

République Algérienne démocratique et populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
Centre universitaire Belhadj Bouchaïb d'Ain Temouchent
Institut des sciences et de la technologie
Département de Génie Mécanique



Mémoire pour l'Obtention du Diplôme de Master

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Mécanique et Energétique

Thème :

**Calcul d'emboutissage d'une structure
axisymétrique**

Présenté en Juin 2015 par :

M^r : AID Mohamed Chemseddine.

M^r : BENTALEB Youcef.

Devant le Jury composé de :

M^r :	Abdelkader ZIADI	Président.
M^{me} :	Farida BOUAFIA	Examinatrice.
M^{me} :	Bourassia BENSAAD	Encadrante.

□ Je dédie ce mémoire à...

Mon très cher père

Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour,
Le dévouement et le respect que j'ai toujours eu pour vous.
.Ce travail est le fruit de tes sacrifices que tu as
Consentis pour mon éducation et ma formation.

Ma très chère mère

Honorable, aimable : Tu représentes pour moi le
Symbole de la bonté par excellence.
Aucune dédicace ne saurait être assez éloquente pour
Exprimer ce que tu mérites pour tous les sacrifices que tu
n'as

Cessé de me donner depuis ma naissance, durant mon
enfance et même à l'âge adulte.

Je te dédie ce travail en témoignage de mon profond
Amour. Puisse Dieu, le tout puissant, te préserver et
T'accorder santé, longue vie et bonheur.

Dédicace special a Baghded et Mohamed et djamila

Mes frère mes sœurs mes tentes et a toute ma grande famille

A mes chères ami (e)s

Mon binome; AID Mohamed Chemsseddine

BENTALEB Youcef

Remerciement

Avant tous, nous remercions dieu le tout puissant pour ce qu'il nous à donné le long durée de notre vie, de nous accorder courage et volonté pour réalisé nos rêves.

Nous tenons à présenter nos chaleureux remerciement et profonde gratitude à notre encadreur pour son aide, son soutien et son orientation pour l'elaboration et la finalisation de ce travail :

D^r Bourassia. BENSSAD .

Nos vifs remerciement sont adressés aussi au :

Et trois docteurs de Génie Mécanique « ZIADI Abdelkader & AOUDAD Wahid, BOUAFIA Farida »

Département de génie mécanique

Et également dédiées à tous ceux qui nous ont aidés de prés ou de loin.

Lise des figures

Chapitre 01:

[30] Figure 1 : laminage.	8
[6] Figure 2 : Principe du tréfilage.	8
[2] Figure 3 : filage.	9
[2] Figure 4 : Une pièce de métal fritté.	9
[31] Figure 5: Les différents procédés de mise en forme et de fabrications des matériaux.	10
[32] Figure 6 : Schéma de principe d'élaboration par emboutissage.	11
[17] Figure 7 : Le procédé d'emboutissage en chiffres.	12
[8] Figure 8 : Procédé d'emboutissage avec freinage de la tôle sous serre-flan.	12
[11] Figure 9 : Principaux types de la déformation par emboutissage.	13
[11] Figure 10 : emboutissage mixte.	13
[20] Figure 11 : La préparation de l'emboutissage.	13
[20] Figure 12 : Le serrage du flan.	14
[20] Figure 13 : L'emboutissage proprement dit.	14
[20] Figure 14 : L'enlèvement du poinçon puis du serre-flan.	14
[16] Figure 15 : L'emboutissage « renversé ».	15
[33] Figure 16 : Déformation conique.	16
[16] Figure 17. Emboutissage de pièce demi sphérique.	16
[20] Figure 18 : pièces de sécurité dans un châssis envisageables en Usinor 1500.	17
[19] Figure 19 : Schéma d'un essai d'expansion.	18
[19] Figure 20 : Éprouvette de traction plane.	18
[19] Figure 21 : Mouvements du métal d'un godet.	19
[19] Figure 22 : Éprouvettes de cisaillement.	19
[19] Figure 23 : Fonctionnement d'une presse simple effet.	21
[19] Figure 24 : Fonctionnement d'une presse double effet.	21
[19] Figure 25 : Presse triple effet.	21
[19] Figure 26 : Une presse mécanique.	23
[16] Figure 27 : Presse à col de cygne et presse à arcade.	24
[16] Figure 28 : Traction biaxiale.	25
[16] Figure 29 : compression.	25
[9] Figure 30 : Modes de déformation.	26
[34] Figure 31 : Exemple d'ouverture d'une pièce en U après retour élastique.	26

Chapitre 02:

[24] Figure 32 : Opération d'emboutissage.....	31
[24] Figure 33 : Diagramme de la force.....	34
[7] Figure 34 : Rapport d'emboutissage β en fonction de la force de serre-flan.....	36
20[] Figure35 : pression serre-flan.	37
[20] Figure 36. : Graphique serre-flancs.	37
[20] Figure 37 : Limites d'élasticité.....	41
[17] Figure 38 : Courbe limite de formage pour différents domaines.....	42
[17] Figure 39 : Etats de contrainte et de déformation d'un élément fini de tôle mince.....	43
[24] Figure40 : Mode de déformation.	43
24[] Figure 41 : Les zones d'emboutissage.....	44
[26] Figure 42 : direction des forces.	46
[20] Figure 43 : Coefficient de Lankford.	48
[24] Figure 44 : Anisotropie.....	48
[24] Figure 45 : exemple plis.	50
[24] Figure 46 : Emboutissage profond hydromécanique.....	51
[24] Figure 47 : Schéma d'une rupture.	51

Chapitre 03:

Figure 48 : Logo ANSYS.....	58
Figure 49 : Logo.ABAQUS	59
Figure 50: Emboutissage d'une tôle axisymétrique.	59
Figure 51 : Construction de modèle.	60
Figure 52 : Création du PATH.	60
Figure 53 : distribution des contrainte de Von Misses avec la structure déformer.	61
Figure 54 : courbes déplacement on fonction de la distance.....	61
Figure 55 : courbes contrainte en fonction de la distance.	62
Figure 56 : distribution des pressions de contact.....	62
Figure 57 : distribution des contraintes suivant le PATH.	63
Figure 58 : courbes contrainte équivalente en fonction de la distance.....	63

Lise des Tableaux

Chapitre 02:

Tableau 01 : Valeurs typiques	32
Tableau 02 : représenté l'anisotropie et le coefficient LDR	33
Tableau 03 : représente la pression du serre-flan pour chaque matériau	36
Tableau 04 : pour différents types d'acier.....	48
Tableau 05 : Relation formabilité.....	49

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE	2
Chapitre 01 :	
1. Introduction	6
2. Généralités :	
2.1. Mise en forme d'un matériau	7
2.1.1. Le forgeage	7
2.1.2. L'emboutissage	7
2.1.3. Le laminage	7
2.1.4. Le tréfilage	8
2.1.5. Le filage	8
2.1.6. La fonderie	9
2.1.7. Le moulage	9
2.1.8. Le frittage	9
2.2. L'emboutissage :	
2.2.1. Définition	10
2.2.2. Principe	12
2.2.3. Les matières utilisées pour l'emboutissage technique	15
2.2.4. Formes des tôles	15
2.2.5. Les techniques d'emboutissage	16
2.2.6. Les différents types d'emboutissage	17
2.2.7. Les procédés et la technologie de l'emboutissage	20
2.2.8. La nature du moteur	22
2.2.9. Le Bâti	23
2.2.10. Les coulisseaux	24
2.2.11. Les principaux paramètres du procédé	24
2.2.12. Les modes de déformation	25
2.2.13. Le retour élastique	26
2.2.14. L'utilisation et l'application de l'emboutissage	26
2.2.15. Les avantages et les inconvénients de l'emboutissage	27
3. Conclusion	28

Chapitre 02:

1. Introduction	30
2. Calcul de l'opération d'emboutissage :	
2.1. Rapport Limite d'emboutissage et détermination du diamètre initial du flan	31
2.2. Détermination des forces d'emboutissage	33
2.3. Détermination des forces de serrage du serre-flan	35
2.4. Détermination du jeu poinçon-matrice	37
2.5. Détermination du rayon sur la matrice	38
2.6. Détermination du rayon sur le poinçon	38
2.8. Détermination de l'énergie d'emboutissage	39
2.9. Effet du frottement	39
3. Caractérisation et analyse de la déformation en emboutissage	40
3.1. Principe et analyse des déformations	41
3.2. Courbes limite de formage	41
3.3. Critères de caractérisation de déformation	46
3.3.1. Critères combinés	46
3.3.2. Critères rationnels	47
4. Plis	49
5. Ruptures	51
6. La vitesse d'emboutissage	51
7. Conclusion	52

Chapitre 03:

1. Introduction	54
2. Qu'est-ce que la simulation numérique ?	55
3. La simulation virtuelle de la mise en forme des matériaux	56
4. Apport de la simulation numérique à la mise en forme des matériaux	57
5. Eléments finis utilisés dans les simulations numériques de l'emboutissage	57
5.1. Approches bidimensionnelles et approches solides	57
5.2. Approche coque	58
5.3. Approche membrane	58
6. simulation sur ANSYS	58
7. simulation sur Abaqus	59
8. Présentation du problème étudié	59
9. Construction du modèle	60
10. Les résultat	61

10.1. Représentation des contraintes de Von Mises	61
10.2. Force en fonction du déplacement	62
11. Conclusion	64
CONCLUSIONION GENERALE	65
BIBLIOGRAPHIE	67
L'EXIQUES	70

INTRODUCTION GENERALE :

L'objectif premier de la mise en forme des métaux est de conférer à une pièce métallique des dimensions situées dans une fourchette de tolérance donnée. Les principaux procédés de mise en forme des métaux sont apparus progressivement, donnant naissance par la suite à diverses variantes, parfois très nombreuses. Les formes modernes des divers procédés sont le plus souvent apparues récemment pour assurer la production en grande série de pièces à faible coût. On note dans la Figure 5 quatre stades principaux d'émergence des divers procédés.

Dès les débuts de l'élaboration des métaux et alliages métalliques à partir de minerais sont pratiqués, semble-t-il, le moulage à partir de l'état liquide, le forgeage libre à chaud de pièces massives brutes de coulée ou réchauffées et le formage à froid de feuilles métalliques. Il s'agit en effet d'une extension assez naturelle du processus d'élaboration mettant en jeu des moyens simples : des moules, un outil de frappe et un support. Par la suite, il a fallu attendre 1940 pour que les Allemands inventent la forge à froid (extrusion) des aciers pour fabriquer des pièces d'armement en économisant des éléments d'alliage, et 1970 pour que, dans le cadre des politiques d'économie d'énergie, la coulée continue des demiproduits en acier prenne son véritable essor industriel.

Vers les premiers siècles de l'ère chrétienne, apparaissent les procédés d'étirage de fils à travers des plaques percées et d'usinage de pièces à l'aide de burins, forets, limes et scies. Petit à petit, ces procédés mécaniques d'usinage (dits traditionnels) se sont diversifiés en tournage, fraisage, perçage, rectification... procédés pratiqués sur diverses machines-outils spécialisées ; leur mise en œuvre et leurs performances ont considérablement évolué à partir de 1960 avec l'introduction de la commande numérique qui donne naissance, entre autres machines-outils polyvalentes, aux centres d'usinage. Il s'agit des procédés de mise en forme des métaux les plus importants d'un point de vue économique.

À la Renaissance, apparaissent le laminage, devenu depuis, du fait de sa très haute productivité et de sa grande polyvalence, le procédé de mise en forme sans enlèvement de matière le plus important, et le procédé de gravure par eau forte, devenu à l'ère moderne l'usinage chimique. Ce dernier procédé reste toutefois le procédé d'usinage non traditionnel le plus confidentiel, à côté des autres procédés développés à partir de 1945 : électroérosion, usinage électrochimique, au jet d'eau avec et sans abrasif, oxycoupage, avec un faisceau de

lumière laser ou d'électrons, usinage par ultrasons... Ces procédés ont permis, entre autres applications, de résoudre les problèmes d'usinage des matériaux de faible usinabilité mécanique, comme les outils de mise en forme.

Au siècle dernier, apparaîit le filage à chaud des alliages cuivreux rendu possible par la réalisation de presses hydrauliques de fortes capacités. C'est au Français Ségournet que revient le mérite de l'invention, vers 1945, de la lubrification au verre qui rend possible le filage à chaud des aciers et autres alliages de haute dureté.

Dans cette étude on s'intéresse à l'analyse des modes de déformation intervenant lors d'une opération d'emboutissage. On prend l'exemple de déformation d'une tôle métallique 'le flan' prise en sandwich entre une matrice et un poinçon.

Dans l'objectif de bien explorer le monde de la mise en forme par emboutissage, ce mémoire est organisé comme suit :

- Un premier chapitre étalant les généralités sur les différents modes de mise en forme, particulièrement l'opération d'emboutissage.
- Un deuxième chapitre dédié à l'analyse des phénomènes mécaniques intervenant lors de l'emboutissage.
- Un troisième chapitre présentant une étude de cas.
- Le mémoire se termine par une conclusion.

Chapitre I

La mise en forme des matériaux par emboutissage: Généralités

1. Introduction.

2. Généralités.

2.1. Mise en forme d'un matériau.

2.2. L'emboutissage.

3. Conclusion.

1. Introduction :

La conception, la fabrication et la mise au point de pièces ou structures utilisant des matériaux métalliques pour l'industrie vivent actuellement une importante évolution. En effet, le marché, les nouvelles réglementations, la sécurité, les économies d'énergie et la prise en compte du développement durable conduisent dorénavant à une diminution globale du poids des structures et à l'utilisation de nouveaux matériaux métalliques de plus en plus résistants. Cette amélioration des propriétés mécaniques est souvent associée à des microstructures multi phases et des changements de phase peuvent se produire au cours de la déformation. Cette étude concerne le développement d'outils de simulation numérique et expérimentale des procédés de mise en forme des tôles métalliques. En effet, la prédiction numérique des procédés est devenue quasi-incontournable à l'échelle industrielle ; les très nombreux travaux consacrés à l'amélioration des modèles du comportement mécanique des matériaux, des méthodes numériques et des outils de simulation conduisent aujourd'hui à une prédiction fiable mais perfectible du procédé. Les points à améliorer concernent plus particulièrement l'emboutissabilité des nouveaux matériaux, une meilleure prédiction des écarts de géométrie liés au retour élastique des pièces au cours du retrait des outils et la simulation numérique des opérations postérieures à la mise en forme comme le sertissage [1].

2. Généralités :

2.1. Mise en forme d'un matériau :

Les techniques de mise en forme des matériaux ont pour objectif de donner une forme déterminée au matériau tout en lui imposant une certaine microstructure, afin d'obtenir un objet ayant les propriétés souhaitées. C'est un travail qui nécessite de maîtriser parfaitement les paramètres expérimentaux (composition du matériau, température, pression, vitesse de refroidissement, etc.). Les techniques diffèrent selon les matériaux (leur solidité, l'usage, etc.).

De manière générale, la mise en forme des matériaux en métallurgie tient au découpage, formage, soudage et usinage. S'ajoutent à cela différents traitements (traitement thermique...) visant à donner au produit des propriétés particulières. Pour les métaux, les techniques de mise en forme sont citées dans la suite de ce paragraphe [2]:

2.1.1. Le forgeage :

C'est la technique de mise en œuvre la plus ancienne (5 000 ans avant J.-C.), elle consiste à exercer une force sur la matière afin de la former et regroupe aujourd'hui plusieurs méthodes telles que : Consiste à déformer, par choc ou par pressage entre deux outils, une masse métallique rendue malléable par chauffage [3].

2.1.2. L'emboutissage :

Permet d'obtenir, à partir d'une feuille de tôle mince, un objet dont la forme est non développable [2].

2.1.3. Le laminage :

Le laminage est un procédé de transformation par passage du métal entre deux cylindres lisses ou cannelés, tournant en sens inverse ce procédé est illustré dans la figure 1. En raison de ce mouvement de rotation et de la compression générée par les cylindres, il se produit une réduction en continu de l'épaisseur initiale par déformation plastique du métal. Suivant les profils à réaliser le métal chauffé va passer dans une série de plusieurs laminoirs (jusqu'à plus de 30) dans lesquels la section va être progressivement réduite, et la vitesse accélérée (jusqu'à plus de 100m/s en sortie). Cette technique est utilisée pour la réalisation de tôles, poutrelles et fils en très grande quantité [5].

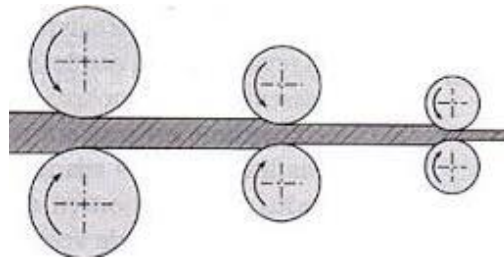


Figure 1 : laminage.

2.1.4 Le tréfilage :

Le tréfilage est une technique de mise en forme à froid des métaux qui permet de réduire la section d'un fil, par déformation plastique, en le tirant à travers l'orifice calibré d'une filière sous l'action d'une force de traction et en présence d'un lubrifiant (figure 2). Cette technique permet d'obtenir des fils de diamètres inférieurs à 5 mm et de s'affranchir ainsi des limites technologique et économique d'un procédé de déformation à chaud, à savoir de respecter des tolérances serrées sur les diamètres et de conférer, éventuellement, des caractéristiques mécaniques adaptées par écrouissage

Les matériaux les plus utilisés dans le cadre d'applications industrielles sont l'acier, le cuivre, l'aluminium et le tungstène. Les applications des produits mis en œuvre par cette technique, qui peuvent être utilisés en l'état, assemblés ou transformés, sont nombreuses : clôtures, armatures pour béton, électrode de soudage, câbles, agrafes, vis et boulons, ressorts, aiguilles, anneaux, boucles et crochets, armatures de pneumatique [6].

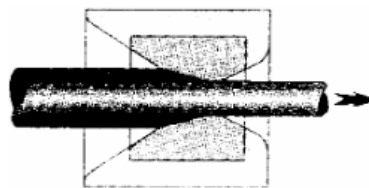


Figure 2 : Principe du tréfilage.

2.1.5. Le filage :

Est une méthode de mise en forme des métaux par compression. Elle consiste à pousser un matériau ductile (éventuellement rendu ductile par chauffage) à travers une filière (figure 3). La poussée permettant la déformation est généralement fournie par des presses hydrauliques.

Cette méthode permet d'obtenir des produits longs qui peuvent être de formes simples (barres, tubes) ou plus compliquées (profilés pour l'aéronautique ou le bâtiment) [2].

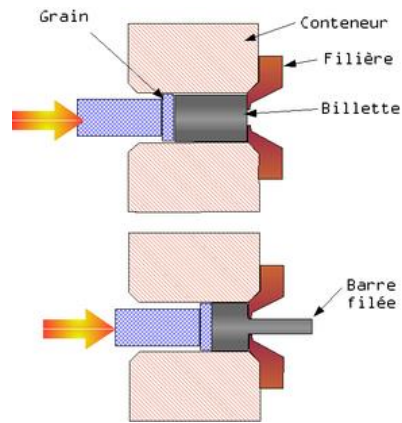


Figure 3 : filage.

2.1.6. La fonderie :

Cette technique consiste à fondre et à couler le métal dans un moule. Le choix du moule est un critère à prendre en compte. Il existe ainsi plusieurs méthodes de **moulage** : moulage sable, moulage coquille et moulage en cire perdue [2].

2.1.7. Le moulage :

Est l'action de prendre une empreinte qui servira ensuite de moule dans lequel sera placé un matériau et qui permettra le tirage ou la production en plusieurs exemplaires d'un modèle. Le moulage consiste donc à placer un matériau (liquide, pâte, poudre, feuille, plaque, paraison, préforme, pastille, etc.) dans un moule dont il prendra la forme. Le **façonnage** à partir d'une ou plusieurs pièces à l'état solide. Cette voie peut, elle-même, se scinder en **formage**, ou mise en forme sans enlèvement de matière, **usinage**, ou mise en forme avec enlèvement de matière, dont les principaux aspects sont présentés dans le volume Usinage du traité Génie mécanique où l'on solidarise deux ou plusieurs pièces selon des procédés présentés dans le volume Travail des matériaux. Assemblage du traité Génie mécanique [2].

