



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

MÉMOIRE DE MASTER

Domaine : Sciences et Techniques

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Construction Mécanique

Réf. : Entrez la référence du document

Présenté et soutenu par :
Khaled Menni et Souheyb Bouzinaoui

Le : lundi 27 juin 2022

Evaluation du retour élastique en hydroformage de tôles

Jury :

Pr.	M. N. AMRANE	Pr	Université de Biskra	Président
Pr.	M. S. CHEBBAH	Pr	Université de Biskra	Rapporteur
Dr.	N. DRIAS	MCB	Université de Biskra	Examineur

Année universitaire : 2021 - 2022

Remerciements

Nous avons attendu ce jour pour remercier du profond du cœur

✓ *Notre encadreur le professeur **Mohamed-Saïd CHEBBAH***

Pour son aide précieuse Et judicieuse ainsi que pour son soutien le long de cette année.

✓ *Tous nos professeurs que nous avons eus le privilège de rencontrer durant notre cursus*

✓ *Zui nous ont soutenus et toujours poussé à nous surpasser et à donner le meilleur même jusqu'à notre arrivée à ce stade qui est:*

Diplôme de constructions mécanique.

Dédicace

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

Toute ma famille

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

A tous ceux et celles qui me sont chers

A tous ceux et celles qui m'aiment

A tous ceux et celles que j'aime.

Khaled Menni

Soheyb Bouzinaoui

Table des Matières

Introduction générale	2
Chapitre 1	
Généralité sur la mise en forme de tôles	
1. L'emboutissage de tôles	5
1.1. Définition	5
1.2. Les deux familles d'emboutissage	7
1.2.1. L'emboutissage de pièce en forme de profilé	7
1.2.2. L'emboutissage profond	7
1.3. Le principe de l'emboutissage	7
1.4. Type d'emboutissage	8
1.4.1. L'expansion	8
1.4.2. Le rétreint	8
1.5. Les matériaux et formes d'emboutissage	9
1.5.1. Les matériaux	9
1.5.2. Les forme	10
1.6. Les avantages et les inconvénients de l'emboutissage	10
1.6.1. Les avantage de l'emboutissage	10
1.6.2. Les inconvénients de l'emboutissage	11
1.7. Les paramètres d'emboutissage	11
2. L'hydroformage de tôles	11
2.1. Principe d'hydroformage	12
2.2. Avantages et inconvénients de l'hydroformage de tôles	13
2.3. L'étude et la modélisation de l'hydroformage	13
2.4. Presses d'hydroformage	15

Chapitre 2

Les paramètres influençant le retour élastique en mise en forme de tôles

1. Etude des contraintes et déformation	17
1.1. Les modes de déformations	17
1.2. Coefficient d'anisotropie	19
1.3. Lois constitutives	19
1.4. Courbes limite de formage (CLF)	20
2. Le retour élastique	22
2.1. Définition	22
2.2. Calcul du retour élastique	23
2.3. Les paramètres influençant le retour élastique	25

Chapitre 3

Simulation numérique du retour élastique en mise en forme de tôles

1. Présentation du logiciel ABAQUS.....	28
1.1. Les logiciels sur le marché	28
1.2. Les caractéristiques du logiciel ABAQUS.....	28
1.3. Fonctionnement du code ABAQUS	29
2. Applications numériques.....	30
2.1. Formage de la tôle circulaire.....	30
2.2. Formage du godet axisymétrique.....	33
Conclusion générale	37
Références bibliographiques	39

Liste des Figures

Chapitre 1

Généralité sur la mise en forme des tôles

Figure 1. a. pièces laiton, inox, b. L'emballage et le conditionnement	6
Figure 2. Procédé d'emboutissage avec freinage de la tôle sous serre flan	7
Figure 3. Procédé d'emboutissage	8
Figure 4. Principaux modes de déformation par emboutissage	8
Figure 5. Pièce avant et après déformation	12
Figure 6. Principe du procédé d'hydroformage de tôle	13
Figure 7. Eléments nécessaire pour la modélisation numérique de l'hydroformage ...	14
Figure 8. Exemple de presse utilisée en hydroformage	15

Chapitre 2

Les paramètres influençant le retour élastique en mise en forme de tôles

Figure 9. Différents Modes de déformations.....	18
Figure 10. Différents Modes de contraintes	18
Figure 11. Les modes de déformations de la tôle	20
Figure 12. Courbe limite de formage selon la méthode Hacker	21
Figure 13. Courbe limite de formage numérique	21
Figure 14. Le retour élastique lors d'étirage	22
Figure 15. Deux types principaux de retour élastique	23
Figure 16. Paramètres du le retour élastique et la courbure de paroi	23
Figure 17. Comparaison des tôles déformées avant et après du retour élastique	24
Figure 18. Retour élastique formé près pliage	24
Figure 19. Schéma illustrant paramètres influençant le retour élastique	26

Chapitre 3

Simulation numérique du retour élastique en mise en forme de tôles

Figure 20. Architecture du code ABAQUS.....	29
Figure 21. Configuration et dimensions du poinçon hémisphérique	31

Figure 22. a. Tôle- poinçon, b. Fin d’emboutissage, c. après retrait du poinçon	31
Figure 23. A. Tôle initiale, B. Fin d’hydroformage, C. Suppression de la pression	31
Figure 24. Déplacement longitudinale : A- Fin d’emboutissage, B- Après retrait du poinçon ; C- Fin d’hydroformage, D- Après suppression de pression	32
Figure 25. Description géométrique du godet axisymétrique	33
Figure 26. A. Tôle-Poinçon, B. Fin d’emboutissage, C. après retrait du poinçon.....	34
Figure 27. A. Tôle-pression, B. Fin d’hydroformage, C. après décompression	34
Figure 28. Déplacement longitudinale : A- Fin d’emboutissage, B- Après retrait du poinçon ; C- Fin d’hydroformage, D- Après suppression de pression	35

Liste des tableaux

Chapitre 2

Les paramètres influençant le retour élastique en mise en forme de tôles

Tableau 1. Module d’élasticité des métaux	17
Tableau 2. Modes de déformation d’emboutissage	18

Chapitre 3

Simulation numérique du retour élastique en mise en forme de tôles

Tableau 3. Caractéristiques liées au procédé	30
Tableau 4. Caractéristiques géométriques, mécaniques et matérielles	33

Introduction Générale

Introduction générale

L'hydroformage est l'un des procédés de mise en forme qui consiste à déformer une surface métallique dans un moule ayant la forme finale désirée en appliquant une pression hydraulique.

Cette technologie a été reconnue et utilisée pour la première fois dans les années 20 du vingtième Siècle, et les percées technologiques principales ont été faites en production par série dans les 20 dernières années [1].

A cause de leurs importances, leurs avantages par rapport aux autres méthodes de formage comme l'emboutissage et comme il y a un manque de base de connaissance étendue pour le processus, plusieurs travaux de recherches ont été menés dans la dernière décennie (Dohmann et Hartl (1997) ; Asnafi (1999); Ahmetoglu et al (2000) etc....).

Ces recherches sont principalement concentrées sur les paramètres géométriques et matériels liés au processus de mise en forme. De nos jours il existe plusieurs logiciels industriels basés sur des approches incrémentales comme ABAQUS, LS-DYNA, PAM-STAMP ou STAMPAK.

Avec la réduction de durée du cycle de fabrication et l'amélioration des commandes de Procédé, les champs de l'application de l'hydroformage sont devenus plus larges. En raison de ses nombreux avantages et parce qu'il suit le développement des technologies correspondant par rapport le procédé d'emboutissage, l'hydroformage a gagné l'intérêt augmenté dans le monde.

Des applications principales de l'hydroformage peuvent être trouvées dans les industries aéronautiques, automobiles, électrotechniques et aussi bien que dans la production des composants pour l'usage sanitaire, etc. Les applications dans l'industrie automobiles peuvent être remarqué dans les pièces d'échappement, les arbres à cames, les armatures de radiateur, les essieux avant et arrière, les berceaux de moteur, structures du siège, etc. [2].

L'hydroformage est reconnu non seulement dans la production des pièces tubulaire mais aussi pour les pièces de forme de coque quelconque.

La conception et la production des pièces par ce procédé exigent la connaissance de la loi de comportement matériel de tube et des effets tribologiques pendant l'hydroformage, et comment l'opération d'hydroformage elle-même devrait être commandée.

Le présent travail comprend trois chapitres :

1. Généralité sur la mise en forme des tôles.
2. paramètres influençant le retour élastique en mise en forme de tôles.
3. Simulation numérique du retour élastique en mise en forme de tôles.

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

Chapitre 1

Chapitre 1 : Généralité sur la mise en forme de tôles

1. L'emboutissage de tôles

1.1. Définition

L'emboutissage est une technique de fabrication permettant d'obtenir à partir d'une feuille de tôle plane et mince, un objet dont la forme n'est pas développable. Contrairement aux opérations plus simples que sont le pliage, le roulage ou le profilage, ce procédé est utilisé très générale permet de fabriquer les pièces de carrosserie automobile, des appareils électroménagers ou des ustensiles de cuisine, des emballages métalliques et pièces mécaniques [1].



a



b

Figure 1 – a. pièces laiton, inox ; b. L'emballage et le conditionnement.

Il est essentiellement composée de :

- D'une matrice qui sert d'appui à la tôle et lui donne la forme extérieure finale.
- D'un poinçon coulissant suivant l'axe vertical, et déformant la tôle.
- D'une serre flan qui a le rôle de maintenir le flan afin d'assurer un écoulement homogène du métal et de prévenir les risques de plis ou autres défauts d'emboutissage [2].

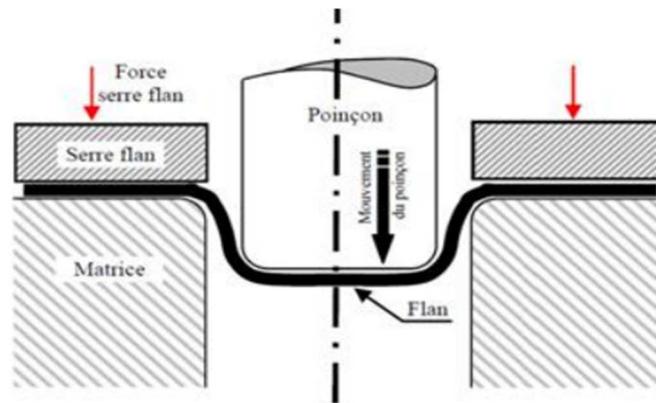


Figure2– Procédé d'emboutissage avec freinage de la tôle sous serre flan.

