée. Néanmoins, dans certains cas les déformations peuvent se localiser dans des bandes étroites sans qu'il y ait de striction diffuse perceptible dans la tôle, c'est le cas des tôles très minces par exemple (Col, 2003). La figure (I.23) montre la différence en termes de striction entre une tôle épaisse et une tôle mince lors d'un essai de traction uni axiale. Sur la tôle épaisse, nous remarquons une réduction de la largeur de l'éprouvette par rétreint avant rupture, signe de striction diffuse avant localisation. Par contre, sur la tôle mince la déformation est concentrée principalement dans une bande étroite où l'épaisseur diminue jusqu'à rupture ; la striction diffuse y est peu perceptible.

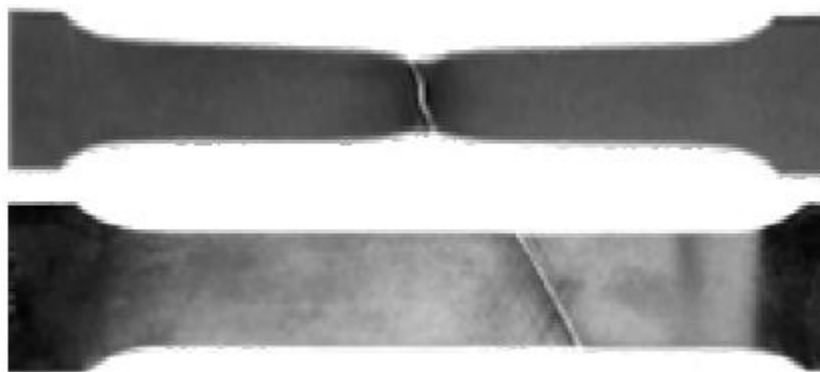


Figure I.23: Striction sur une tôle épaisse (en haut) et très mince (en bas). D'après [22]

Également, dans certains cas nous pouvons avoir une rupture sans qu'il y ait de striction localisée perceptible. C'est le cas de l'expansion d'une tôle par exemple, comme le montre la figure I.24. En effet, pour ce mode de chargement il n'y a pas de direction privilégiée pour la formation d'une bande de localisation. Souvent, la fissure suit une direction quelconque.



Figure I.24: Mise en évidence par l'essai Nakazima d'une rupture après striction localisée (à Gauche : en rétreint) et sans striction localisée (à droite : en expansion). [23]

Certaines formes géométriques de la pièce ont un effet sur l'endroit où la striction est susceptible d'apparaître. Les trous ou les entailles, par exemple, constituent des lieux favorables à la concentration de déformations, donc à la formation de bandes de localisation.

La (figure I.25) montre une localisation des déformations autour d'un trou de la tôle. Nous remarquons une apparition de plusieurs bandes de localisation au bord du trou, avec propagation d'une fissure macroscopique selon une direction radiale au trou.



Figure I.25: Essai d'expansion d'une tôle en acier doux ayant un trou au centre. Apparition de plusieurs bandes de localisation au bord du trou, avec propagation d'une fissure macroscopique selon la direction radiale (3ème Rapport CECA, VoestAlpine). [23]

I.3.3. Plissement :

Les tôles métalliques, vues leurs caractéristiques dimensionnelles (rapport très faible entre l'épaisseur et les dimensions de la tôle dans son plan), sont très sensibles au flambement. Ceci se traduit au cours de la déformation de la tôle par la formation de plis. Ce phénomène est dû aux contraintes de compression qui se développent au cours de la mise en forme et qui agissent dans le plan de la tôle comme des efforts de flambement.

Comme le montre la figure I.26, lors de l'opération d'emboutissage d'un godet, ce phénomène peut se manifester au voisinage du bord de la tôle. Il est d'autant plus prononcé que l'effort de serrage est faible. De plus, ces contraintes de compression sont d'autant plus grandes que le diamètre initial du flan est grand par rapport au diamètre du poinçon.

L'augmentation de l'effort de serrage génère des efforts normaux au plan de la tôle qui tendent à éliminer ce phénomène (photo de gauche). Néanmoins, cette solution n'est pas sans risque, car elle empêche l'écoulement de la matière et peut conduire à une rupture prématurée de l'embouti. Une solution complémentaire consiste à diminuer le frottement entre les outils et la tôle, tout en augmentant cet effort de serrage.



Figure I.26: Rupture sans formation de plis (à gauche : effort de serrage élevé) et avec formation de plis (à droite : effort de serrage faible). D'après Lang et al. (2004).

Comme décrit précédemment, divers défauts peuvent apparaître sur les pièces obtenues par mise en forme. Certains phénomènes apparaissent au cours de l'opération de mise en forme (striction localisée, rupture et plissement). D'autres apparaissent juste à la fin (retour élastique).

On peut citer également d'autres phénomènes. Par exemple, les ondulations au bord (« cornes » d'emboutissage), qui sont dues à la texture initiale de la tôle. Également, la rupture différée, caractérisée par la formation de fissures sur la pièce finale après un certain temps, allant de quelques heures à plusieurs jours, et qui apparaît sur certaines nuances d'aciers à très haute résistance.

Chapitre II

Retour Elastique

- II.1 Le retour élastique
- II.2 Les paramètres du processus
- II.3 Les paramètres de matériau

Résumé :

Dans ce chapitre, nous allons dans un premier temps présenter le retour élastique. Ensuite, nous allons voir les paramètres qui influencent sur le retour élastique. D'ont les paramètres du processus et les paramètres de matériau.

II Retour Elastique :

II.1 Introduction :

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 [24]. Une large utilisation des alliages d'aluminium et d'acier dans l'industrie automobile et dans l'aviation pose chaque jour le problème du retour élastique. La prévision précise du retour élastique de l'embouti est de plus en plus importante pour la conception des outils et la compensation en raison du rapport plus élevé de la limite élastique au module élastique [25].

Plusieurs recherches faites ces 15 dernières années ont montré que la quantification du retour élastique a un rôle très important dans l'industrie de la mise en forme des tôles. Ces études ont été faites dont l'objectif de trouver des techniques et des méthodes pour minimiser ou éviter totalement cette variation physique permanente. On a observé que, le point commun des toutes ces recherches est basé sur l'estimation, le commandement et la réduction de ce paramètre [26]. La détermination à l'avance de la quantité du retour élastique permet en conséquence la conception et la fabrication postérieure des outils.

Actuellement, il y a eu beaucoup d'effort pour évaluer ou diminuer le retour élastique,

[27] a toujours utilisé un modèle de forme U pour étudier le comportement du retour élastique dans les deux plans, à l'aide d'un outil de forme elliptique pour évaluer les deux valeurs du retour élastique primaire (x-y) et secondaire (x-z) où il a découvert que la quantité du retour élastique secondaire soit petite en comparaison avec le retour élastique primaire.

[28] [29] ont dit que la plupart des études existantes sur le retour élastique traitent seulement les pièces formées par le pliage. Ils ont suggéré la nécessité de faire d'autres recherches sur la prévision de la quantité du retour élastique et de la courbure de la paroi latérale. [30] a démontré que l'augmentation de la valeur du retour élastique est également liée à la diminution du rayon de courbure de la paroi latérale.

[31] ont fait des essais de pliage-étirage où la distribution d'effort résiduel à relever par une opération précédente affectera la distribution de contraintes de la partie dans l'opération suivante, et par conséquent le retour élastique à la valeur de la dernière opération.

[32] a démontré, à travers ses essais, que le rayon de courbure et la taille de grains sont deux facteurs qui influent considérablement sur le retour élastique dans le processus de pliage. [33] [34] ont étudié l'effet de l'anisotropie sur le retour élastique pour toutes les directions de laminage et ils ont trouvé que la direction de laminage (la texture) a aussi une grande influence. L'effet de l'écroutissage cinématique ne peut être négligé et c'est ce qui a été fait par [25]. D'autres essais, faits par [35] ont montré qu'un échauffement, durant la dernière étape de formage et avant l'élimination de la force, a permis de réduire énormément le retour élastique.

En ce qui concerne l'évaluation du retour élastique, plusieurs techniques ont été utilisées. Le retour élastique a été étudié par [5] en mesurant la variation de la distance transversale de l'ouverture. [34] l'a mesuré suivant la direction d'enfoncement du poinçon. D'autres auteurs [36] [28] ont évalué le retour élastique à travers la déviation $\Delta\theta$ mesurée sur les extrémités. Concernant notre étude, le retour élastique est donné par différence entre la profondeur à la fin de l'étirage h_c et celle mesurée après décharge h_d .

II.2. le retour élastique :

II.2.1. Définition :

Lorsque le connecteur électronique est formé, la base métallique doit être transformée à partir de l'éprouvette plate dans une partie compliquée à trois dimensions, ce qui exige une déformation permanente de la base métallique, néanmoins la majorité des matériaux de connecteur sont choisis suivant leur résistance à la déformation permanente. Naturellement,

cette caractéristique est difficilement produite. Ce conflit entre la production et la performance exigée peut être bien vu dans le retour élastique.

Durant la formation du composant, le poinçon charge le métal sous différents rayons de courbures données, une fois l'outil est déchargé; le métal subit un retour élastique augmentant le rayon et élargissant l'angle. Le rapport du retour élastique est défini comme l'angle final après le retour élastique sur l'angle initial de chargement.

Dans le but de comprendre le retour élastique, il est nécessaire de voir la courbe contrainte - déformation du matériau. Lorsque le matériau est déformé, il est sous contrainte.

Quand la charge est enlevée; la contrainte revient à zéro parallèlement au module élastique.

En plus de quelques exceptions, la déformation permanente est généralement due au rayon de courbure conçu. Le retour élastique doit être égal à la déformation élastique quand le poinçon est enlevé. Le retour élastique est le changement des dimensions de l'embouti après la suppression de la charge sur l'outil. Quand la charge est enlevée la déformation totale est réduite. Ce changement est dû au retour élastique. Donc ce dernier est une caractéristique intrinsèque du matériau qu'il faut toujours quantifier pour prendre en considération lors de la conception d'outils d'emboutissage et aussi lors de fabrication des pièces par emboutissage [37] [38] Habituellement, les corrections pour compenser le retour élastique sont en faites en modifiant la forme des outils. Il est très important de prévoir le retour élastique et de le corriger à l'étape de la conception d'outillage, puisque la correction de la géométrie sur les outils finis est très chère et prend du temps.

Il est difficile pour les ingénieurs concepteurs de prédire le retour élastique, car il y a plusieurs paramètres qu'ils l'influencent tels que :

- propriétés du matériau
- géométrie d'outil
- épaisseur de la tôle
- la profondeur de pénétration du poinçon

Pour comprendre le retour élastique, il est nécessaire de regarder à la courbe charge - déplacement d'un matériau (Figure II 1).

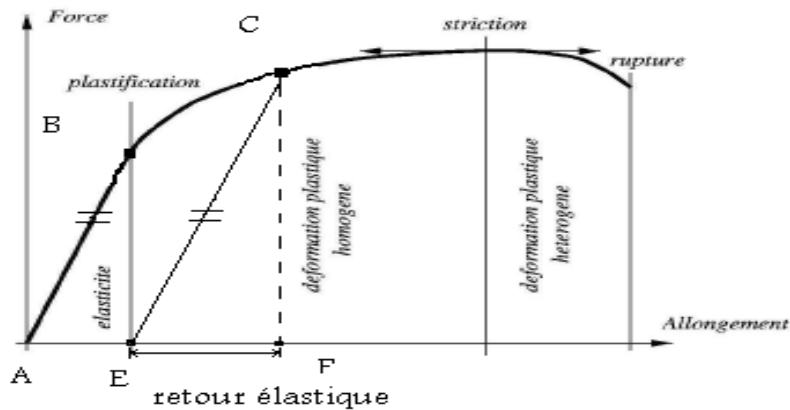


Figure. II.1. Le retour élastique lors d'étirage [39].

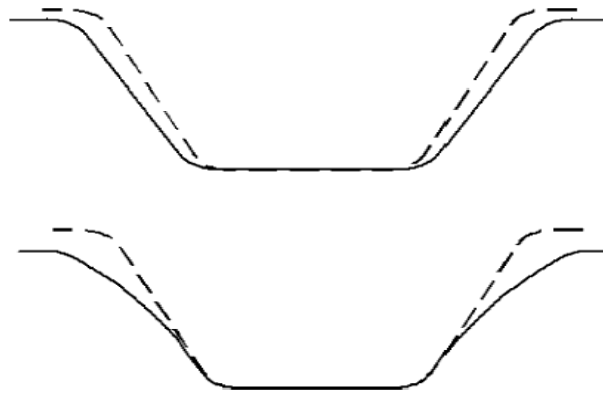


Figure. II.2. Deux types principaux de retour élastique [26].

On observe généralement que l'ouverture de la paroi se produit dans le cas du pliage localisé, tandis que la paroi se courbe habituellement dans les opérations pliage-étirage.

II.2.2 Calcul du retour élastique :

La compréhension et la prédiction du retour élastique des pièces mise en forme par emboutissage est un sujet d'étude très actuel, comme en témoignent les nombreux travaux publiés à (Nurnisheet 2002). Le retour élastique a été mesuré en considérant les formes en coupe des pièces formées obtenues avant et après l'enlèvement des outils. La mesure des formes avant l'enlèvement des outils n'était pas possible, le retour élastique et la courbure de parois latérale ont été caractérisés par trois paramètres définis dans la figure (Figure. II.3) proposé par Benchmark : l'angle entre le fond et le mur est θ_1 , l'angle entre le mur et la bride est θ_2 , tandis que le rayon de courbure de la paroi latérale est ρ . Pour l'augmentation de θ_1 et

θ_2 , et diminution de ρ , on a une augmentation du retour élastique. Le comité de Benchmark a pu voir les grandes déformations se produisent à la région périphérique du mur latéral. Ceci est considéré influencé par emboutissage le long de la direction transversale près du coin de la matrice [37], [35]

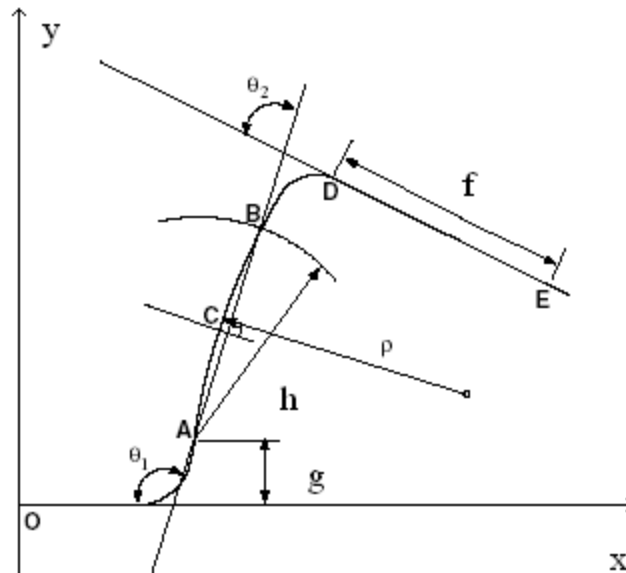


Figure .II.3. : Paramètres du le retour élastique et la courbure de paroi (aux coins de Poinçon et de matrice) et la courbure de paroi latérale [37] [28].

