

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère De l'Enseignement Supérieur et De la Recherche Scientifique



UNIVERSITE ABBES LAGHROUR - KHENCHELA

FACULTE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT GENIE MECANIQUE

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme

deMASTER

Filière: Génie Mécanique

Option: Génie Des Matériaux

Thème:

**Identification du comportement
mécanique des matériaux métalliques**

Présenté par:

Mr ALIOUA AlaEddine

Mr KHOUCHA Hamza

Encadré par:

Dr CHAHAOUI Oualid

Soutenu le: / /2020

Jury de soutenance :

Président :	Mr Brek Samir	(MCB)	Univ. Abbès Laghrou - Khenchela
Encadreur :	Mr CHAHAOUI Oualid	(MCA)	Univ. Abbès Laghrou - Khenchela
Examineur :	Mr Groun Brahim	(MAA)	Univ. Abbès Laghrou - Khenchela

Promotion: 2020

Remerciements

Avant toute chose, nous remercions Dieu, le tout-puissant, de nous avoir donné la force et la patience pour mener ce travail à bout.

Nous exprimons nos profonds remerciements et nos vives reconnaissances à Monsieur **CHAHAOUI Oualid**, Maître de conférences à l'Université Abbès Laghrour de Khenchela, d'avoir dirigé ce travail avec une grande rigueur scientifique ainsi que pour sa disponibilité, ses conseils.

Une très grande reconnaissance va à Monsieur **Brek Samir**, Maître-assistante à l'Université Abbès Laghrour de Khenchela, pour l'honneur qu'elle nous a fait en acceptant de présider le jury de soutenance.

Nous adressons également nos sincères remerciements à Monsieur **Groun Brahim**, Maître-assistante à l'Université Abbès Laghrour de Khenchela, d'avoir accepté de faire partie de ce jury et d'examiner ce travail.

Dédicace

Merci Allah de m'avoir donnée la capacité d'écrire et de réfléchir, la force d'y croire, la patience

d'aller jusqu'au mon but

Je dédie ce travail à

Mes très chers parents Elmekki et Louiza

Pour leur amour, leur encouragement, leur patience et leur soutien sans faille

Je les remercie de m'avoir accompagnée tout au long de mon parcours à ceux qui

m'ont tout donné sans rien en retour

Pour mon encadreur CHAHAOUI Oualid

Pour mes frères AbdElnuor et wail

Pour mes sœurs Hakima, Assia, Chaima, Soundousse et Razane

Pour toute la famille ALIOUA

Pour tous mes amis et mes proches sans exception

Ala Eddine

Dédicace

Merci Allah de m'avoir donné la capacité d'écrire et de réfléchir, la

force d'y croire, la patience d'aller jusqu'au but du rêve.

À l'âme de mon cher père (que dieu ait pitié de lui)

et de ma chère mère pour leur amour et leur support continu,

Je vous dois tous mes succès, tous mes bonheurs et

toutes mes joies. Je suis très heureuse et fière de votre

présence à mes côtés.

A mes chers frères ZOUHIR ET MOUHMED FARES

et mes sœurs AHLEM NOUSSA ET NOUHA et warda et tassnim

Que Dieu le tout puissant vous procure continuellement santé, bonheur et tranquillité.

Pour mon encadreur CHAHAOUI Oualid

Pour toute la famille KHOUCHA

Pour tous mes amis et mes camarades de promotion sans exception

A ceux qui m'ont encouragé et soutenu dans mes moments les plus

difficiles.

Hamza

Table des matières

Résumé

Liste des tableaux	I
Liste des figures	II

PARTIE BIBLIOGRAPHIQUE

Introduction general.....	1
---------------------------	---

Chapitre I : Généralité sur laminage.

I-1/Introduction.....	3
I-1/Historique	3
I-2/Le procédé delaminage.....	3
I-3/Les typedu laminage	4
I-3.1/ Laminageàfroid	4
I-3.2/ Laminageàchaud	5
I-3.3/La cage quartodelaminage	6
I-4/Défautsdelaminage.....	6
I-4.1/Défautsgéométriques.....	6
I-4.2/ Défautsdeplanéité.....	7
I-4.3/Contrôle des défautsdeplanéité	7
I.5/Conclusion.....	9