1.2. Les deux familles d'emboutissage

Il existe deux familles d'emboutissage selon la forme de la pièce finis :

1.2.1. L'emboutissage de pièce en forme de profilé : qui ressemble davantage à des pièces Obtenues par pliage, Ce sont par exemple des longerons utilisés dans l'automobile. Ces emboutis présentent de forts retours élastiques.

1.2.2. L'emboutissage profond : concerne principalement des pièces de révolution où le diamètre est faible par rapport à la hauteur de la pièce. La principale difficulté de fabrication de ces pièces est de ne pas déchirer la matière et de minimiser les amincissements de l'épaisseur de l'embouti [1].

1.3. Le principe de l'emboutissage

Le principe est basé sur la déformation plastique du matériau (en général un métal) déformation consistant en allongement ou rétreint local de la tôle pour obtenir la forme désirée. Par suite de la conservation globale du volume du matériau, les zones d'étirement subissent un amincissement (qui doit rester limité pour éviter la rupture) et les zones de rétreint (compression) subissent une combinaison d'épaississement et de plissement on cherche en général à éviter ce dernier effet, mais il ne peut jamais être complètement absent et on cherche donc à le provoquer dans les parties des tôles qui seront élimées dans la suite du processus de fabrication [3].

L'opération d'emboutissage consiste, tout d'abord, à serrer le flan entre le serre flan et la matrice. Ensuite, le poinçon descend dans la matrice. Au cours de ce mouvement, le flan pousse la forme du poinçon et de la matrice en se déformant plastiquement. Le mouvement de la tôle est contrôlé par un serre-flan empêchant l'apparition de pli sou de déchirures sur la pièce en lui imposant une pression de retenue [2].

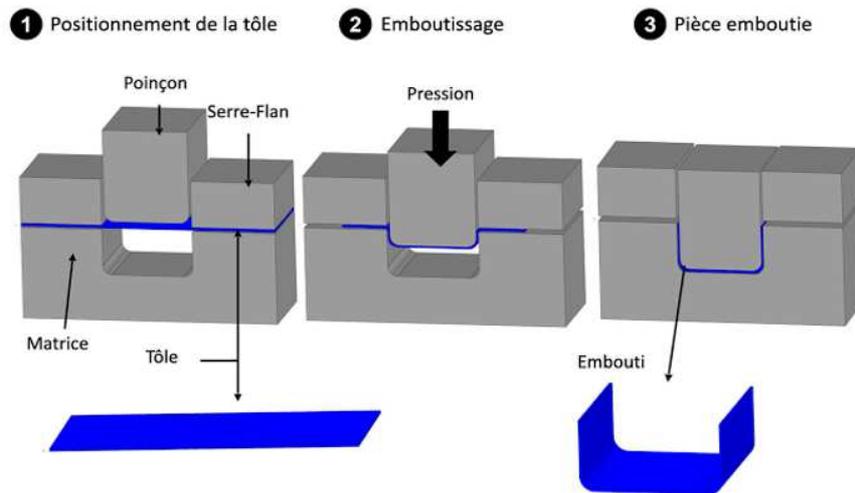


Figure 3–Procédé d'emboutissage.

1.4. Type d'emboutissage

L'emboutissage impose à la tôle différents modes de déformation dont le but est l'obtention d'une surface creuse. Le type d'outillage conditionne les deux cas limites de déformation :

1.4.1. L'expansion

C'est l'accroissement du diamètre d'un corps creux, par action sur sa paroi interne à l'aide d'un outil, d'un fluide ou d'un matériau élastique. La figure (3) ci-dessous met en évidence un emboutissage par expansion sur le poinçon, le flan étant bloqué sous le serre flan, l'épaisseur sous le poinçon diminue [2] .

1.4.2. Le rétreint

C'est la réduction diamétrale de l'extrémité ouverte d'un corps creux. La figure(4) montre un emboutissage profond avec rétreint du métal glissant sous la serre– flan, l'épaisseur entre serre flan et matrice peut augmenter

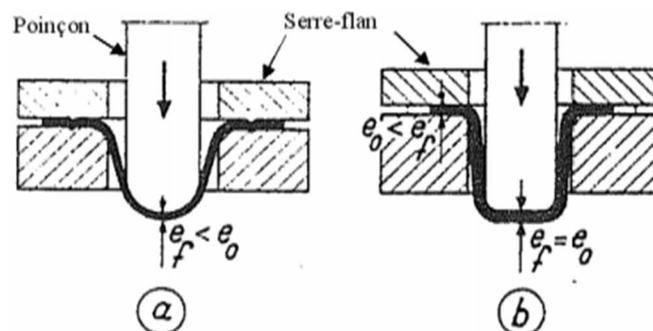


Figure 4–Principaux modes de déformation par emboutissage [3].

Avec :

e_0 : l'épaisseur de la tôle a l'état initial (mm) ;

e_f : l'épaisseur de la tôle a l'état final (mm) ;

a : l'expansion ;

b : le retraits.

1.5. Les matériaux et formes d'emboutissage

1.5.1. Les matériaux

La technique d'emboutissage permet de mettre en forme de nombreux matériaux que ce soit des aciers, des alliages non ferreux [4]. Néanmoins, la mise en œuvre d'une opération d'emboutissage d'une tôle nécessite certains réglages ou certaines actions préalables dépendant de la nature même du matériau.

a. Les aciers

Les techniques modernes de laminage permettent d'obtenir des tôles d'acier très minces, avec une surface propre et lisse, une structure homogène et une gamme de caractéristiques mécaniques adaptées aux exigences de l'emboutissage. Ces tôles sont classées en trois catégories : tôle de fabrication courante (TC), tôle d'emboutissage (E), et tôle d'emboutissage spéciale (ES).

Les aciers inoxydables se comportent différemment de l'acier doux en raison de la présence de nickel et de chrome. Ainsi les vitesses d'emboutissage doivent être plus lentes que pour les autres nuances.

b. Les alliages non ferreux

- **Les laitons** : Les plus couramment utilisés sont ceux désignés sous le nom de (60% ; 40%) (Contenant 60% de cuivre et 40% de zinc) (Avec addition de plomb pour les utilisations en horlogerie et sans addition pour les pièces optique, de sidérurgie) et de (72% ; 28%) (Pour l'emboutissage extra profond). Il est employé pour la fabrication de cartouches et de douilles évitant des opérations de recuit).
- **L'aluminium et ses alliages** : ces alliages s'écroutissent à l'emboutissage, l'étirage profond ne s'obtient qu'avec les qualités les plus douces. On peut toutefois obtenir des emboutis peu profond avec des qualités plus dures.
- **Le zinc** : il s'emboutit facilement mais, dans le cas d'emboutissage de forme complexe, il est nécessaire de le chauffer entre 100 et 150°C.

- **Le cuivre** : non allié appelé cuivre rouge possède d'excellentes qualités d'emboutissage extra profonds ; souvent supérieures à celles du laiton ou des aciers spéciaux.
- **Le nickel et ses alliages** : ils possèdent d'excellentes qualités d'emboutissage. Les plus couramment utilisées sont ceux contenant 60 à 65% de cuivre, 20 % de zinc, et 15 à 20 % de nickel.
- **Le magnésium** : c'est le plus léger des métaux utilisés dans l'industrie. A température ambiante le magnésium ne peut être embouti que dans certaines limites. Pour réaliser des pièces semblables à celles obtenues avec l'acier, il est indispensable de chauffer de 200 à 500°C en fonction de la qualité d'emboutis souhaités.

1.5.2. Les forme

L'emboutissage est une opération qui transforme une tôle plane en pièce avec une forme plus ou moins complexe .On peut obtenir des différent formes parmi lesquelles on a :

- **Forme rectangulaire** : Dans les emboutis rectangulaires on peut considérer que seuls les rayons latéraux sont emboutis (quart d'embouti cylindrique), les flancs étant simplement cambrés.
- **les formes coniques** : la forme conique ne peut être obtenue qu'après au moins 4 passes. Cette technique permet d'obtenir des formes qu'il aurait été impossible en une seule passe.
- **Les formes cylindriques** : sont facilement réalisable avec de bonnes conditions opératoires. A partir de cette forme simple il est possible de réaliser des formes plus évoluées avec la méthode d'emboutissage dit renverser
- **Les formes hémisphériques** : l'emboutissage d'une demi-sphère est difficile en raison de la formation de plis mais il est possible en une seule passe si la matrice est munie d'un bourrelet
- **Les formes complexes** : Ces formes sont relativement difficiles à réaliser et ne sont généralement réalisables qu'avec un emboutissage par étapes, c'est à dire un emboutissage où la forme désirée n'est obtenue qu'après un certain nombre de phases successives.

1.6. Les avantages et les inconvénients de l'emboutissage

1.6.1. Les avantage de l'emboutissage

- Pièces minces de formes géométriques complexes.
- Bon état de surface.
- Très bonne qualité esthétique et travaux de finition de polissage moins lourds et moins coûteux.
- Bas prix de revient et cadences de production très élevées [1].

1.6.2. Les inconvénients de l'emboutissage

- Les zones d'étirement subissent un amincissement important et les zones de retrait subissent une combinaison d'effets d'épaississement et de plissement.
- Les phénomènes du retour élastique (après que le poinçon se retire) conduisent à un retrait de la matière.
- Temps de préparation important.
- Mise au point des outils (poinçon, matrice) très coûteuse et nécessite un savoir-faire de l'entreprise.
- Le rayon d'entrée de la matrice doit être très arrondi et poli pour éviter toute déchirure du métal.

1.7. Les paramètres d'emboutissage

Lors de l'emboutissage d'une pièce ; plusieurs paramètres doivent être bien précisés pour avoir la forme souhaitée avec une bonne qualité mais aussi doit être respectée la rentabilité de l'entreprise. Ces paramètres sont :

- Le rayon sur la matrice ;
- Arrondi sur le poinçon ;
- La pression du poinçon ;
- La vitesse du poinçon ;
- La pression de serrage des serres-flans ;
- Le jeu entre le poinçon et la matrice ;
- L'effort d'emboutissage [2].

2. L'hydroformage de tôles

L'hydroformage de tôles est un procédé de formage dans lequel des tôles métalliques sont mises en forme par l'action interne d'un fluide sous pression. Le principe est expliqué sur le schéma de la figure (5). Les tôles à mettre en forme sont placées à l'intérieur de matrices ayant la forme appropriée et dans lesquelles s'exerce une pression hydraulique. La déformation du métal est due à l'action conjuguée de cette pression et à la poussée exercée par les vérins axiaux qui repoussent la matière vers l'intérieur de la pièce.