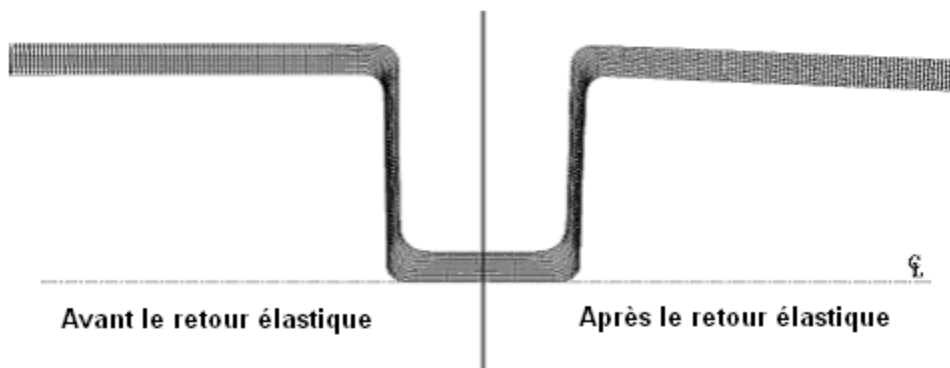


Figure. II.4 : Comparaison des tôles déformées avant et après du retour élastique [40].

Pendant l'opération de pliage, sous l'action du poinçon, la tôle est pliée à un angle (α_i).

Lorsque le poinçon se relève, l'angle soulève légèrement jusqu'à un angle (α_f), ce phénomène dû aux relâchements des contraintes élastiques est appelé retour élastique.

Pour obtenir un pliage précis il faut tenir compte du retour élastique au moment de la conception de l'outillage [41].

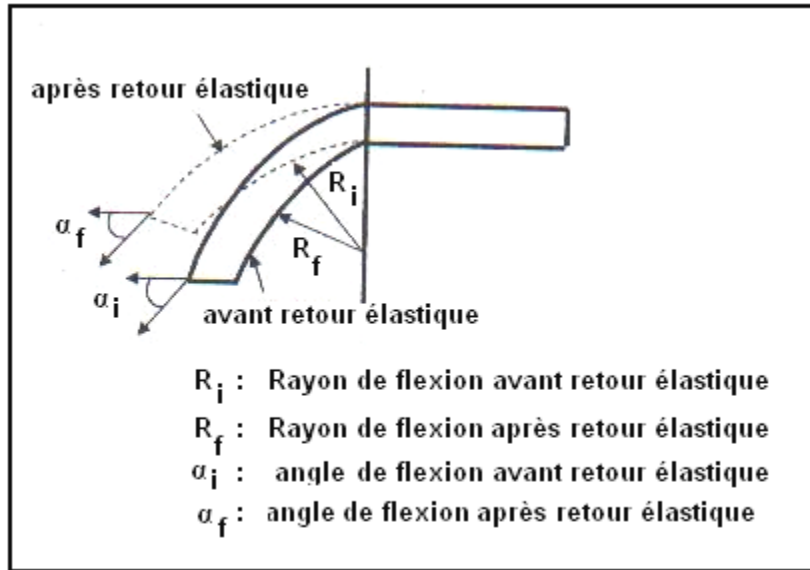


Figure. II.5 : Retour élastique formé près pliage

L'angle final (α_f) après le retour élastique est plus petit que l'angle initial (α_i) avant le retour élastique, le rayon de flexion final (R_f) après le retour élastique est plus grand que celui d'avant le retour élastique (R_i). Cette diminution sera d'autant plus importante que la limite élastique du matériau soit élevée. Le retour élastique d'une pièce après pliage est particulièrement sensible pour le grand rayon de pliage. La correction du rayon de pliage pour un rapport rayon/épaisseur tôle >10 est donnée par la formule suivante :

$$\frac{R_0}{e} = \frac{\frac{R_D}{e}}{1+3\left(\frac{R_D \cdot R_e}{E \cdot e}\right)} \quad (1)$$

Avec :

- E : module élastique de la tôle.
- e : épaisseur de la tôle.
- R_e : Limite d'élasticité de la tôle.
- R_D : Rayon de la pièce (forme finale).
- R_0 : Rayon de l'outil.

Pour des rapports rayon/ épaisseur ≤ 10 , la formulation du retour élastique est donnée par :

$$\frac{R_m}{R'_m} = 1 - \frac{3K(1-\nu^2)}{E(2+n)(3/4)^{(1+n)/2}} \left(\frac{2R_m}{e}\right)^{(1-n)} \quad (2)$$

Avec :

- R_m : Rayon moyen avant le retour élastique.
- R'_m : Rayon moyen après le retour élastique.
- n : coefficient d'écrouissage du métal.
- K : Coefficient d'amplitude du métal, (loi d'écrouissage $\delta = K \times e^n$).
- ν : module de poisson ($\nu = 0.3$ pour l'acier).

Le retour élastique apparaît systématiquement si la zone écrouie est relativement localisée (Exemple: rayon du pliage), c'est en fait la maîtrise du retour élastique qui conditionne la qualité de l'outillage et la précision des pièces. Il est méfiant de diminuer l'angle de la matrice, cette diminution sera d'autant plus importante que la limite élastique du matériau soit élevée.

II.2.3. Les paramètres influençant le retour élastique :

D'abord, le phénomène de retour élastique est influencé par une combinaison de divers paramètres de processus, tels que la forme et la dimension d'outil, coefficient de frottement, force de serrage, vitesse de mise en forme, température. Il dépend aussi des propriétés matérielles, tels que: épaisseur de la tôle, taille de grain, anisotropie et ainsi de suite [42] [43]. Dans la pratique la compréhension des caractéristiques paramétriques de la quantité de retour élastique est essentielle pour la conception systématique d'outil [44], [45] et [31].

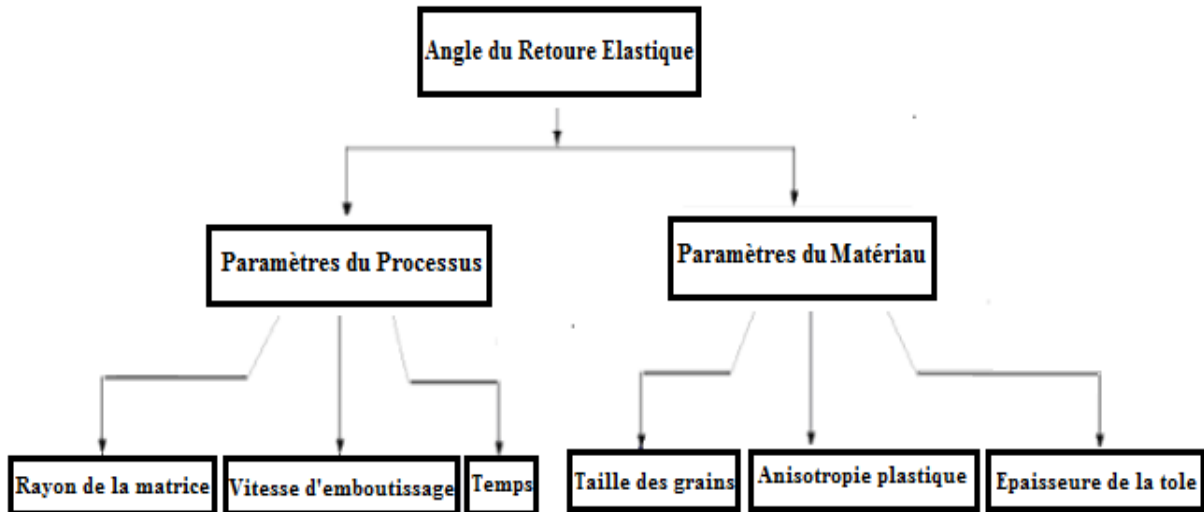


Figure. II.6. Schéma illustrant les paramètres influençant le retour élastique.

II.2.3.1. Les paramètres du processus

II.2.3.1.1. Le dégagement

Dans la conception des outils de la mise en forme des tôles il faut tenir compte l'espace entre le poinçon et la matrice, d'après les recherches précédentes nous avons trouvé que le retour élastique augmente linéairement avec le dégagement croissant de matrice et poinçon [26] [28]. (Figure. II.7).

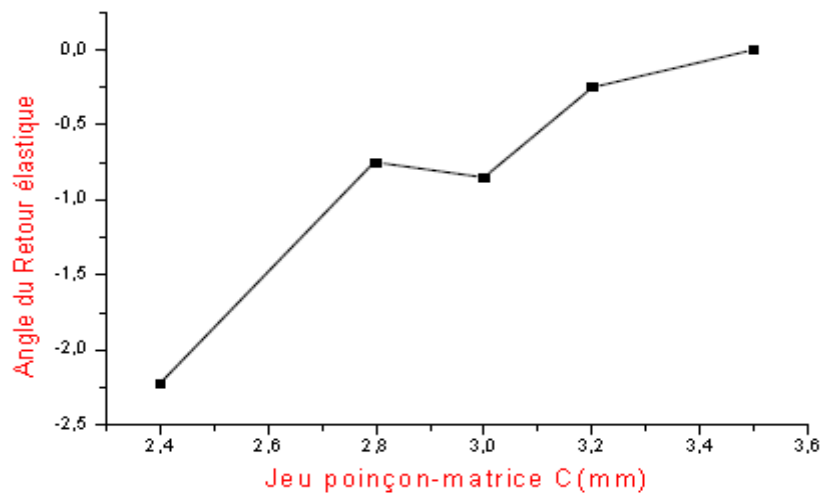


Figure. II.7. L'effet de l'espace entre poinçon-matrice sur le retour élastique [42].

On peut voir que ce facteur a une influence significative sur le retour élastique, c.-à-d., l'augmentation d'angles de retour élastique avec augmentation de l'espace de

poinçon-matrice parce que la déformation plastique développée dans le flan devient moins significative [46]. Pour le cas de pliage, figure. (II.7, II.8) présentent l'effet de cette espace sur l'angle du retour élastique pour le cas de l'acier TRIP laminé à froid [47].

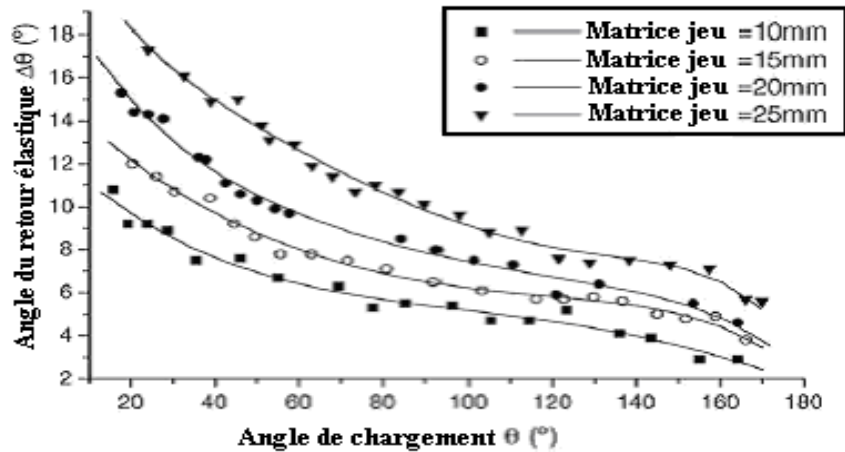


Figure. II.8. Influence d'espace de poinçon-matrice sur l'angle de retour élastique [47].

II.2.3.1.2. Le coefficient de frottement :

La rugosité de la tôle et de son interaction avec les lubrifiants et les surfaces d'outillage affectera l'exécution dans une opération de formage et le retour élastique en même temps, mais ne sera pas mesurée dans l'essai de traction mais il y a des essais spéciaux existents pour exploration des propriétés extérieures [48]. dans figure. II.9 on peut voir l'effet de ce paramètre sur le retour élastique.

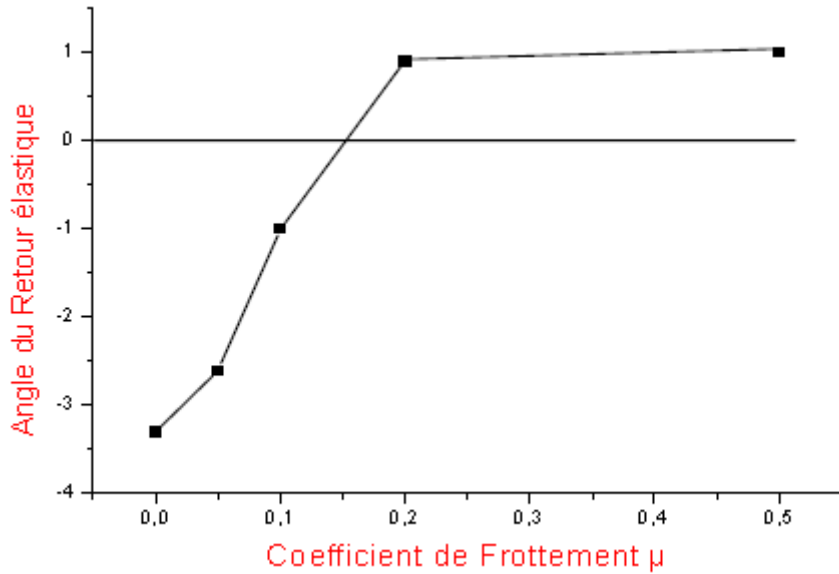


Figure. II.9. L'effet de coefficient du frottement sur le retour élastique [42].

Le retour élastique est presque saturé où μ prend de grandes valeurs ceci implique que la tendance du retour élastique peut être supprimée après l'emploi d'un lubrifiant approprié [42]. Comparant les résultats à ceux obtenus pour la condition sèche, on l'a observé que la charge a chuté de manière significative en utilisant le lubrifiant, dû à la force de retenue. En outre, les courbes sont plus lisses et la surface des éprouvettes est plus lumineuse, qui indique que le lubrifiant réduit le frottement entre la surface du spécimen et les surfaces des outils. Ceci a été confirmé pour toutes les éprouvettes examinées.

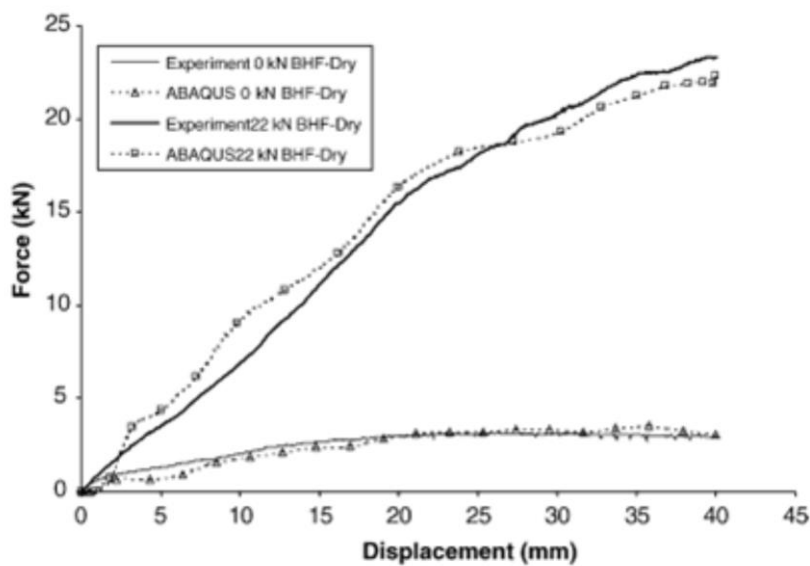


Figure. II.10. La force en fonction de déplacements des pièces épaisses secs [47].

En réalité l'augmentation de la force de frottement de la pièce de corne pendant l'opération de la mise en forme, comme il a été mentionné auparavant, augmente les contraintes et automatiquement elle provoque l'augmentation du retour élastique [27].

Une des raisons pour laquelle la force prévue de poinçon est plus petite que la force réelle pendant le processus de la mise en forme est peut-être l'influence du frottement comme montré dans figure. II.10 donc pendant l'opération de la simulation il faut prendre en considération le frottement et évaluer la valeur du coefficient de frottement [47] [44].