Chapitre II : Généralités sur le procédé d'emboutissage

II/L'emboutissage	10
II-1/Introduction	10
II-1.1/ Généralitésdel'emboutissage	10
II-1.2/ Définitiondel'emboutissage	12
II-2/Principed'emboutissage	13
II-3/Modes d'emboutissage	13
II-3.1/Emboutissageenexpansion.....	13
II-3.2/ Emboutissageen retreint.....	14

II-4/ L’emboutissage à température	15
II-4.1/ L’emboutissage à froid	15
II-4.2/ L’emboutissage à chaud.....	15
II-5/Machines utilisées en emboutissage	15
II-6/ Caractérisation en emboutissage	15
II-6.1/ Mesure de déformations en emboutissage	15
II-6.1.1/ Principe et analyse des déformations	16
II-6.1.2/ Courbes limites de formage	16
II-6.1.3/ Mesure des déformations	17
II-6.1.4/ Les modes de déformations	20
II-6.2/ Essais d'emboutissage	20
II-6.2.1/ Essais d’expansion Biaxiale.....	21
II-6.2.2/ Essais de rétreint	21
II-6.2.3/ Essais mixtes.....	22
II-6.3/ Aspects métallurgiques d’emboutissage	23
II-6.3.1/ Prise en compte de directions de laminage.....	23
II-6.4/ Aspects opératoires	25
II-6.4.1/ Paramètres liés à la presse	25
II-6.4.2/ Paramètres liés à la tôle	28
II.7/Conclusion	29

Chapitre III: Etude Expérimentales, Résultats Et Discussion

III-1/Présentation du formalisme mathématique	32
III-2/ Loi d’écoulement associée au critère de Hill	36
III-3/Coefficient d’anisotropie (Lankford)	36
III-4/Critère de plasticité de BBC2005	37
III-4.1/ Identification des paramètres d’anisotropie du critère BBC2005.	39
III-4.1.1/ Présentation des résultats.....	39
III-4.1.1.1/ Application des critères de l’anisotropie	39
III-4.2/ Détermination de la contrainte d’écoulement expérimentale.....	40
III-5/Détermination des grandeurs mécaniques à partir de 2 critères de plasticité	42
a) Identification des paramètres associés des deux critères	42
b) Résultats graphiques dans le cadre de la plasticité associée	43
Conclusion générale.....	45
Référence bibliographique	III

Résumé :

L'objectif essentiel de cette contribution est d'améliorer la prévision du comportement mécanique anisotrope des tôles laminées. Pour cela, on a proposé deux critères de plasticité, le premier est celui de Hill 1948 anciennement connu comme généralisation du critère isotrope de von Mises, il est quadratique, insensible à l'effet du contraire hydrostatique contenant 4 paramètres d'anisotropie à identifier analytiquement dans le plan de la tôle. Idem, pour le second, mais il est récent proposé par D, Benabic et ses collaborateurs en 2005 contenant 4 paramètres d'anisotropie à identifier numériquement moyennant la méthode Newton -Raphson ou autre.

Les résultats donnés par le critère récent sont d'une importance prévisionnelle remarquable en comparant par les résultats expérimentaux.

Abstract:

The main objective of this contribution is to improve the prediction of the anisotropic mechanical behavior of rolled sheets. For that, one proposed two criteria of plasticity, the first is that of Hill 1948 formerly known as generalization of the isotropic criterion of von Mises, it is quadratic, insensitive to the effect of the hydrostatic opposite containing 4 parameters of anisotropy to identify analytically in the plane of the sheet. Ditto, for the second, but it is recently proposed by D, Benabic and his collaborators in 2005 containing 4 anisotropy parameters to be identified numerically by means of the Newton -Raphson method or other.

The results given by the recent criterion are of remarkable predictive importance when comparing by the experimental results.

ملخص:

الهدف الرئيسي من هذا المساهمة هو تحسين التنبؤ بالسلوك الميكانيكي المتباين للصفائح الملفوفة. لذلك، اقترح أحد معايير اللدونة، الأول هو معيار Hill 1948 المعروف سابقاً باسم تعميم معيار الخواص -Mises von، إنه تربيعة، غير حساس لتأثير المعاكس الهيدروستاتيكي الذي يحتوي على 4 معلمات من تباين الخواص لتحديد تحليلي في مستوى الورقة. كما سبق، للثاني، لكن اقترح مؤخرًا D، Benabic، ومعاونوه في 2005 تحتوي على 4 متغيرات تباين يتم تحديدها عددياً عن طريق طريقة نيوتن-رافسون أو غيرها.

النتائج التي قدمها المعيار الأخير لها أهمية تنبؤية ملحوظة عند مقارنتها بالنتائج التجريبية.