L'hydroformage des tôles se développe dans les industries automobile et aéronautique du fait des nombreux avantages offrant une large plage de formage, une bonne qualité des pièces formées et la possibilité d'obtenir des formes compliquées. Une répartition homogène et

régulière de la pression est un avantage pour l'emboutissabilité des tôles, de même que pour la reproductibilité.



Figure 5– Pièce avant et après déformation.

2.1. Principe d'hydroformage

Ce procédé est basé sur le brevet des années 1950 pour le moulage hydraulique par Fred Leuthesser, Jr. et John Fox de la Schaible Company de (Cincinnati, Ohio) aux États-Unis [5]. Il était à l'origine utilisé dans la production de becs de cuisine. Cela a été fait car en plus du renforcement du métal, l'hydromoulage a également produit des pièces moins « granuleuses », permettant une finition plus facile du métal [6].

Dans l'hydroformage en feuille, il y a la formation de vessie (où il y a une vessie qui contient le liquide ; aucun liquide n'entre en contact avec la feuille) et l'hydroformage où le fluide entre en contact avec la feuille (pas de vessie). La formation de la vessie est parfois appelée flexforming [7]. Flexforming est principalement utilisé pour les productions à faible volume, comme dans le domaine aérospatial [8].

Le formage avec le fluide en contact direct avec la pièce peut se faire soit avec un poinçon mâle plein (cette version est parfois appelée emboutissage hydro-mécanique) [9]. Soit avec une matrice femelle pleine. Dans l'emboutissage profond hydromécanique, une pièce est placée sur un anneau d'étirage (porte-ébauche) sur un poinçon mâle, puis une chambre hydraulique entoure la pièce et une pression initiale relativement faible place la pièce contre le poinçon. Le poinçon est ensuite élevé dans la chambre hydraulique et la pression est augmentée jusqu'à 100 MPa (15000 psi) qui forment la partie autour du poinçon. Ensuite, la pression est relâchée et le poinçon est rétracté, la chambre hydraulique est levée et le processus est terminé.

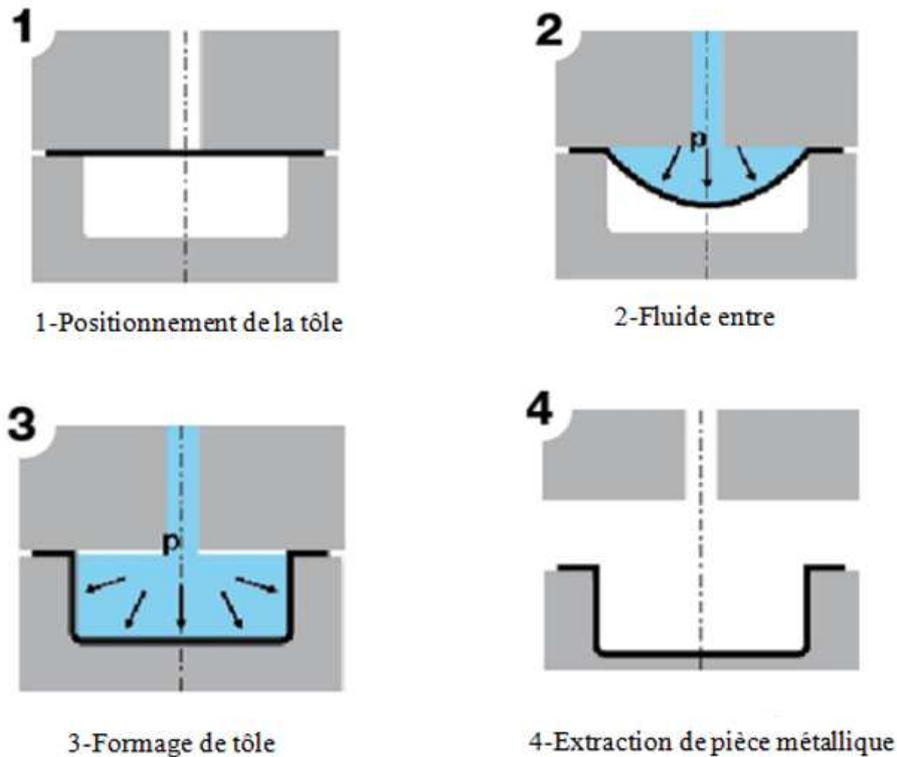


Figure 6– Principe du procédé d'hydroformage de tôle

2.2. Avantages et inconvénients de l'hydroformage de tôles

Les avantages de ce process de formage par rapport à l'emboutissage profond classique sont les suivants :

- Minimisation des jonctions entre les pièces assemblées et/ou soudées.
- Conception pour des pièces complexes.
- Réduction du matériau utilisé et du poids de la pièce.
- Durabilité plus longue.
- Précision dimensionnelle et précision de formage avec un retour élastique réduit.

Les avantages de ce procédé de formage sont trop demandés dans l'industrie automobile comme d'autres secteurs industriels. Par exemple, l'industrie de la plomberie et du chauffage, la technologie de l'électro-ménager, l'aviation et l'aérospatiale, l'industrie du mobilier ainsi que la construction de machines et d'équipements [10].

2.3. L'étude et la modélisation de l'hydroformage

Dans un contexte industriel de plus en plus compétitif, les constructeurs automobiles sont amenés à réduire les délais de conception et les coûts de développement de leurs nouveaux produits et procédés tel que l'hydroformage.

La simulation numérique est devenue aujourd’hui un outil incontournable pour répondre à ces besoins en réduisant le nombre de campagne d’essais, les coûts d’outillage et les délais de conception

La striction, la rupture et le plissement sont les principaux modes de défaillance qui entraînent le rebut systématique des pièces. C’est pourquoi, améliorer la prédiction d’apparition de ces défauts lors de la simulation va dans le sens d’une meilleure maîtrise du procédé.

Parallèlement au gain de temps que peuvent offrir les simulations numériques, la compétitivité exige de cet outil de plus en plus de fiabilité et de précision. La réalisation de cet objectif passe nécessairement par (voir également la Figure 7) :

1. La définition de lois constitutives du modèle numérique capables de décrire le plus fidèlement le comportement mécanique réel du matériau. Ainsi, en mise en forme des produits minces, et en hydroformage en particulier, les lois élasto-plastiques anisotropes sont indispensables pour la bonne description du comportement des tôles laminées. L’identification des paramètres de ces lois constitue un facteur déterminant dans la fiabilité des simulations.
2. L’algorithme de la méthode numérique doit être en mesure de simuler les conditions réelles du procédé et reproduire les différents phénomènes physiques qui peuvent s’y produire.
3. L’outil numérique doit disposer d’un outil complémentaire fiable et précis lui permettant de détecter les défauts qui peuvent survenir [11].

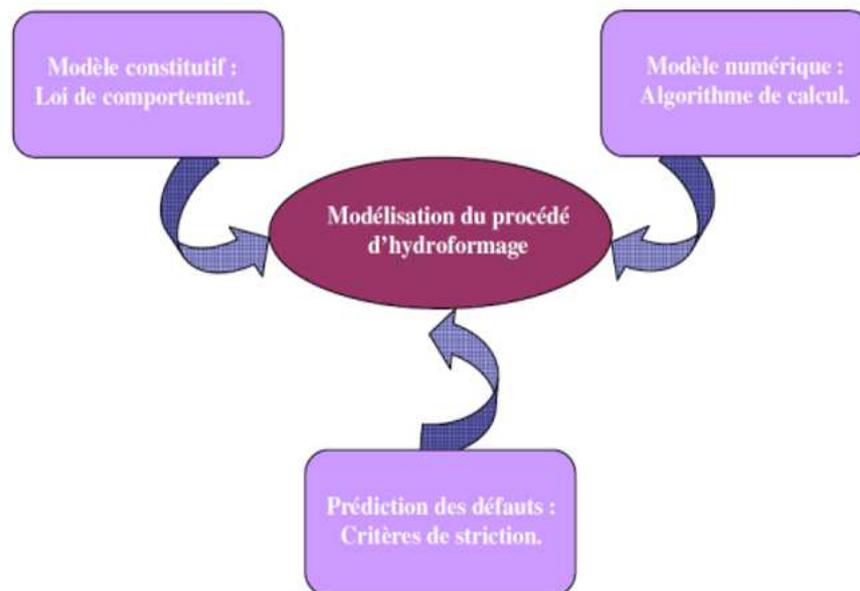


Figure 7– Éléments nécessaire pour la modélisation numérique de l’hydroformage.

2.4. Presses d'hydroformage

En hydroformage, la pression est uniformément répartie sur la surface de la pièce. Dans la mesure où des pressions élevées peuvent être mises en jeu sur des surfaces également importantes, très vite les efforts de serrage deviennent conséquents et les presses (Figure 8) peuvent atteindre des dimensions considérables (jusqu'à 100 000 KN). L'investissement initial dans de telles installations s'avère coûteux et limite donc l'exploitation étendue de cette technologie [11].

Les principaux rôles des presses d'hydroformages sont, l'ouverture et la fermeture de la matrice et la production d'un effort de retenue pendant le formage, pour éviter la séparation des deux parties de la matrice. Les unités additionnelles qui sont exigées pour suivre le processus incluent des pistons, pour les charges axiales et un compresseur. Actuellement, des presses hydrauliques sont utilisées, pour fournir de grandes forces de retenue pendant le processus. Ces presses sont habituellement très coûteuses. Parmi les considérations à prendre en compte, durant la sélection des presses d'hydroformage on distingue :

- Une presse de haute ou basse pression ;
- Le type de système de fermeture ;
- Force Maxi de fermeture ;
- Pression interne Maximale ;
- Force axiale Maximale ;
- Prix de la presse ;
- Energie d'utilisation ;
- Facilité d'entretien.



Figure 8–Exemple de presse utilisée en hydroformage.

Chapitre 2

Chapitre 2 : Paramètres Influençant le Retour Élastique en Mise en Forme de Tôles

1. Etude des contraintes et déformation

1.1. Les modes de déformations

Par exemple lors de l'opération de l'emboutissage des tôles minces, le métal a d'abord un comportement élastique, suivant la loi de Hooke :

$$\sigma = E \delta L/L_0 \quad (1)$$

Avec : σ Contrainte,

$\delta L/L_0$: Déformation conventionnelle ;

E : Module d'élasticité ou encore module d'Young.

Voici quelques valeurs du module d'élasticité des métaux :

Matériaux	Module (GPa)
Acier de construction	210
Acier a ressorts	220
Acier inoxydable 18-10	203
Bronze (cuivre+9 à 12% d'étain)	124

Tableau 1 – module d'élasticité des métaux

Au cours de l'opération d'emboutissage des tôles minces, différents modes de sollicitation peuvent apparaître dans certaines zones de l'embouti, conduisant à la formation d'ondulations que nous désignerons généralement sous le nom plis ou à des amincissements conduisant à la rupture [14]. Ces capacités de déformation peuvent différer fortement d'un mode à l'autre (Figure9).