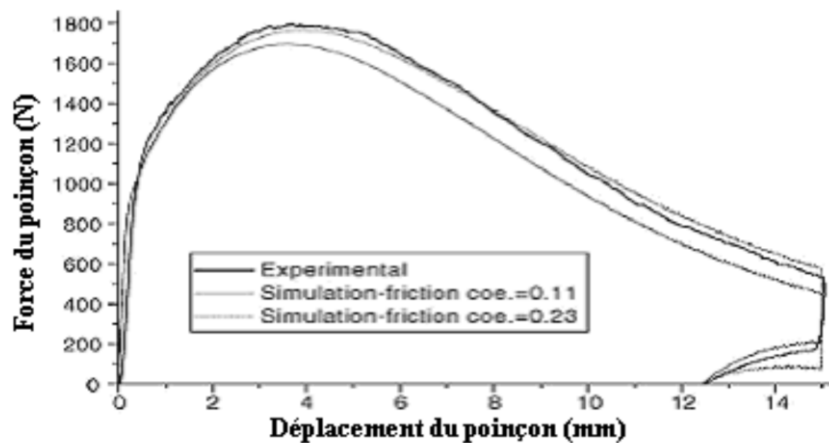


Figure. II.11. Influence du coefficient de frottement sur la force du poinçon [47].

II.2.3.1.3. La température :

Une petite variation de la température nous permet de garder les propriétés de matériau indépendant d'elle [42]. Le comportement des tôles métalliques dans la mise en forme (SMF) est souvent affecté par la température, La résistance des métaux diminue quand ils sont chauffés, la diminution de la limite élastique (retour élastique) est substantielle même pour petites augmentations de la température produites lors mise en forme d'aluminium et de métal [31].

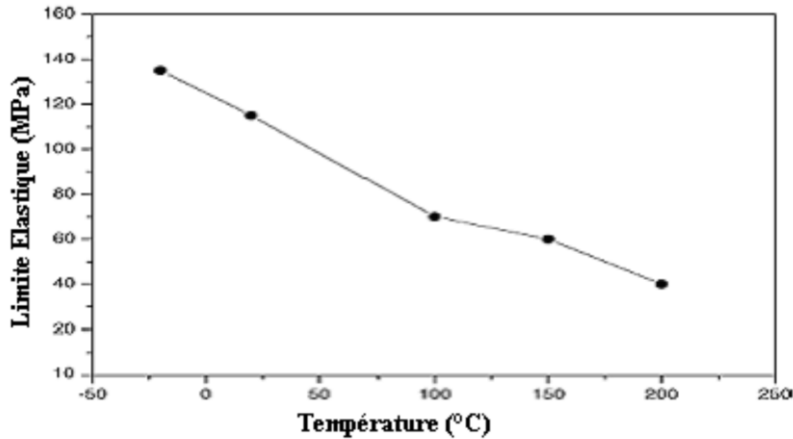
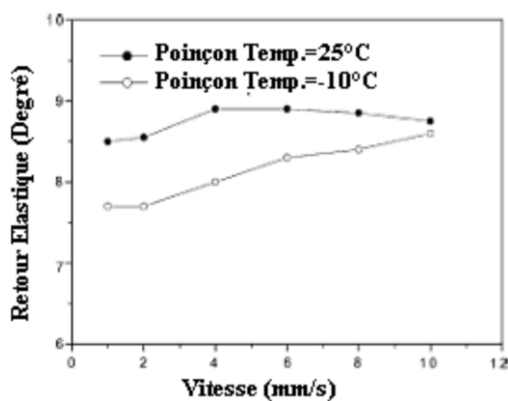


Figure. II.12. Variation de la limite élastique en fonction de température (Al) [31].

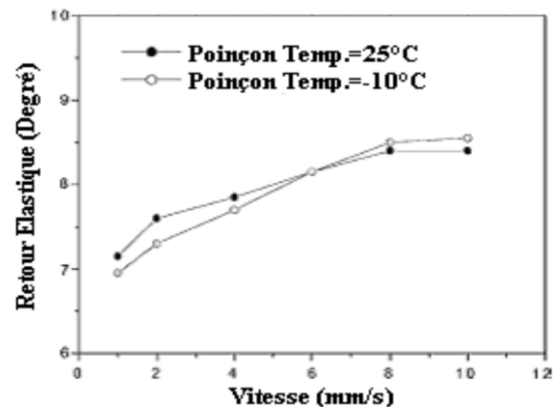
Les expériences ont été effectuées à diverses combinaisons de températures d'outil progressivement jusqu'à l'obtention de processus optimum qui peut réduire au minimum la quantité de retour élastique. Par conséquent, la température plus élevée de matrice avec la vitesse inférieure du poinçon est un état favorable pour la réduction du retour élastique.

La combinaison de la matrice chaude avec le poinçon froid change la distribution de contraintes dans la direction d'épaisseur, et le réduit le retour élastique après déchargement.

La différence de température entre les deux côtés de la tôle est responsable de la diminution du retour élastique. La matrice chaude est très efficace pour la réduction de la quantité de retour élastique et la combinaison d'une matrice chaude et du poinçon froid peut réduire la quantité de retour élastique jusqu'à 20% une fois comparée à l'essai de pliage conventionnel à une température ambiante. Le changement de la distribution de contraintes par la commande de température d'outil décide l'importance et la direction du retour élastique de la partie après déchargement [31].



(a) Température de la matrice: 25°C



(b) Température de la matrice: 100°C

Figure .II.13 : Effet de la température sur le retour élastique pour deux valeurs de températures de la matrice : $T=25^{\circ}\text{C}$, et $T=100^{\circ}\text{C}$ [31].

II.2.3.1.4. Le rayon de courbure :

Les recherches ont prouvé que le rayon de courbure a un effet significatif sur le retour élastique par rapport aux autres paramètres. Figure .II.14 Montre le profil de section de spécimen à un rayon de pliage de 3mm après la mise en forme. Pour des petits rayons de courbure, la tôle est déformée plus localement et sévèrement, ayant pour résultat de durcissement plastique et la rigidité de la zone coudée, et par conséquent fluage serait réduite [32]. Les investigations montrent que l'effort au niveau de coin de poinçon est le facteur le plus significatif qui régit la quantité de retour élastique. Par conséquent, le retour élastique est plus grand pour un rayon plus grand de matrice que c'est dû aux contraintes de pliage localisé au coin de tôle [49].

Quand la tôle est pliée avec un petit rayon, le métal au dessous du poinçon est soumis à une contrainte qui dépasse la limite élastique pour l'épaisseur entière de la tôle. Cet agrandissement de la zone plastique produit une réduction de l'angle de retour élastique [32].

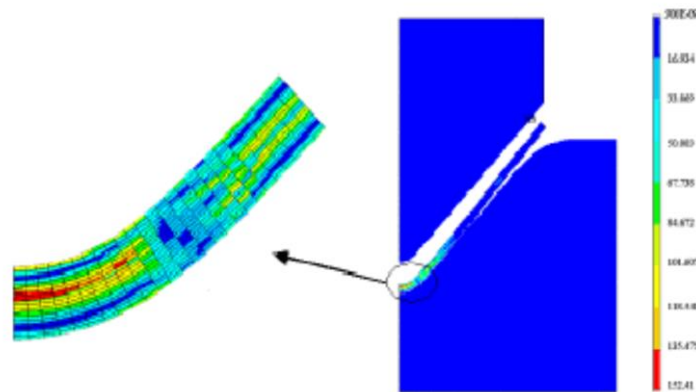


Figure. II.14. La répartition des contraintes au Figure.III.13 Effet du rayon de courbure niveau du rayon de courbure cas de pliage (pliage V) [32]. En V épaisseur de la tôle est (3mm) [32].

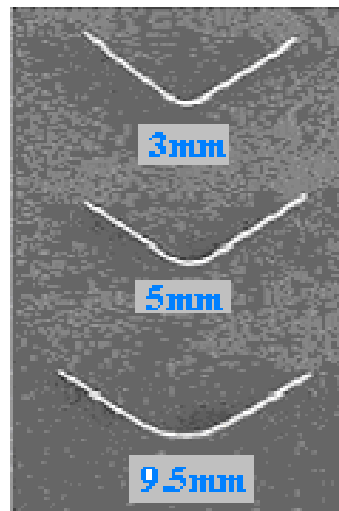


Figure. II.15 Effet du rayon de courbure (pliage V) [32].

II.2.3.2. Les paramètre de matériau

II.2.3.2.1. L'épaisseur :

Les investigations précédentes ont prouvé que l'utilisation du matériau plus épais réduira le retour élastique [35]. Pour un rayon donné de la fibre externe chargée, l'augmentation de l'épaisseur de feuille donne une augmentation du moment de flexion et l'effort de flexion à la fibre externe, de ce fait elle réduit le retour élastique [32].

Un matériau particulier, quand l'épaisseur de la tôle augmente, toute la contrainte plastique équivalente augmente pour des conditions identiques [54]. On peut voir que ce facteur a une influence significative sur le retour élastique, c.-à-d., l'augmentation de la valeur de retour élastique avec la diminution de l'épaisseur de la tôle contrairement que le recourbement de paroi [47] [28].

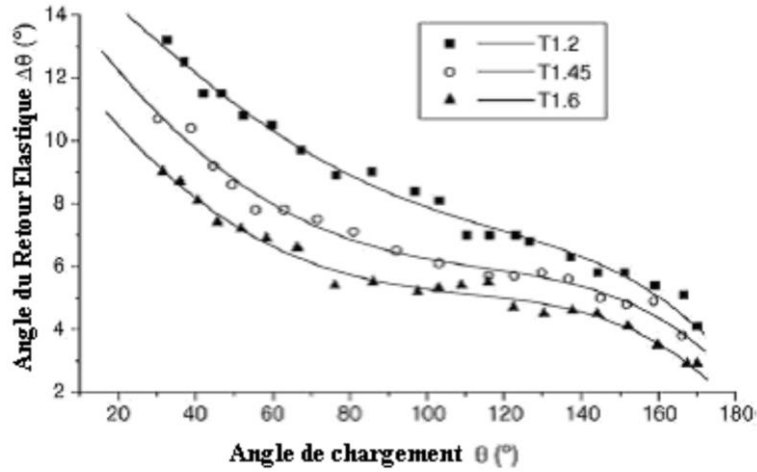


Figure. II.16. Influence de l'épaisseur de tôle (acier TRIP) sur l'angle de retour élastique [47].

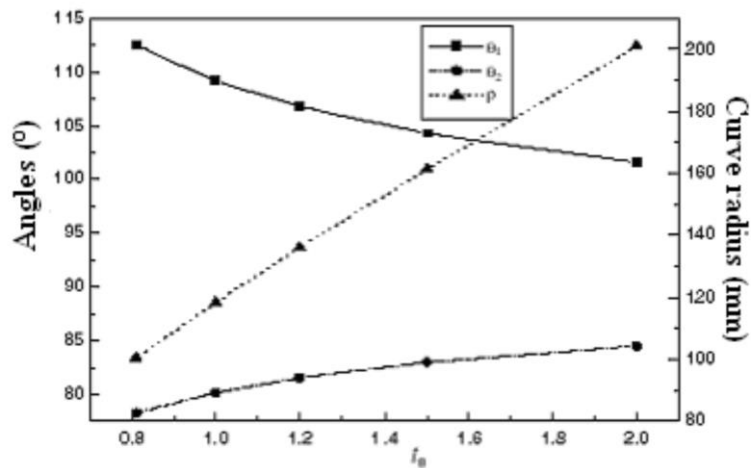


Figure II.17 Effet de l'épaisseur sur le retour élastique [47].

II.2.3.2.2. La limite élastique :

La quantité de retour élastique a une relation directe avec la limite élastique où nous avons trouvé que le retour élastique est grand pour une haute limite élastique du matériau [35]. figure. II.18 explique bien cette idée.

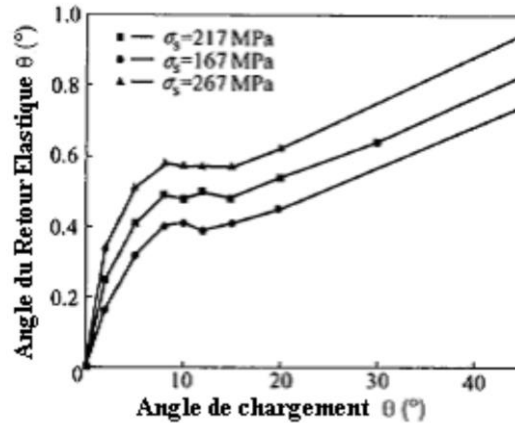


Figure. II.18. L'effet de la limite élastique sur le retour élastique [44].

II.2.3.2.3. Le module de Young :

Le module d'élasticité affecte également le formage des pièces et une haute valeur de ce module donnera un composant plus raide, qui est habituellement un avantage. En termes de formage, le module affectera le retour élastique. Un module faible donne une plus grande valeur de retour élastique et habituellement il y a une difficulté pour contrôler les dimensions finales. Dans plusieurs cas, le retour élastique augmentera avec le rapport de la contrainte d'écoulement au module de Young et pour une grande valeur de $e R$ il y a également un plus grand retour élastique [48].

La littérature prouve que la valeur du module de Young d'acier TRIP faiblement allié change après une certaine déformation plastique, pour l'acier TRIP, on signale que le module de Young diminue de 12% quand l'épaisseur est réduite de 1.44 à 1.10 mm par laminage [47].

La quantité du retour élastique était plus petite pour une valeur plus élevée du module élastique [51]. Cependant, le module élastique n'est pas une variable contrôlable de conception après le choix du matériau [35]. Les calculs tiennent compte du changement du module de Young avec la contrainte plastique en raison de l'importance de ce paramètre pour le calcul de retour élastique, le module de Young noté par E est évalué pour chaque couche avec une déformation plastique équivalente déduit d'une loi de travail de durcissement cinématique, la variation de module de Young est montré sur figure. II.19 et figure. II.20 [24] [54].

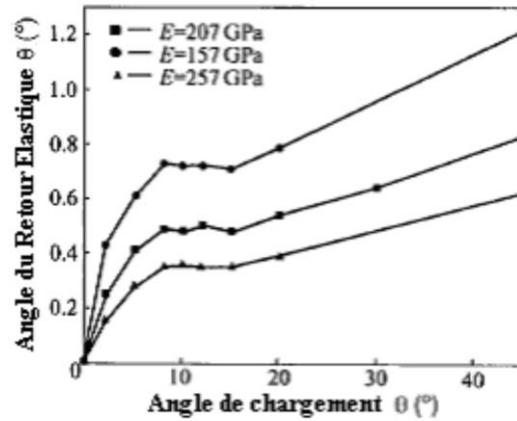


Figure. II.19. L'influence du module de Young sur le retour élastique [44].

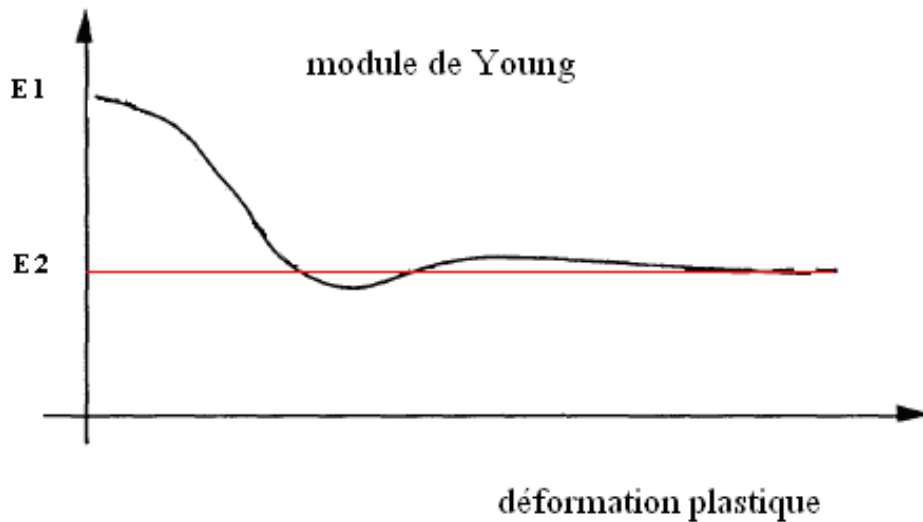


Figure. II.20. Variation du module de Young en fonction de déformation [24].