2.1.8. Le frittage :

Est un procédé de fabrication de pièces consistant à chauffer une poudre sans la mener jusqu'à la fusion. Sous l'effet de la chaleur, les grains se soudent entre eux, ce qui forme la cohésion de la pièce. Le cas le plus connu est celui de la cuisson des poteries (figure 4) [2].



Figure 4 : Une pièce de métal fritté.

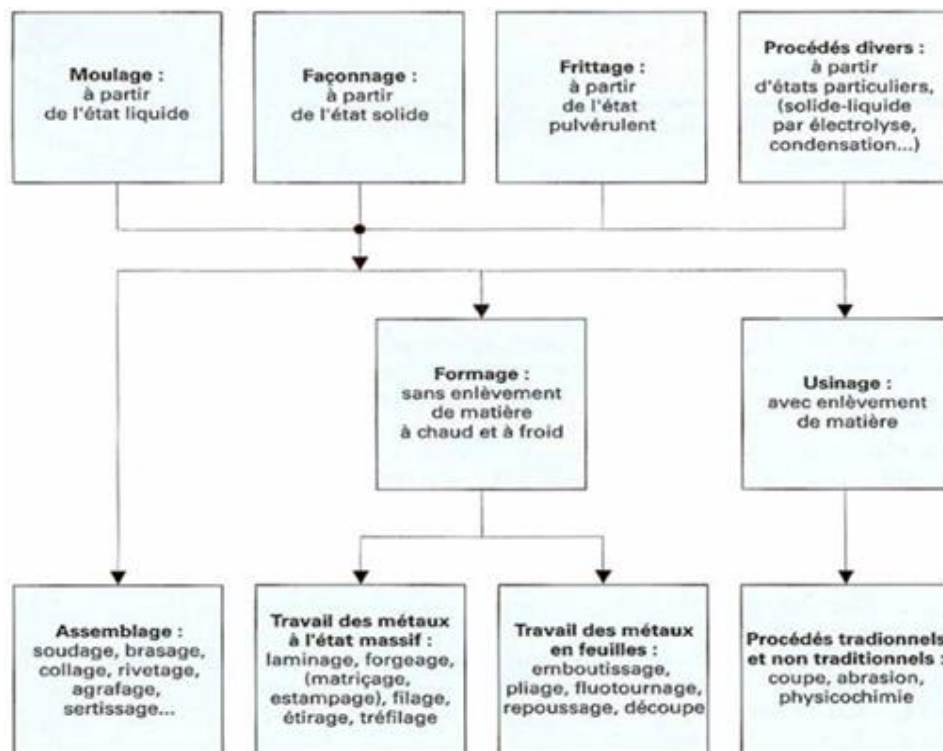


Figure 5: Les différents procédés de mise en forme et de fabrications des matériaux.

2.2. L'emboutissage :

2.2.1. Définition d'emboutissage:

L'emboutissage est un procédé de formage par déformation à chaud ou à froid des métaux visant à transformer une tôle en une pièce plus ou moins creusée de surface non développable. Dans le cas d'emboutissage de tôles minces, cette dernière se présente sous la forme d'une feuille de moins de 3mm d'épaisseur, appelé flan.

- L'emboutissage des tôles est une opération qui est habituellement réalisée sous presse double effet à l'aide d'outillages comprenant (figure 6) :

- Un poinçon : coulissant plus ou moins vite sur l'axe vertical, et déformant la tôle.

- Une matrice : elle serre d'appui à la tôle et lui donne la forme extérieure finale au retour élastique prés.

- Un serre-flan : Son rôle est de maintenir plus ou moins le flan lors d'une opération d'emboutissage afin d'assurer un écoulement homogène du métal et prévenir les risques de plis ou autres défauts d'emboutissage [7].

- D'autres éléments caractérisant le type de presse et dont nous parlerons ultérieurement.

Le métal à emboutir peut se présenter soit sous forme de bobines (alimentation continue), soit sous forme de flans, plaques prédécoupées de contour circulaire ou polygonal la plupart du temps. Au cours de l'opération d'emboutissage, le métal est tout d'abord pincé entre la matrice et le serre-flan puis, lorsque le serrage est effectif, le poinçon descend à l'intérieur de la matrice entraînant ainsi le métal dans sa course et l'obligeant à épouser son contour sous l'effet des tensions engendrées par la retenue du serre-flan [8].

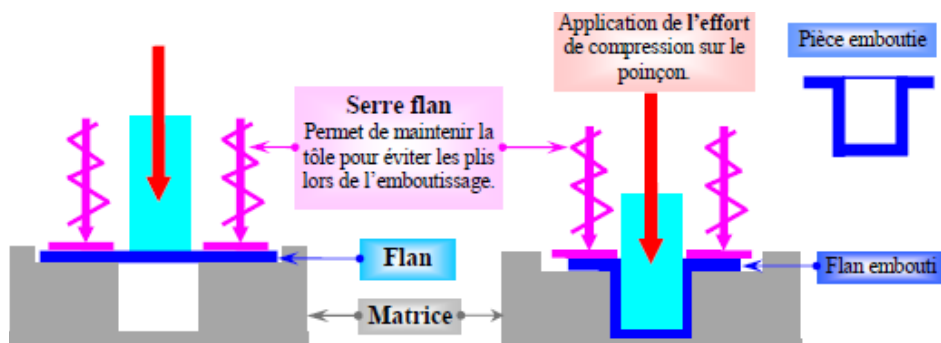
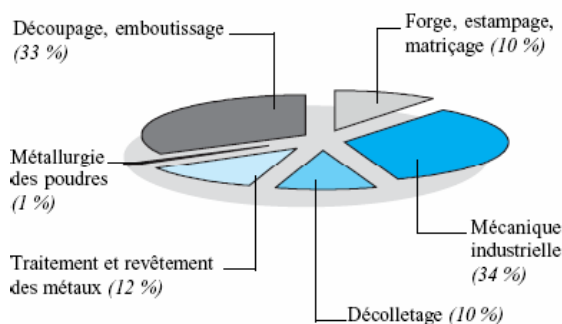


Figure 6 : Schéma de principe d'élaboration par emboutissage.

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 de 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 (figure 7) [9].

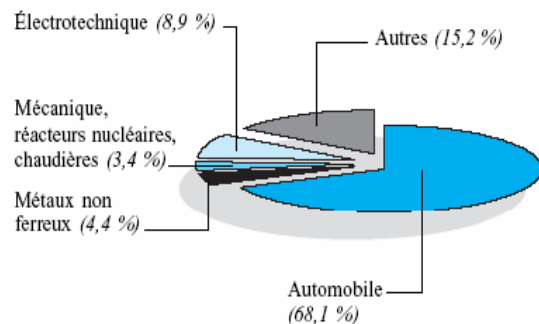
RÉPARTITION DU CHIFFRE D'AFFAIRES DES SERVICES INDUSTRIELS

Facturations : 14 842 millions d'euros



L'AUTOMOBILE : MARCHÉ MAJORITAIRE

Facturations : 4 872 millions d'euros



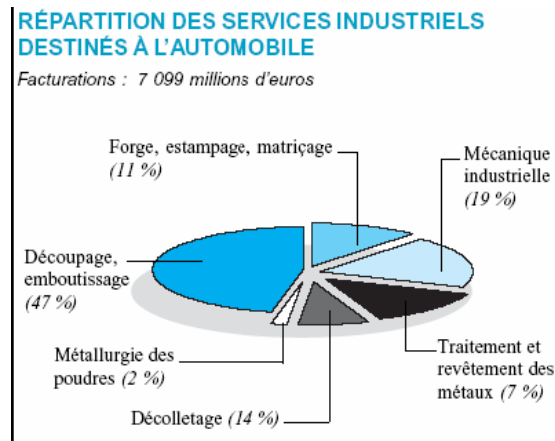


Figure 7 : Le procédé d'emboutissage en chiffres.

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 [9].

2.2.2. Principe :

L'emboutissage consiste à fabriquer, à partir d'un flan plan de faible épaisseur, d'une fraction de millimètre à quelques millimètres, une pièce de forme complexe, non développable en général. Le flan est découpé au préalable dans une tôle laminée dont l'huile de protection, déposée par le lamineur, sert le plus souvent à lubrifier l'emboutissage. L'emboutissage peut comporter une ou plusieurs opérations : dans chacune, le flan ou la pièce de l'opération précédente est préalablement plaqué contre la matrice par le serre-flan avec une certaine force, plus ou moins constante, puis mis en forme par l'avancée du poinçon. (La figure 8) [10].

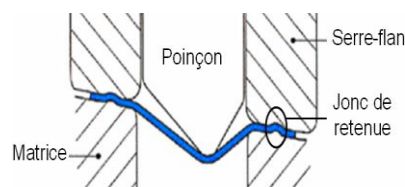


Figure 8 : Procédé d'emboutissage avec freinage de la tôle sous serre-flan.

L'emboutissage impose à la tôle différents modes de déformation dont le but est de conduire à l'obtention d'une surface creuse. Le type d'outillage conditionne les deux cas limites de déformation: l'expansion (Figure 9a) et le retreint (Figure 9b) [11].

Dans le cas de l'emboutissage par expansion, le flan est bloqué sous le serre flan donc l'épaisseur sous le poinçon diminue. Par contre dans le cas de l'emboutissage profond

avec retreint du métal, ce dernier glisse sous le serre-flan, donc l'épaisseur entre serre-flan et matrice diminue et reste constant sous le poinçon [7 - 11].

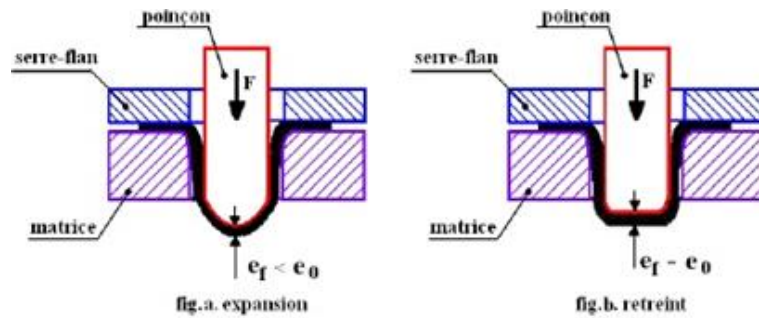


Figure 9 : Principaux types de la déformation par emboutissage.

Remarque :

Dans la plupart des cas, l'emboutissage associé à la fois des composants d'expansion et de rétreint (emboutissage mixte fig.10).

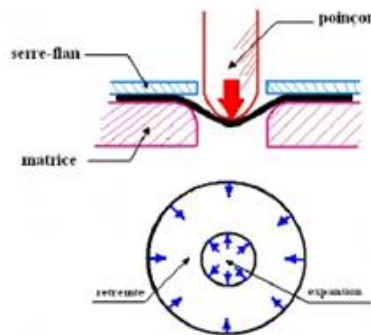


Figure 10 : emboutissage mixte.

A. La préparation :

Le poinçon et le serre-flan sont relevés. La tôle (ou le flan), préalablement graissée, est posée sur la matrice. (Figure 11)[12 – 13 - 21].

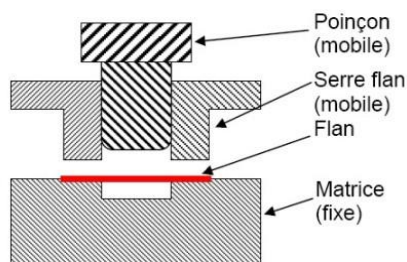


Figure 11 : La préparation de l'emboutissage.

Le serre-flan descend et vient appliquer une pression de serrage afin de maintenir le flan tout en lui permettant de se déformer plastiquement ou plastiquement sous gravité. (Figure 12) [12 - 13 - 21].

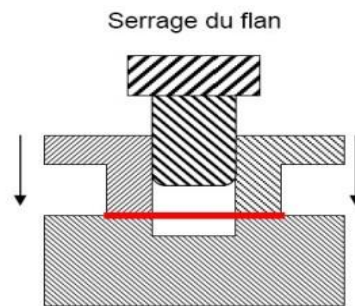


Figure 12 : Le serrage du flan.

B. L'application du chargement :

Le poinçon descend et déforme plastiquement la tôle. (Figure 13) [12 - 13].

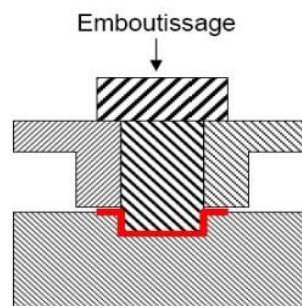


Figure 13 : L'emboutissage proprement dit.

C. Le détournage :

Le poinçon puis le serre-flan se relèvent : la pièce conserve la forme acquise (limite d'élasticité dépassée). On procède au « détournage » de la pièce, c'est-à-dire à l'élimination des parties devenues inutiles, essentiellement les parties saisies par le serre-flan. (Figure 14) [12 - 13].

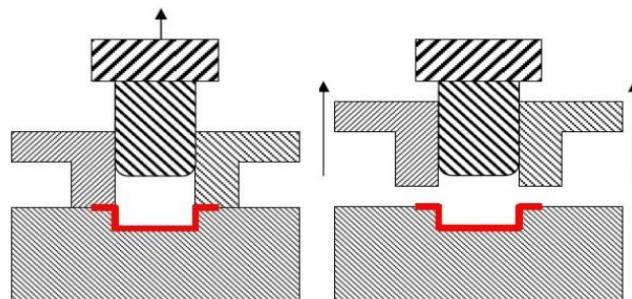


Figure 14 : L'enlèvement du poinçon puis du serre-flan.

2.2.3. Les matières utilisées pour l'emboutissage technique : [14 - 15]

Tous les matériaux disponibles en feuilles et présentant une bonne ductilité à froid sont susceptibles d'être transformés par emboutissage. Par exemple :

- Les cuivres : CuBe₂ ou CuB_{1 9}, Cu-b₁ (Cu-DHP) recuit ou écroui, Cu-a₁ (Cu-ETP) recuit ou écroui...
- Les laitons : CuZn₃₉, CuZn₃₈, CuZn₃₇, CuZn₃₆...
- Les aluminiums : Al_{99,5}...
- Les aciers non alliés : S₂₃₅JR, DC0₃, DC0₁...
- Les aciers pour trempe et revenu : C₄₅ ou C₂₂ ...
- Les inox : 316L (X₂CrNiMo₁₇₋₁₂₋₂), 304L (X₂CrNi₁₉₋₁₁), 304 (X₅CrNi₁₈₋₁₀)...

2.2.4. Formes des tôles :

D'une façon générale, les pièces embouties sont de forme simple telle que cylindrique, conique ou sphérique. Cependant, ces formes simples sont déjà 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 [16 - 9].

A. Forme cylindrique :

La forme cylindrique est 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 (figure 15) [16 - 9].

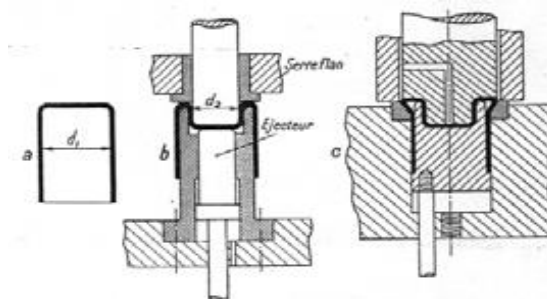


Figure 15 : L'emboutissage « renversé ».

B. Forme conique :

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 à former en une seule passe (figure 16) [16 - 9].



Figure 16 : Déformation conique.

C. Forme demi-sphérique :

L'emboutissage d'une demi-sphère (figure 17) 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 [16-9].

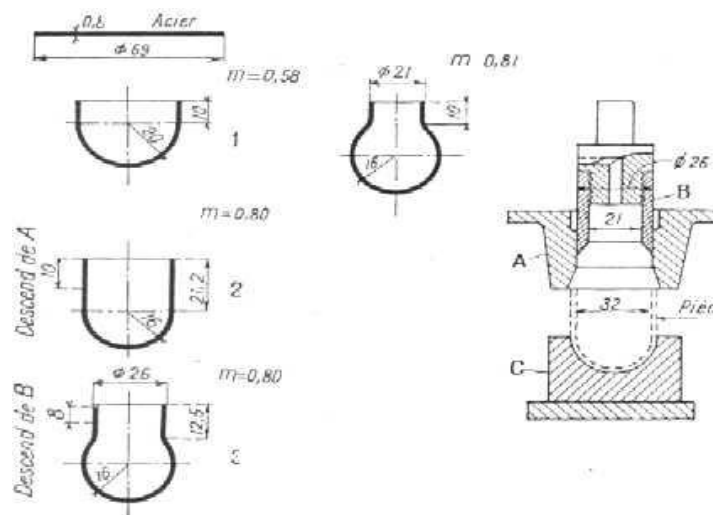


Figure 17. Emboutissage de pièce demi sphérique.

2.2.5. Les techniques d'emboutissage :

Il existe deux techniques d'emboutissage :

A. L'emboutissage à froid :

Est le procédé le plus employé pour la fabrication en grande série. Les machines d'emboutissage se rencontrent couramment dans les ateliers de chaudronnerie. Il est bon que le chaudronnier en connaisse le principe de fonctionnement. Il impose souvent un outillage double effet. Il est utilisé pour l'emboutissage des inoxydables [9 - 16].

B. L'emboutissage à chaud :

L'emboutissage à chaud est un procédé dédié à une classe de matériaux bien précise, les aciers trempant. Le surcoût inhérent au procédé (utilisation de fours, manipulation de flans à haute température et usure des outils) est parfaitement justifié par les propriétés de

la pièce finale, qui combinent légèreté (tôle 1,5mm d'épaisseur), très haute limite élastique et résistance mécanique élevée.

Ce procédé est principalement utilisé dans l'automobile pour des pièces de structure du châssis. Quelques applications typiques pour l'automobile sont : les traverses avant / arrière, les renforts de portière et de pied milieu et le bras de roue (figure 18) [9 – 10 - 16].

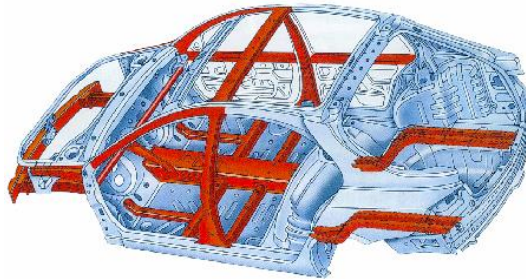


Figure 18 : pièces de sécurité dans un châssis envisageables en Usinor 1500.

L'emboutissage à chaud se pratique [18]:

- Quand le métal ou l'alliage ne peut pas se conformer à froid.
- Quand, en raison de l'épaisseur et de la surface de la tôle, l'emboutissage à froid exige une force supérieure à celle de la presse dont on dispose.
- Quand, pour les faibles séries, on veut limiter les frais d'outillage, toujours importants, que nécessite l'emboutissage à froid.

Cette technique permet l'emboutissage de pièces épaisses. Cela facilite la déformation du matériau.

2.2.6. Les différents types d'emboutissage :

A. Emboutissage en expansion :

L'exemple typique de l'expansion pure est donné par l'emboutissage sur un poinçon hémisphérique présenté sur la figure 19. Le métal est totalement bloqué entre matrice et serre-flan, en général simultanément par un jonc et par une force de serre-flan élevée. Quand le poinçon s'élève, la partie de métal située au-dessus passe de la forme plane à une forme plus ou moins bombée, dépendant de la hauteur atteinte. La surface augmentant et le volume restant constant, le métal ne peut que s'amincir sur le sommet [19].

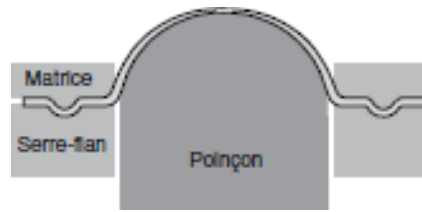


Figure 19 : Schéma d'un essai d'expansion.