Le Tableau suivant illustre, les différents modes de déformations :

Mode de chargement	Déformations	Contraintes
Expansion bi axiale	$\varepsilon_1 > 0$ et $\varepsilon_2 > 0$ et $\varepsilon_3 = 0$	$\sigma_1 > 0$ et $\sigma_3 = 0$ et $\sigma_2 > 0$
Déformation plane	$\varepsilon_1 > 0$ et $\varepsilon_2 = 0$ et $\varepsilon_3 < 0$	$\sigma_1 > 0$ et $\sigma_3 = 0$ et $\sigma_2 > 0$
Traction uni axiale	$\varepsilon_1 > 0$ et $\varepsilon_2 < 0$ et $\varepsilon_3 < 0$	$\sigma_1 > 0$ et $\sigma_3 = 0$ et $\sigma_2 = 0$
Cisaillement pur	$\varepsilon_1 > 0$ et $\varepsilon_2 < 0$ et $\varepsilon_3 = 0$	$\sigma_1 > 0$ et $\sigma_3 = 0$ et $\sigma_2 < 0$
Rétreint	$\varepsilon_1 > 0$ et $\varepsilon_2 < 0$ et $\varepsilon_3 \neq 0$	$\sigma_1 > 0$ et $\sigma_3 = 0$ et $\sigma_2 < 0$
Pliage sous tension	$\varepsilon_1 = -\varepsilon_3$ et $\varepsilon_2 = 0$	$\sigma_1 > 0$ et $\sigma_3 > 0$ et $\sigma_2 = 0$

Tableau 2 –Modes de déformation d’emboutissage [21].

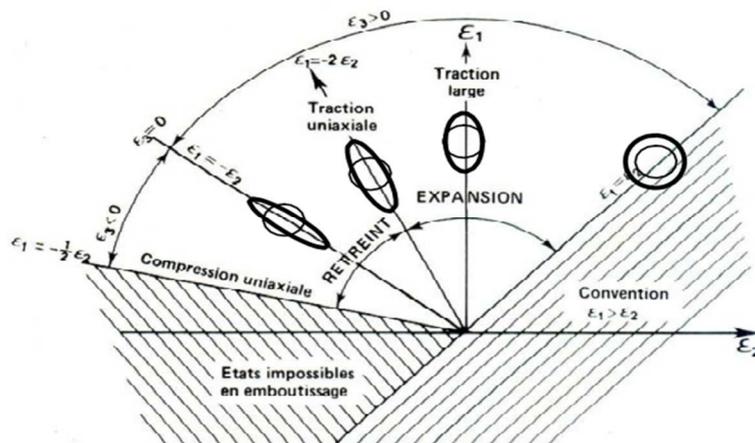


Figure 9– Différents Modes de déformations [21].

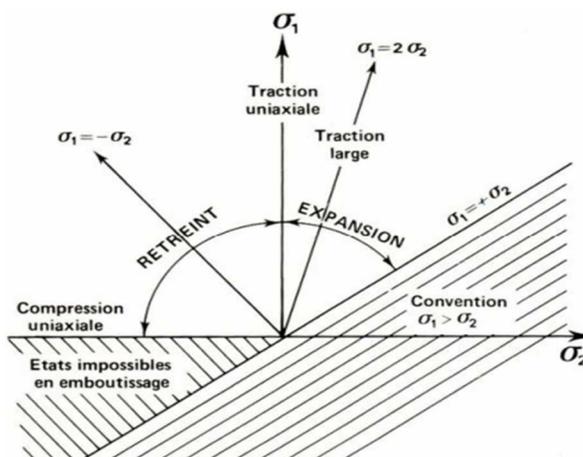


Figure 10– Différents Modes de contraintes [21].

Avec : ε est la déformation vraie ou rationnelle (ou encore logarithmique)

$$\varepsilon = \ln (L/L_0) \quad (2)$$

La loi de conservation de volume pendant la déformation plastique

$$\varepsilon_1 + \varepsilon_2 = -\varepsilon_3 \quad (3)$$

Avec : ε_1 est la déformation principale (suivant la direction de laminage).

ε_2 est la déformation principale suivant la largeur ;

ε_3 est la déformation principale suivant l'épaisseur.

1.2. Coefficient d'anisotropie

Ce coefficient dépend des orientations des cristaux de Fer dans la texture de la tôle suivant les trois directions.

Le plus utilisé est le coefficient de Lankford, il est défini comme étant la variation de la largeur par rapport à l'épaisseur.

$$r = \varepsilon_2 / \varepsilon_3 \quad (4)$$

Si la valeur de r est grande, on déduit que l'amincissement ou l'épaississement de la tôle est limité.

Il existe une anisotropie suivant le plan de la tôle, elle est caractérisé par un autre coefficient moyen d'anisotropie r' tel que :

$$r' = (r_0 + r_{\pi/2} + 2 r_{\pi/4}) / 4 \quad (5)$$

Avec :

r_0 est le coefficient d'anisotropie suivant la direction de laminage ;

$r_{\pi/2}$ Coefficient d'anisotropie suivant la direction de la largeur ;

$r_{\pi/4}$ Coefficient d'anisotropie suivant la direction $\pi/4$.

1.3. Lois constitutives

L'essai de traction rationnel délivre des informations réelles (appelé true stress ou true strain en anglais). L'intérêt est bien sûr d'en déduire des lois permettant de modéliser facilement le comportement d'un matériau.

Les lois les plus utilisées sont :

- La loi de Hollomon :

$$\sigma = K \varepsilon^n \quad (6)$$

- Ludwik :

$$\sigma = \sigma_0 + K \varepsilon^n \quad (7)$$

- Kupkrowski ou Swift :

$$\sigma = K (\varepsilon_0 + \varepsilon)^n \quad (8)$$

Pour les aciers doux, la loi de Hollomon est la plus généralement employée.

Avec : K Consistance (avec la même dimension d'une contrainte).

n Coefficient d'écroutissage.

La valeur de n varie entre 0.1 et 0.28 pour la plupart des aciers d'emboutissage.

1.4. Courbes limite de formage (CLF)

Une prédiction quantitative de la réussite d'emboutis en tôles minces, basée sur la notion de courbe limite de formage (CLF), est apparue en 1965 à travers les travaux de Keeler [13]. Puis complétée en 1968 par Goodwin [12]. L'emboutisseur peut grâce à elle connaître la nature des modes de déformation dans les différentes régions de la pièce (figure 8).

Les courbes limites de formage sont tracées sur des diagrammes $\varepsilon_1/\varepsilon_2$ ou :

- ε_1 est la déformation principale maximale (plus grande en valeur algébrique, elle détermine alors la direction principale de déformation) en ordonnée.
- ε_2 est la déformation principale minimale en abscisse

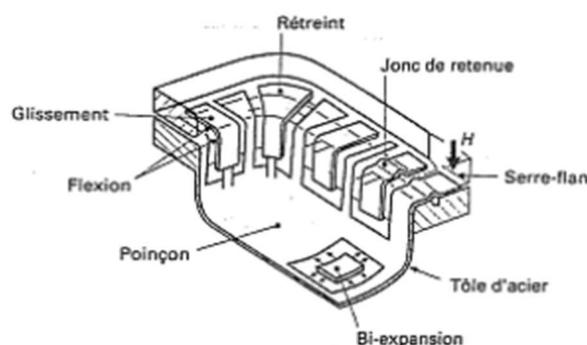


Figure 11–Les modes de déformations de la tôle.

Les CLF sont très intéressantes pour les emboutisseurs, car le plan ($\varepsilon_1, \varepsilon_2$) est séparé en deux domaines :

- le domaine situé au-dessus de la courbe, qui correspond à la rupture des emboutis.

– le domaine situe en dessous, qui correspond à la réussite des emboutis.

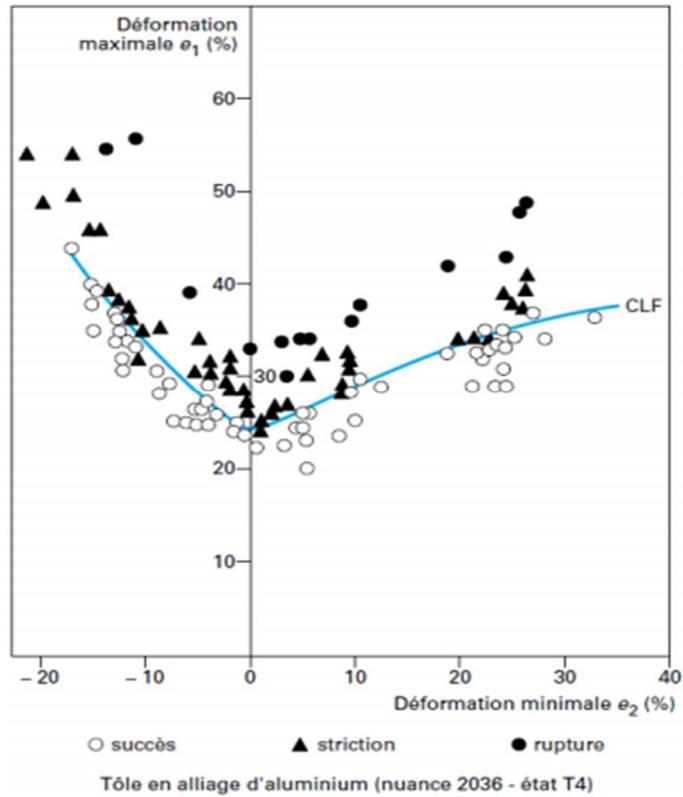


Figure 12 – Courbe limite de formage selon la méthode Hecker.

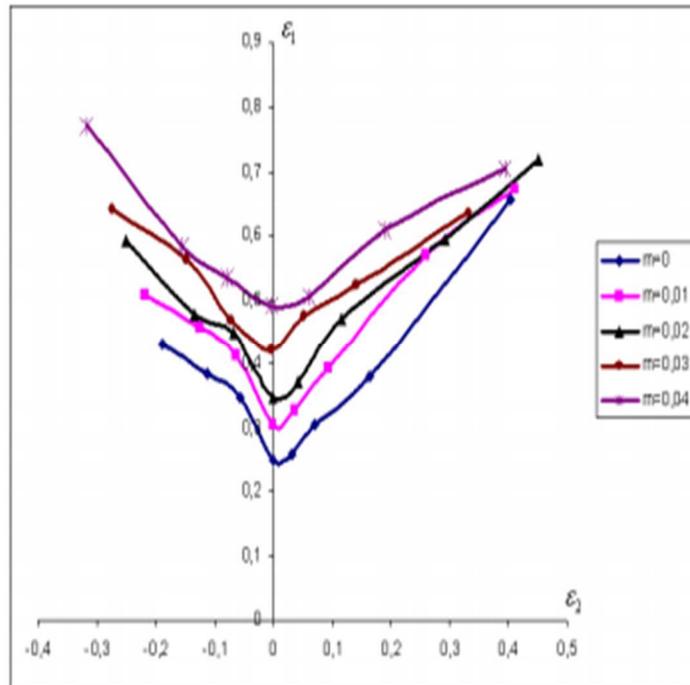


Figure 13– Courbe limite de formage numériques.