De par leur processus de fabrication (laminage à chaud et à froid, recuit de recristallisation, croissance de des grains) les tôles minces présentent une anisotropie cristallographique ou texture .cette anisotropie cristallographique a comme conséquence une anisotropie de certaines propriétés physiques, et en particulier mécaniques. Figure. II.21 montre la variation du module de Young d'une tôle mince d'acier extra – doux effervescent en fonction de la position de la direction d'observation par rapport à la direction de laminage de la tôle [50].

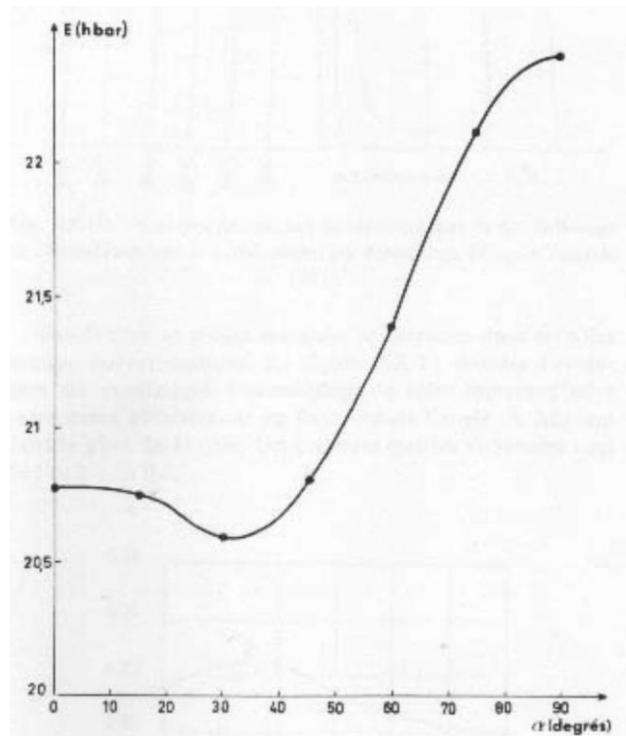


Figure. II.21. Variation du module d'élasticité d'une tôle mince d'acier extra – doux effervescent en fonction de l'angle α entre la direction d'observation et la direction de laminage [50].

III.2.3.2.4. Anisotropie :

Le matériel en lequel les mêmes propriétés sont mesurées dans n'importe quelle direction est *isotrope*, mais la plupart des tôles montrent une différence dans ces propriétés, on appelle cette variation l'*anisotropie*, l'état d'anisotropie est habituellement indiqué par la valeur de R [48].

$$\varepsilon_w = \ln\left(\frac{w}{w_0}\right) \quad (4)$$

A déformation d'épaisseur

$$\varepsilon_t = \ln\left(\frac{t}{t_0}\right) \quad (5)$$

Où la valeur de R est:

$$R = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_t} \quad (6)$$

Souvent les mesures sont prises à une valeur particulière et la direction dans laquelle R est mesuré et indiqué par un suffixe, par exemple R_0 , R_{45} et R_{90} suivent la direction de laminage [52] [53]. Généralement la valeur de R est représentée par une valeur moyenne \bar{R} [33]:

$$\bar{R} = \frac{R_0 + 2R_{45} + R_{90}}{4} \quad (7)$$

On a expérimentalement constaté que les feuilles éprouver moins de résistance à amincir quand l'axe du recourbement est aligné avec la direction de roulement du spécimen, on a signalé que plus la valeur de R est haute, plus le retour élastique est grand, on a observé aussi que l'expérience d'éprouvette 45° a plus grands efforts que les éprouvettes 90° et 0° comme elle est montré sur figure. II.22 et une légère différence dans les angles de retour élastique dans les trois directions, qui est une indication de l'anisotropie de feuille Figure. II.23 [33].

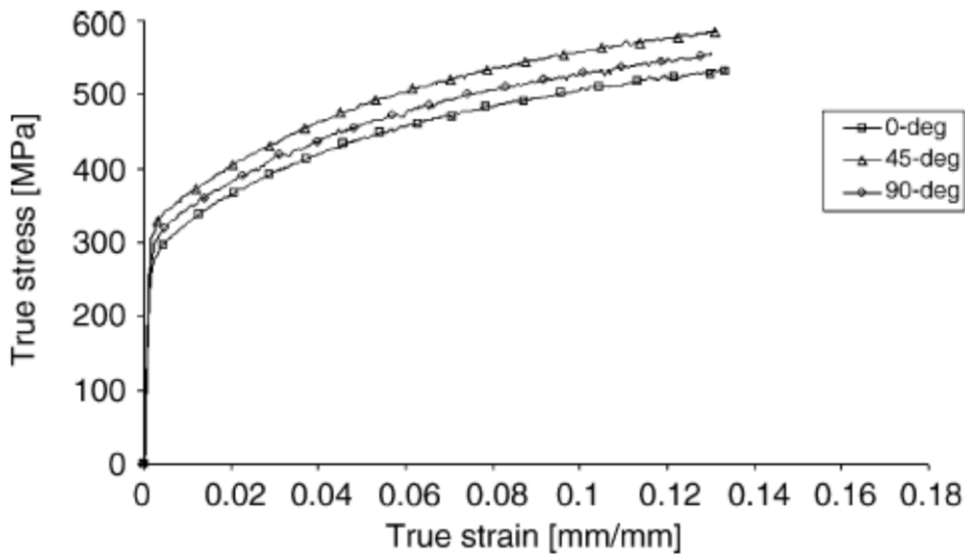


Figure. II.22. L'effet de la direction de laminage sur la courbe de traction [33].

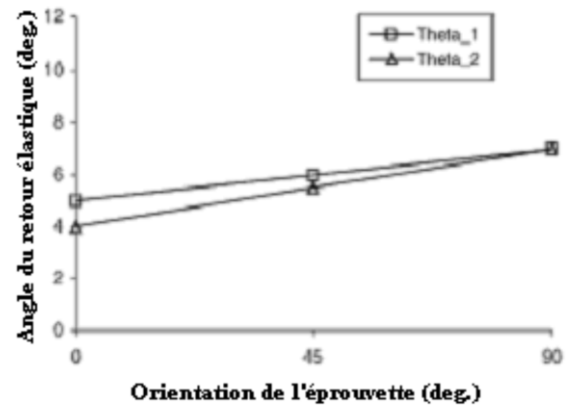


Figure.III.23. L'effet de la direction de laminage sur le retour élastique [33].

Chapitre I

Simulation Numérique

III.1	INTRODUCTION
III.2	CONDUITE DE LA SIMULATION
III.3	ÉTAPES DE LA SIMULATION SUR <i>ABAQUS</i>
III.4	HYPOTHÈSES GÉNÉRALE DE LA MODÉLISATION
III.5	ÉTUDE NUMÉRIQUE
III.6	RESULTATS ET DISCUSSION

Résumé :

Dans ce chapitre en vas présenter logiciel de simulation *ABAQUS* et en vas faire une étude numérique pour calculer les contraintes externe et interne distribuer sur le long de la tôle et on vas discutez les résultats donnez par *ABAQUS*.

III Simulation numérique :

III. 1. INTRODUCTION :

Jusqu'à nos jours, on se base sur l'expérimentation pour caractériser le comportement des matériaux à tel ou tel phénomène (traction, fatigue, compression, résilience, dureté, ...) Ces techniques expérimentales fournissent des indications parfois insuffisantes aux ingénieurs qui calculent les structures et s'assurent de leur mise en service après que les grandeurs théoriques (calculées) sont comparées à celles expérimentales (mesurées). Cependant la réponse aux essais expérimentaux souvent globale fournit peu de détails à une échelle locale. En plus elle nécessite du matériel (machines d'essai et consommable) et de la matière première et sa mise en œuvre (éprouvette), à cela s'ajoute le temps de préparation et de mise en service des équipements. Ces facteurs influencent le prix de revient des opérations d'essais. De nos jours une alternative plus économique est apportée par les modélisations analytiques et numériques [55].

La simulation numérique est l'un des outils permettant de simuler des phénomènes réels. Appelée aussi simulation informatique, elle désigne un procédé selon lequel on exécute un programme informatique sur un ordinateur en vue de simuler par exemple un phénomène physique complexe (ex: chute d'un corps sur un support mou, résistance d'une plateforme pétrolière à la houle, fatigue d'un matériau sous sollicitation vibratoire, usure d'un roulement à billes, ...).

Les simulations numériques scientifiques reposent sur la mise en œuvre de modèles théoriques utilisant souvent la technique dite des éléments finis. Elles sont donc une adaptation aux moyens numériques de la modélisation mathématique, et servent à étudier le fonctionnement et les propriétés d'un système modélisé ainsi qu'à en prédire son évolution. On parle également de calcul numérique. Les interfaces graphiques permettent la visualisation des résultats des calculs par des images de synthèse.

Pour les projets actuels, la MEF est souvent utilisée pour prédire la déformation de la structure en service et fournir des données relatives à la phase de construction (déplacement et déformation en cours de construction). Le calcul par la MEF est souvent effectué afin de vérifier le comportement constaté du dispositif [56].

L'analyse de type éléments finis d'une structure peut notamment comporter les étapes suivantes :

- La définition des conditions aux limites.
- Le choix de la relation déformations-contraintes des matériaux utilisés.
- Les caractéristiques mécaniques des interfaces, la définition des chargements.
- La visualisation des résultats [56].

III. 2. CONDUITE DE LA SIMULATION :

III. 2.1. Présentation générale d'Abacus :

ABAQUS est un code de calcul utilisant la MEF créé en 1978. Selon la méthode de résolution, on distingue deux grands codes :

- ABAQUS/Standard : résolution par un algorithme statique implicite.
- ABAQUS/Explicit : résolution par un algorithme dynamique explicite.

La version que nous avons utilisée, ABAQUS 6.12-1, permet de traiter des problèmes couplés (hydromécanique, thermomécanique ...) dans les divers domaines (mécaniques, thermiques, électriques ...). Un très large choix d'éléments (plus de 100) en 2D ou 3D est proposé dans le code pour des analyses statiques, dynamiques, linéaires et non-linéaires [55].

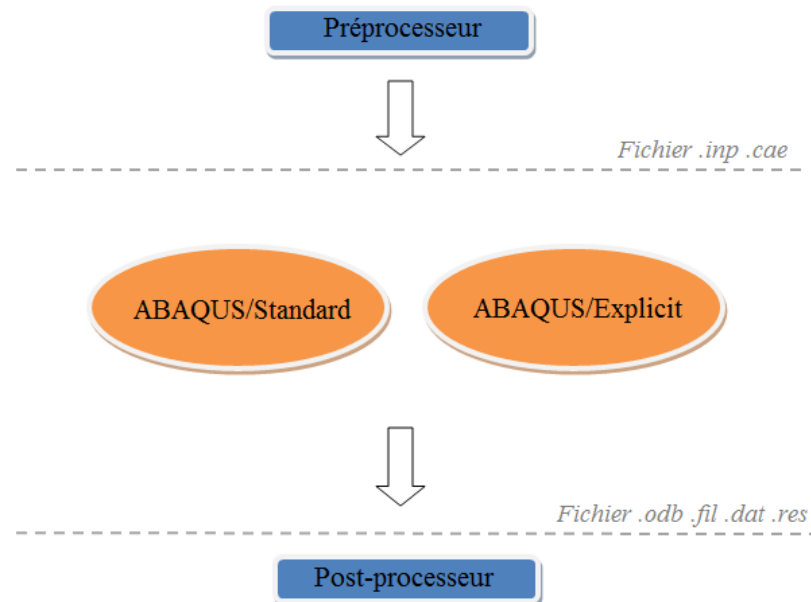


Figure III.1. Structure d'une analyse ABAQUS [57].

Le préprocesseur lit le fichier d'entrée qui définit la géométrie du modèle, sa discrétisation, les conditions aux limites, les chargements appliqués et les résultats demandés. Ensuite ABAQUS exécute le calcul, le post-processeur se charge de récupérer les résultats et permet aux utilisateurs de les visualiser puis de les exploiter. Plus de détails concernant l'utilisation d'ABAQUS seront donnés par la suite [57].

- Domaines physiques : Mécanique, Thermique, Électrique, Problèmes couplés.
- Problèmes : Statique et dynamique, Linéaires et non linéaires.
- Catégories d'éléments : Milieu continu (2D et 3D), Poutres, plaques, coques, Éléments spéciaux (ressorts, masses, ...)
- Géométries : Approximations linéaires et quadratiques, Triangles, quadrangles, hexaèdres, tétraèdres, pentaèdres.
- Un très large choix d'éléments (plus de 100).
- Beaucoup moins d'éléments disponibles sur ABAQUS/Explicit.

- Possibilités de programmer de nouveaux éléments (en FORTRAN, sur ABAQUS/Standard).

III. 3. ÉTAPES DE LA SIMULATION SUR ABAQUS :

ABAQUS CAE est divisé en unités fonctionnelles appelées modules. Chaque module contient les outils qui sont propres à une partie de la tâche de modélisation [58].

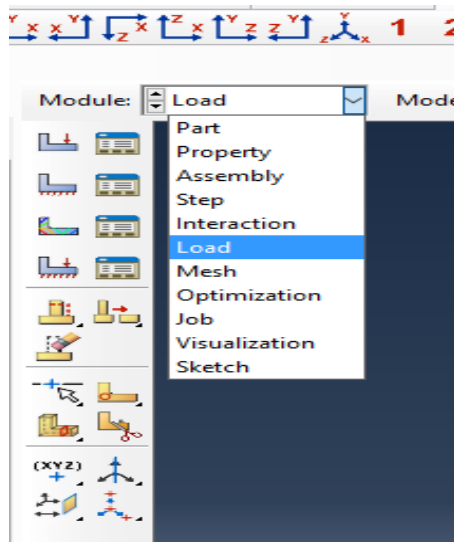


Figure III. 2. Modules d'Abaqus.

a) Le module « PART » : Le module Part permet de créer tous les objets géométriques nécessaires à notre problème, soit en les dessinant dans ABAQUS CAE, soit en les important d'un logiciel de dessin tiers [56].

b) Le module « PROPERTY » : Le module Property permet, comme son nom l'indique, de définir toutes les propriétés d'un objet géométrique ou d'une partie de ces objets.

c) Le module « ASSEMBLY » : Ce module permet d'assembler les différents objets géométriques créés dans un même repère de coordonnées global. Un modèle ABAQUS contient un seul assemblage.

d) Le module « STEP » : Ce module permet de définir toutes les étapes et les requêtes pour le post traitement, c'est à dire le moment (temps) à partir duquel une force est appliquée et jusqu'à quand, il est aussi possible de créer des forces ou des conditions limites qui s'activent à des moments donnés.

e) Le module « INTERACTION » : Grâce ce module, il est possible de spécifier toutes les interactions entre les différentes parties et régions du modèle, qu'elles soient mécaniques,

thermiques ou autres. Il faut savoir qu'ABAQUS ne prend en compte que les interactions explicitement définies, la proximité géométrique n'étant pas suffisante.

f) Le module « LOAD » : Le module Load permet de spécifier tous les chargements, conditions limites et champs. il faut savoir que les chargements et les conditions limites sont dépendants des steps, par exemple une force est appliquée au step 1 mais inactive au step 2.

g) Le module « MESH » : Ce module contient tous les outils nécessaires pour générer un maillage élément fini sur un assemblage.

h) Le module « JOB » : Une fois que toutes les tâches de définition du modèle ont été réalisées, il faut utiliser le module Job pour analyser ce modèle. ABAQUS va alors réaliser tous les calculs nécessaires et en tirer des résultats.

i) Le module « VISUALIZATION » : Ce module permet de visualiser le modèle et les résultats, les courbes de charges, les déformations...

j) Le module « SKETCH » : Ce module permet de créer des formes bidimensionnelles qui ne sont pas associés à un objet. Il peut être utilisé pour des extrusions par exemple [56].