L'expansion est dite équi-biaxiale si le métal est également retenu de toutes parts, donnant une déformation isotrope au sommet 2 mais elle peut être non équi-biaxiale quand le poinçon n'est pas hémisphérique mais de forme elliptique.

B. Emboutissage en traction plane :

Supposons une tôle de grande largeur, renforcée aux deux extrémités par des plaques soudées sur ses deux faces, comme montré à la (figure 20), et étirée dans le sens des flèches. La largeur de la partie déformée est donc beaucoup plus grande que sa longueur.

Quand cette tôle est soumise à une déformation suivant la direction des flèches, la partie centrale ne peut pas se rétrécir comme dans une traction uniaxiale car elle est fermement maintenue par les renforts. Pour un élément situé au milieu de l'éprouvette, tout se passe comme si une contrainte transversale s'opposait à son rétrécissement. C'est d'ailleurs la réalité physique et on démontre que cette contrainte transversale σ_2 est égale à la moitié de la contrainte axiale σ_1 si le métal est isotrope ($r = 1$). Cette zone qui s'allonge mais dont la largeur ne varie pas est en traction plane (TP) [19].

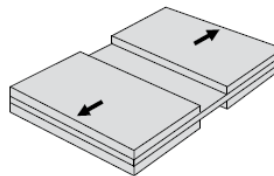


Figure 20 : Éprouvette de traction plane.

Dans le cas illustré, seule la partie centrale de l'éprouvette se trouve vraiment en TP. Comme le volume est conservé en déformation plastique, on retrouve en épaisseur toute la variation de longueur :

$$\varepsilon_3 = -\varepsilon_1 \quad \text{parce que} \quad \varepsilon_2 = 0.$$

C. Emboutissage en rétreint :

D'une certaine façon, la déformation en rétreint peut être considérée comme l'inverse de l'expansion car elle s'obtient, d'une part en utilisant un poinçon plat. D'autre

part, en laissant le métal venir de la périphérie - la collerette - pour former la partie cylindrique verticale - la jupe ou le mur - ceci en supprimant le jonc et en réglant une pression de serre-flan juste suffisante pour éviter la formation de plis. Durant ce type d'opération, le métal de la collerette est constamment attiré dans l'ouverture de la matrice, on dit avalé, pour devenir la partie cylindrique, la jupe ; C'est ce que représente la figure 21.

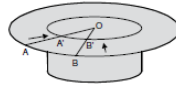


Figure 21 : Mouvements du métal d'un godet.

La symétrie de la pièce impose que chaque point du flan situé entre la matrice et le serre-flan soit entraîné vers le centre suivant une direction radiale : A va en A' et B en B'. Il en résulte que le secteur AB devient A'B' plus petit, dans le rapport des rayons : OA'/OA . Cette réduction de longueur est imposée par les éléments proches voisins qui exercent donc une contrainte circonférentielle sur l'élément ABB'A' [19].

D. Cisaillement :

Poursuivant l'illustration des modes de déformation par des tests mettant en évidence la façon dont se déforme le métal, nous allons considérer une forme d'éprouvette très utilisée pour produire du cisaillement. La partie utile est constituée par un rectangle de tôle dont les bords sont tenus par deux mors dont l'un est fixe et l'autre peut se déplacer parallèlement à la direction principale de l'éprouvette, (figure 22) à gauche.

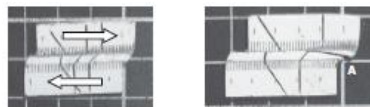


Figure 22 : Éprouvettes de cisaillement.

Le rectangle se transforme donc en un losange de même longueur de côté. La largeur ne varie pas, c'est du cisaillement simple. La déformation est représentée par un angle. L'un des grands intérêts de ce test est qu'il permet d'atteindre des niveaux de déformation considérablement plus élevés que les autres tests de formage. Par exemple, un acier DP peut atteindre une déformation de $g = 0,8$ avant de se rompre, c'est ce qui fait que cet essai est très utilisé pour extrapoler les lois de consolidation aux grandes déformations [19].

E. Mode dominant :

Nous avons, dans ce qui précède, montré que certains essais de base illustraient un type ou un autre de déformation. En fait, nous allons voir maintenant trois choses :

- que toute pièce emboutie présente au moins deux modes principaux différents,
- que la plupart des pièces présentent tous les modes de déformation,
- que la même zone d'une pièce peut subir successivement plusieurs modes [19].

2.2.7. Les procédés et la technologie de l'emboutissage :

L'énergie nécessaire pour déformer le flan lors d'une opération d'emboutissage est fournie par une presse. Cette machine-outil peut prendre différentes formes qu'il est possibles de classer en fonction de :

- La nature du moteur : Presse Mécanique, Presse Hydraulique.
- La forme du bâti : Presse à Arcade ou à Montant Droit, Presse à Col de Cygne.
- Le nombre de coulisseaux : Simple, double, triple...

Lors du choix d'une presse, il est indispensable de considérer les principaux facteurs suivants : la nature du travail, l'énergie disponible, l'effort du serre-flan, la course, l'entretien et la mise en œuvre [16].

A. L'atelier d'emboutissage :

L'aventure de fabrication de voiture débute par l'atelier d'emboutissage. C'est un atelier composé de presses (mécaniques ou hydrauliques) qui découpent et emboutissent la tôle pour obtenir la forme souhaitée.

À l'emboutissage, le parcours de la bobine de tôle commence au train de découpe. Elle est placée en amont du train puis est déroulée jusqu'à un outil de découpe qui lui donne la forme souhaitée – appeler flan- puis, ce flan est empilé sur une palette. Les flans sont dépilés puis transporter automatiquement jusqu'au premier outil, appelé embouti, qui donne la forme souhaitée. Autres étapes de mise en forme sont souvent nécessaires pour finaliser la pièce : découpage, détourage, pliage et poinçonnage [20].

B. Le nombre d'effets :

La définition du nombre d'effets est un sujet controversé. Normalement, on ne devrait compter comme effets que les mouvements de coulisseau qui sont moteurs ; on ne doit pas considérer les serre-flans passifs ou les éjecteurs comme des effets à part entière. Les anglo-saxons utilisent d'ailleurs des expressions qui sont moins discutables : ils parlent de single action pour le simple effet et de double action pour le double effet. Le mot action est indiscutablement plus clair. Dans ce domaine, nous distinguerons trois cas [19] :

B.1. Emboutissage avec outils simple effet :

Cette configuration est la plus simple. Elle est composée d'une matrice et d'un poinçon, équipé d'un coussin élastique situé sous la table de la presse. Pour cette technique, les emboutis réalisés sont peu profonds et ne nécessitent pas d'important effort de serrage (voir la figure 23 ci-dessous) [16 - 19].

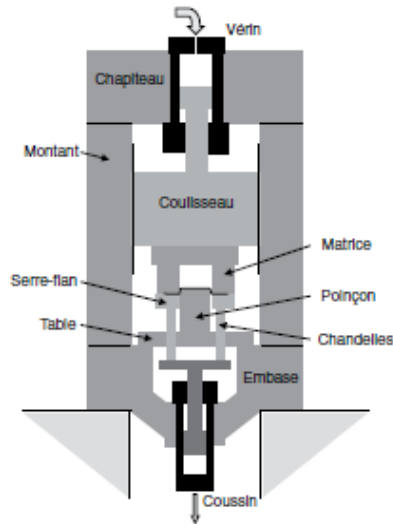


Figure 23 : Fonctionnement d'une presse simple effet.

B.2. Emboutissage avec outils double effet :

Par rapport à l'emboutissage simple effet, l'emboutissage double effet comprend en plus un serre-flan. Cette technique de formage est la plus répandue dans l'industrie. Ici les emboutis sont très profonds et les efforts d'emboutissage sont importants. Un serrage très efficace est nécessaire pour ce type d'emboutissage (voir la figure 24 ci-dessous) [16 - 19].

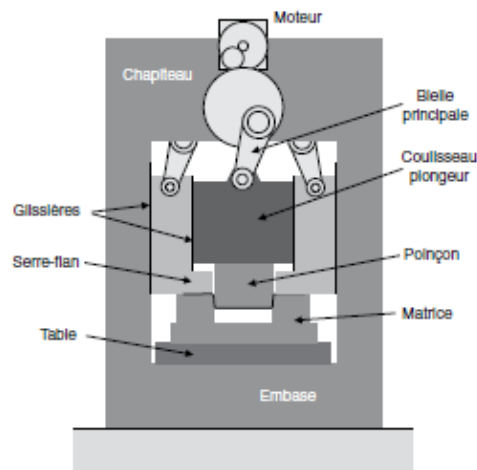


Figure 24 : Fonctionnement d'une presse double effet.

B.3 Presses triple effet :

Elles sont rares et destinées à un cas bien précis : quand la pièce nécessite trois opérations d'emboutissage - réemboutissage, mais pas plus. Il est alors rentable de n'avoir qu'une seule presse intégrant les trois outils, beaucoup plus complexe et donc plus chère qu'une presse normale, bien sûr, mais moins chère que trois presses (figure 25).

On les utilise pour des corps emboutis cylindriques assez profonds, par exemple des filtres à huile de camion ou des corps d'extincteurs, on soude deux pièces en opposition dans ce dernier cas [19].

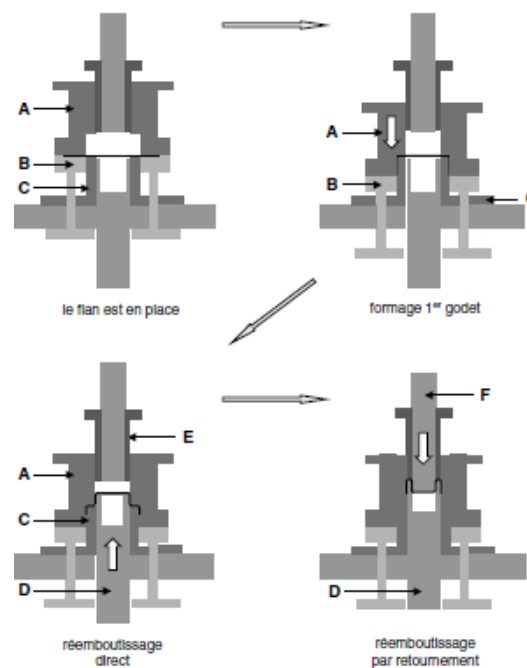


Figure 25 : Presse triple effet.

B.4. Emboutissage multi-passes :

L'emboutissage profond consiste à transformer en plusieurs passes, des flancs de forte épaisseur afin d'éviter la rupture mécanique au cours du processus de déformation. Les épaisseurs de pièces embouties peuvent être très faibles (de l'ordre de 0,05mm) [19].

2.2.8. La nature du moteur :

Le moteur est la partie entraînant de l'outillage et principalement du poinçon. Sans réellement rentrer dans les détails, nous distinguons deux types de presses [16 – 19]:

- Les presses mécaniques.
- Les presses hydrauliques.

A. Les presses mécaniques :

Dont la motricité est fournie par un système de bielle-manivelle. Ce sont les plus répandues car leur coût à l'achat est moins important, leur entretien plus facile et surtout car elles permettent des cadences plus importantes (voir la figure 26 ci-dessus) [19].

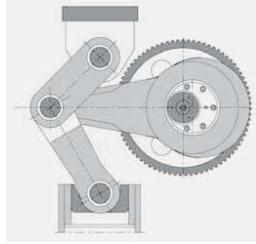


Figure 26 : Une presse mécanique.

B. Les presses hydrauliques :

Dont la motricité est fournie par l'injection d'un fluide dans un piston. Le fluide pouvant être de l'huile ou de l'eau. Elles tendent peu à peu à remplacer les presses mécaniques grâce à l'amélioration de leur performance [16].

C. Servopresses :

Il s'agit d'une technologie très récente ; une dizaine d'années environ. L'idée de base consiste à remplacer le classique moteur électrique à induction, l'embrayage et le volant d'inertie, par un ou des servomoteur(s) en prise directe avec le mécanisme donnant le mouvement alternatif. Il peut s'agir de bielles, genouillères, ou d'autres mécanismes.

La consommation totale d'énergie est réduite car le moteur ne tourne que pendant le mouvement du coulisseau. La vitesse de déplacement de celui-ci est presque infiniment modulable, ce qui permet :

- de régler une approche très rapide,
- de ralentir le coulisseau juste à l'instant de l'attaque (réduit le bruit et les chocs pour la découpe),
- de régler la vitesse de travail au mieux vis-à-vis du matériau embouti,
- de maintenir le coulisseau au PMB pour parfaire la frappe,
- de remonter très rapidement le coulisseau,
- de régler les courses avec une extrême précision (de l'ordre du 1/100 mm) [16-19].

2.2.9. Le Bâti :

Le bâti est l'ensemble sur lequel repose le système matrice/poinçon. Nous distinguerons les deux cas suivants :

A. Le col de cygne :

Cette forme rend la table et le coulisseau très accessible ce qui facilite fortement l'accès à l'outillage et au flan. De plus, ces presses sont souvent inclinés en arrière de façon à permettre une évacuation aisée des emboutis (Fig. 27 a) [19].

B. L'arcade :

Ces presses offrent une meilleure rigidité et peuvent donc développer des efforts plus importants. Elles sont donc principalement utilisées pour la mise en forme de pièces de grandes dimensions ou de grande épaisseur. Elles se présentent de la même manière que les presses à col de cygne, mais doivent l'effort qu'elles sont susceptibles de fournir à deux colonne reliant la partie inférieure à la partie supérieure. (Fig. 27 b) [19].

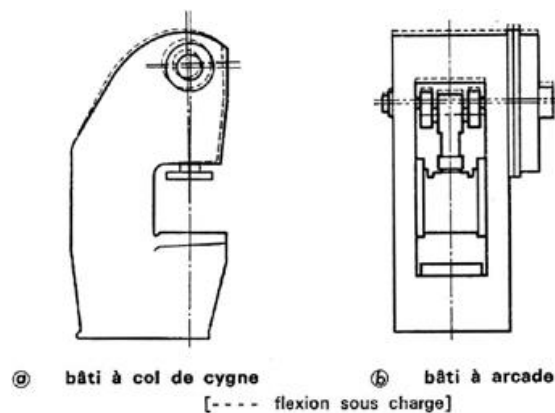


Figure 27 : Presse à col de cygne et presse à arcade.

2.2.10. Les coulisseaux :

Les coulisseaux représentent la partie mobile de la presse, c'est à dire celle permettant au poinçon d'atteindre la matrice. Ils sont soit en fonte soit en acier afin de permettre des efforts plus importants. La partie inférieure, appelée semelle, comporte des usinages pour assurer la fixation de l'outil : rainures en T pour les outils de taille importante, en alésage pour le nez de fixation des petits outils. Les coulisseaux sont de formes variables suivant le type de presse utilisé [19].

2.2.11. Les principaux paramètres du procédé :

Les principaux paramètres du procédé d'emboutissage sont [19]:

- 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 jonc.

2.2.12. Les modes de déformation :

Au cours de l'opération d'emboutissage des tôles minces, différents modes des sollicitations 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. Pour un matériau donné, ces capacités de déformation peuvent différer fortement d'un mode à l'autre et c'est la raison pour laquelle nous aborderons l'étude de la formabilité des tôles par la définition de ces différents modes [23]:

- Expansion sous l'effet d'une traction biaxiale (figure 28).

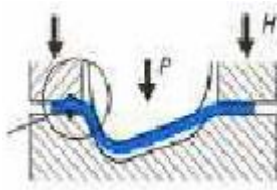


Figure 28 : Traction biaxiale.

- Rétreint sous l'effet d'une compression (figure 29).

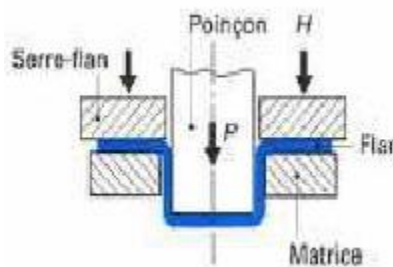


Figure 29 : compression.

- Autre modes : Déformation plane, Allongement uni-axiale, Cisaillement pur, Compression pure, Pliage sous tension. La figure 30 ci-dessus représente les différents modes de déformation dans le repère des déformations principales majeure et mineure [23].

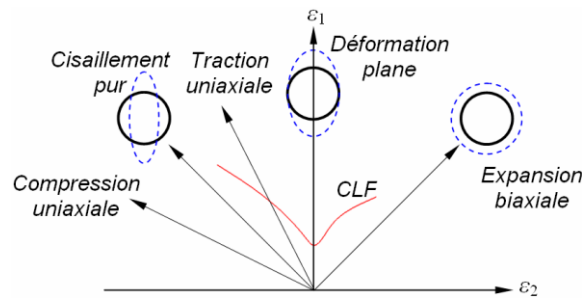


Figure 30 : Modes de déformation.

2.2.13. Le retour élastique :

Après extraction des outils, la pièce ne garde pas la géométrie désirée: c'est le phénomène de retour élastique (figure 31).

Des hétérogénéités de contraintes apparaissent dans la pièce (encore dans l'outil fermé) :

- dans l'épaisseur de la tôle après passage sur les rayons des outils ;
- entre des zones ayant subi des trajets de déformation différents sur la pièce.

Lors de l'arrêt de la charge, ces contraintes se redistribuent pour obtenir un nouvel équilibre dans la pièce. La pièce « s'ouvre ». Ainsi, pour paramétrer le retour élastique, les grandeurs représentatives sont soit des variations angulaires, soit des rayons de courbure.

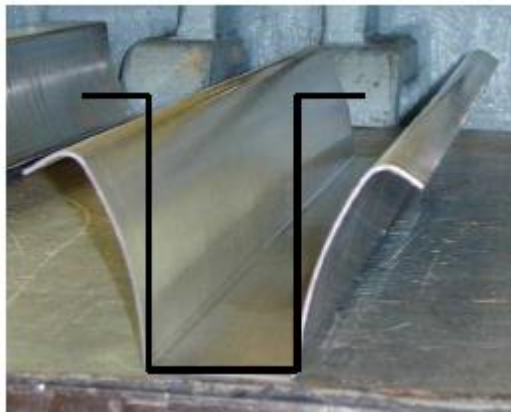


Figure 31 : Exemple d'ouverture d'une pièce en U après retour élastique.

2.2.14. L'utilisation et l'application de l'emboutissage :

L'emboutissage est un procédé très largement utilisé dans la ferblanterie, l'industrie automobile pour les éléments de carrosserie mais aussi dans le domaine des appareils électroménagers du sanitaire et de l'emballage : lavabos métalliques, bacs de couches, boîtes de boisson, conserves,...

Pour les emboutissages peu profonds, les moules sont alimentés par du feuillard en ruban alors que les moules en bloc sont alimentés par des disques ou des découpes de formes différentes [20].

- Exemples d'applications industrielles [10]:

On fabrique ainsi en très grande série la plupart des pièces de la carrosserie d'une automobile, le corps des boîtes de conserve plates, des ébauches des boîtes boisson, entre autres exemples. Il s'agit donc d'un secteur industriel particulièrement important, comme en témoigne la rivalité aiguë entre les fabricants de tôles fines en acier et en aluminium sur le marché européen des boîtes boisson. Un autre exemple édifiant, déjà évoqué et sur lequel, est celui des pièces de carrosserie automobile, très diverses en taille et en forme. comme le délai de conception et de réalisation d'un nouveau modèle dépend principalement du temps nécessaire pour la mise au point des opérations d'emboutissage, la maîtrise par les constructeurs d'automobiles des problèmes d'emboutissage est un facteur essentiel, voire vital, de productivité dans le climat actuel de très vive concurrence ; l'un des avantages actuels des constructeurs japonais par rapport à leurs homologues européens est leur avance dans ce domaine.

2.2.15. Les avantages et les inconvénients de l'emboutissage :

Par conséquent on constate des avantages et des inconvénients qu'on cite dans ce paragraphe [12 - 14 – 22].