2. Le retour élastique

2.1. Définition

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

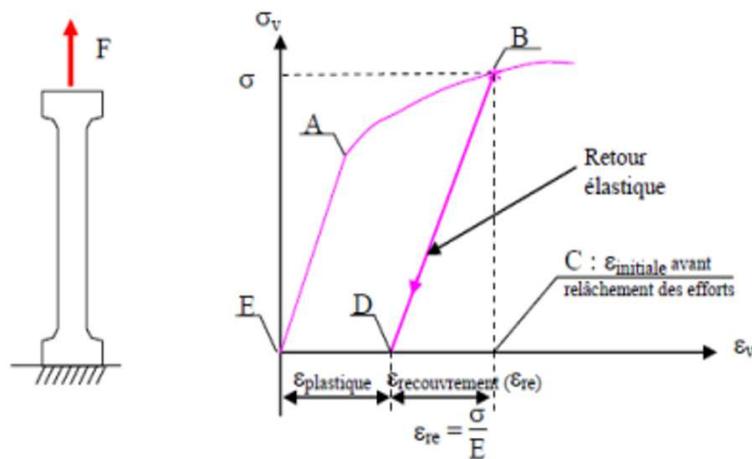


Figure 14 –Le retour élastique lors d'étirage.

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.

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.

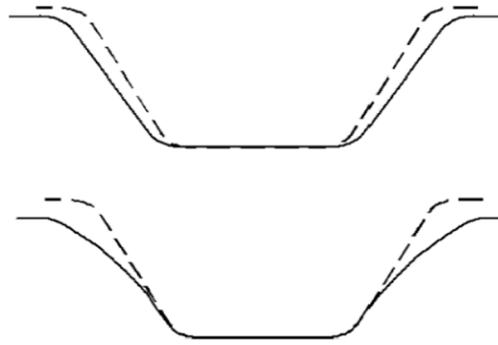


Figure 15 –Deux types principaux de retour élastique.

2.3. Calcul du retour élastique

La compréhension et la prédiction du retour élastique des pièces mise en forme par formage 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) 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. [16].

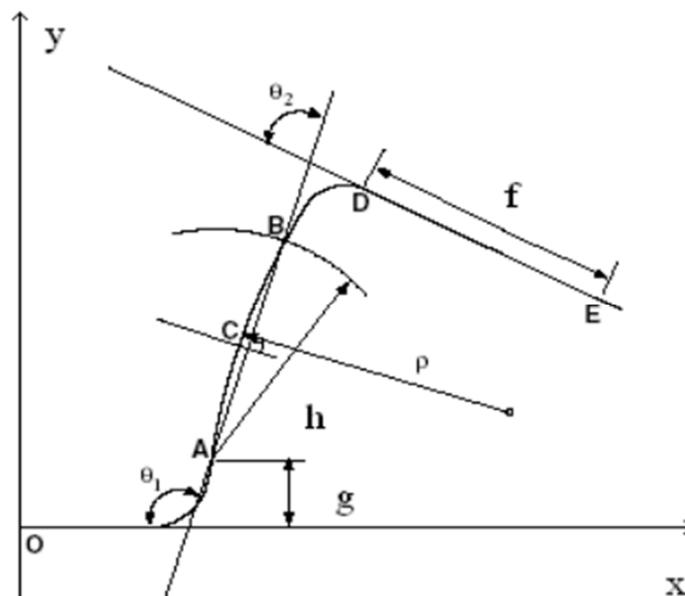


Figure 16 –Paramètres du le retour élastique et la courbure de paroi.

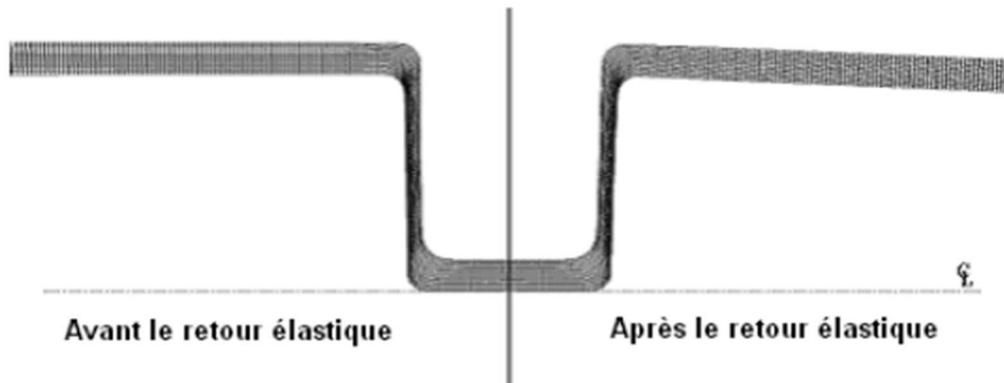


Figure 17 – Comparaison des tôles déformées avant et après du retour élastique.

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 [15].

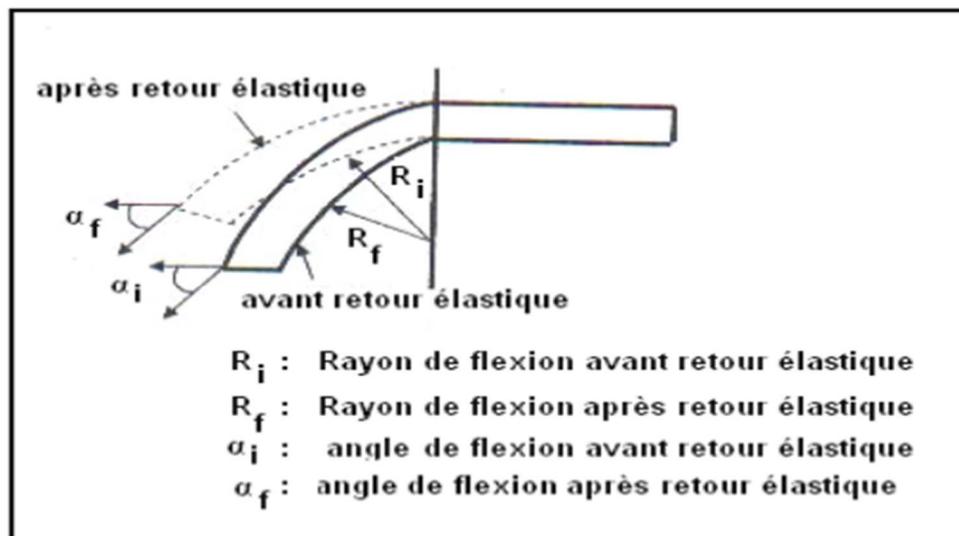


Figure 18–Retour élastique formé près pliage.

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 :

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

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'écroutissage du métal ;
- K : coefficient d'amplitude du métal, (loi d'écroutissage $\delta = K \cdot e^n$) ;
- ν : module de poisson ($\nu = 0.3$ pour l'acier).

Le retour élastique apparaît systématiquement si la zone écroutie 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 [17].

2.4. 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.[19]. Dans la pratique la compréhension des caractéristiques paramétriques de la quantité de retour élastique est essentielle pour la conception systématique d'outil [18].

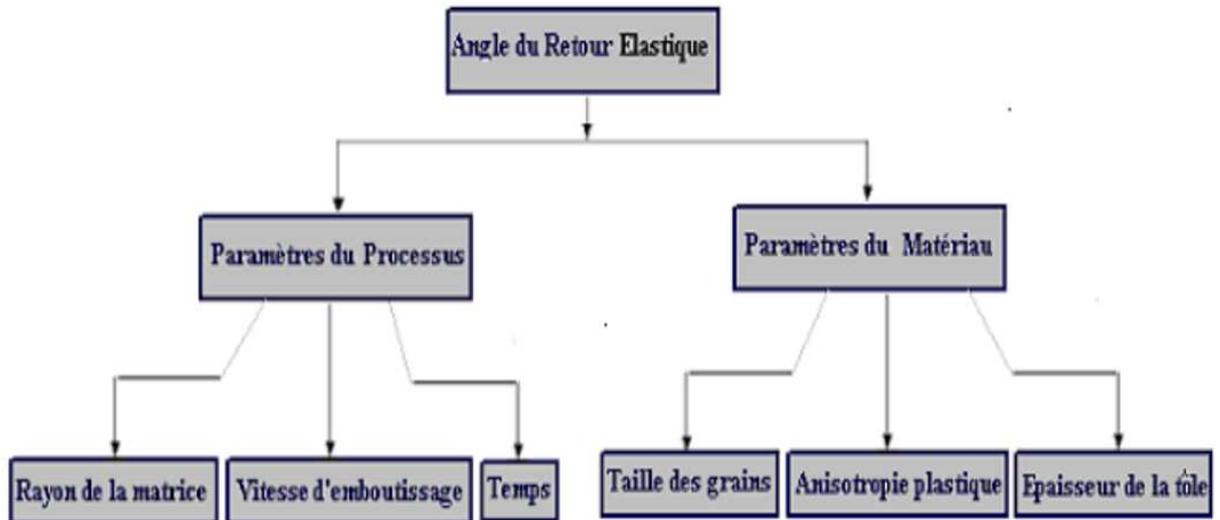


Figure 19 –Schéma illustrant paramètres influençant le retour élastique.

Chapitre 3

Chapitre 3 : Simulation numérique du retour élastique en mise en forme de tôles

1. Présentation du logiciel ABAQUS

1.1. Les logiciels sur le marché

Il faut savoir que les logiciels de conception et de calculs assistés par ordinateur sont très nombreux sur le marché. Les plus utilisés sont Patron- Nastran, Ansys, Catia, ABAQUS et Solidworks. Tous ces logiciels effectuent les mêmes tâches, c'est-à-dire qu'ils génèrent des structures, ses caractéristiques et celles du problème étudié, ensuite ils calculent le devenir de cette structure (déformations, rupture, plastification...) et enfin ils permettent de traiter ces résultats afin d'en sortir des données utilisables et exploitables.