III.4. HYPOTHÈSES GÉNÉRALE DE LA MODÉLISATION :

Dans le contexte de notre travail, l'échantillon de structure est essentiellement composé d'une tôle en acier.

La simulation associe : une représentation géométrique, un modèle mécanique, un modèle de comportement matériel et une représentation des actions extérieurs (conditions aux limites).

Dans ce travail on effectue une étude sur la distribution des contraintes sur la surface interne d'une tôle d'épaisseur $e = 1\text{mm}$ et de longueur $L = 130\text{mm}$ et de largeur $L = 40\text{mm}$ soumis à une pression

III.4.1. Représentation géométrique :



Figure III.3. Représentation géométrique de la tôle.

III.4.2. Caractéristique de matériau :

Dans ce travail on effectue une analyse mécanique d'une tôle en acier.

- Les caractéristiques mécaniques du matériau utilisé sont :

Module d'Young	Coefficient de poisson	Coefficient de dilatation	Conductivité
210GPa	0.3	11.7 E-6 k⁻¹	43Wm⁻¹k⁻¹

Tableau III.1. Caractéristiques mécaniques. [9]

III.4.3.Assemblage :

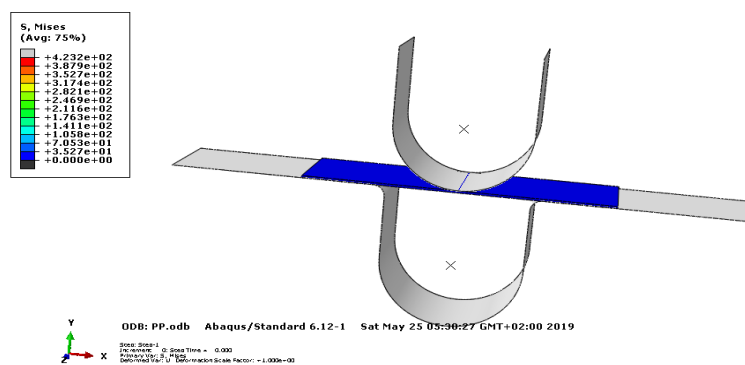


Figure III.4. Assemblage des pièces tôle, matrice et poinçon.

III.4.4 Les étapes de la simulation :

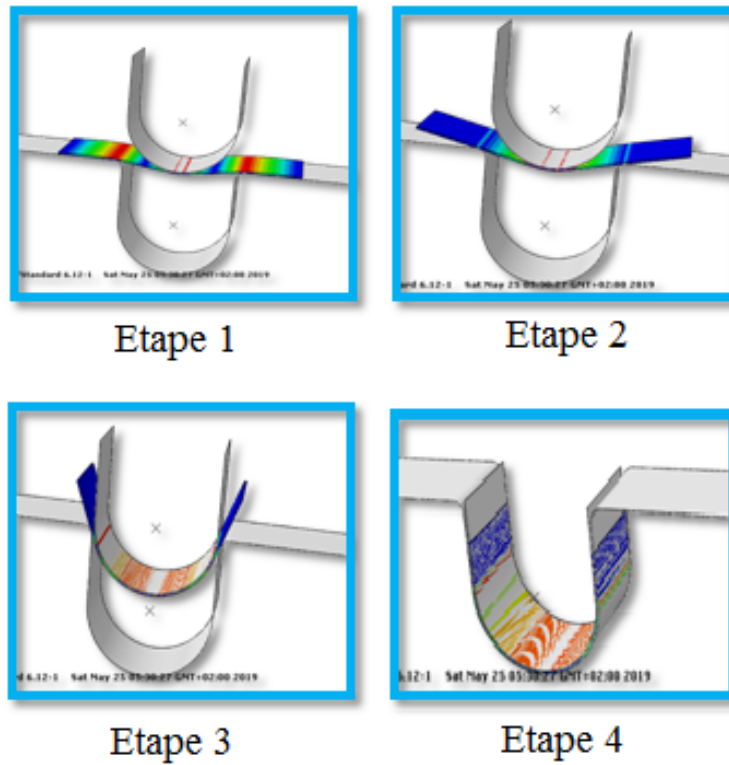


Figure III.5. Étapes de la simulation.



Figure III.6. Pièce finale.

III.5.ÉTUDE NUMÉRIQUE :

III.5.1. Conditions aux limites :

Les conditions aux limites cinématique considèrent l'encastrement presque parfait des extrémités de la matrice (Figure III.7) les conditions sont notamment le blocage en rotation du poinçon et un mouvement en translation suivant l'axe Y.

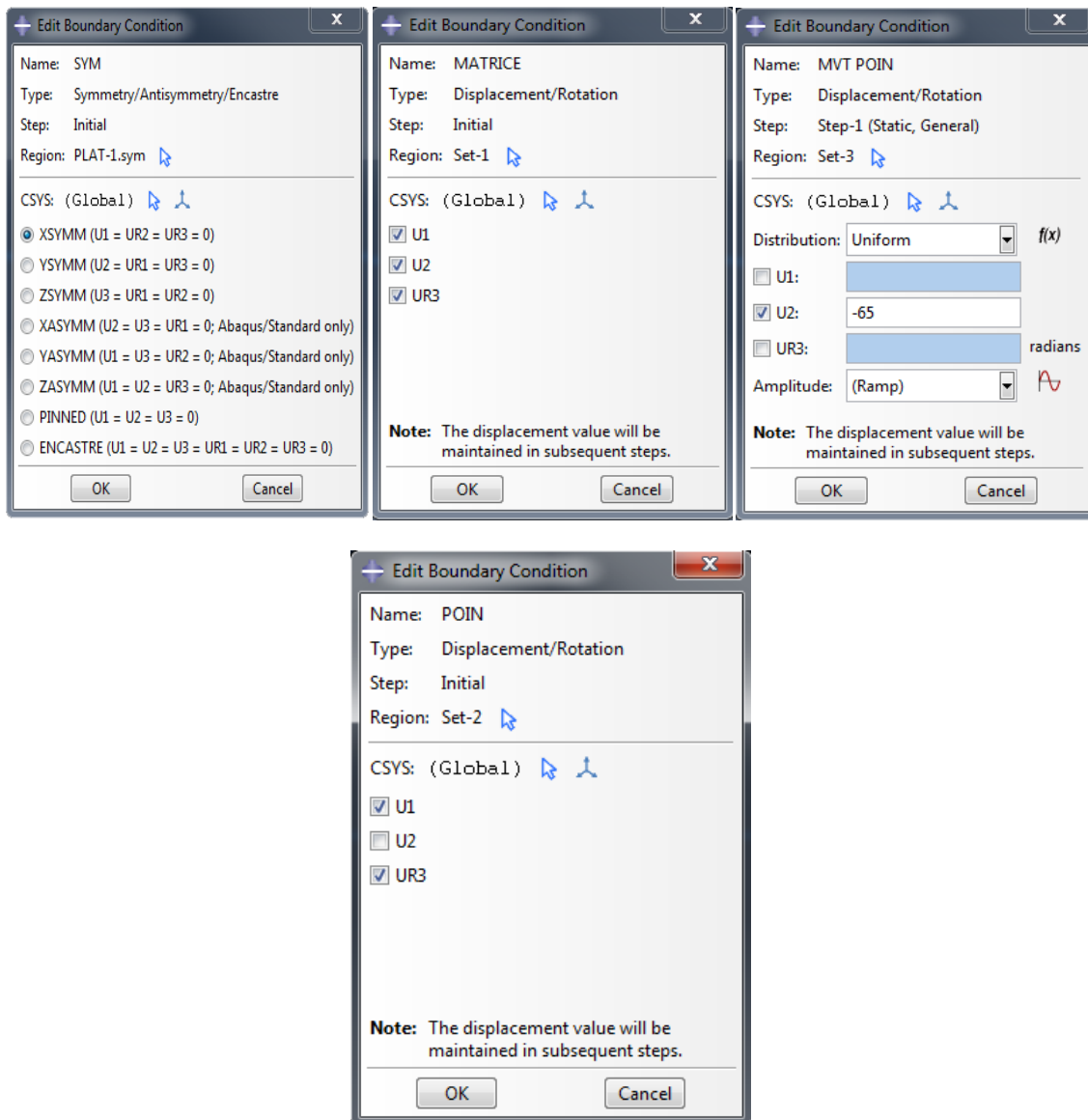


Figure III.7. Le blocage en rotation et en translation.

III.5.2. Discrétisation :

Le logiciel utilisé est ABAQUE 6-12.1 largement utilisé dans les domaines de recherche, type d'élément fini utilisé est le (couple 3d stress), type de maillage est (hexaèdre 8 nœuds) maillage structuré consiste à diviser le domaine de calcul en plusieurs compartiments.

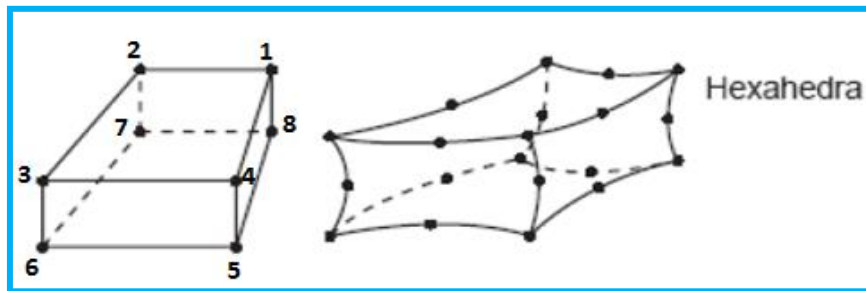


Figure III.8. Type de maillage.

- La figure suivante illustre le maillage sur la pièce étudiée :

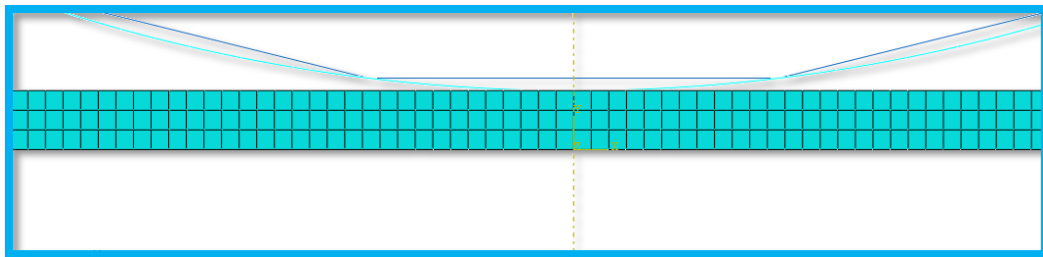


Figure III.9. Modèle discrétisé.

- Le tableau suivant montre la distance entre nœuds et le nombre des nœuds dans chaque corps.

<i>Component</i>	<i>Type de maillage</i>	<i>Pas</i>	<i>Nombre d'élément</i>	<i>Nombre d'élément Totale</i>
Tôle	<i>Hexaèdre</i>	0.3	1302	3025
poinçon			538	
matrice			1132	

Tableau III.2. Calcul de maillage.

III.6. RESULTATS ET DISCUSSION :

III.6.1. Déplacements sur différentes zone sur la tôle :

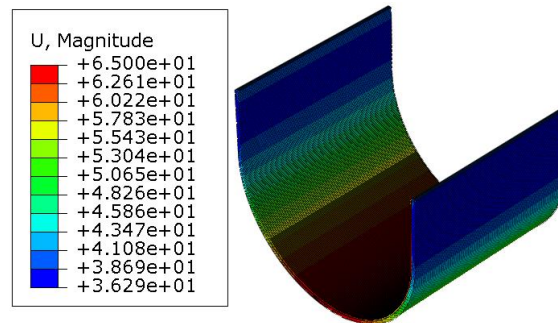


Figure III.10.déplacement de la tôle suivant les deux directions X et Y.

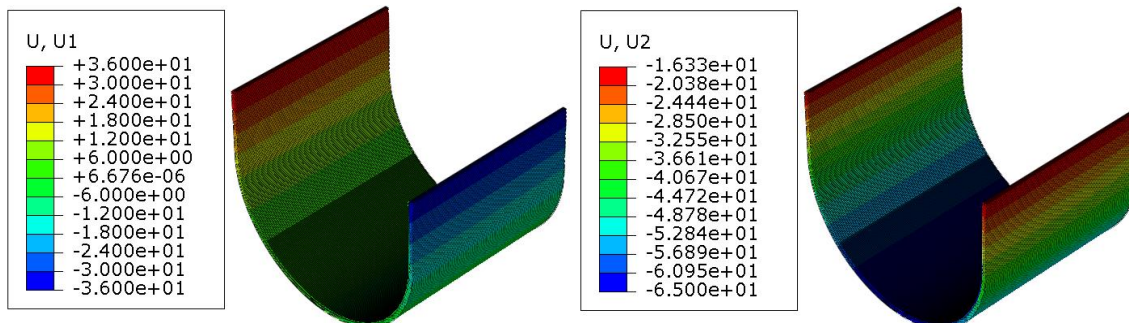


Figure III.11.déplacement de la tôle suivant l'axe X.

Figure III.12.déplacement de la tôle suivant l'axe Y.

III.6.2. Distribution des contraintes sur la surface interne de la tôle :

Distribution des contraintes Van Mises interne :

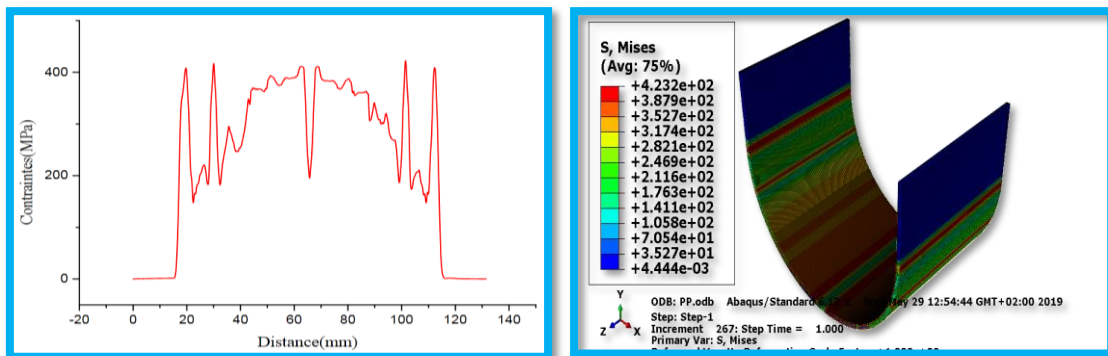


Figure. III.13. Distributions des contraintes Van Mises le long de la surface interne.

Interprétation :

On observe sur la figure. III.13. la présence de cinq pique de concentration de contrainte au niveau de la tôle d'une valeur max du contrainte atteint à $\sigma_{\max} = 423\text{MPa}$, au point $X_1 = 20\text{mm}$, $X_2 = 30\text{mm}$, $X_4 = 100\text{mm}$, $X_5 = 110\text{mm}$ et une valeur de contrainte $\sigma = 200\text{MPa}$ au point $X_3 = 65\text{mm}$ ceci est due à la compression à la quelle est soumise la tôle. Aussi une symétrie de la courbe para port à l'axe $X=65$ et cette dernière due à la forme et la répartition uniforme des charges du poinçon sur la tôle.