A. Les avantages de l'emboutissage :

- L'emboutissage est un procédé permettant d'obtenir des pièces de surface non développable à partir de feuilles de tôle mince. C'est à dire qu'il est possible d'obtenir des formes très variées impossible à obtenir avec un tour ou une fraiseuse.
- L'état de surface d'une pièce brute d'emboutissage est nettement meilleur que celui d'une pièce coulée. L'esthétique des pièces embouties en est donc bien supérieure et les travaux de finition telle que le polissage sont moins lourds à gérer et sur tout moins coûteux.
- Cette technique de mise en œuvre offre un bas prix de revient et permet des cadences de production très élevées :
 - 100 à 200 pièces par heure pour des pièces de gros volumes (carrosserie automobile)
 - 3000 à 4000 pièces par heure pour des petites pièces (renfort, capuchon de réservoir).
 - Les pièces embouties ont un état de surface plus esthétique et moins coûteux que pour une pièce moulée.

- Cette technique permet des cadences de production élevées selon les tailles, les formes et les matières.
- Presque pas de reprise en usinage, haute cadence de production.
- Bon état de surface.

B. Les inconvénients de l'emboutissage :

Les zones d'étirement subissent un amincissement qui doit rester limité pour éviter la rupture. Les zones de rétreint subissent une combinaison d'épaississement et de plissement.

- Le retour élastique.
- Pour obtenir des pièces précises il est nécessaire d'utiliser des logiciels permettant de simuler les retours élastiques de la pièce.
- Nécessite un découpage au préalable des flans dans une tôle.

Les différents défauts en emboutissage sont [20] :

- La rupture.
- La striction.
- Les plis.

Les défauts en emboutissage dépendent de [20]:

- La géométrie et la position du flan.
- La géométrie de l'outil.
- La position et la géométrie des joncs de retenue.
- La force de serrage exercée par le serre-flan.
- L'élasticité du matériau de la tôle, sa ductilité et son anisotropie.
- L'usure des outils.

3. Conclusion :

Cette partie a posé les bases de la mise en forme des tôles. Tout d'abord les différents procédés de mise en forme à froid ont été énumérés et les différents modes de déformations rencontrés en mise en forme ont été présentés. Le procédé d'emboutissage est mis en avant et avec lui les principaux problèmes liés à la mise en forme des tôles.

Chapitre II

Analyse des phénomènes mécaniques lors de l'emboutissage: Applications

1. Introduction.
2. Calcul de l'opération d'emboutissage.
3. Caractérisation de la déformation en emboutissage.
4. Plis.
5. Ruptures.
6. Vitesse d'emboutissage.
7. Conclusion.

1. Introduction :

Après avoir énuméré les différents modes de déformation qui surviennent lors d'une opération d'emboutissage, nous analyserons les forces mécaniques résultantes de cette opération. Par la suite, nous caractérisons la déformation au sein du matériau ainsi que les critères d'analyse de faisabilité.

Dans l'emboutissage, les limites de la déformation admissible est fixée par la limite d'étirage des flans. Le rapport d'emboutissage LDR (limite drawing ratio) est utilisé pour :

- **Déterminer** combien les opérations d'emboutissage sont nécessaires pour produire une pièce sans défaut
- **Juger** de la capacité d'allongement des matériaux pour emboutissage profond;
- **Calculer** la force d'emboutissage.

2. Calcul de l'opération d'emboutissage :

2.1. Rapport Limite d'emboutissage et détermination du diamètre initial du flan :

Une série de flans circulaires de diamètre D_0 croissant sont emboutis en godets cylindriques au moyen d'un poinçon de diamètre d_0 constant jusqu'à ce qu'une valeur limite soit atteinte. Le diamètre de flan maximal $D_{0 \max}$ juste avant que la première fissure ne se produise détermine l'aptitude du matériau à l'emboutissage profond pour une épaisseur de tôle et une lubrification données (figure 32) [24].

- Rapport d'emboutissage :

$$\beta_0 = \frac{D_0}{d_0}$$

- Rapport Limite d'Emboutissage :

$$\beta_{0 \max} = \frac{D_{0 \max}}{d_0}$$

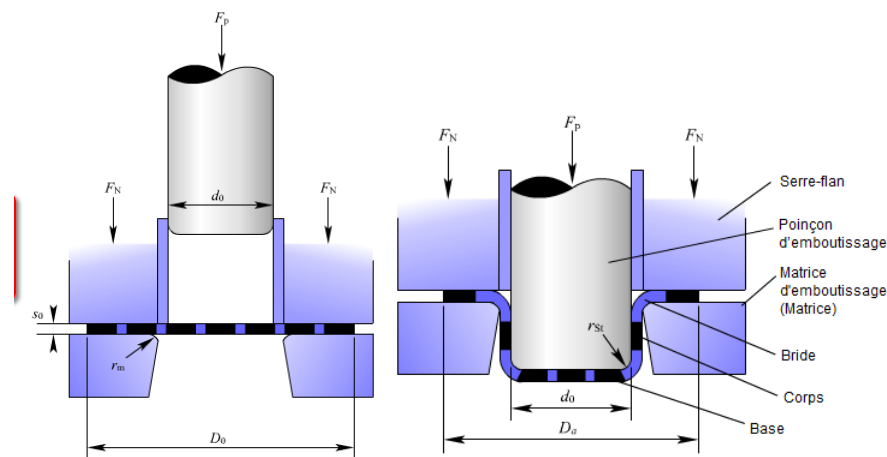


Figure 32 : Opération d'emboutissage.

Le coefficient LDR, fonction des propriétés du matériau à transformer, permet de classer les matériaux suivant leur capacité à être emboutis [20] :

$$\text{LDR} = \frac{D_{\text{flan}}}{D_{\text{poinçon}}}$$

Notation :

Diamètre initial du flan D_0 (mm).

Diamètre de poinçon d_0 (mm).

Force de poinçon F_p (N).

Force de serre-flan F_{BH} (N).

Rayon du poinçon r_p (mm).

Diamètre de matrice d_m (mm).

Rayon de matrice r_m (mm).

Jeu d'emboutissage J (mm).

Le rapport d'emboutissage dépend de paramètres suivants :

- Coefficient de frottement entre la pièce et le poinçon μ .
- Épaisseur de la tôle t .
- Coefficient d'anisotropie du matériau r .

2.1.1. Influence de certains paramètres sur le rapport limite d'emboutissage :

Le rapport limite d'emboutissage $\beta_{0 \max}$ dépend du frottement μ entre la collerette et le serre-flan. Cette influence est d'autant plus importante que le diamètre du poinçon augmente. $\beta_{0 \max}$ dépend également du matériau [24]:

Exemple : **Tableau 01** : Valeurs typiques ($d_0 = 100$ mm):

Matériaux	$\beta_{0 \max}$
Aluminium	1.8 – 2.0
Acier	1.9 – 2.2

Le rapport total d'emboutissage ne doit pas dépasser une valeur limite [20]:

$$\beta_{\text{total}} < \beta_{\text{max}} (D, d, m\mu, r, t, \dots)$$

La taille et la forme du flan sont importantes pour la consommation de matières, pour la conception de l'outillage d'emboutissage et l'optimisation du rapport coût-efficacité du processus. Il est très important de faire un dimensionnement correct pour réduire les déchets

Dans cette étude on considère l'emboutissage cylindrique. Lors de la détermination de la taille du flan circulaire, on suppose que l'épaisseur du matériau reste constante tout au long de l'emboutissage [20].

Dans le cas d'un emboutissage cylindrique le rapport d'emboutissage est donné par la relation :

$$F = P \cdot S$$

- Si l'emboutissage s'effectue en une seule passe le rapport, $= \frac{F}{S}$, vaut

$$P = (\beta_{\text{actual}} - 1)^2 + \frac{d}{200 \cdot t} \cdot \frac{R_m}{400}$$

- Si l'emboutissage s'effectue en plusieurs passes, alors le rapport vaut :

$$\beta_{\text{total}} = \frac{D_{\text{0 initial flan}}}{d_{\text{0 final poçon}}} = \frac{D}{d_n}$$

Pour chaque passe on peut alors calculer le rapport d'emboutissage pour n passe par les relations :

- Première passe :

$$\beta_0 = \frac{D}{d_1}$$

- -Seconde passe :

$$\beta_1 = \frac{D_1}{d_2}$$

- n-ième passe :

$$\beta_{n-1} = \frac{D_{n-1}}{d_n}$$

Le coefficient total d'emboutissage est donné par le produit des n coefficients de chaque passe :

$$\beta_{\text{total}} = \beta_0 \beta_1 \beta_2 \dots \beta_{n-1}$$

Tableau 2 : l'anisotropie et le coefficient LDR Pour chaque matériau

Matériau	Anisotropie	LDR
Les alliages de zinc	0.4 - 0.6	1.8
Hot - acier laminé	0.8 - 1.0	2.3 - 2.4
Froid - acier laminé cerclées	1.0 - 1.4	2.3 - 2.5
Cild - acier laminé à Al-Tué	1.4 - 1.8	2.5 - 2.6
Les alliages d'aluminium	0.6 - 8	2.2 - 2.3
Cuivre et laiton	0.6 - 0.9	2.3 - 2.4
Alliages Ti	3.0 - 5.0	2.9 - 3.0

Les dimensions initiales du flan peuvent être estimées en considérant que la variation de l'épaisseur du flan est faible.

2.2. Détermination des forces d'emboutissage :

Pour pouvoir mieux juger de l'influence des caractéristiques mécaniques sur la formabilité, nous avons besoin de considérer les forces mises en jeu. La description de ces

efforts n'est pas simple. Il n'existe pas de loi analytique précise permettant de les prévoir, ce qui oblige, soit à utiliser des formules approchées, soit à pratiquer des calculs par simulation numérique. Nous allons raisonner sur des pièces de forme simple (calotte cylindrique) [20].

L'effort nécessaire pour emboutir des pièces cylindriques dépende des diamètres de l'embouti et du flan, de l'épaisseur, du type de matériau, de la pression serre-flan, de la vitesse d'emboutissage, du rayon entrée matrice, du jeu entre poinçon-matrice et de la lubrification.

- La force d'emboutissage de la première passe s'écrit :

$$F_p = \pi \cdot d_n \cdot t \cdot R_m \cdot K$$

- Alors, La force d'emboutissage de la n-ième passe :

$$F_{p_n} = \frac{F_{n-1}}{2} + \pi \cdot d_n \cdot t \cdot R_m \cdot K$$

Le diagramme de la figure 33 montre la force par rapport à la course pendant l'emboutissage profond.

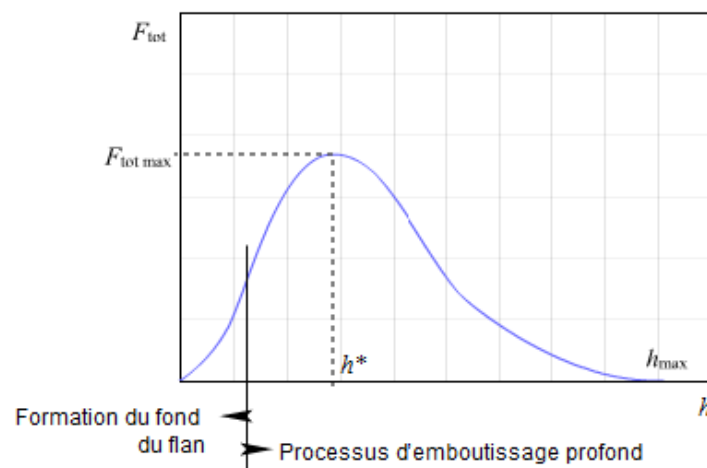


Figure 33 : Diagramme de la force.

La force d'emboutissage F_p augmente pendant l'opération d'emboutissage profond jusqu'à un maximum (critique) caractéristique. Le fond du flan commence à se déformer avant que le formage réel par emboutissage profond ne commence.

La condition de stabilité peut également être obtenue en essayant de maintenir la force de poinçon F_p le plus faible possible. Dans ce cas il est nécessaire de prendre en considération l'équation suivante [20 – 24]:

$$F_p = F_{id} + F_{bend} + F_{F,BI/UB} + F_{F,BI/LB} + F_{F,BI/DR}$$

Où :

F_{ib} : force requise pour effectuer le formage de la tôle dans la zone de formage,

F_{bend} : force de pliage requis pour plier la tôle autour du rayon de l'anneau d'emboutissage,

$F_{F,BI/UB}$: force requise pour surmonter le frottement du système tribologique tôle/lubrifiant/serre-flan (jaquette supérieure),

$F_{F,BI/LB}$: force requise pour surmonter le frottement dans le système tribologique tôle/lubrifiant/anneau d'emboutissage (jaquette inférieure),

$F_{F,BI/DR}$: force requise pour surmonter le frottement du système tribologique tôle/lubrifiant/rayon de l'anneau d'emboutissage,

On note que pendant l'emboutissage profond il est impossible d'influencer les forces F_{ib} et F_{bend} quand le matériau et l'épaisseur de la tôle sont donnés. Toutefois, il est possible de minimiser les forces de frottement $F_{F,BI/UB}$, $F_{F,BI/LB}$ et $F_{F,BI/DR}$ en créant des surfaces appropriées sur la tôle et les matrices, en plus de l'optimisation de la lubrification.

Où R_m est la contrainte limite du matériau et k coefficient qui dépend du rapport d'emboutissage

2.3. Détermination des forces de serrage du serre-flan :

Le rôle du serre flan consiste à empêcher la formation de plis sur le rebond du flan en exerçant une pression appropriée. Si cette force est trop importante, le flan risque de se fissurer, par contre si cette force est trop faible, le flan risque de présenter des plis.

- La force de serrage est estimée par l'expression :

$$F_{BH} = P \cdot S_{BH}$$

Où p est la pression de serrage du serre-flan et S_{BH} la surface du serre-flan.

Les limites du processus dépendent :

- des propriétés du matériau
- du lubrifiant
- de la géométrie de l'outil
- des paramètres du formage

La présence du serre-flan ne s'impose que si $d < 0.95D$ ou $t < 0.02(D-d)$. Pour un embouti cylindrique :

$$P = (\beta_{\text{actual}} - 1)^2 + \frac{d}{200 \cdot t} \cdot \frac{R_m}{400}$$

La surface S_{BH} du serre flan est estimée dans le cas d'un emboutissage cylindrique :

$$S_{BH} = (D^2 - d_e^2) \cdot \frac{\pi}{4}$$

Pression sur le serre-flan se calcule comme suit :

$$F_{\text{serre-flan}} = q \cdot \frac{\pi}{4} (D_{\text{flan}}^2 - (d_m + 2.2 \cdot e + 2 \cdot r_m)^2)$$

q : est la pression recommandée de serre-flan de l'ordre de 1.5 de la limite d'écoulement

Le tableau 3 : représente la pression du serre-flan pour chaque matériau :

Matériau	Pression du serre-flan [q (MPa)]
Aluminium	0.8 – 1.2
Laiton	1.5 – 2.0
Cuivre	1.2 – 1.5
Acier pour emboutissage >0.5 mm	2.0 – 2.5
Acier pour emboutissage <0.5 mm	2.5 – 3.0
Acier inoxydable	2.8 – 3.5

La qualité de la pièce obtenue par emboutissage ainsi que l'effort de l'opération dépendent grandement de la pression appliquée par le serre-flan comme le montre les figures 33 et 34.

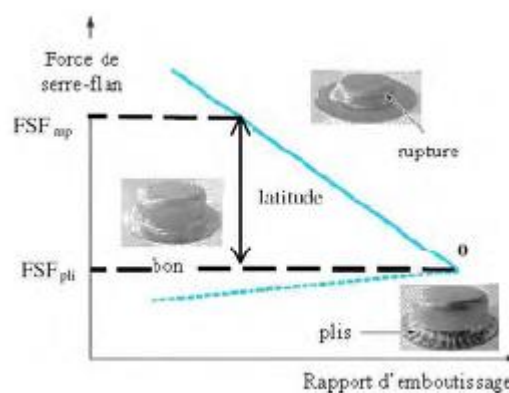


Figure 34 : Rapport d'emboutissage β en fonction de la force de serre-flan.

Les figures 35 et 36 représentent la variation de pression du serre-flan tel que :

A : Déformation à pression optimale.

B : Déformation à pression excessive (rupture).

C : Déformation à pression insuffisante (plissement).

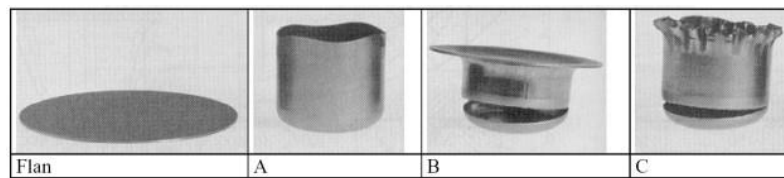


Figure 35 : pression serre-flan.

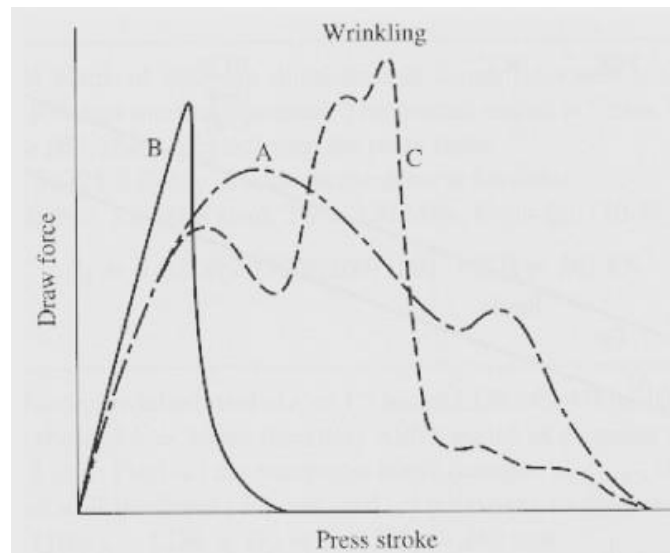


Figure 36. : Graphique serre-flancs.

2.4. Détermination du jeu poinçon-matrice :

Lorsque le jeu entre le poinçon et la matrice est théoriquement égal à l'épaisseur de la tôle, il se produit une augmentation de l'épaisseur de la paroi. L'augmentation de ce jeu a une influence favorable sous l'effet du poinçon mais entraîne certains inconvénients tels que [17 - 20]:

- La détérioration du profil de la paroi.
- Déviation du poinçon entraînant la formation de languettes sur le bord de l'embouti.
- Apparition de plis sur la paroi de l'embouti.

Inversement, si l'épaisseur du flan est plus grande que le jeu existant entre le poinçon et la matrice, il se produit un écrasement et un amincissement indésirables de la paroi.

Le calcul du jeu est basé sur la formule suivante :

$$J = t \cdot \sqrt{\frac{D}{d}}$$

Le jeu J , est la moitié de la différence entre le diamètre de la matrice et le diamètre du poinçon.

Exemple :

- Pour l'acier : $J = t + 0.07 (10t)^{1/2}$
- Pour l'aluminium : $J = t + 0.02 (10t)^{1/2}$
- Pour métaux non ferreux : $J = t + 0.04 (10t)^{1/2}$

2.5. Détermination du rayon sur la matrice :

Des rayons matrice trop petits induisent des déformations importantes du flan. Des rayons trop grands induisent la formation des plis par conséquent le serre-flan n'est plus efficace. Le rayon efficace sur la matrice est estimé par la relation suivante [17]:

$$r_m = K \sqrt{t \cdot (D - d)}$$

En première passe :

Acier $K = 0.8$.

Alu $K = 0.9$.

En deuxième passe :

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

Avec

d_1 : \emptyset en première passe.

d_2 : \emptyset en deuxième passe.

2.6. Détermination du rayon sur le poinçon :

La partie de la tôle qui se trouve en contact avec le rayon trop faible de poinçon subie une diminution d'épaisseur, après emboutissage, le défaut se retrouve sur la surface latérale de l'embouti. Le rayon sur le poinçon est estimé par :

$$r_p = (4 \dots \dots 5) \cdot t$$

Le rayon du poinçon r_p 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.