La plupart des entreprises utilisent un assortiment de ces logiciels qui sont plus ou moins performants dans l'une ou l'autre de ces tâches, par exemple, dessiner avec Catia, calculer avec ABAQUS et faire du post traitement avec Nastran. Il vous sera donc certainement demandé dans le monde de l'entreprise une maîtrise de plusieurs de ces outils, d'où l'intérêt de commencer avec ABAQUS.

1.2. Les caractéristiques du logiciel ABAQUS

ABAQUS a été développé par Hibbit, Karlsson & Sorensen (HKS) (devenue ABAQUS, Inc depuis) depuis 30 ans et le début de la théorie des éléments finis et a fait à mesure pour intégrer toutes les nouveautés de la théorie et des besoins de l'entreprise, jusqu'à ce que l'entreprise soit rachetée par Dassault industries en Octobre de l'année 2005.

ABAQUS est avant tout un logiciel de simulation par éléments finis de problèmes très variés en mécanique. Il est connu et répandu, en particulier pour ses traitements performants de problèmes non-linéaires. Il se compose de trois produits : ABAQUS/Standard, ABAQUS/Explicit et ABAQUS/CAE.

- **ABAQUS/Standard** et un solveur généraliste qui recourt à un schéma traditionnel d'intégration implicite.
- Le solveur **ABAQUS/Explicit** emploie un schéma d'intégration explicite pour résoudre des problèmes dynamiques ou quasi-statiques non –linéaires.
- **ABAQUS/CAE** constitue une interface intégrée de visualisation et de modélisation pour lesdits solveurs.

1.3. Fonctionnement du code ABAQUS

Le cœur du logiciel ABAQUS est donc ce qu'on pourrait appeler son « moteur de calcul ». A partir d'un fichier de données (caractérisé par le suffixe), qui décrit l'ensemble du problème mécanique, le logiciel analyse les données, effectue les simulations demandées, et fournit les résultats dans un fichier ODB (figure19).

Deux tâches restent à accomplir : générer le fichier de données et exploiter les résultats contenus dans le fichier ODB. La structure du fichier de données peut se révéler rapidement complexe : elle doit contenir toutes les définitions géométriques, les descriptions des maillages, des matériaux, des chargements, etc., suivant une syntaxe précise. ABAQUS propose le module ABAQUS/CAE, interface graphique qui permet de gérer l'ensemble des opérations liées à la modélisation :

- La génération du fichier de données ;
- Le lancement du calcul proprement dit ;
- L'exploitation des résultats.

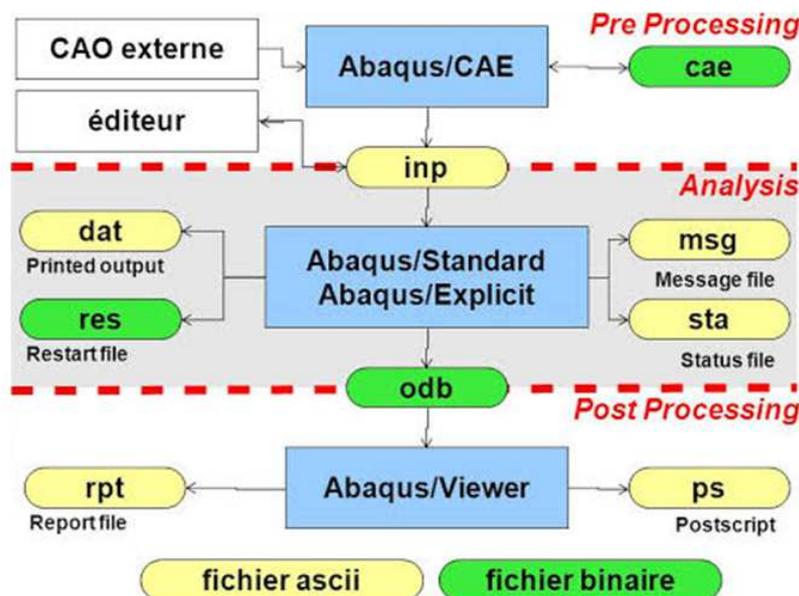


Figure 20- Architecture du code ABAQUS.

2. Applications numériques

Afin de mettre en évidence les performances du programme ABAQUS et pour montrer l'influence de l'application d'une pression fluide par rapport à un outil rigide sur le retour élastique après retrait des outils ainsi la distribution de l'épaisseur de la forme finale (le produit), nous présentons les deux applications numériques suivantes.

2.1. Formage de la tôle circulaire

Ce problème est considéré comme un test standard dans l'industrie de la mise en forme des matériaux. C'est un test qui a été étudié expérimentalement par Gosh et Hecker [20]. Ce test est souvent utilisé pour valider les modèles et les simulations numériques de l'emboutissage. A travers la simulation de ce procédé, nous allons voir l'influence de l'application d'une pression fluide au lieu d'un poinçon rigide.

L'emboutissage hémisphérique consiste à déformer une structure, généralement de forme circulaire, par contact avec un outil (poinçon) de forme hémisphérique.

Sur la Figure 21, on montre la géométrie et les propriétés mécaniques de la structure étudiée. La tôle est de 0.85mm d'épaisseur, de forme circulaire et supposée encadrée sur son contour. Le matériau de la tôle considérée est l'acier désoxydé à l'aluminium supposé satisfaire la relation contrainte déformation élasto-plastique de Ramberg-Osgood :

$$\varepsilon = \sigma/E + (\sigma/K)^n \quad (9)$$

Les principaux paramètres géométriques et matériels sont présentés sur le Tableau 3 :

Propriété		Valeur
Module de Young	E	206.8GPa
Coefficient de Poisson	ν	0.3
Epaisseur initial	h_0	0.85mm
Limite élastique	σ_e	170MPa
Coefficients d'écrouissage	n, K	4.76, 0.510GPa
La densité	ρ	7850Kg/m ³
Coefficient de frottement (Tôle / Outils)	μ	0.275
La course du poinçon	$Z_{Poinçon}$	34.5mm

Tableau 3 – Caractéristiques liées au procédé [21]

Pour des raisons de symétrie, seul l'un demi du profil de la tôle est modélisé par un maillage uniforme de 51 éléments de coque axisymétrique SAX1 du logiciel commerciale ABAQUS. Nous avons considéré 5 points d'intégration de type Simpson dans l'épaisseur.

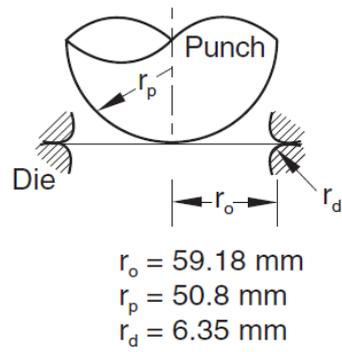


Figure 21 – Configuration et dimensions du poinçon hémisphérique [21]

La Figure (22–A) montre la tôle initiale, la matrice et le poinçon hémisphérique. La Figure (22–B) illustre le profil de la déformée de la tôle avant retrait du poinçon. La Figure (22–C) montre le même système après retour du poinçon, montrant le retour élastique de la tôle.

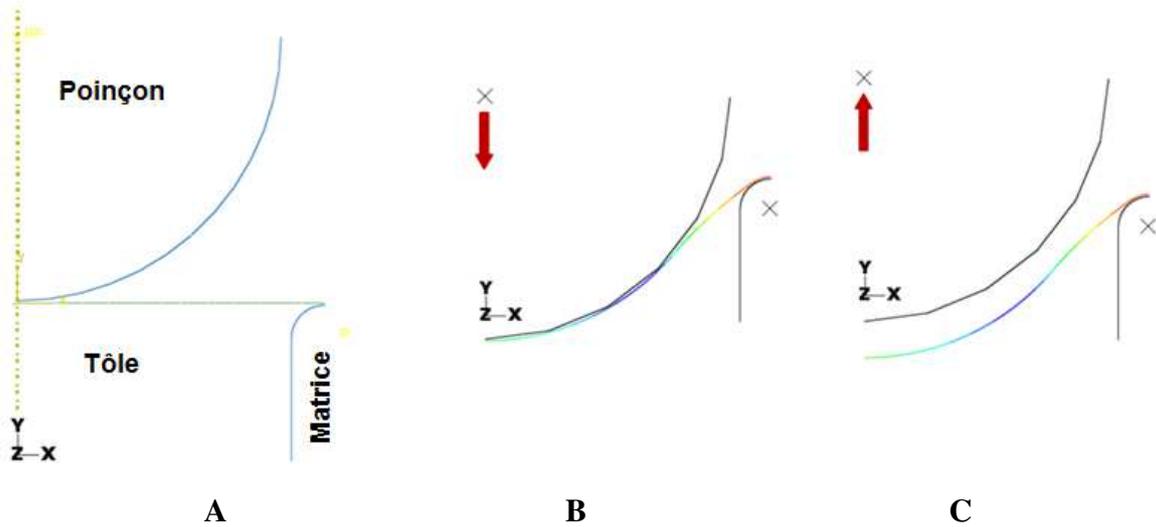


Figure 22–A. Tôle- poinçon, **B.** Fin d’emboutissage, **C.** après retrait du poinçon.

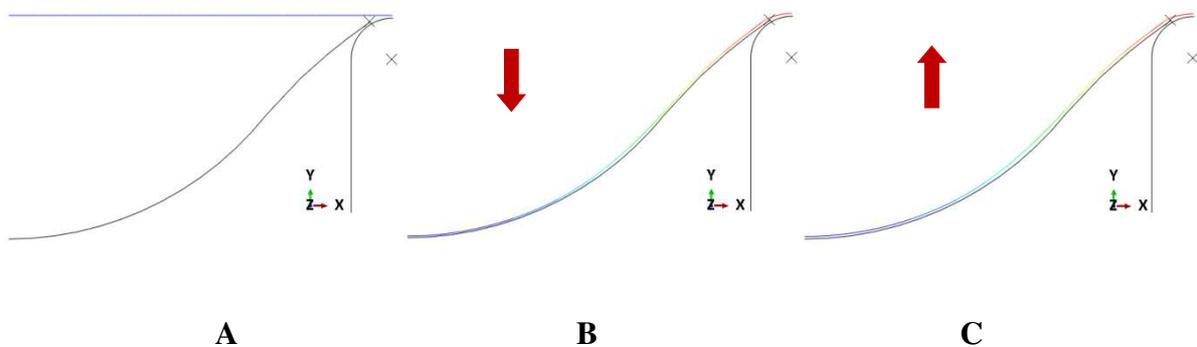


Figure 23–A. Tôle initiale, **B.** Fin d’hydroformage, **C.** Suppression de la pression.