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Les contrainte d'écoulement en (MPa) et les coefficients de l'anisotropie de Lankford suivant les directions ($0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ etéqui biaxiale)	39
Tableau 2 : Les valeurs des contraintes d'écoulements et des coefficients de l'anisotropie de Lankford normalisées	40
Tableau 3 : Identification des paramètres associés des deux critères	42

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Schéma du principe du laminage d'une tôle	4
Figure 2: Les étapes de laminage à froid	5
Figure 3: Les étapes de laminage à chaud	5
Figure 4: Schéma d'une cage quart de laminage	6
Figure 5 : Différents types de défauts de planéité rencontrés en laminage	7
Figure 6: Divers actionneurs de contrôle des défauts de planéité	8
Figure 7 : Mesure des défauts de planéité	9
Figure 8 : Outils d'emboutissage de carrosserie automobile	10
Figure 9 : Procédé d'emboutissage	11
Figure 10 : Procédé d'emboutissage avec freinage de la tôle sous serre-flan	13
Figure 11 : Emboutissage avec serre flan et Emboutissage d'une pièce complexe	13
Figure 12: a) Emboutissage par expansion, b) Emboutissage profond avec créteint	14
Figure 13: Courbe limite de formage pour différents domaines	17
Figure 14 : Différentes nature de grilles de déformation	18
Figure 15 : Exemple de grille déformée	18
Figure 16 : Mesure par méthode optique GOM	19
Figure 17 : Résultats obtenus par GOM	20
Figure 18 : Principaux modes de déformation en emboutissage illustrés par des emboutis servant à des essais de caractérisation	21
Figure 19 : Essai Swift	22
Figure 20: Essai Fukui et rupture caractéristique	23
Figure 21: Hauteur relative des cornes	24
Figure 22: Variation de l'arrondi sur la matrice	25
Figure 23 : Ajout de 2 à 3 mm pour détournage	29

Figure 24: Schéma de l'essai de traction pour la détermination du coefficient de Lankford $R(\theta)$ d'un état homogène.....	32
Figure 25: Eprouvette de traction uniaxiale.....	35
Figure 26: Évolution de la surface d'écoulement issue du critère de Hill (1948) en fonction du coefficient de Lankford	37
Figure 27: Résultats de calcul de contrainte d'écoulement expérimentale $\sigma(\theta)$ normalisée pour les matériaux	41
Figure 28: Résultats de calcul du coefficient de Lankford expérimentale $r(\theta)$ normalisée pour les matériaux.....	41
Figure 29: Comparaison du Critère de Hill48 avec les données expérimentales des contraintes et du coefficient d'anisotropie (AFR)	43
Figure 30: Comparaison du Critère Yld2000-2d avec les données expérimentales des contraintes et du coefficient d'anisotropie (AFR).....	44



*Introduction
Générale*

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Dans tous les domaines de l'industrie, la notion de mise en forme des matériaux intervient soit en amont, en aval ou en cours de production. L'objectif premier est de conférer à une pièce métallique des dimensions situées dans une fourchette de tolérances données ainsi que des caractéristiques d'emploi, notamment mécaniques, précises. Parmi les techniques de formage les plus répandues dans l'industrie on trouve le laminage. Cette opération de mise en forme par déformation plastique, destinée à réduire la section d'un produit de grande longueur, s'effectue par passage de celui-ci entre deux ou plusieurs cylindres tournant autour de leur axe c'est la rotation des outils qui entraîne le produit dans l'emprise par l'intermédiaire du frottement.

Le laminage engendre un gradient de déformation suivant l'épaisseur de la tôle. Le cisaillement est plus ou moins intense en surface, mais nul à mi-épaisseur de la tôle. L'hétérogénéité des grandeurs mécaniques induit une hétérogénéité de la texture et de la microstructure des produits laminés. Ces problèmes d'hétérogénéité et d'anisotropie de propriétés mécaniques des matériaux ayant subi une grande déformation plastique ainsi que différents traitements thermiques ont une importance cruciale au niveau industriel.