Distribution des contraintes normales σ_{11} σ_{22} σ_{33} interne :

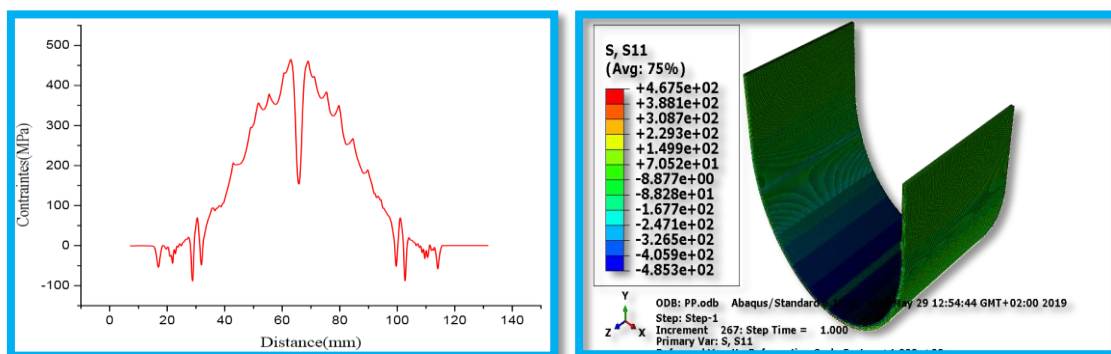


Figure. III.14. Distributions des contraintes normales σ_{11} le long de la surface interne.

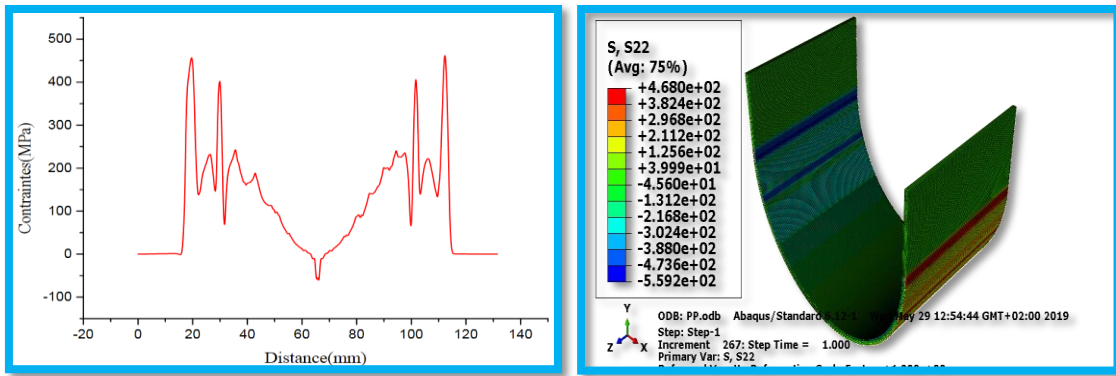


Figure. III.125. Distributions des contraintes normales σ_{22} le long de la surface interne.

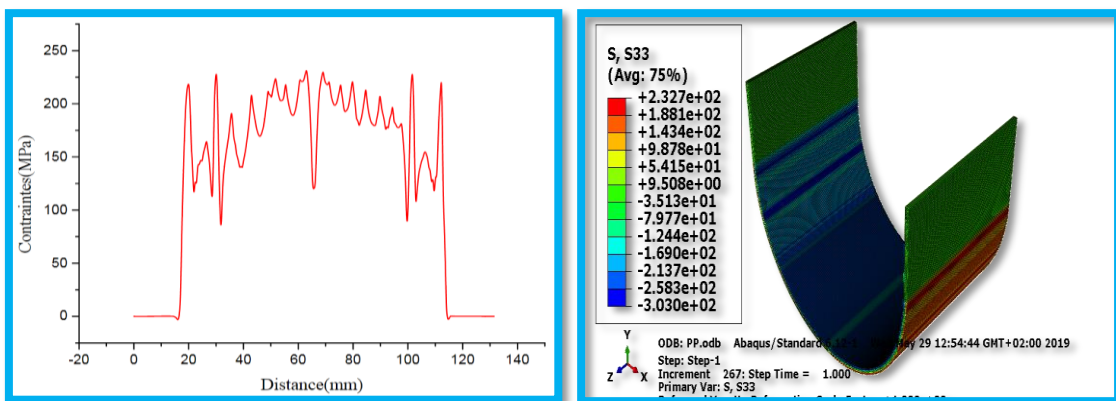


Figure. III.16. Distributions des contraintes normales σ_{33} le long de la surface interne.

Interprétation

Et pour les figures. III.14.15.16, la présence de cinq pique de concentration de contrainte au niveau de la tôle a des même distances $X_1 = 20\text{mm}$, $X_2 = 30\text{mm}$, $X_3 = 65\text{mm}$, $X_4 = 100\text{mm}$, $X_5 = 110\text{mm}$ que la contrainte Van Mises avec un changement des contraintes selon les distances précédente est due à la compression à la quelle est soumise la tôle. Aussi une symétrie para port l'axe $X=65$ due a la répartition uniforme des charges du poinçon sur la tôle.

Distribution des contraintes tangentielles σ_{12} interne :

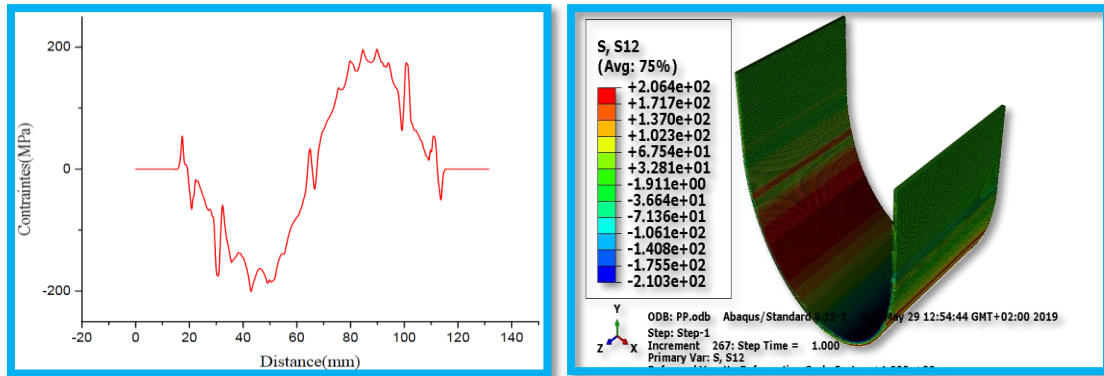


Figure. III.17. Distributions des contraintes tangentielles σ_{12} le long de la surface interne.

Interprétation

Pour la Figure. III.17 on observe que la courbe est antisymétrique pour les deux axes $Y=0$ et $X=65\text{mm}$ car c'est une contrainte tangentielle, et on trouve ça dans la relation entre les deux contraintes tangentielles $\sigma_{12} = |-\sigma_{21}|$.

III.6.3. Distribution des contraintes sur la surface externe de la tôle :

Distribution des contraintes Van Mises externe :

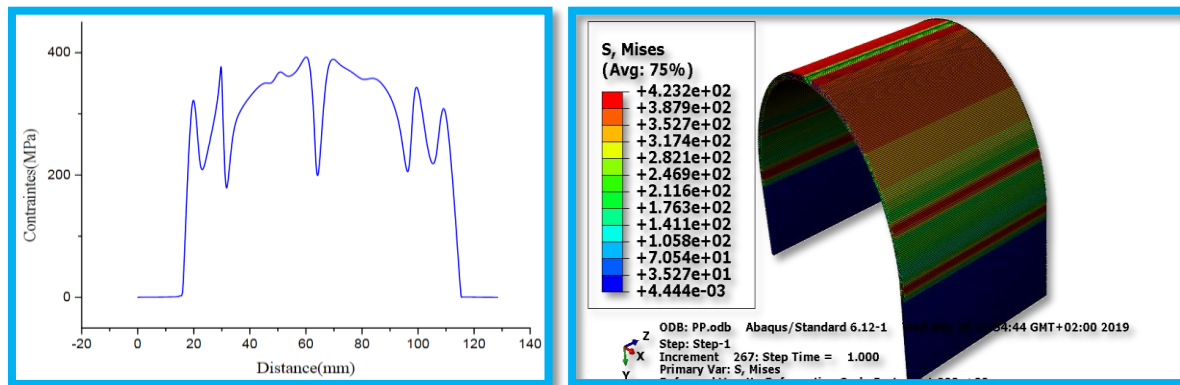


Figure. III.18. Distributions des contraintes Van Mises le long de la surface externe.

Interprétation :

On observe sur la figure. III.18. la présence de cinq pique de concentration de contrainte au niveau de la tôle d'une valeur max du contrainte atteint à $\sigma_{\max} = 423\text{MPa}$, au point $X_1 = 20\text{mm}, X_2 = 30\text{mm}, X_4 = 100\text{mm}, X_5 = 110\text{mm}$ et une valeur de contrainte

$\sigma = 200\text{MPa}$ au point $X_3 = 65\text{mm}$. Ceci est due à la traction à la quelle est soumise la tôle. Aussi une symétrie de la courbe para port à l'axe $X=65$ et cette dernière due à la forme et la répartition uniforme des charges du poinçon sur la tôle.

Distribution des contraintes normales σ_{11} σ_{22} σ_{33} externe :

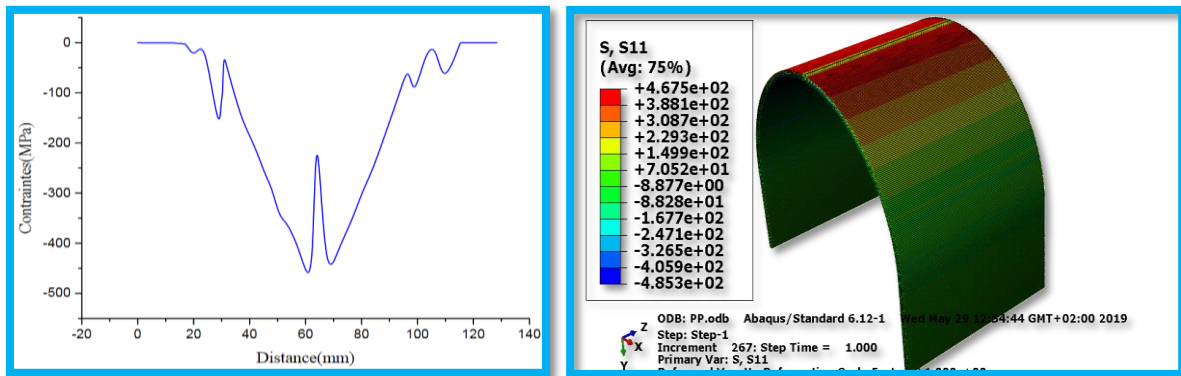


Figure. III.19. Distributions des contraintes normales σ_{11} le long de la surface externe.

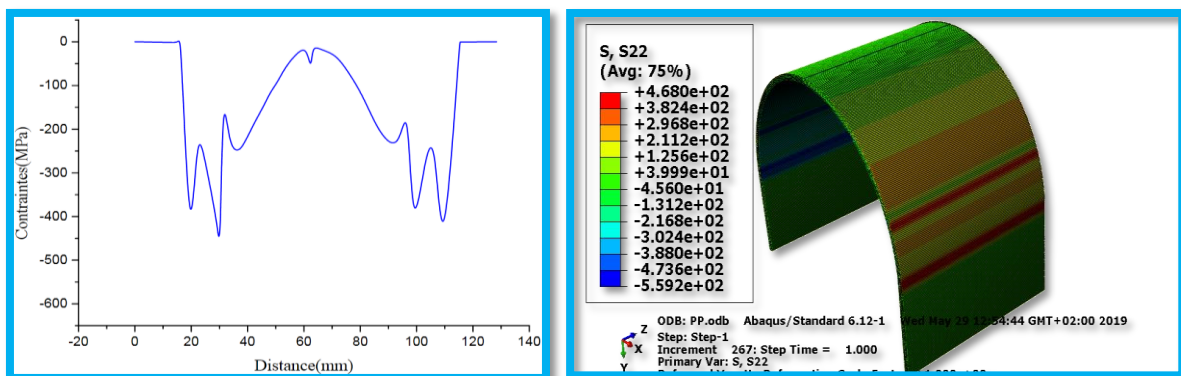


Figure. III.20. Distributions des contraintes normales σ_{22} le long de la surface externe.

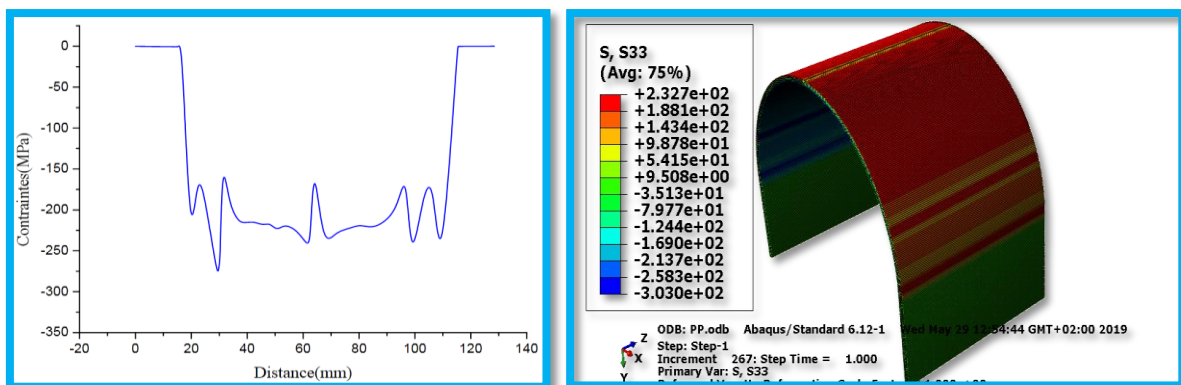


Figure. III.21. Distributions des contraintes normales σ_{33} le long de la surface externe.

Interprétation :

Et pour les figures. III.19.20.21, sont de même interprétation que les figures des contraintes internes sauf que les valeurs de contraintes sont négatives, ceci est due à l'effet de la traction.

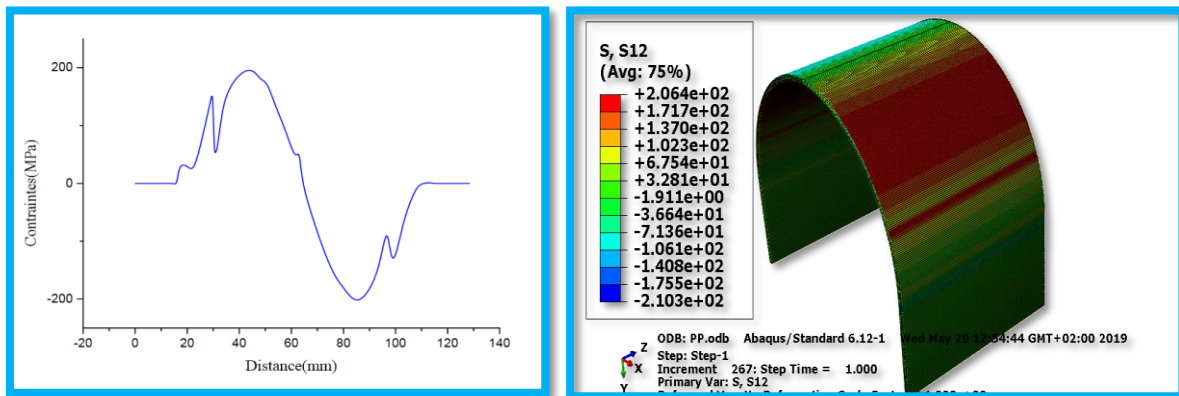
Distribution des contraintes tangentielles σ_{12} interne :

Figure. III.22. Distributions des contraintes tangentielles σ_{12} le long de la surface externe.