Nous Conservons les mêmes paramètres géométriques et matériels ainsi de fonctionnements du test mais cette fois ci nous remplaçons la force du poinçon par une pression fluide normale à la surface de la tôle d'une valeur maximale de 8MPa.

La Figure (23–A) montre l'état initial avant application de la pression. La Figure (23–B) illustre le profil de la déformée de la tôle avant suppression de la pression. La Figure (23–C) montre le même système après suppression de la pression, montrant le retour élastique de la tôle.

En utilisant le code ABAQUS, les résultats du retour élastique sont illustrés sur la Figure 24.

En emboutissage, l'expansion de la tôle à la fin du procédé d'emboutissage est 34.42mm et après retrait du poinçon devient 34.21mm. Donc la valeur maximale du retour élastique est 0.21mm.

Tandis que nous avons obtenu un déplacement maximal de 34.17mm à la fin de l'hydroformage et 34.1mm après suppression de la pression. Donc, la valeur du retour élastique est 0.07mm qui est faible par rapport le premier cas d'emboutissage.

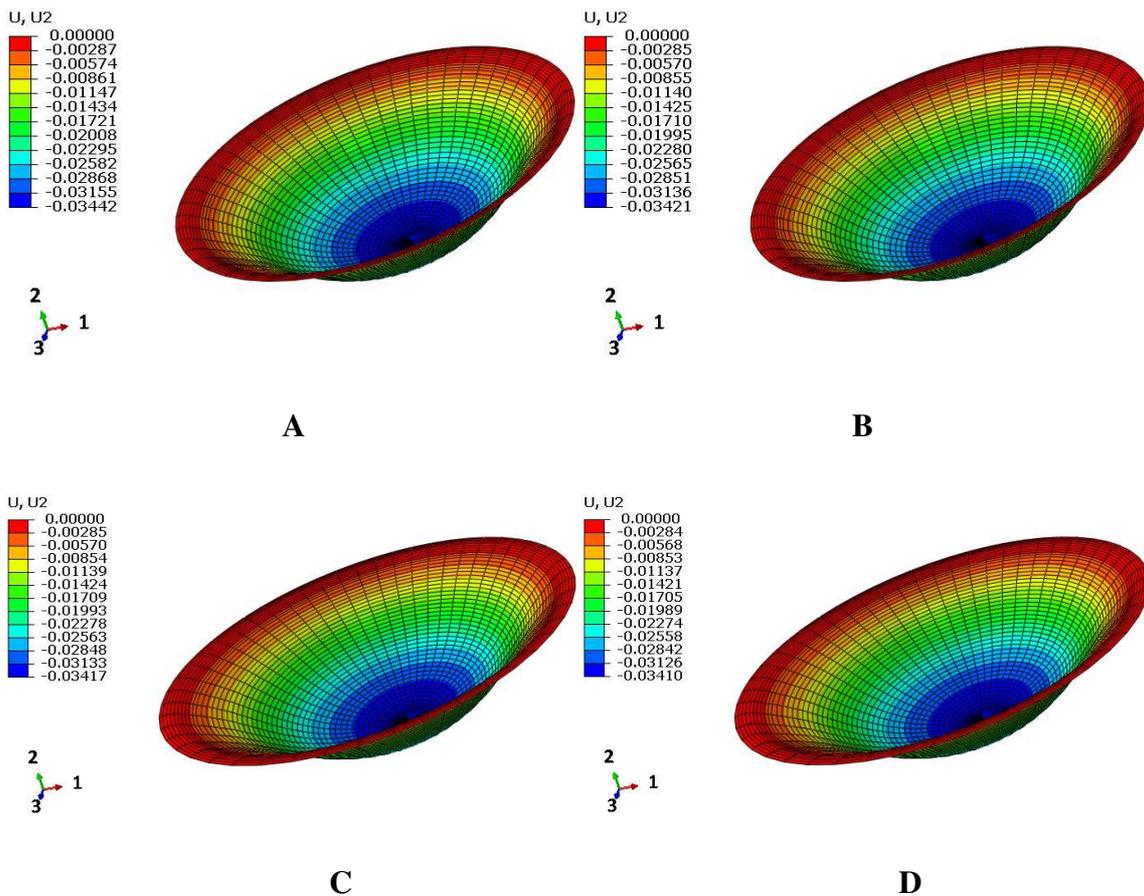


Figure 24–Déplacement longitudinale : **A**- Fin d'emboutissage, **B**-Après retrait du poinçon ; **C**- Fin d'hydroformage, **D**-Après suppression de pression.

2.2. Formage du godet axisymétrique

Comme deuxième application notre choix à été porté sur l'exemple de l'emboutissage du godet axisymétrique. La Figure 25 montre les paramètres géométriques liés aux procédés. La tôle est de 0.82mm d'épaisseur.

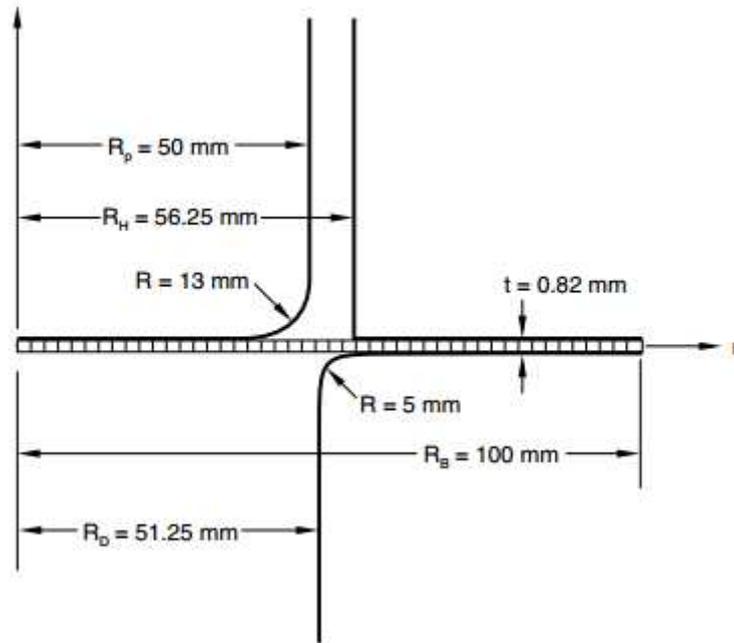


Figure 25 –Description géométrique du godet axisymétrique.

La tôle est de 0.82mm d'épaisseur, de forme circulaire de diamètre initial de 200 mm. Le matériau de la tôle considérée est l'acier désoxydé à l'aluminium supposé satisfaire la relation (la contrainte réel et la déformation logarithmique) élasto-plastique de Ramberg-Osgoo :

$$\varepsilon = (\sigma/K)^{1/n} \quad (10)$$

Les principaux paramètres géométriques et matériels sont présentés sur le Tableau 3 :

Propriété		Valeur
Module de Young	E	211GPa
Coefficient de Poisson	ν	0.3
Epaisseur initial	h_0	0.85mm
Limite élastique	σ_e	91.3MPa
Coefficients d'écrouissage	n, K	0.223, 0.513GPa
Coefficients d'anisotropie	r_{00}, r_{45}, r_{90}	1.79, 1.51, 2.27
La densité	P	7800Kg/m ³
Coefficient de frottement (Tôle / Outils)	μ	0.25
Force de retenue	F	100KN
La course du poinçon	$Z_{Poinçon}$	29mm

Tableau 4 – Caractéristiques géométriques, mécaniques et matérielles.

A l'aide du programme ABAQUS, nous avons modélisé cette forme pour les deux procédés d'emboutissage et d'hydroformage, afin de déterminer les valeurs du retour élastique :

En emboutissage la figure 26 ci-dessous montre la forme de la tôle avant et après l'opération de retrait du poinçon.

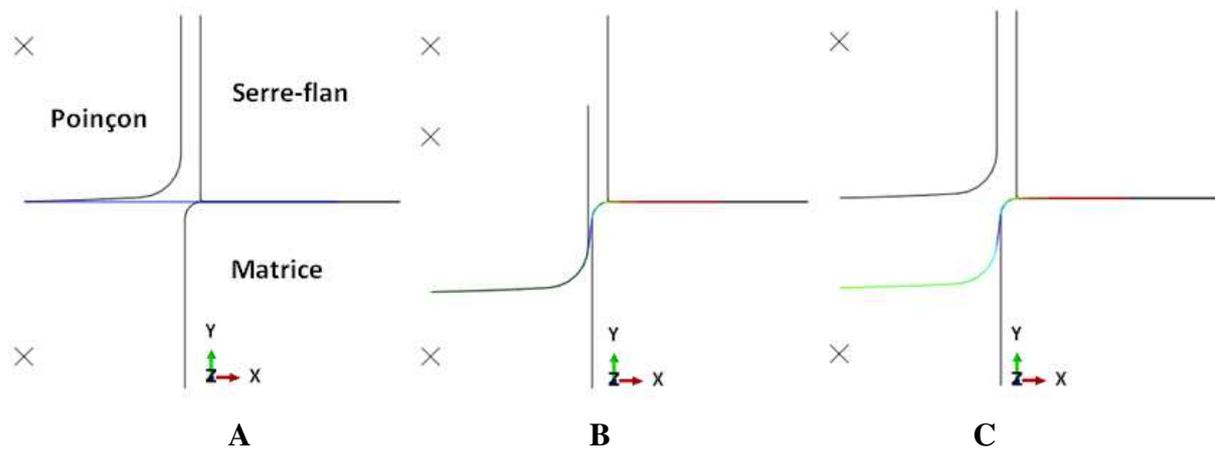


Figure 26 – A. Tôle-Poinçon, B. Fin d'emboutissage, C. après retrait du poinçon.

Avec les mêmes caractéristiques liées à la fabrication, nous effectuons le processus d'hydroformage par remplacement de l'effet du poinçon par une simple pression de 35MPa. La Figure 26 montre les différentes étapes du processus de formage. En utilisant le code ABAQUS, les résultats du retour élastique sont illustrés sur la Figure 27.