2.8. Détermination de l'énergie d'emboutissage :

L'énergie nécessaire pour une opération d'emboutissage double action est le produit de la force de pression d'emboutissage par le déplacement du poinçon (h) :

$$W = (F \cdot \alpha) \cdot h$$

Pour un emboutissage simple action :

$$W = (F \cdot \alpha + F_{BH}) \cdot h$$

Le coefficient α dépend du rapport d'emboutissage.

2.9. Effet du frottement :

Dans le cas d'un poinçon de petit rayon, il est préférable de ne pas lubrifier voir même d'augmenter la rugosité du poinçon afin d'éviter une forte déformation par expansion localisé.

Parmi les techniques permettant de maîtriser le frottement, l'adhésion et l'usure entre deux solides, la lubrification est certainement la plus courante et la plus utilisée. Elle consiste à intercaler entre les deux corps, un troisième corps de faible scission et de contrainte de rupture faible.

Une lubrification adaptée facilite l'écoulement de la tôle entre la matrice, le serre-flan et le poinçon. Si le frottement est [20]:

- Faible :

- tôle/lubrifiant/serre-flan
- tôle/lubrifiant/anneau d'emboutissage
- tôle/lubrifiant/rayon d'anneau d'emboutissage

Toutefois, le frottement entre le poinçon et la paroi de la pièce métallique doit être aussi élevé que possible afin de pouvoir transmettre au maximum la force du poinçon.

La condition de stabilité s'écrit ainsi :

$$F \leq \pi \cdot n \cdot R_m \cdot d \cdot t$$

-Lubrifier la face du flan opposée au poinçon : la lubrification de la partie centrale du flan a un effet néfaste car la lubrification diminue l'adhérence entre le poinçon et les parois de l'embouti.

3. Caractérisation et analyse de la déformation en emboutissage :

- Le métal en emboutissage se doit de posséder [20]:

- Une résistance maximale à la traction très élevée pour résister à la traction uniaxiale
- Une limite élastique faible ; car dans le domaine plastique, les contraintes exercées, tout en étant les plus faibles possibles pour éviter les ruptures, doivent tout de même être supérieures à la limite d'élasticité,
- Des allongements importants.
- Une faible résistance à la compression tangentielle sous le serre flan (bonne aptitude au rétreint).

La résistance du matériau peut être appréhendée par :

La limite d'élasticité

La résistance maximale à la traction

L'allongement à la rupture.

- Ces trois grandeurs peuvent être obtenues lors de l'essai de traction d'une éprouvette (courbe d'écrouissage). Le résultat de ces essais est présenté sur la figure

Limite d'élasticité : R_e .

-Zone A : C'est la charge qui délimite le domaine élastique, où les déformations sont réversibles, du domaine plastique.

Résistance maximale à la traction : R_m .

-Zone B : C'est la charge maximale enregistrée pendant l'essai de traction.

Allongement à la rupture : $A\%$.

-Zone C : C'est l'allongement maximum enregistré pendant l'essai de traction.

(Voir la figure 37).

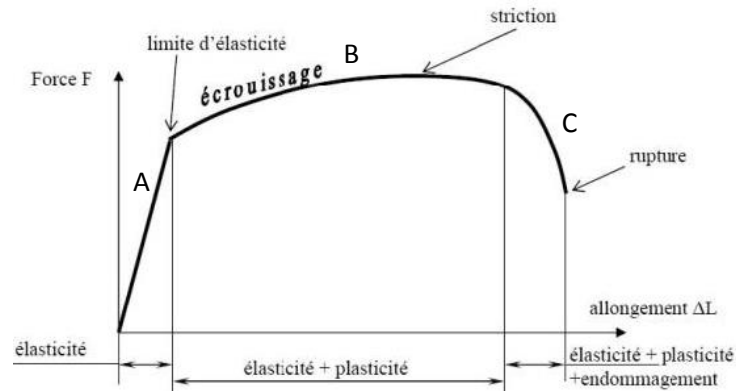


Figure 37 : Limites d'élasticité.

3.1. Principe et analyse des déformations :

L'état des déformations d'un élément de flan est correctement décrit à partir des déformations dans trois directions principales [25]:

- dans le sens de la longueur (généralement la direction de laminage) :

$$\varepsilon_1 = \ln\left(\frac{L}{L_0}\right)$$

- dans le sens de la largeur (généralement la direction perpendiculaire) :

$$\varepsilon_2 = \ln\left(\frac{b}{b_0}\right)$$

- dans le sens de l'épaisseur :

$$\varepsilon_3 = \ln\left(\frac{t}{t_0}\right)$$

Avec L_0 , b_0 , t_0 sont la longueur, la largeur et l'épaisseur initiales, respectivement. L , b , t sont la longueur, la largeur et l'épaisseur finales de l'élément, respectivement.

La conservation du volume pendant la déformation permet d'écrire :

$$\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = 0$$

3.2. Courbes limite de formage (les figures 38-39):

Lors de l'emboutissage, les éléments de tôle subissent une déformation que l'on peut matérialiser à l'aide d'un réseau de cercles tracés au préalable sur le flan. Les dimensions des ellipses résultantes permettent d'estimer les déformations dans le plan de la tôle ε_1 et ε_2 avec $\varepsilon_1 > \varepsilon_2$. Donc on peut déduire, du fait de l'incompressibilité du matériau (pas de variation de volume), la déformation à travers l'épaisseur associée comme suit [20]:

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

On détermine les valeurs des déformations des zones de rupture qui, reportées sur un diagramme $(\varepsilon_1, \varepsilon_2)$, se situent au voisinage d'une courbe assez peu dépendante de la nature de la tôle. Notant que le point de cette courbe le plus proche de l'origine correspond à la déformation plane

$$\varepsilon_2 = 0$$

Les déformations atteintes dans les zones d'apparition de la striction se situent au voisinage d'une courbe plus ou moins proche de la courbe de rupture selon la nature du matériau (coefficient écoulement n et coefficient d'anisotropie r).

Les différents secteurs dans le diagramme sont :

- A. Des capacités de formage du matériau.
- B. Danger de la rupture.
- C. Le matériau a fendu.
- D. Amincir grave.
- E. Risque du retour élastique.
- F. Tendance au ridage.
- G. Rides entièrement développées.

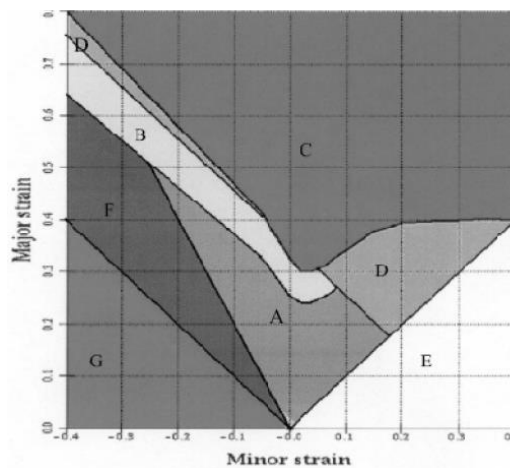


Figure 38 : Courbe limite de formage pour différents domaines.

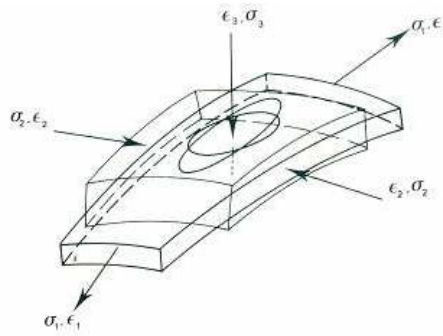


Figure 39 : Etats de contrainte et de déformation d'un élément fini de tôle mince.

L'emboutissage est soumis à une contrainte de traction radiale σ_r et à une contrainte de compression tangentielle σ_t situées dans le plan de la tôle. Aussi, il est nécessaire d'appliquer une contrainte minimale de compression normale, par la force de serre-flan F_N , afin d'empêcher la formation de plis dans la collerette (figure 40) [24].

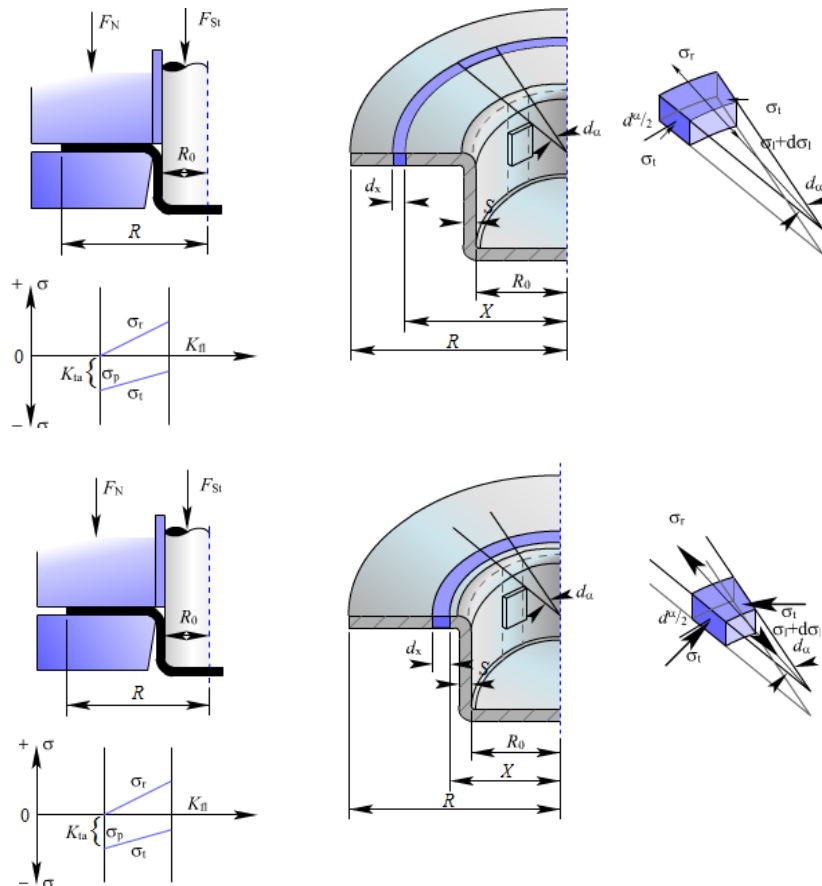


Figure40 : Mode de déformation.

Quatre zones caractéristiques présentant différents états de contraintes et de déformation se développent pendant l'opération de formage (figure 41):

- la zone de formage où s'effectue le formage du matériau extérieur du flan. Dans cette zone, la force du serre-flan F_N empêche la formation de plis de premier ordre.
- le matériau glisse et se déplace ensuite en passant sur le rayon de la matrice (anneau d'emboutissage) dans une zone de pliage.
- la paroi du godet se forme dans cette zone, où l'on constate seulement une transmission de la force.
- cette force est insuise par la force F_p du poinçon d'emboutissage dans la zone d'application de la force.

La surface de la pièce étirée est plus ou moins la même que celle de la découpe initiale. De ce fait, l'épaisseur de la tôle demeure presque constante.

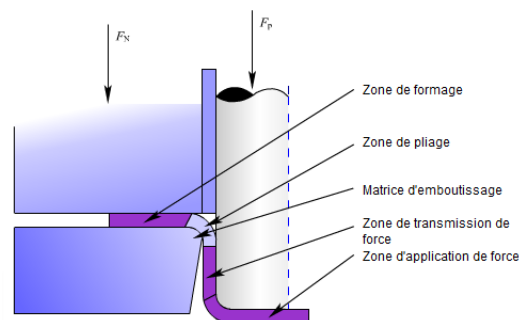


Figure 41 : Les zones d'emboutissage.

L'expansion bi axiale correspond à ce qu'il se passe au nez du poinçon. Cette expansion est d'autant plus importante que le métal est bloqué sous le serre-flan. La traction correspond généralement à ce qu'il se passe dans les parois verticales de l'embouti. La traction plane correspond à ce qu'il se passe sur un embouti à la transition entre la déformation sur le nez du poinçon et celle dans la paroi verticale de la pièce.

La traction uniaxiale est la trajectoire limite entre les zones sollicitées en traction large et celles sollicitées en rétreint. Le cisaillement est un trajet de formage où toute déformation en traction est compensée par une déformation en compression sans que l'épaisseur diminue ou augmente. Ce type de trajet peut se trouver dans la zone sous le serre-flan lorsque l'écoulement est homogène (embouti axisymétrique). Le domaine de rétreint se situe au-delà de la droite de cisaillement. Cette déformation correspond généralement aux zones sous le serre-flan quand la tôle s'épaissit.

Les contraintes qui apparaissent dans le flan au début de l'emboutissage sont principalement influencées par le rapport entre le diamètre d'entrée de la matrice « d » et le diamètre du flan « D ». Lorsque le poinçon commence à entraîner la tôle dans la matrice (figure 42a), une force de traction « F_t » est générée en périphérie de l'orifice de la matrice (section motrice du flan) [26].

Pour ne pas avoir d'amincissement pouvant amorcer une déchirure du métal, cette force de traction ne doit pas générer une contrainte de traction « σ_t » qui soit supérieure à la limite élastique « R_e » du métal. La partie annulaire du flan (la couronne) qui est confinée entre la matrice et le serre-flan est tirée vers le centre et doit subir une déformation globale par compression pour que son périmètre puisse être réduit à celui de la matrice. On peut simplifier l'analyse, à partir de la figure 45, en considérant que chaque petit secteur de cercle de cette couronne doit entrer en déformation par compression. Cette supposition de contrainte uniaxe nous donne une relation simple entre la force de compression « F_c » et la contrainte de compression « σ_c » [26]; on a :

$$F_c = \delta_c \left(\frac{D-d}{2} \right) t$$

Où « t » est l'épaisseur de la tôle. Au tout début de l'opération d'emboutissage, σ_c doit dépasser la limite élastique du métal pour que l'embouti commence à se former. Dans la section motrice (la longueur de cette section motrice est indiquée en rouge dans la figure 42b), on a

$$F_t = \delta_t \left(\frac{D-d}{2} \alpha \right) t$$

Où « α » est l'angle (en radian) de cette « pointe de tarte ». En faisant l'équilibre des forces suivant l'axe des X, on doit avoir

$$F_t = 2 \left(\frac{\alpha}{2} F_c \right)$$

Si on remplace F_t et F_c par leur valeur, on obtient

$$\frac{d}{D} = \frac{\delta_c}{\delta_c + \delta_t}$$

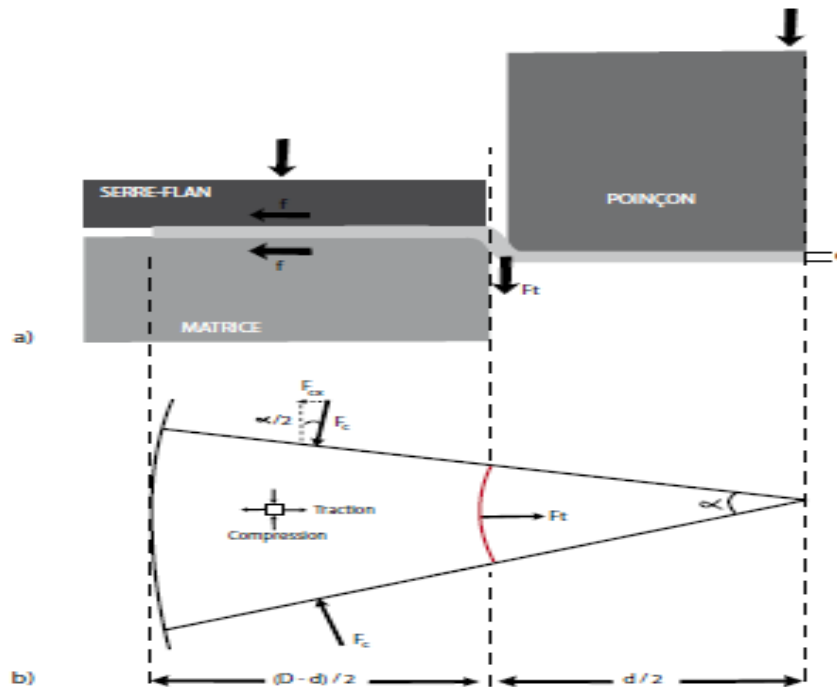


Figure 42 : direction des forces.

3.3. Critères de caractérisation de déformation :

Un critère de plasticité, ou critère d'écoulement plastique, est un critère permettant de savoir, sous des sollicitations données, si une pièce se déforme plastiquement ou si elle reste dans le domaine élastique. De nombreux essais ont montré que l'on pouvait utiliser deux critères principaux : le critère combinés ou le critère rationnel. En résistance des matériaux, on désire parfois rester dans le domaine élastique, on parle alors de critère de résistance. Les critères des matériaux en emboutissage sont [20]:

- Le matériau est caractérisé par son coefficient d'anisotropie r et d'écrouissage n .
- L'élasticité du matériau conditionne le retour élastique.
- La contrainte d'écoulement d'une tôle déformée évolue avec la déformation, la vitesse de déformation et la température.

3.3.1. Critères combinés :

Ce sont des critères utilisant des combinaisons de facteurs conventionnels. On retrouve donc des critères tels que :

1. R_e/R_m
2. $R_m - R_e$
3. $(R_m - R_e) * A$

Ils apportent une plus grande précision dans la caractérisation de l'embouti mais nécessite un plus grand nombre d'expériences et de matériels.

3.3.2. Critères rationnels :

Ce sont les plus difficiles et les plus coûteux à déterminer mais ce sont eux qui offrent le meilleur jugement face à l'emboutissabilité d'une tôle [20]:

1. Coefficients d'écrouissage.
2. Coefficients d'anisotropie.

A. Coefficient d'écrouissage n :

$$\delta = \delta_0 + K \cdot \varepsilon^n \quad \text{ou} \quad \delta = K \cdot (\varepsilon_0 + \varepsilon)^n$$

Le coefficient n est lié à la consolidation du matériau: l'écrouissage augmente la résistance à la rupture et la limite élastique qui se rapproche ainsi de la résistance maximale à la traction [20].

Si deux tôles de même valeur de n mais de coefficient d'élasticité k différent sont embouties, elles se comporteront de façon semblable malgré des forces d'emboutissage différentes. Ce critère détermine la capacité d'une tôle à être mise en forme.

Il est obtenu à partir de la courbe rationnelle de traction reliant contrainte

$$\delta = \frac{F}{S}$$

À la déformation rationnelle

$$\varepsilon = \ln \left(\frac{S}{S_0} \right).$$

B. Anisotropie initiale :

Du fait de l'orientation préférentielle des cristaux, la tôle ne possède pas les mêmes propriétés mécaniques suivant la direction considérée. Il en résulte aussi une perte de l'équilibre des déformations entre la largeur et l'épaisseur lors d'un essai de traction uni axiale. Lors de l'emboutissage profond des découpes de tôle circulaires l'anisotropie (texture cristallographique) provoque une collerette irrégulière du godet (figure 44) [8 – 17 - 21 - 20].

Le coefficient d'anisotropie plastique se définit comme le rapport de la variation de largeur à la variation d'épaisseur durant un essai de traction. Le coefficient de Lankford indique (figure 43) la tendance du métal à s'amincir ou s'épaissir [20].

$$r = \frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_w}$$

ε_t : déformation dans l'épaisseur

ε_w : déformation dans la largeur

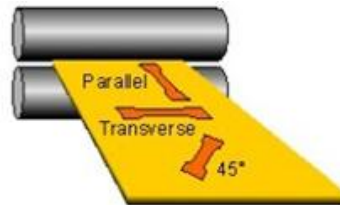


Figure 43 : Coefficient de Lankford.

Dans le plan d'une tôle, la valeur du coefficient d'anisotropie normale varie suivant les directions. Le coefficient d'anisotropie moyen s'écrit :

$$r = \frac{r_{0^\circ} + r_{90^\circ} + r_{45^\circ}}{4}$$



Figure 44 : Anisotropie.