Interprétation :

Pour la Figure. III.22 on observe que la courbe est antisymétrique pour les deux axes $Y=0$ et $X=65\text{mm}$ car c'est une contrainte tangentielle, et on trouve ça dans la relation entre les deux contraintes tangentielles $\sigma_{12} = |-\sigma_{21}|$.

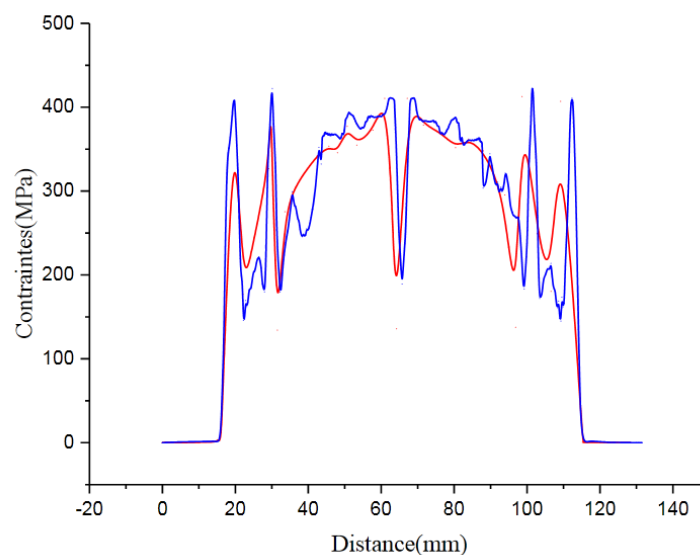
III.6.3. Comparaison entre les contraintes interne et externe de la tôle :

Figure. III.23. Distributions des contraintes Van Mises le long de la surface interne et externe.

Interprétation :

Dans la Figure. III.23. On constate que la distribution des contraintes Van Mises sur la surface interne et externe sont presque les mêmes et ça revient à l'effet que la contrainte Van Mises est une contrainte équivalente.

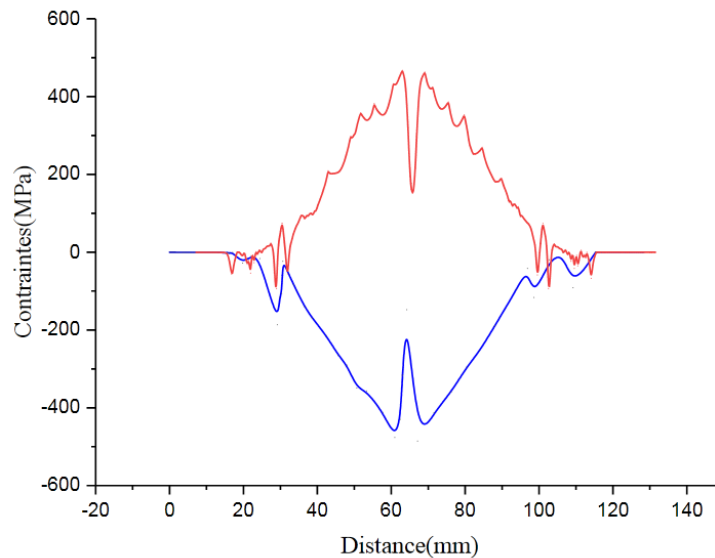


Figure. III.24. Distributions des contraintes σ_{11} le long de la surface interne et externe.

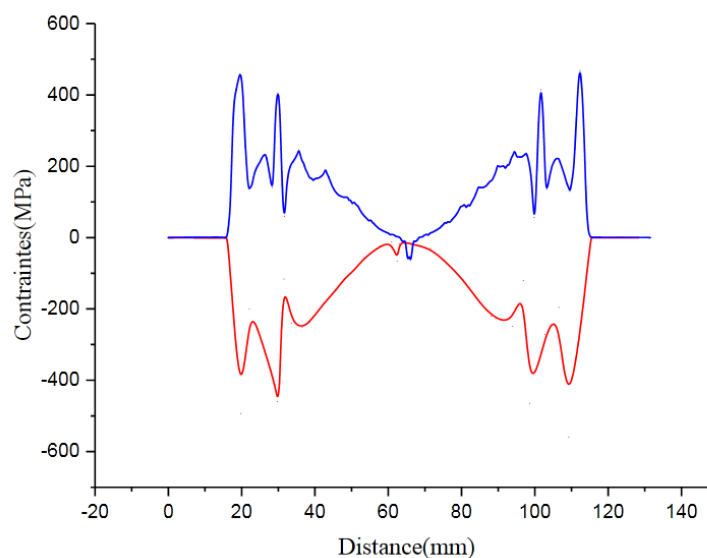


Figure. III.25. Distributions des contraintes σ_{22} le long de la surface interne et externe.

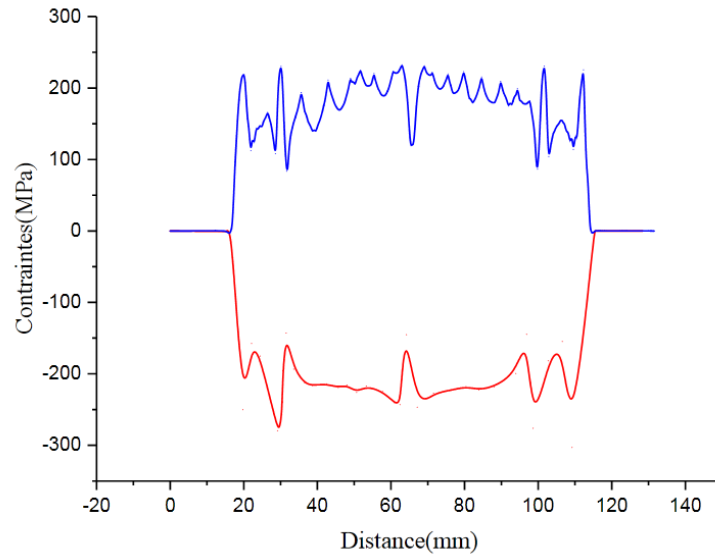


Figure. III.26. Distributions des contraintes σ_{33} le long de la surface interne et externe.

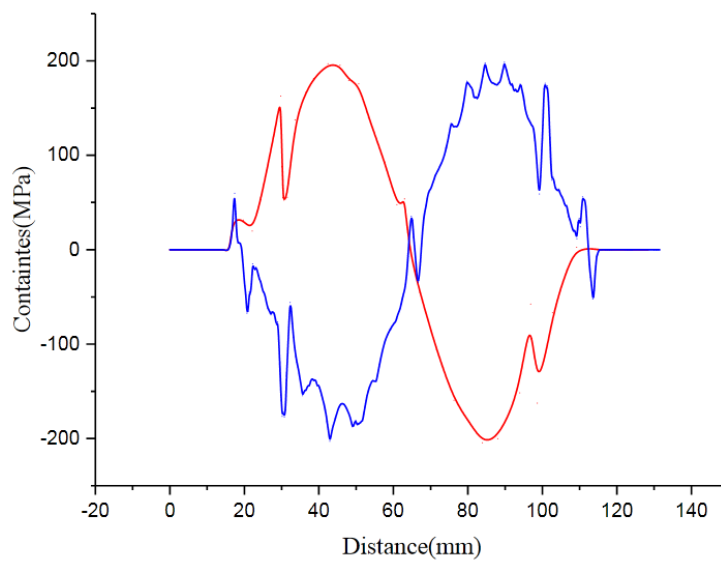


Figure. III.27. Distributions des contraintes σ_{12} le long de la surface interne et externe.

Interprétation :

On constate Dans les Figures. III.24.25.26.27 que la distribution des contraintes normales σ_{11} σ_{22} σ_{33} et tangentielle σ_{12} sur la surface interne et externe sont symétriques para port à l'axe $Y=0$. Ceci est dû à l'action de compression sur la surface interne de la tôle et de la traction sur la surface externe de la tôle.

	<i>Contraintes</i>	<i>V.M</i>	σ_{11}	σ_{22}	σ_{33}	σ_{12}
<i>Intérieur</i>	<i>max</i>	4.13 e+2	1.7 e-2	1.93	3.65 e-1	1.97 e+2
	<i>min</i>	4.44 e-3	-4.85 e+2	-4.93 e+2	-3.03 e+2	-2.04 e+2
<i>Extérieur</i>	<i>Max</i>	4.22 e+2	4.68 e+2	4.68 e+2	2.32 e+2	1.93 e+2
	<i>min</i>	1.56 e-2	-9.34 e+1	-6.42 e+1	-3.62	-2.03 e+2

Tableau. III.3 : les valeurs max et min des contraintes interne et externe.

Conclusion Générale

Dans un premier temps, nous avons présenté une étude bibliographique pour décrire le procédé d'emboutissage pour le situer parmi l'ensemble des procédés de mise en forme existants et montrer son importance sur le plan économique : (utilisation en industrie, les essais de caractérisation, les paramètres du procédé, ...). Ceci nous a permis de comprendre la mise en forme des métaux afin de pouvoir mener à bien la suite de notre recherche concernant l'étude sur les caractéristiques et importance des dimensions des outils du procédé emboutissage.

Ensuite, nous avons présenté une synthèse sur les défauts rencontrés dans la mise en forme des tôles métalliques.

Et à la fin de l'étude bibliographique nous avons projeté la lumière sur le retour élastique et les paramètres qui influencent.

Nous avons terminés ce travail par une simulation numérique en utilisant un code de calcul ABAQUS dans le but de maîtriser cette technique qui a un impact intéressant sur la maîtrise des procédés de mise en forme. A travers ces résultats, nous avons pu suivre la variation des déformations dans différentes zones de la tôle. On a ainsi conclu que la concentration des contraintes maximales est située dans les zones qui ont subi une action de traction ou bien une action de compression, ce qui a été validé par théorie et par simulation numérique.

Chapitre I : Généralité sur la mise en forme des métaux

Fig. I.1	:Principaux procédés de mise en forme des matériaux métalliques.....	02
Fig. I.2	:Procédé d'emboutissage.....	03
Fig. I.3	:Procédé d'emboutissage avec freinage de la tôle sous serre-flan.....	03
Fig. I.4	:Description du procédé d'Emboutissage.....	04
Fig. I.5	:Le processus d'emboutissage en quatre étapes.....	05
Fig. I.6	:Emboutissage hydromécanique.....	06
Fig. I.7	:Outils d'emboutissage d'un capot d'une voiture (Documentation STAMPACK, Société QUANTECH).....	07
Fig. I.8	:Outils d'emboutissage d'aile d'une voiture (Documentation STAMPACK, Société QUANTECH).....	07
Fig. I.9	:Le procédé d'emboutissage en chiffres.....	07
Fig. I.10	:Retour élastique.....	10
Fig. I.11	:Rayon du poinçon r_p	11
Fig. I.12	:Rayon de matrice r_m	12
Fig. I.13	:Principe de la segmentation élastique du serre-flan.....	14
Fig. I.14	:Difficultés en emboutissage et intérêt du contrôle des efforts serre-flan.....	14
Fig. I.15	:Contrôle des efforts de serrage : (a) sur le segment 3, (b) sur le segment 4.....	15
Fig. I.16	:Avantage de la flexibilité du serre-flan et du contrôle local de la force de serrage.....	16
Fig. I.17	:Simulation numérique du phénomène de retour élastique.....	19
Fig. I.18	:Retour élastique pour différents efforts de serrage sur un acier doux (4ème Rapport CECA, Voest Alpine). A gauche : efforts de serrage élevés.....	19
Fig. I.19	:Dispersion des résultats du retour élastique sur une nuance d'aluminium obtenue par différents partenaires dans le cadre du projet 3DS de la conférence Numisheet 2005.....	20
Fig. I.20	:Essai en "V" pour caractériser la sensibilité du retour élastique à la vitesse de mise en forme.....	21
Fig. I.21	:Illustration par une courbe rhéologique de la sensibilité au retour élastique de deux matériaux ayant le même module de Young et des limites d'élasticité différentes.....	21
Fig. I.22	:Essai d'enroulement d'une tôle : (a) forme finale après l'essai (b) formes initiale et finale durant l'essai. Trois matériaux testés, trois conditions de frottement et différents rayons de l'outil.....	22
Fig. I.23	:Striction sur une tôle épaisse (en haut) et très mince (en bas).....	23
Fig. I.24	:Mise en évidence par l'essai Nakazima d'une rupture après striction localisée (à Gauche : en rétreint) et sans striction localisée (à droite : en expansion).....	24
Fig. I.25	:Essai d'expansion d'une tôle en acier doux ayant un trou au centre Apparition de plusieurs bandes de localisation au bord du trou, avec propagation d'une fissure macroscopique selon la direction radiale.....	24
Fig. I.26	:Rupture sans formation de plis (à gauche : effort de serrage élevé) et avec formation de plis (à droite : effort de serrage faible).....	25

Chapitre II : Retour Elastique

Fig. II.1	:Le retour élastique lors d'étirage.....	30
Fig. II.2	:Deux types principaux de retour élastique.....	30
Fig. II.3	:Paramètres du le retour élastique et la courbure de paroi (aux coins de Poinçon et de matrice) et la courbure de paroi latérale.....	31
Fig. II.4	:Comparaison des tôles déformées avant et après du retour.....	31
Fig. II.5	:Retour élastique formé près pliage.....	32
Fig. II.6	:Schéma illustrant les paramètres influençant le retour élastique.....	33
Fig. II.7	:L'effet de l'espace entre poinçon-matrice sur le retour élastique.....	34
Fig. II.8	:Influence d'espace de poinçon-matrice sur l'angle de retour élastique.....	35
Fig. II.9	:L'effet de coefficient du frottement sur le retour élastique.....	35
Fig. II.10	:La force en fonction de déplacements des pièces épaisses secs.....	36
Fig. II.11	:Influence du coefficient de frottement sur la force du poinçon.....	37
Fig. II.12	:Variation de la limite élastique en fonction de température.....	37
Fig. II.13	:Effet de la température sur le retour élastique pour deux valeurs de températures de la matrice : T=25°C, et T=100°C.....	38
Fig. II.14	:La répartition des contraintes au Figure.III.13 Effet du rayon de courbure niveau du rayon de courbure cas de pliage (pliage V) [32]. En V épaisseur de la tôle est (3mm).....	39
Fig. II.15	:Effet du rayon de courbure (pliage V).....	39
Fig. II.16	:Influence de l'épaisseur de tôle (acier TRIP) sur l'angle de retour élastique....	40
Fig. II.17	:Effet de l'épaisseur sur le retour élastique.....	41
Fig. II.18	:L'effet de la limite élastique sur le retour élastique.....	41
Fig. II.19	:L'influence du module de Young sur le retour élastique.....	42
Fig. II.20	:Variation du module de Young en fonction de déformation.....	43
Fig. II.21	:Variation du module d'élasticité d'une tôle mince d'acier extra – doux effervescent en fonction de l'angle α entre la direction d'observation et la direction de laminage.....	44
Fig. II.22	:L'effet de la direction de laminage sur la courbe de traction.....	45
Fig. II.23	:L'effet de la direction de laminage sur le retour élastique.....	46