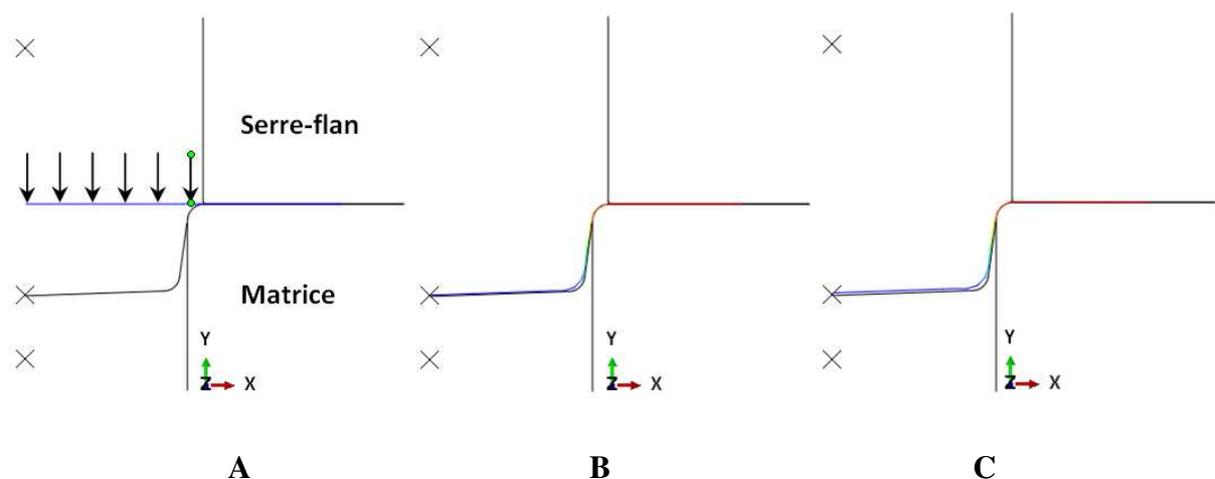


Figure 27 – A. Tôle-pression, B. Fin d'hydroformage, C. après décompression

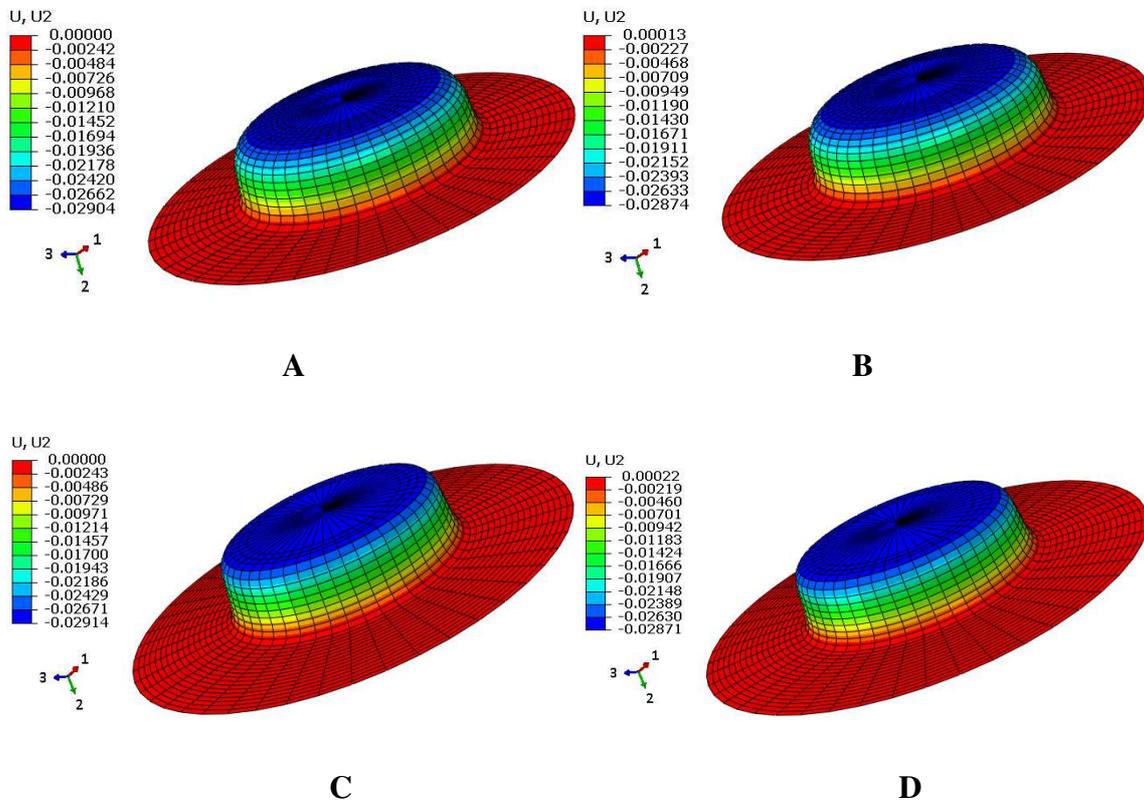


Figure 28–Déplacement longitudinale : **A**- Fin d’emboutissage, **B**-Après retrait du poinçon ; **C**- Fin d’hydroformage, **D**-Après suppression de pression.

Dans le cas de l’emboutissage, l’expansion de la tôle avant retrait du poinçon est 29.04mm. Après retrait des outils, l’expansion devient 28.74mm. Alors la valeur du retour élastique c’est 0.4mm.

Tandis que l’expansion de la tôle en hydroformage, avant la suppression de pression est 29.14mm ; après suppression de la pression l’expansion de tôle devient 28.71mm. Alors, la valeur du retour élastique et 0.43mm.

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans ce travail nous avons abordé la simulation numérique de la mise en forme de tôles par les deux procédés d'hydroformage et d'emboutissage.

Pour la simulation, notre choix a été porté sur le logiciel commercial ABAQUS en raison de sa fiabilité dans le domaine de mise en forme.

L'objectif essentiel de ce travail est de mettre en évidence l'influence de l'application d'une pression fluide par rapport à l'action d'un outil rigide pendant le formage sur le retour élastique de la structure après retrait des outils ou la suppression de la pression selon le cas.

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques

- [1] Yann Ledoux, thèse de doctorat « Optimisation des procédés d'emboutissage par caractérisation géométrique et essais numériques », 2005.
- [2] Zaoui Miloud, thèse de doctorat « La recherche d'un matériau économique pour la réalisation des outils d'emboutissage pour la mise en forme des tôles minces », 2018.
- [3] Decultot Nicolas, « Formage incrémental de tôle d'aluminium, étude du procédé à l'aide de la mesure de champs et identification de modèles de comportement » thèse de doctorat de l'université de Toulouse le 10 décembre 2009
- [4] B. Wassilief, « Emboutissage, Règles principales, Calcul ». Edition Dunod, Paris 3^{ème} édition, 1970.
- [5] "premier brevet HF", Consulté le 17 juillet, 2012.
- [6] Brevet américain, 2 713 314
- [7] Hatipoglu, H. Ali; Polat, Naki ; Köksal, Arif ; Tekkaya, A. Erman, (1er janvier 2007). "Modélisation du processus de Flexforming (FluidCellForming) avec la méthode des éléments finis". *Matériaux d'ingénierie clés*. 344 : 469-476. doi : 10.4028/www.scientific.net/KEM.344.469. S2CID 137151717
- [8] Strano, M, (2006). « Optimisation sous incertitude des processus de formage de tôles par la méthode des éléments finis ». Actes de l'Institution of Mechanical Engineers, partie B: Journal of Engineering Manufacture. 220 (8) : 1305-1315. doi : 10.1243/09544054JEM480 . S2CID 108843522.
- [9] Dachang, Kang ; Yu, Chen ; Yongchao, Xu, (2005). « Emboutissage profond hydromécanique de coupelles en superalliage ». *Journal de la technologie de traitement des matériaux*. 166 (2) : 243-246. doi : 10.1016/j.jmatprotec.2004.08.024
- [10] OH S.I., JEON B. H., KIM H. Y., and YANG J. B., « Applications of hydroforming processes to automobile parts », *Journal of Materials Processing Technology*, 174: 42–55, 2006.
- [11] Ben Tahar, M, (2005), Contribution à l'étude et la simulation du procédé d'hydroformage. Thèse de Doctorat, l'Ecole des Mines de Paris, France

- [12] Goodwin, “Application of the strain analysis to sheet metal forming problem in the process shop”. La metallurgia Italian n°8, 1968.
- [13] Keeler, “Determining of forming limits in automotive stamping”. Metals Industries, 1965.
- [14] C. Alain, «Emboutissage des tôles Aspect mécanique». Techniques de l’ingénieur, BM 7 511.
- [15] 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.
- [16] 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 non-quadratic anisotropic yield functions”. Part II: Characterization of material properties. Int. J. of Plasticity 21, 883-914. 2005.
- [17] H.B. Mullan 2004, “Improved prediction of springback on final formed components”, Journal of Materials Processing Technology, Vol.153-154, pp. 464-471.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] A. Gosh et S. S. Hecker, « Failure in thin sheets stretched over rigid punches », Metallurgical Transactions6, A, pp.: 1065-1074, 1975.
- [21] Mourad chaabi, (2013), optimisation des paramètres du retour élastique en emboutissage de tôles minces. Thèse de master, Université de Biskra, Algérie .

الملخص:

التشكيل الهيدروليكي والتشكيل بالختم هما من الطرق المستخدمة في تشكيل الصفائح المعدنية حيث المحاكات الرقمية تلعب دورا هاما في مرحلة الدراسة الأولية للقطع الصناعية المعقدة كما هو الحال في إمكانية التشكيل.

هذا العمل يركز على المحاكات بواسطة البرنامج العددي **ABAQUS** لأجل تشكيل الصفائح المعدنية عن طريق التشكيل الهيدروليكي والتشكيل بالختم. حاولنا صياغة مسألة الرجوع المرن وحلها لأجل إيجاد أهم المعطيات الهندسية والمادية والتي تؤدي إلى الحصول على أفضل شكل نهائي للمنتوج .

الكلمات المفتاحية: **ABAQUS**، الرجوع المرن، التشكيل الهيدروليكي، التشكيل بالختم.

RESUME :

L'hydroformage et l'emboutissage ce sont deux procédés de mise en forme, ou la modélisation numérique joue un rôle important dans la conception de pièces industrielles complexes, ceci aussi bien au niveau de l'avant-projet qu'au niveau vérification de la faisabilité du produit.

Ce travail est consacré à la simulation numérique des deux procédés d'hydroformage et d'emboutissage de tôles à l'aide du logiciel commercial **ABAQUS**. Nous avons formulé et résolu le problème du retour élastique pour déterminer les meilleurs paramètres géométriques et matériels donnant la meilleure formabilité de la tôle.

Mots-Clés : ABAQUS, retour élastique, Hydroformage, Emboutissage.

ABSTRACT:

Hydroforming and stamping are one of the processes where numerical modeling plays an important role in the design of complex industrial parts, both at the preliminary design and for the product feasibility.

This works is devoted to the numerical simulation of the sheet metal by hydroforming and stamping process using the commercial software **ABAQUS**. We have formulated and solved a spring-back problem to determine the best geometric and material parameters giving the best formability of the sheet.

Keywords: ABAQUS, Spring-back, Hydroforming, stamping.