Exemple :

Les matériaux utilisés pour la carrosserie sont des tôles d'acier très bas carbone (limite d'élasticité $Re = 160$ à 200 MPa), la grande formabilité est assurée par la valeur élevée de leur allongement à la rupture $A = 35$ à 45 % et de leur coefficient d'anisotropie normale $r = 1,7$ à $1,85$. Les pièces de structure sont en tôles HLE (haute limite d'élasticité $Re = 400$ MPa) de moindre formabilité ($A = 20$ % et $r = 1,1$), car durcies par addition d'éléments de micro-alliages.

Tableau 4 : pour différents types d'acier.

Qualité	Type d'acier	Re (MPa)	A (%)	Rm (MPa)	r
0.004% carbone	G	160	44	300	1.85
Haute formabilité	XE	165	44	300	1.87
Formabilité » moyenne	E	200	37	330	1.7
Haute limite élastique	HLE	400	22	470	1.15

On note que :

- Les pièces à dominance d'expansion obtiennent un pourcentage de réussite pour n fort
- Les pièces à dominance de rétreint correspondent à un coefficient r fort.

Tableau 5 : Relation formabilité :

Relation entre formabilité (LDR) et valeurs de R_e/R_m et n (pour les aciers)		
Formabilité en expansion	R_e/R_m	n
Excellente	0.4 à 0.5	0.24 à 0.27
Bonne	0.5 à 0.6	0.20 à 0.24
Moyenne	0.6 à 0.7	0.18 à 0.20
Médiocre	0.7 à 0.9	0.12 à 0.18

4. Plis :

Nous-mêmes appelons plis les ondulations de la tôle résultant d'un flambement local associé à un champ de contraintes de compression. Généralement associés à des déformations en rétreint, ils peuvent apparaître aussi bien dans les brins libres, zones de la tôle qui momentanément ne sont en contact ni avec la matrice, ni avec le poinçon, que sous serre-flan. Ils peuvent résulter aussi bien des contraintes de formage proprement dites que des contraintes résiduelles libérées après décharge et extraction de la pièce hors de l'outil [8].

Eux-mêmes peuvent faire une distinction à partir de l'ampleur du phénomène :

- Les plis à proprement parler que la faible longueur d'onde (quelques centimètres) et la hauteur supérieure au millimètre les rendent parfaitement visibles (figure 45) ;

- Les ondulations ou déflexions de surface, de faible amplitude (quelques dixièmes de millimètre) et parfois de grande longueur d'onde, visibles surtout en lumière rasante où elles se manifestent par une impression de flou. Elles peuvent parfois se présenter sous forme de creux ou de cuvettes de quelques dixièmes de millimètre de profondeur se situant au voisinage d'un contre-embouti du type logement de la poignée de porte. Elles peuvent aussi affecter un panneau tout entier conduisant à un défaut alors désigné par manque de tendu. Une ondulation est souvent un pli en voie de résorption en fin de course.

Les pièces présentant des plis ne sont pas forcément à rebuter, s'il s'agit par exemple de pièces non visibles où les défauts de forme obtenus ne présentent aucune incidence sur le comportement en service (résistance mécanique, vibrations en particulier).

Il convient cependant d'être prudent et de veiller à ce que les plis, si petits soient-ils, ne favorisent pas la ruine de la pièce par flambement dans quelque circonstance d'utilisation. C'est pourquoi il est préférable de les maîtriser en les transformant par exemple en nervures supplémentaires judicieusement disposées qui renforceront la pièce tout en facilitant son formage [8].

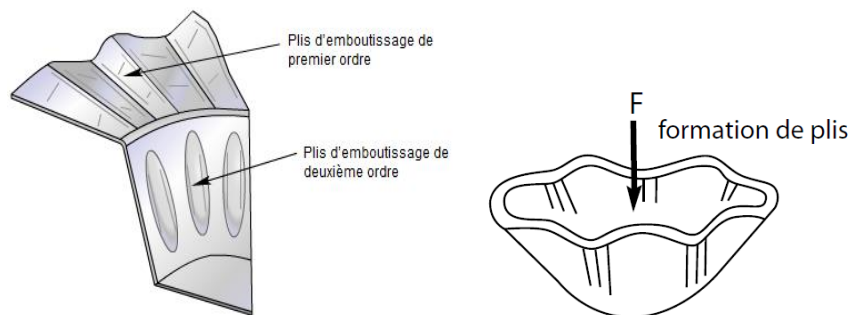


Figure 45 : exemple plis.

L'emboutissage profond des pièces coniques, paraboliques ou sphériques est considérablement plus difficile que celui des pièces cylindriques (figure 46):

1. La force d'emboutissage doit être transmise seulement au travers d'une petite section transversale de la tôle, de sorte qu'il existe un risque considérable de fissuration locale, même pour de petits rapports d'emboutissage.

2. La déformation n'a pas seulement lieu dans la collerette, elle se produit également dans la zone entre la matrice et le poinçon. A cet endroit, la pièce n'est pas supportée et les contraintes de compression tangentielle peuvent provoquer des plis de premier ordre.

Dans ce cas, il est préférable de faire appel à l'emboutissage profond hydromécanique.

$$K = \frac{d_{0 \max} - d_{0 \min}}{2 \tan \alpha_w}$$

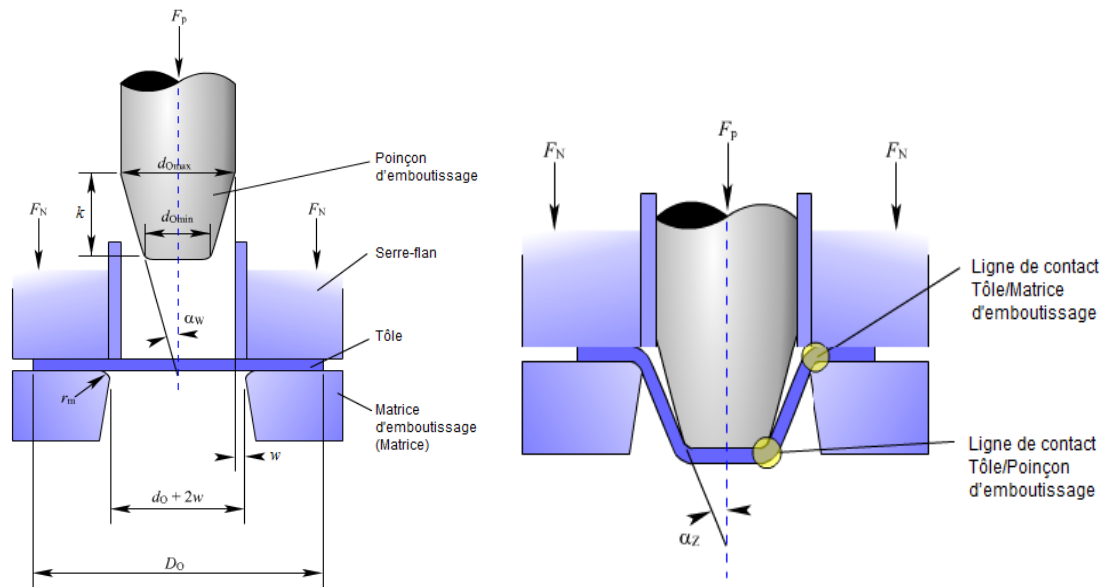


Figure 46 : Emboutissage profond hydromécanique.

5. Ruptures :

Plus le rapport d'emboutissage choisi est grand. Plus les contraintes maximales d'emboutissage à transmettre par la paroi de la pièce emboutie ne sont importantes. Les ruptures se produisent au fond du godet quand le **rapport d'emboutissage** dépasse une valeur maximale [24].

La rupture peut avoir lieu (figure 47):

- Pendant la formation du fond du godet ; rupture prématurée dans la zone du rayon du fond
- Après la formation du fond de godet ; rupture ordinaire dans le rayon du fond et dans la zone de transition vers la paroi du godet (on l'appelle « rupture optimale », puisque les plus grandes contraintes possibles ont été transmises à la zone de déformation).



Figure 47 : Schéma d'une rupture.

6. La vitesse d'emboutissage :

Elle se définit comme la vitesse du poinçon au moment de l'attaque de la tôle. Les transformations que subit le métal à froid entraînent un écrouissage de celui-ci dépendant de

cette vitesse. Une vitesse trop faible, tend donc à générer un écrouissage trop important sur le métal, le rendant moins malléable. Une grande vitesse tend à empêcher la propagation de la force du poinçon jusqu'au niveau du flan. Cette altération pouvant alors se traduire, il existe une vitesse optimale pour chaque métal :

- Pour l'acier : 200 mm/s
- Pour les aciers doux : 280 mm/s
- Pour l'aluminium : 500 mm/s

7. Conclusion :

Cette partie pose les bases de la mise en forme de tôle. Tout d'abord les différents procédés de mise en forme à froid ont été énumérés et les différents modes de déformations rencontrés en mise en forme ont été présentés. Le procédé d'emboutissage est mis en avant et avec lui les principaux problèmes liés à la mise en forme de tôles. Pour prédire la réussite d'un embouti, les courbes limites de formage ont été introduites.

L'aspect marquage des tôles et mesure des déformations, ainsi que les essais permettant de construire les courbes limites de formage, ont été abordés. Il est essentiel de retenir que d'une part une tôle peut subir différents modes de déformation et que d'autre part une pièce ne se déforme jamais dans un mode unique.

La construction d'une courbe limite de formage est compliquée du fait de la définition d'une condition d'arrêt. Il faut en effet réussir à caractériser la déformation (% de déformation plastique, striction) ou la rupture lors des essais. Cependant les CLF sont indispensables car elles constituent le principal outil permettant de quantifier la formabilité de tôles pour prévoir la réussite d'un embouti.

Chapitre III

Simulation numérique: Étude de cas

- 1. Introduction.**
- 2. Qu'est-ce que la simulation numérique ?**
- 3. La simulation virtuelle de la mise en forme des matériaux.**
- 4. La Apport de la simulation numérique à la mise en forme des matériaux.**
- 5. Les Eléments finis utilisés dans les simulations numériques de l'emboutissage.**
- 6. La simulation sur ANSYS.**
- 7. La simulation sur ABAQUS.**
- 8. Présentation du problème étudié.**
- 9. Construction du modèle.**
- 10. Les résultat.**
- 11. Conclusion.**

1. Introduction :

Il y a encore une dizaine d'années, la simulation numérique des procédés de mise en forme est désormais présente chez la majorité des acteurs industriels de ce secteur. Les outils de simulation sont devenus presque indispensables pour optimiser la gamme de fabrication, comprendre et maîtriser les déformations subies par le matériau. Plusieurs logiciels commerciaux sont aujourd'hui disponibles :

Les codes "généralistes" :

Souples d'utilisation, ils sont capables de modéliser plusieurs procédés. Cependant, n'étant pas spécifiques à un métier, leur mise en données peut s'avérer délicate et laborieuse : abaqus, ansys, samcef, ls-dyna, ideas...

Les codes "métiers" :

Spécifiques à un métier donné, leur structure et ergonomie sont adaptées au public concerné. Pratiques et efficaces pour les industriels spécialisés sur un procédé de mise en forme donné : forge®, marc/autoforge, LsDyna, pam/stamp, autoForm, Z-cast

Dans le présent chapitre, nous utilisons l'outil numérique pour l'analyse de la déformation mécanique d'un flan pris en sandwich entre une matrice et un poinçon lors d'un procédé d'emboutissage.

Nous avons choisi de faire la simulation sur deux codes de calcul à savoir l'ABAQUS et l'ANSYS.

2. Qu'est-ce que la simulation numérique ? :

Aujourd'hui, la simulation numérique est utilisée dans de nombreux domaines de recherche et développement : mécanique, mécanique des fluides, science des matériaux, astrophysique, physique nucléaire, aéronautique, climatologie, météorologie, physique théorique, mécanique quantique, biologie, chimie... ainsi qu'en sciences humaines : démographie, sociologie... Elle intervient aussi dans des secteurs comme celui de la banque et des finances [27].

La simulation numérique est un outil de prototypage virtuel accélérant les processus de création et d'optimisation. Que cela concerne l'amélioration d'un procédé en fonction de nouvelles normes, la mise au point d'un produit pour un nouveau marché, un regard plus pointu sur un phénomène physique. Avec une prise en compte toujours plus grande des interactions entre physiques parce que le monde est ... multiphysique [28].

Insérer un dispositif de mesure, comme un capteur capacitif, dans un outillage, implique de préciser l'influence de l'environnement mécanique (écrantage, déformation) sur la mesure électromagnétique. Etudier la pérennité d'un stockage profond de déchets nucléaires conduit à simuler les fuites radioactives en cas de fracture dans la roche. Refroidir l'alimentation d'un dispositif électronique concerne la simulation de la source de chaleur (batterie ou pile à

combustible) et de la façon dont la chaleur se dissipe, en interaction avec la structure mécanique [28].

Pour analyser un procédé ou un produit, il est courant de se focaliser sur un aspect des phénomènes en jeu (une seule physique). Avec l'hypothèse que les autres physiques n'ont pas ou peu d'influence (température, fatigue, attaques chimiques, vibrations, humidité par exemple). C'est souvent correct: on est dans un régime où c'est le cas (pièce métallique à telle température de fonctionnement). Et c'est d'ailleurs le but des prototypes de vérifier l'adéquation entre les objectifs initiaux et le résultat concret.

La simulation intervient à ce niveau parce que c'est un outil inégalable pour rester compétitif. Véritable laboratoire virtuel, l'outil idéal s'insère dans la chaîne de conception et s'adapte à la problématique. Il doit incorporer les géométries issues des logiciels de CAO et les données matériaux. Bien plus, il doit être capable de simuler une physique particulière, ou plusieurs avec leurs couplages en fonction de l'évolution des idées à tester. La paramétrisation totale du modèle (géométries, matériaux, physiques) est nécessaire pour déterminer l'optimum de fonctionnement. Enfin, l'interface s'adapte à des utilisateurs de niveaux différents, du néophyte à l'expert, pour faciliter la coopération et les échanges [28].

3. La simulation virtuelle de la mise en forme des matériaux :

Reproduire virtuellement n'importe quel procédé de fabrication ou de mise en forme par grandes déformations élasto - (visco) plastiques, tout en optimisant sa gamme vis-à-vis de l'avènement de la rupture ductile, est aujourd'hui possible grâce à la simulation numérique par éléments finis. Dans cette étude on propose une méthodologie de formage virtuel de structures minces ou massives qui permet de simuler numériquement des procédés de formage tout en les optimisant vis-à-vis de l'endommagement ductile. On pourra ainsi agir sur les paramètres technologiques pertinents du procédé de sorte à :

- Soit minimiser l'endommagement ductile afin d'obtenir une pièce saine sans aucun défaut ni volumique ni surfacique (forgeage, estampage, extrusion, emboutissage, hydroformage de tôles ou de tubes,) ;

- Soit favoriser l'endommagement ductile en direction et en intensité afin de reproduire des opérations de coupe (poinçonnage, cisailage, guillotinage, dérivage, usinage par enlèvement de copeaux,) [20].

4. Apport de la simulation numérique à la mise en forme des matériaux [20]:

Actuellement, dans l'industrie, l'ensemble des étapes de mise au point d'un procédé de fabrication est réalisé manuellement. Ce cycle de production long et coûteux nécessite de nombreux allers et retours entre bureau d'études, bureau des méthodes et l'atelier de fabrication. Il paraît évident que seule la simulation numérique est aujourd'hui en mesure d'apporter une aide appréciable dans ces domaines.

Moyennant l'utilisation de modèles pertinents, on peut simuler des procédés complexes. Cela évite la très coûteuse procédure empirique dite essai-erreur-correction et permet ainsi de réaliser des économies substantielles et de réduire significativement les temps de conception de nouveaux outillages et de répondre rapidement à des appels d'offre.

5. Eléments finis utilisés dans les simulations numériques de l'emboutissage :

Les modèles de simulation numériques de l'emboutissage dépendent fortement du type des éléments finis utilisés pour discrétiser la tôle. Dans la littérature, on trouve des approches membranes, approches 2D, approches solides et approches coques.

Dans la simulation numérique de ces procédés, le problème de contact est généralement assimilé à un contact entre solides déformables qui représente la matière à déformer, et des solides indéformables ou obstacles qui représentent les outils (poinçon, matrice, serre flan.).

La répartition des déformations et des contraintes ainsi qu'une bonne estimation des efforts exercés sur les outils avec des temps de calcul et des espaces mémoire faibles par rapport aux autres approches. Mais le problème qui se pose est qu'une approche pareille ne permet pas de prévoir les phénomènes des plis et les phénomènes de cisaillement qui sont très importants en emboutissage [20].

5.1. Approches bidimensionnelles et approches solides :

Dans le but de simplifier la simulation numérique de l'emboutissage plusieurs approches se sont limitées à une étude bidimensionnelle ou axisymétrique du procédé, ce qui a permis d'aboutir souvent à de bons résultats. Dans toutes ces approches, les formes des emboutis étudiées étaient simples. Ce qui n'est pas toujours le cas, surtout lorsque on parle de l'industrie automobile. Les approches tridimensionnelles basées sur des éléments volumiques (Solides) sont plutôt utilisées dans la simulation des procédés de mise en forme des produits massifs tels que le laminage et la coulée continue ou le forgeage. Les modèles basés sur cette dernière approche ne sont pas nombreux. Ceci s'explique par les temps de calcul très importants générés

par ces types d'éléments. Par ailleurs, vu la faible épaisseur des tôles. Utilisées dans l'industrie de l'emboutissage une approche coque semble la plus réaliste pour une simulation de ce procédé [20].

5.2. Approche coque :

Dans cette approche, les effets de flexion dans le plan de la tôle sont superposés aux effets membranes. Plusieurs simulations basées sur cette approche ont été développées. La formulation coque semble la formulation la plus efficace dans la discrétisation par éléments finis des tôles destinées pour la mise en forme.

5.3. Approche membrane :

Dans cette approche, seuls les effets des composantes des efforts dans le plan de la tôle sont pris en compte. Plusieurs modèles basés sur cette approche ont été proposés. Ces approches sont permis aux auteurs de prévoir.

6. simulation sur ANSYS:

ANSYS, Inc (figure 48). Est un éditeur de logiciels spécialisé en simulation numérique. L'entreprise a son siège à Canonsburg en Pennsylvanie aux États-Unis. Ses produits majeurs sont des logiciels qui mettent en œuvre la méthode des éléments finis, afin de résoudre des modèles préalablement discrétisés. La société possède de nombreuses filiales à travers le monde, notamment en Europe et en Asie [29].



Figure 48 : Logo.

Deux environnements logiciels permettent de mettre en œuvre le code ANSYS :

- **ANSYS classic** : Chronologiquement, c'est la première solution logicielle développée par le constructeur. Elle est destinée à la construction de modèles éléments finis à la géométrie simple, facilement constructible à l'aide d'opérations basiques. À partir de cet environnement, l'utilisateur construit directement un modèle éléments finis en utilisant le langage de script APDL (ANSYS Parametric Design Language). ANSYS classic est donc destiné à des utilisateurs compétents dans le domaine de la simulation numérique [2].
- **ANSYS Workbench** : Cette plate-forme propose une approche différente dans la construction d'un modèle en ré-utilisant le code ANSYS initial. Elle est particulièrement

adaptée au traitement de cas à la géométrie complexe (nombreux corps de pièces) et aux utilisateurs non confirmés dans le domaine du calcul. Dans cet environnement, l'utilisateur travaille essentiellement sur une géométrie et non plus sur le modèle lui-même. La plateforme est donc chargée de convertir les requêtes entrées par l'utilisateur en code ANSYS avant de lancer la résolution. Le modèle éléments finis généré reste néanmoins manipulable en insérant des commandes propres au code ANSYS [2].

7. simulation sur Abaqus :

ABAQUS (Figure 49) est un code de calcul par la méthode des éléments finis créé en 1978. Il existe deux types [2]:

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

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 été amélioré au fur et 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.