Chapitre III : Simulation Numérique

Fig. III.1	: Structure d'une analyse <i>ABAQUS</i>	49
Fig. III.2	: Modules d' <i>ABAQUS</i>	50
Fig. III.3	: Représentation géométrique de la tôle.....	51
Fig. III.4	: Assemblage des pieces tole, matrice et poinçon.....	52
Fig. III.5	: Étapes de la simulation.....	53
Fig. III.6	: Pièce finale.....	53
Fig. III.7	: Le blocage en rotation et en translation.....	54
Fig. III.8	: Type de maillage.....	55
Fig. III.9	: Modèle discrétisé.....	55
Fig. III.10	: déplacement de la tôle suivant les deux directions X et Y.....	56
Fig. III.11	: déplacement de la tôle suivant l'axe X.....	56
Fig. III.12	: déplacement de la tôle suivant l'axe Y.....	56
Fig. III.13	: Distributions des contraintes normales VM le long de la surface interne.....	56
Fig. III.14	: Distributions des contraintes normales σ_{11} le long de la surface interne.....	56
Fig. III.15	: Distributions des contraintes normales σ_{22} le long de la surface interne.....	57
Fig. III.16	: Distributions des contraintes normales σ_{33} le long de la surface interne.....	57
Fig. III.17	: Distributions des contraintes normales σ_{12} le long de la surface interne.....	57
Fig. III.18	: Distributions des contraintes normales VM le long de la surface externe.....	58
Fig. III.19	: Distributions des contraintes normales σ_{11} le long de la surface externe.....	58
Fig. III.20	: Distributions des contraintes normales σ_{22} le long de la surface externe.....	58
Fig. III.21	: Distributions des contraintes normales σ_{33} le long de la surface externe.....	59
Fig. III.22	: Distributions des contraintes normales σ_{12} le long de la surface externe.....	59
Fig. III.23	: Distributions des contraintes VM le long de la surface interne et externe.....	60
Fig. III.24	: Distributions des contraintes σ_{11} le long de la surface interne et externe.....	60
Fig. III.25	: Distributions des contraintes σ_{22} le long de la surface interne et externe.....	61
Fig. III.26	: Distributions des contraintes σ_{33} le long de la surface interne et externe.....	61
Fig. III.27	: Distributions des contraintes σ_{12} le long de la surface interne et externe.....	62

Liste des tableaux :

Chapitre I : Généralité sur la mise en forme des métaux

Tableau I.1 : Optimisation des propriétés matériau..... 17

Chapitre II : Retour Elastique

Tableau III.1 : Caractéristiques mécaniques..... 52
Tableau III.2 : Calcule de maillage..... 55
Tableau III.3 : Les valeurs max et min de contraintes interne et externe..... 65

- [1] **É. Felder**, « *Procédés de mise forme : Introduction* », Techniques de L'ingénieur, M 3000, 2000.
- [2] **Felder E.** « *Tribologie de l'emboutissage* » Techniques de l'ingénieur, Traité Mécanique et Chaleur, B7535.
- [3] **Toufik SEDRAT** « *Étude et conception d'un procédé d'emboutissage Appliqué aux moules d'emboutissage pour emballage métallique* » 2007 thèse de Magistère.
- [4] « *Etude en grandes transformation d'une nouvelle famille d'éléments Finis coque triangulaire à trois degrés de liberté par nœud. Application à la Simulation numérique de l'emboutissage* », Thèse de doctorat, Université de Maine 1996.
- [5] **A. Andersson**, « *Numerical and experimental evaluation of springback in a front side member* », Journal of Materials Processing Technology, 169, 2005, pp352–356.
- [6] **Lang, L., Danckert, J., Nielsen, K.B.** “ *Investigation into hydrodynamic deep drawing assisted by radial pressure* ” - Part I : Experimental Observations of the forming process of aluminium alloy. Journal of Materials Processing Technology 148, 119–131. 2004.
- [7] “ *Service des Études et des Statistiques Industrielles (Sessi) du Ministère de L'Economie des Finances et de l'Industrie; La sous-traitance en chiffres (métaux, Plastiques, caoutchouc, électronique* ”, Dossiers sectoriels, Téléchargeable <http://www.industrie.gouv.fr/sessi/>, 2004.
- [8] **Keeler, S.P.** “ *Determination of the forming limits in automotive stamping* ” Sheet Metal Industries 42, 683-703. 1965.
- [9] **A.Cornet et F. Hlawka**, « *Science des matériaux, propriétés et Comportement des matériaux du microscopique ou macroscopique* ».
- [10] « *Formage à la presse* » BT2, 7510, PB7510-3.
- [11] « *Matériau industriels et Matériaux Métalliques* », S8/62292
- [13] **D. Haller**, “ *Controllable Nitrogen Gas Spring Systems for Stamping Applications*, in New Developments in Sheet Metal Forming ISBN 3–88355292–5, Klaus Siegert (Editor) : 249–276, Fellbach, Germany, 23–24 May 2000
- [14] **M. Häussermann**, “ *Multipoint–Cushion–Technology Advances and Die Design* ” in New Developments in Sheet Metal Forming ISBN 3–88355–292–5, Klaus Siegert (Editor): 341–366, Fellbach, Germany, 23–24 May 2000.

- [15] **K. Siegert**, “ *Research and Development in the Field of Sheet Metal Forming Technology of the Institute for Metal forming Technology (IFU) of the University of Stuttgart*”, in *New Developments in Sheet Metal Forming* ISBN 3–88355–292–5, Klaus Siegert (Editor) : 277–308, Fellbach, Germany, 23–24 May 2000.
- [16] **K. Siegert, B. Oberpriller, H. Markstädter**, “*Hydromechanical Deep Drawing of Car outer Panels, in Hydroforming of Tubes, Extrusions and Sheet Metals*” ISBN 3–88355–321–2, Klaus Siegert (Editor) : 551–567, Fellbach Germany, 28–29 October 2003.
- [17] **S. Wagner, S. Jäger**, “*Combination of Deep Drawing With Subsequent Hydroforming, in Hydroforming of Tubes, Extrusions and Sheet Metals*” ISBN 3–88355–321–2, Klaus Siegert (Editor) : 227–243, Fellbach, Germany, 28–29 October 2003.
- [18] **R. Descamps, B. Chamont, R. Kergen**, «*Blank-holder Force Control in Deep Drawing (Application on a Critical Industrial Part)* », in *New Developments in Sheet Metal Forming* ISBN 3–88355–292–5, Klaus Siegert (Editor) : 229–247, Fellbach, Germany, 23–24 May 2000.
- [19] **A. Delamézière, H. Naceur, P. Breilkopf, C. Knopf-Lenoir, J. L. Batoz, P. Villon**, *Faisabilité en emboutissage : Optimisation du matériau par surface de réponse*, Mécanique & Industries, 3 (2) : 93–98, 2002.
- [20] **Brunet Michel, Morestin Fabrice, Sabourin François et Godereaux Stéphane**, «*Identification of non-linear kinematic hardening with bend reverse bend experiments in anisotropic sheet-metals*», *International Journal of Forming Processes*, 2003.
- [21] **Lee, M.-G., Kim, D., Kim, C., Wenner, M.L., Wagoner, R.H., Chung, K**, “*Springback evaluation of automotive sheets based on isotropic-kinematic hardening laws and nonquadratic anisotropic yield functions*”. Part II: Characterization of material properties. *Int. J. of Plasticity* 21, 883-914. 2005
- [22] **Alain Col**, «*emboutissage des tôles, importance des modes de Déformation*» technique de l'ingénieur, MC1, M 3 180. 2002
- [23] **Badis HADDAG** «*Contribution à la modélisation de la mise en forme des toles métallique : application au retour élastique et à la localisation*» thèse de doctorat 2007

- [24] **Fabrice Morestin, Maurice Boivin**, «*On the necessity of taking into account the variation in the Young modulus with plastic strain in elastic-plastic Software*», Nuclear Engineering and Design, 162, 1996, pp107-116.
- [25] **Zhang Dongjuan, Cui Zhenshan**, «*An analytical model for predicting springback and side wall curl of sheet after U-bending*», Computational Materials Science, 142 2006, 216–217.
- [26] **H. Livatyali, T. Altan**, «*Prediction and elimination of springback in Straight flanging using computer aided design methods*», Journal of Materials Processing Technology, 117, 2001, pp 262-268.
- [27] **Sang-Wook Lee**, «*A study on the bi-directional springback of sheet metal stamping*», Journal of Materials Processing Technology, 167, 2005, pp33–40.
- [28] **M. Samuel**, «*Experimental and numerical prediction of springback and side wall curl in U-bendings of anisotropic sheet metals*», Journal of Materials Processing Technology, 105, 2000, pp382-393.
- [29] **Jin Nam, Wenxia Li, John J. Lannutti**, «*Density gradients and springback: environmental influences*», Powder Technology, 133, 2003, pp23– 32.
- [30] **T.B. Hilditch, J.G. Speer, D.K. Matlock**, «*Influence of low-strain deformation characteristics of high strength sheet steel on curl and springback in bendunder-Tension tests*», Journal of Materials Processing Technology, 182, 2007, pp84–94.
- [31] **Y.H. Moon, S.S. Kang, J.R. Cho, T.G. Kim**, «*Effect of tool temperature on The reduction of the springback of aluminum sheets*», Journal of Materials Processing Technology, 132, 2003, pp 365–368.
- [32] **Crisbon D.J.** «*Experimental measurement and finite element simulation Of springback in stamping aluminum alloy sheets for Auto-body panel application*», Dep. Mechanical University, Mississippi State University, 2003.
- [33] **Ihab Ragai, Duraid Lazim, James A. Nemes**, «*Anisotropy and springback In draw-bending of stainless steel 410: experimental and numerical study*», Journal of Materials Processing Technology, 166, 2005, pp116–127.
- [34] **P. Sun, J.J. Grácio, J.A. Ferreira**, «*Control system of a mini hydraulic press For evaluating springback in sheet metal forming*», Journal of Materials Processing Technology, 176, 2006, pp55–61.
- [35] **Yong Wan Kim, Jong In Kima**, «*Control of spring back for helically coiled steam generator tube*», Nuclear Engineering and Design, 234, 2004, pp 61–70.

- [36] **M. Banua, M. Takamura, T. Hamac**, “*Simulation of springback And wrinkling in stamping of a dual phase steel rail-shaped part*”, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.173, pp.178–184. 2006
- [37] **Myoung-Gyu Lee, Daeyong Kim**, «*Spring-back evaluation of automotive sheets based on isotropic–kinematic hardening laws and non-quadratic anisotropic yield functions, part III: applications*», *International Journal of Plasticity*, 21, 2005, pp915–953.
- [38] **K.P. Li, W.P. Carden, R.H. Wagoner**, “*Simulation of springback*”, *International Journal of Mechanical Sciences*, 44, pp.103–122. 2002.
- [39] **Dominique François, André Pineau, André Zaoui**, «*Comportement Mécanique des matériaux*», Hermès, Paris, 1995.
- [40] “*A study on the bi-directional springback of sheet metal stamping*”, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.167, pp.33–40, 2005.
- [41] **A.Soualem, E.H.Ouakdi, G.Ferron**, 2007, «*Comparative Study of Springback for Expansion and Retreint Deep Drawing, Journal of Engineering and Applied Sciences*» Vol.2, N°05, pp.849-853.
- [42] **J.R. Cho, S.J. Moon, Y.H. Moon**, «*Finite element investigation on springback Caractéristiques in sheet metal U-bending process*», *Journal of Materials Processing Technology* 141, 2003, pp109–116.
- [43] **W.M. Chan., H.I. Chew, H.P. Lee, B.T. Cheok**, «*Finite element analysis of spring-back of V-bending sheet metal forming processes*», *Journal of Materials Processing Technology*, 148, 2004, pp15–24.
- [44] **GU Rui-jie, Yang Hem, H An Mei, Li Heng**, «*Springback of thin-walled Tube NC precision bending and its numerical simulation*», *Trans. Nonferrous Met. SOC. China*, 16, 2006, pp63 1-638.
- [45] **K.M.Liew, H.Tan,T.Ray**, «*Optimal process design of sheet metal forming For minimum springback via an integration neural network evolution evolutionary algorithm*», *Strut Multidisc Optim* ,2004,pp284-294.
- [46] **Q. V. Bui, L. Papeleux, J. P. Ponthot**, «*Numerical simulation of springback using enhanced assumed strain elements*», *Journal of Materials Processing Technology*, v153–154, pp314–318. 2004.
- [47] **Dongye Fei, Peter Hodgson** «*Experimental and numerical studies of springback in air v-bending process for cold rolled TRIP steels*», *Nuclear Engineering and Design*, 236, 2006, pp 1847–1851.

- [48] **Z. Marciniak, J. L. Duncan, S. J. Hu**, «*Sheet metal forming*», Butterworth-Heinemann, 2002.
- [49] **D. Lefebvre, E. Haug, F. Hatt**, «*Industrial Applications of Computer Simulation in Stamping*», Journal of Materials Processing Technology, 46, 1994, pp. 351-389.
- [50] **P. Parniere, G. Sanz**, «*influence des caractéristiques des tôles minces polycristallines sur l'emboutissabilité*», CNRS, 1976.
- [51] **Xuechun Lia, Yuying Yanga, Jun Baoa**, Effect of the material-hardening Mode on the springback simulation accuracy of V-free bending, Journal of Materials Processing Technology, 123, 2002, pp209–211.
- [52] **Myoung-Gyu Lee, Daeyong Kim** «*Spring-back evaluation of automotive sheets based on isotropic-kinematic hardening laws and non-quadratic anisotropic yield functions, Part II: characterization of material properties*», International Journal Of Plasticity 21, 2005, pp 883 914.
- [53] **Carlos Gomes, Oladipo Onipede, Michael Lovell**, «*Investigation of springback in high strength anisotropic steels*», Journal of Materials Processing Technology, 159, 2005, pp91–98.
- [54] **Volkan Esat, Haluk Darendeliler, Mustafa Ilhan Gokler** «*Finite element analysis of springback in bending of aluminium sheet*», Materials and Design, 23, 2002, pp223-229.
- [55] **PATRICKH. R.**, «*Formation ABAQUS* » ; Université de Nantes.France 2007.
- [56] **Hervé. O.**, «*Méthode des éléments finis* » université de Nantes. France. Cel-00341772, version 1 – 26.Nov. 2008.
- [57] **MEFTEH. K.**, «*Cours Introduction général au logiciel Abaqus* » université de Biskra 2013.
- [58] **MEFTEH. K.**, «*Présentation Abaqus. Formation des masters* » ; université deBiskra 2014.

Résumé

Dans ce travail, on a étudié la répartition des contraintes de la force d'emboutissage en forme U dans différentes zones de la tôle. La première partie est consacrée à l'étude bibliographique sur le principe d'emboutissage et les caractéristiques et importance des dimensions des outils, et aussi à la présentation des différents défauts qu'on peut trouver dans la mise en forme. Dans la deuxième partie, on a exprimé le phénomène de retour élastique, et les différentes paramètres qui influencent sur le retour élastique à travers les essais d'étirage – pliage, l'action, suivie d'une simulation numérique sur une tôle en acier, en utilisant le logiciel *ABAQUS*.

Mots clés : Mise en forme, Emboutissage, retour élastique, logiciel, Abaqus.

Abstract

In this work, we studied the distribution of the stresses of U-shaped stamping force in different areas of the sheet. The first part is devoted to the bibliographic study on the principle of stamping and the characteristics and importance of the dimensions of the tools, and also to the presentation of the various defects that can be found in the formatting. In the second part, the spring-back phenomenon has been expressed, and the differential parameters that influence the spring-back through the stretch-bending tests, the action, followed by a numerical simulation on a steel sheet, using the *ABAQUS* software.

Keywords: Forming, Deep-Drawing, spring-back, software, Abaqus.