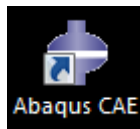
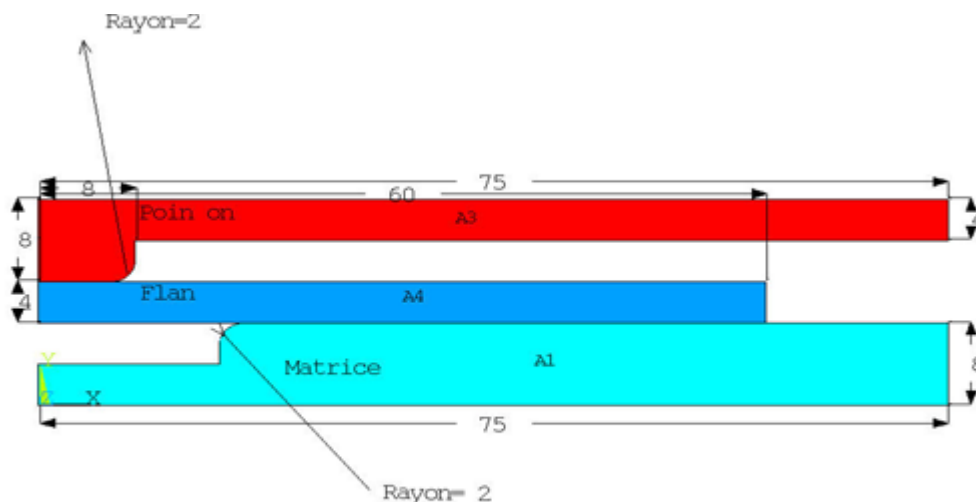


Figure 49 : Logo.

8. Présentation du problème étudié :

Calcul d'emboutissage d'une structure axisymétrique :



Moc le g ol trique : les dimensions sont en mm.

Figure 50: Emboutissage d'une tôle axisymétrique.

Le poinçon et la matrice sont considérés comme infiniment rigides. Le flan est Modélisé en matériau élastoplastique dont les caractéristiques mécaniques sont définies par une loi de comportement bilinéaire avec écrouissage isotrope :

- Module de Young est de 200000 Mpa,
- La limite élastique est de 200 Mpa
- Le module d'écrouissage est de 450 Mpa.
- Le coefficient de poisson est de 0.3.
- Le chargement est représenté par un déplacement de 4 mm appliqué sur le poinçon.

Le frottement est pris en compte entre le poinçon et le flan, et le flan et la matrice. On demande de faire plusieurs calculs en tenant compte des coefficients de Frottement suivants :

- $\mu=0,1$.
- La matrice est considérée fixe. Les caractéristiques géométriques sont représentées sur la figure 50.

9. Discussion des résultats :

Résultats attendus :

- Force en fonction du déplacement,
- Pression de contact,
- Représentation des contraintes de Von Mises,
- Représentation de la déformation du Flan seul.

10. Construction du modèle :

10.1. Sur ANSYS :

1^{er} Etape:

Preprocessor → Element type → Add/Edit/Delete → ~~Plan~~ 183.

2^{eme} Etape:

Material propes → ~~Material Models~~ Structural → Linear → Elastic → Isotropic
 $E = 2e$ et $\nu = 0.3$ et friction coefficient $\mu = 0.1$ →

3^{eme} Etape:

Structural → Non linear → Inelastic → Rate independent → Isotropic hardening
 plasticity → Mises plasticity → Bilinear → Yield stress = 200 MPa et Tang mod = 450
 MPa.

4^{eme} Etape:

Modeling → Create → Key points → In activeCs

(x, y) → (0 ; 0) ; (15 ; 0) ; (15 ; 4) ; (75 ; 4) ; (0 ; 4) ; (60 ; 4) ; (0 ; 8) ; (60 ; 8) ; (0 ; 8) ;
 (8 ; 8) ; (8 ; 12) ; (75 ; 12).

5^{eme} Etape:

Create → Lines → Lines → In active → Coord → Creat → Areas
 Arbitral → By lines → Ok.

Meshing → Mesh tool → Ok.

6^{eme} Etape:

Solution: Analysis type → New analysis → Static Sol'n controles Large
 displacement static time at end of lead step 4.

7^{eme} Etape:

Number of substeps 100 → 1000 et 10 → write every substep Ok.

8^{eme} Etape:

Define leads → Apply → Structural → Displacement → On lines Ok.

On key points → Ok.

9^{eme} Etape:

Preprocessors → Type 1 → Plane 183 → Axisymmetric → OK.

Creat → contact → Ok → Finesh.

10^{eme} Etape:

Solution: Solve → Current LS → Ok → Yes → Solution is done → Ok.

11^{eme} Etape:

General postproc → Plot result → → Ok.

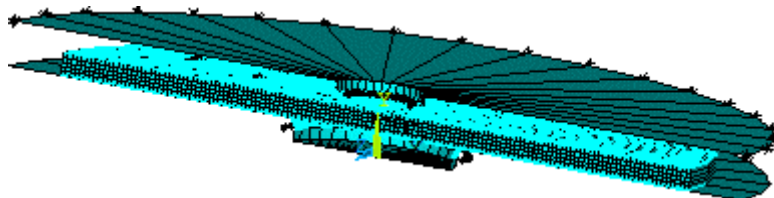
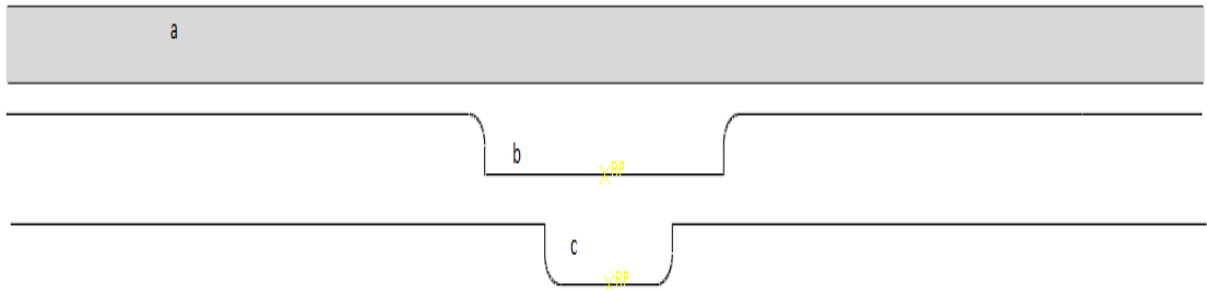


Figure 51 : Construction de modèle sur ANSYS.**10.2. Sur ABAQUS :**

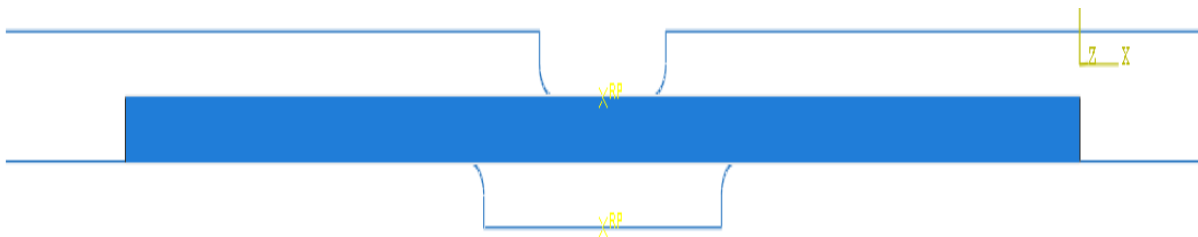
ABAQUS CAE est divisé en unités fonctionnelles appelées modules. Chaque module contient les outils qui sont propres à une partie de la tâche de modélisation :

Le module **PART** : Le module *Part* permet de créer tous les objets géométriques nécessaires à notre problème (figure 52), soit en les dessinant dans ABAQUS CAE, soit en les important d'un logiciel de dessin tiers.

**Figure 52** : Le module part.

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 (Flan).

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 :

**Figure 53** : Assemblage de procédé.

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.

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.

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 :

Le module **MESH** : Ce module (figure 54) contient tous les outils nécessaires pour générer un maillage élément fini sur un assemblage.

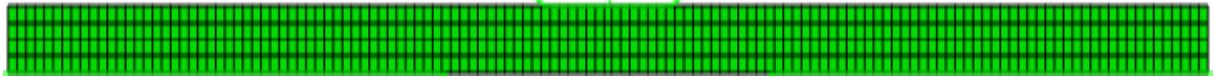


Figure 54 : Maillage de flan.

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 (figure 55).

Le module **VISUALIZATION** : Ce module permet de visualiser le modèle et les résultats, les courbes de charges, les déformations...

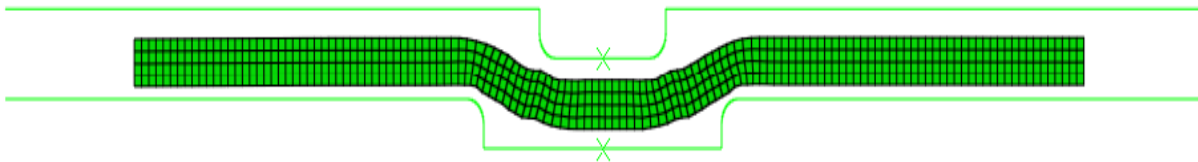


Figure 55 : les résultats.

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.

10.3. Les résultat :

Les modèles géométriques des deux code de calcul ABAQUS - ANSYS sont présente sur la figure 56 (A, B).

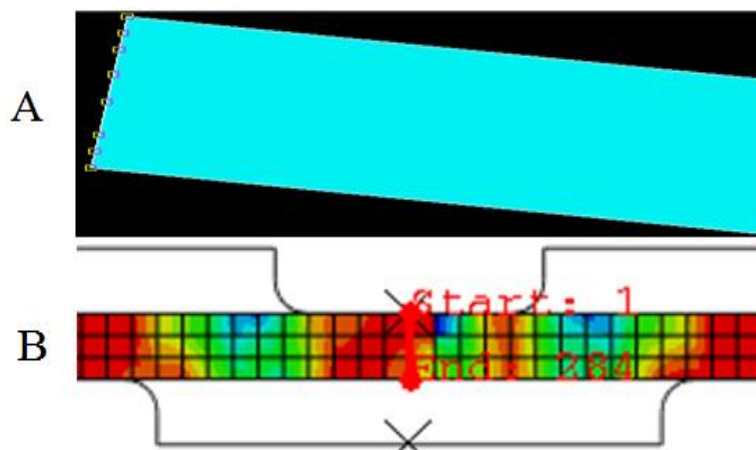


Figure 56 : Création du PATH.

10.3.1. Force en fonction du déplacement :

A. Courbe de déplacement :

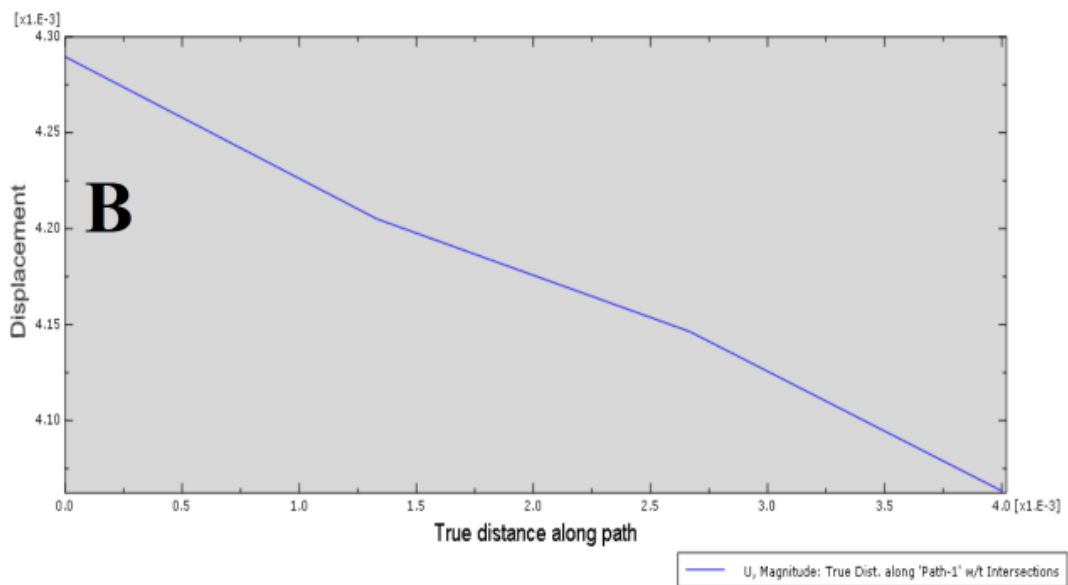
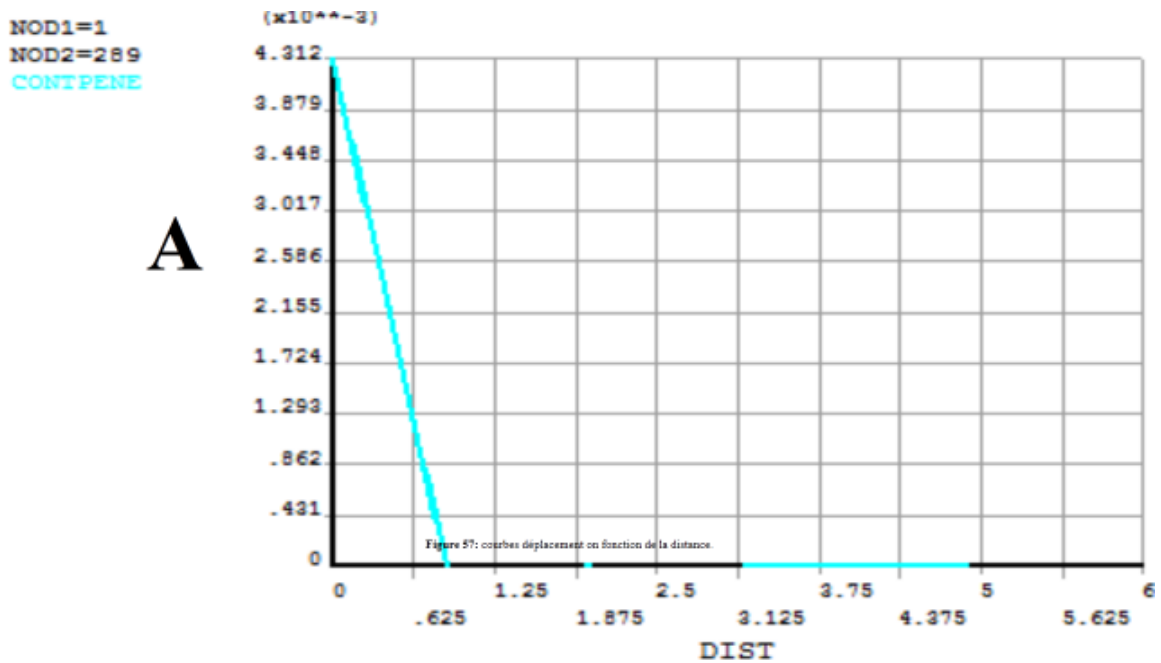


Figure 57 (A, B) : courbes déplacement en fonction de la distance.

La figure 57 présente la variation du déplacement en fonction de la distance virtuelle pour les deux codes on constate qu'il y a une différence entre les deux qui est due :

- La différence de la méthode de maillage.
- Condition aux limites.
- Les propriétés des matériaux.

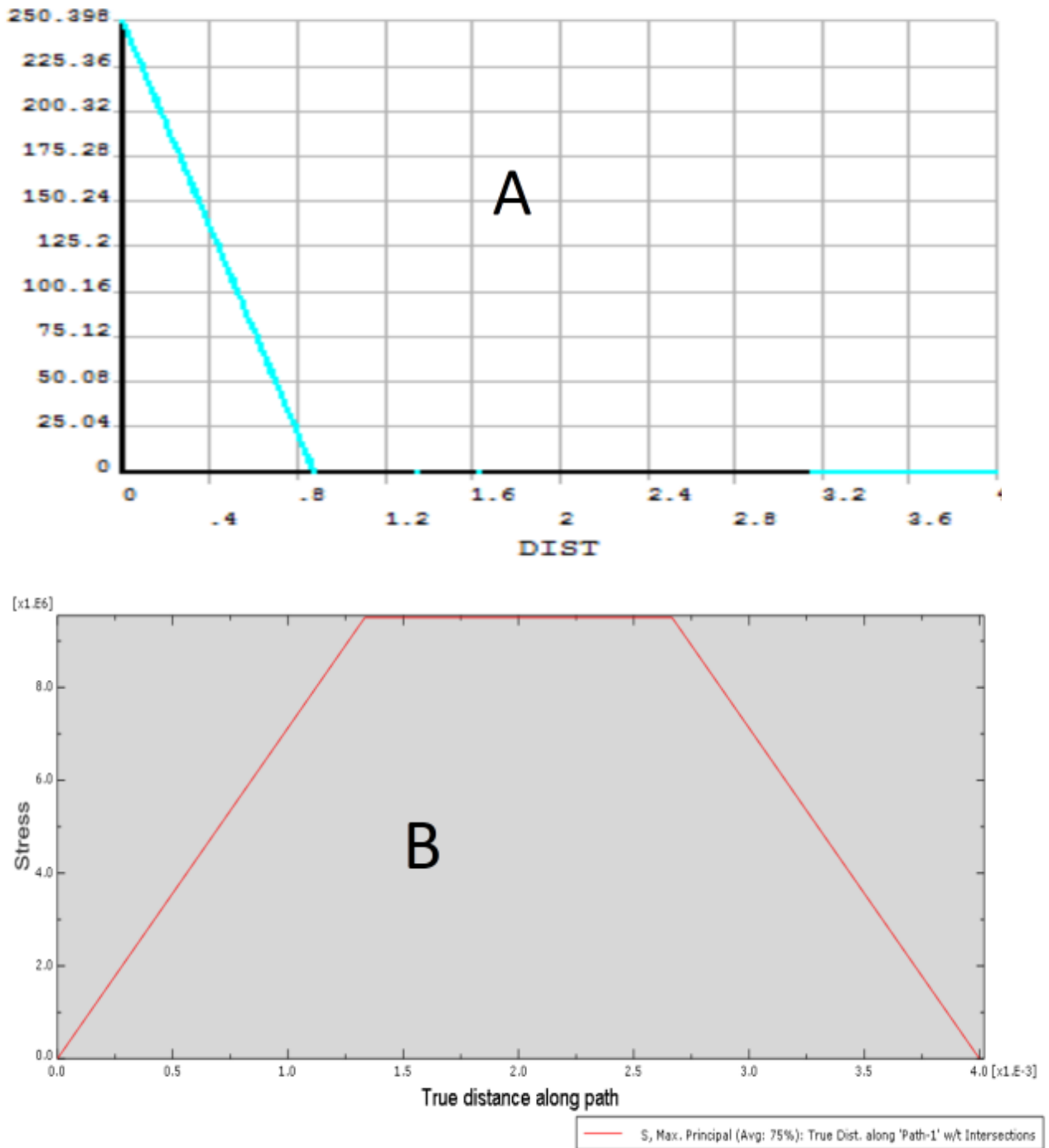
B. Courbe de contrainte :

Figure 58 (A – B) : courbes contrainte en fonction de la distance.

Cette figure présente les répartitions des contraintes de Von mises suivons la ligne virtuelle, on constate que les contraintes sont maximale aux cœurs de la plaque en traction alors que ces contrainte devient en compression loin du cœur de la plaque est ceci pour les deux codes.

C. Pression de contact :

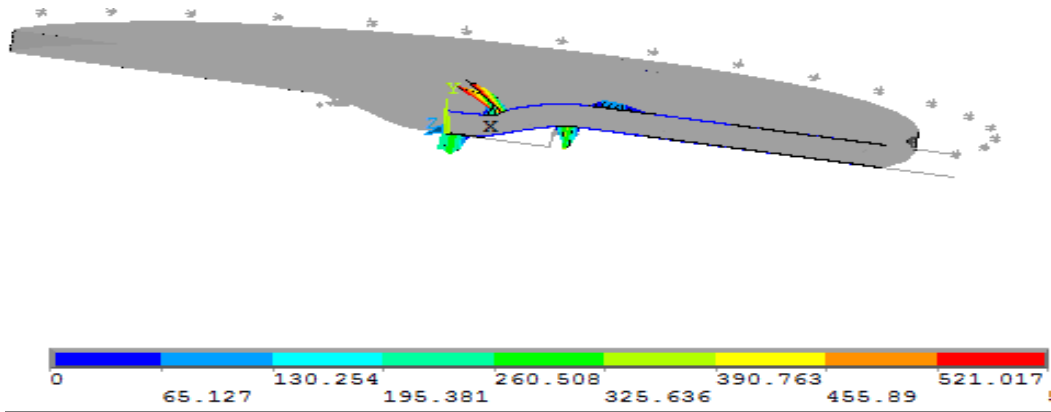


Figure 59 : distribution des pressions de contacte pour ansys.

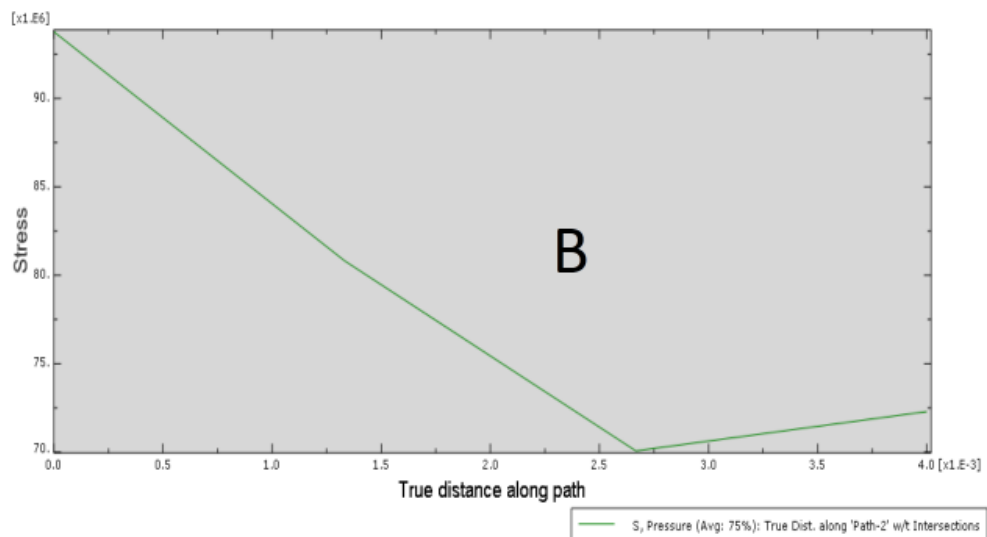
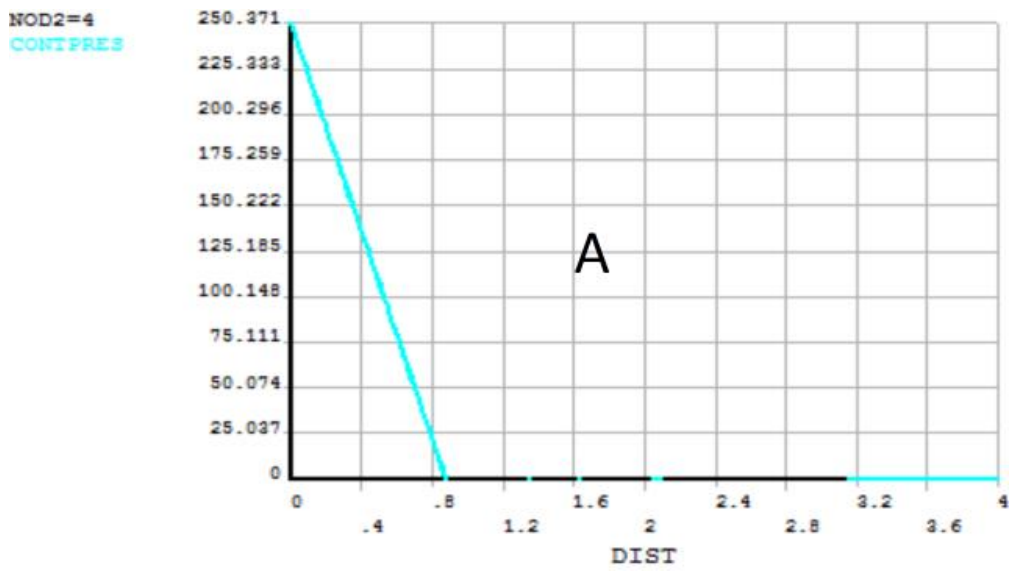


Figure 60 : répartition des contraintes suivant la ligne virtuelle (ANSYS).

A partir des figures 59 et 60A on peut déduire que la contrainte maximal est de l'ordre de 521MPa (ansys) aux centre de la plaque ce qui atteint la limite a la rupture de l'acier, aussi la contrainte dans la ligne virtuelle est en traction cote supérieur et en compression cote inferieur même phénomène est constater pour les résultats obtenue par ABAQUS figure 60B.

10.3.2. Représentation des contraintes de Von Mises :

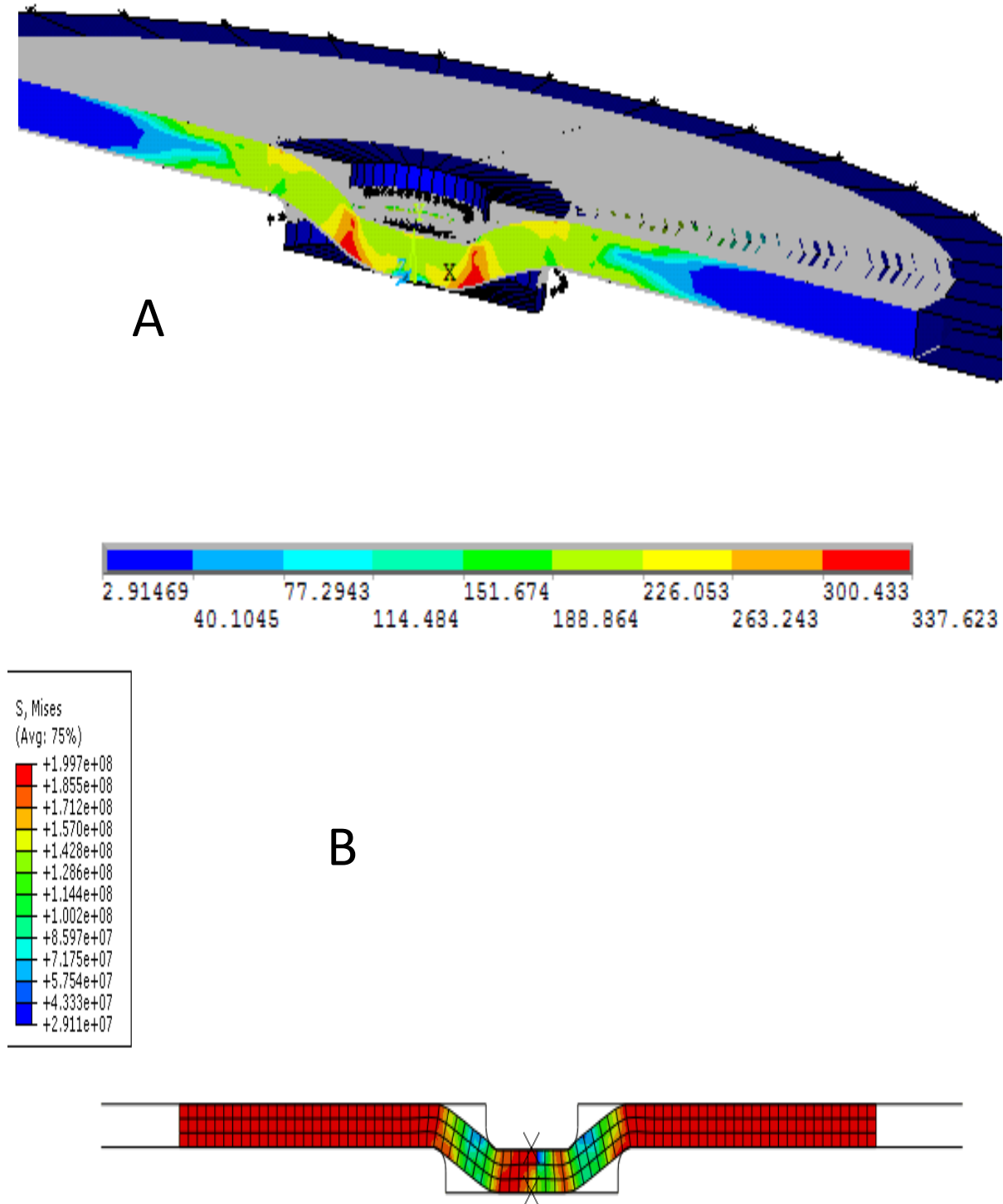


Figure 62 : distribution des contrainte de Von Mises avec la structure déformer (à, A : ANSYS, B : ABAQUS).

La figure 62 présente les structure déformer après les deux calculs, on constater une différence qui est due à une différence des propriétés de la plaque introduite dans les deux code car dans ANSYS le matériau est considéré comme élastoplastique bilinéaire avec écrouissage tandis que dans ABAQUS la plaque est considéré avec un comportement bilinéaire parfaitement plastique, la figure 63 confirme les résultats est la conclusion, en effet nous n'avons pas assez de temps pour faire le calcul avec les mêmes propriétés est les mêmes condition aux limite , c'est pour cela que nous étions limiter par ces résultats,

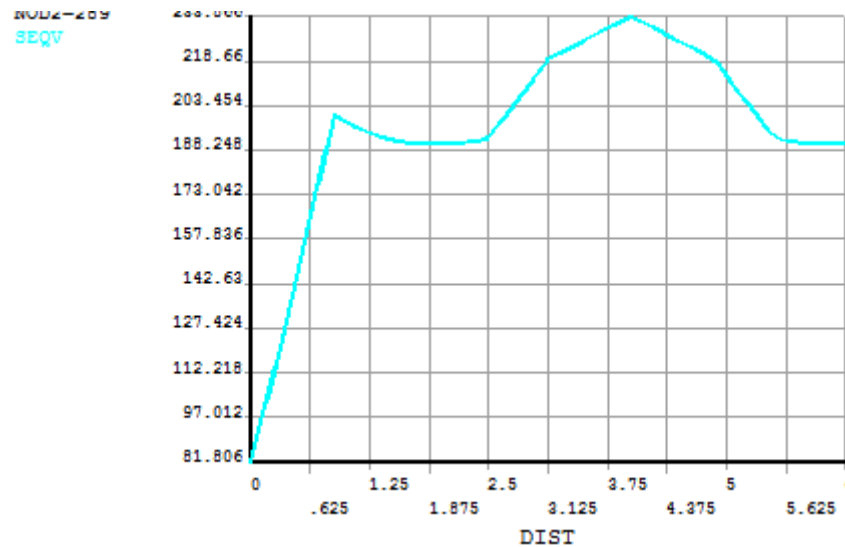


Figure 63 : courbes contrainte équivalente en fonction de la distance.

11. Conclusion :

Afin de répondre à l'ensemble des problématiques rencontrées dans la mise en forme des matériaux, la simulation numérique est devenue un outil incontournable pour les concepteurs. L'utilisation des modèles 2D avec remaillage adaptatif est devenue indispensable pour reproduire le plus fidèlement possible la réalité industrielle.

L'analyse de notre étude nous a permis de conclure ce qui suit :

1. La différence entre les résultats de la simulation est due :
 - La différence de la méthode de maillage
 - Condition aux limites
 - Les propriétés des matériaux
2. L'introduction du comportement du matériau dans les deux codes influe directement sur le calcul et les résultats.
3. la contrainte maximale est de l'ordre de 521MPa pour ANSYS, au centre de la plaque ce qui peut atteindre la limite à la rupture de l'acier, aussi la contrainte dans la ligne

virtuelle est en traction cote supérieur et en compression cote inferieur de la plaque, le mêmes phénomène est constater pour les résultats obtenue par ABAQUS.

Contents

1. Introduction :	54
2. Qu'est-ce que la simulation numérique ? :	55
3. La simulation virtuelle de la mise en forme des matériaux :	56
4. Apport de la simulation numérique à la mise en forme des matériaux [20]:	56
5. Eléments finis utilisés dans les simulations numériques de l'emboutissage :	57
5.1. Approches bidimensionnelles et approches solides :	57
5.2. Approche coque :	58
5.3. Approche membrane :	58
6. simulation sur ANSYS:	58
7. simulation sur Abaqus :	59
8. Présentation du problème étudié :	59
9. Discussion des résultats :	60
10. Construction du modèle :	60
10.1. Sur ANSYS :	60
10.2. Sur ABAQUS :	62
10.3. Les résultat :	63
10.3.1. Force en fonction du déplacement :	64
10.3.2. Représentation des contraintes de Von Mises :	67
11. Conclusion :	68

CONCLUSION GENERALE :

Dans le premier chapitre nous avons posé les bases de la mise en forme des tôles. Tout d'abord les différents procédés de mise en forme à froid ont été énumérés et les différents modes de déformations rencontrés en mise en forme ont été présentés. Le procédé d'emboutissage est mis en avant et avec lui les principaux problèmes liés à la mise en forme des tôles.

Le deuxième chapitre pose les bases de la mise en forme de tôle. Tout d'abord les différents procédés de mise en forme à froid ont été énumérés et les différents modes de déformations rencontrés en mise en forme ont été présentés. Le procédé d'emboutissage est mis en avant et avec lui les principaux problèmes liés à la mise en forme de tôles. Pour prédire la réussite d'un embouti, les courbes limites de formage ont été introduites.

Afin de répondre à l'ensemble des problématiques rencontrées dans la mise en forme des matériaux, la simulation numérique est devenue un outil incontournable pour les concepteurs. L'utilisation des modèles 2D avec remaillage adaptatif est devenue indispensable pour reproduire le plus fidèlement possible la réalité industrielle. Le modèle étudié lors du troisième chapitre sur ANSYS et ABACUS permet de mieux apercevoir les différents phénomènes mécaniques ayant lieu lors d'une opération d'emboutissage.

Bibliographie :

- [1] Mise en forme des matériaux métalliques par déformation plastique : influence du comportement matériel – colloque national de la recherche en IUT – Pierre Yves Manach.
- [2] <http://fr.wikipedia.org/wiki>
- [3] MISE EN FORME DES MÉTAUX ET FONDERIE REF: TIP552WEB
- [4] http://lmm.epfl.ch/webdav/site/lmm/shared/TP_MX2-GM2
- [5] <http://www.educreuse23.ac-limoges.fr>
- [6] Thèse COMPREHENSION ET MODELISATION DES MECANISMES DE LUBRIFICATION LORS DU TREFILAGE DES ACIERS INOXYDABLES AVEC LES SAVONS SECS - Carole LEVRAU.
- [7] technique d'ingénieur Doc. B 7 510
- [8] technique d'ingénieur Doc. B 7 540
- [9] thèse Étude et conception d'un procédé d'emboutissage - Toufik SEDRAT
- [10] BT3 B7535 : Tribologie. *Paris*.
- [11] <http://fr.scribd.com/>
- [12] <http://www.emboutissage-chine.com/>
- [13] <http://www.ansej.org.dz/sites/default/files/Industrie/>
- [14] <http://www.imperator-ind.com/>
- [15] <http://www.delfix.fr/>
- [16] <http://fr.slideshare.net/>
- [17] Thèse Répartition des déformations en étirage pliage et leurs effets sur le retour élastique - KHIRANI DALEL
- [18] <http://www.rocdacier.com>

[19] Alain Col - L'EMBOUTISSAGE DES ACIERS

[20] <http://mediamef.utt.fr/>

[21]

Thèse ETUDE, SIMULATION ET EXPERIMENTATION DU COMPORTEMENT
MECANIQUE DES COUVERCLES DES BOITES D'EMBALLAGE METALLIQUES
POUR PRODUITS CHIMIQUES - Redhouane LOMBARKIA

[22] <http://www.mfg.com/fr/>

[23] <http://www.acheter-vendre-machines.fr/2013/06/lemboutissage-procede-et-utilisation.html>

[24]

<http://aluminium.matter.org.uk/content/html/fre/default.asp?catid=187&pageid=2144416736>

[25] Aciers inoxydables - Mise en œuvre - Mise en forme par déformation plastique à froid
Référence M4542

[26] <http://www.cqrda.ca/>

[27] <http://www.cea.fr/>

[28] <http://www.techniques-ingenieur.fr/>

[29] <http://www.ansys.com/>

[30] <http://notech.franceserv.com/>

[31] <http://www.leblogdelusinagedeprecision.com/>

[32] <https://www.yumpu.com/fr>

[33] <http://www.dvai.fr/>

[34] photo réel

[35] THÈSE CONTRIBUTION A L'ANALYSE DU RETOUR ELASTIQUE EN
EMBOUTISSAGE

Présentée devant - L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon

EXIQUES

FRANÇAIS – ANGLAIS

allangement	A	Elongation	flan	F	Blank
anisotropie		Anisotropy	Force au poinçon		Pubch load
Atelier d'emboutissage		Press shop	frottement		Friction
	B			J	
bati		Bed	jeu		Clearance, Grap
	C			L	
CAO		CAD	Limite d'élasticité		Yield strength, Yield stress
cisaillement		Sheer		M	
CLF		FLC	matrice		die
Coefficient anisotropie		r-value		O	
Coefficient de frottement		Friction coefficient	opération		Stage
contrainte		Stress		P	
coulisseau		Slide(am)	pli		Fold, Wrinkle
Courbe limite de formage		Forming limit curve	poinçon		Punch
critère		Criterion	presse		Press
	D		procédé		Process
dechet		Waste material		R	
découpage		Blanking	apport d'emboutissage		Drawin ratio
déformation		Strain	Rayon de matrice		Die ratius
détourage		Triming	Rayon de poinçon		Punch radius
Double effet		Double action	réemboutissage		Redrawing
	E		Retour élastique		Spring back
écrouissage		Strain hardening, Work harddening	rétrient		Shrink dra
effet		Action		S	
emboutissage		Press forming, Stamping	Serre-flan		Blankholder
Emboutissage profond		Deep drawing	Simple effet		Single action
épaisseur		Thicknes		T	
Essai de traction		Tensile test	Tôle		Sheet
expansion		Steching			

ملخص

في هذا العمل ، قمنا بدراسة تأثير متغيرات عملية التقدير على نوعية المادة المقعرة. و خصص الفصلين الأولين للدراسة المرجعية على مبدأ وتقنيات ختم وتحليل أنماط مختلفة من المواد. في الفصل الأخير عرضنا المبدأ والمصلحة من النمذجة العددية للعملية باستخدام طريقة العناصر المحددة على الأنسيز و الأبكوس رموز الحساب. ويظهر هذا العمل تأثير نمذجة السلوك الميكانيكي للمواد على نوعية النتائج التي تم الحصول عليها من محاكاة العناصر المحدودة

الكلمات المفتاحية : التشكيل, التقدير, المحاكات, أنسيز, أبكوس.

Résume :

Dans ce travail, nous avons étudié l'influence des paramètres du procédé d'emboutissage sur la qualité de la pièce emboutie. Les deux premiers chapitres sont consacrés à l'étude bibliographique sur le principe d'emboutissage et ses techniques ainsi que l'analyse des différents modes de déformations engendre. Dans le dernier chapitre 3, on présente le principe et l'intérêt de la modélisation numérique du procédé en utilisant la méthode des éléments finis sur les codes de calcul ANSYS et ABAQUS.

Ce travail montre l'influence de la modélisation du comportement mécanique des matériaux sur la qualité des résultats obtenus lors de simulations numériques par éléments finis.

Mots clés : Mise en forme, Emboutissage, Éléments finis, ABAQUS.et ANSYS

Abstract:

In this work, we studied the influence of parameters of drawing process on the quality of the drawn part. The first two chapters are devoted to the bibliographical study on the principle and stamping techniques and the analysis of different modes begetttest deformations. In the last chapter 3 presents the principle and the interest of the numerical modeling of the process using the finite element method on the ANSYS and ABAQUS computer code.

This work shows the influence of modeling the mechanical behavior of materials on the quality of the results obtained from finite element simulations.

Key words: shaping, stamping, finished items, ABAQUS.and ANSYS.