Le principal développement attendu est alors de pouvoir prévoir, voire de contrôler, les caractéristiques mécaniques et leurs variations dans l'épaisseur de la tôle. En effet, commercialement, c'est la limite basse des caractéristiques mécaniques des pièces qui détermine la valeur retenue à la vente et qui sert de référence au dimensionnement des structures. Surtout, il est indispensable d'identifier, dans tout le processus qui mène du matériau de coulée à la pièce finale, les étapes qui sont déterminantes dans l'apparition et/ou le contrôle des hétérogénéités. La connaissance des conditions de développement des hétérogénéités des grandeurs mécaniques et de texture est donc primordiale ainsi que la mise au point d'une procédure numérique permettant de les prédire. [1]

Dans d'autre part, nous savons que les essais de caractérisation mécanique monodirectionnelle comme la traction uniaxiale, confèrent des grandeurs mécaniques traduisant les propriétés élastique et plastique suivant la direction de sollicitation. Un tel test est primordial pour déterminer la loi de comportement mécanique d'un matériau donné. La courbe de traction est limitée en déformation par l'effet de striction se caractérisant avant tout par une concentration et localisation de la déformation dans la partie utile de l'éprouvette. Il est donc difficile d'obtenir une loi de comportement où la déformation au-delà de 20% (pour les matériaux métalliques).

INTRODUCTION GENERALE

La prévision du comportement mécanique anisotrope des deux tôles utilisées dans l'article de D. Banabic de 2003 [2] comportant les caractérisations expérimentales d'un acier ferritique interstitiel calmé ((IF-steel)) et un alliage d'aluminium de série 600(A6XXX-T4).

Nous présentons ci-dessous les formalismes de développement mathématique de nos deux fonctions d'écoulements anisotropes de base employées dans cette contribution. La première fonction est celle de Hill1948 de forme quadratique par contre la seconde est le critère de BBC2005 (*Banabic – Balan – Comsa*) utilisant deux transformations linéaires de tenseur des contraintes de Cauchy de caractère non quadratique. Notre contribution est la fois de nature théorique mais de vocation d'application industrielle directe. On va identifier nos paramètres issus des deux critères dans le cadre de la plasticité associée puis dans celui de la plasticité non associée en perspective. Après présentation du formalisme mathématique des paramètres mécaniques recherchés, il nous a paru que la validation par caractérisation expérimentale de l'anisotropie est inévitable par les modèles utilisés.

Le manuscrit présenté est donc subdivisé en trois chapitres précédés d'une introduction générale. Le premier chapitre est présenté la généralité sur le laminage.

Le deuxième chapitre est présenté un rappel théorique sur l'emboutissage fait l'objet du troisième chapitre. Le troisième chapitre de ce mémoire est donc consacré à l'interprétation et à la discussion de l'ensemble des résultats obtenus.

Finalement, on arrive à une conclusion générale qui rappelle les différents points décrits dans le mémoire et les principaux résultats obtenus.



Chapitre I:
Généralité Sur Le laminage

I. Introduction:

Le laminage est une opération de mise en forme par déformation plastique, destinée à réduire la section d'un produit de grande longueur, par passage entre deux ou plusieurs outils tournant autour de leur axe ; c'est la rotation des outils qui entraîne le produit dans l'emprise par l'intermédiaire du frottement. C'est la définition du généraliste. Le procédé de laminage asymétrique permet de réduire l'épaisseur d'une tôle (ou d'un Produit) par passage entre deux cylindres qui n'ont pas les mêmes diamètres (asymétrie géométrique) ou/et ne tournent pas à la même vitesse (asymétrie cinématique) ou/et n'ont pas les mêmes états des surfaces ou/et ou de température différente. L'asymétrie peut aussi être engendrée par une asymétrie dans les propriétés de la tôle à l'entrée comme : un gradient de température entre le haut et le bas ou une différence des paramètres rhéologiques de cettedernière.[3]

I. 1.Historique:

Le laminage est apparu dans l'usine sidérurgique avec d'autres techniques de mise en forme telles que le forgeage au martinet, au marteau pilon ou à la presse. L'évolution des techniques de forgeage et de laminage ont historiquement suivi des voies complémentaires dans la recherche de la productivité. Les premières forges employaient l'énergie hydraulique et les premiers martinets furent construits à partir du 12e siècle. Ils furent peu à peu remplacés par un marteau-pilon entraîné par la vapeur, dont on trouve le premier exemple à simple action en France en 1842. Le premier marteau à double action sera construit aux États-Unis en 1888. La presse hydraulique est une invention anglaise datant de l'année 1861. Le premier laminoir fut employé en France en 1553 pour travailler l'or et l'argent. Vers 1750 les premières applications du laminoir à la mise en forme de l'acier sont citées dans plusieurs pays européens. Henry Cort en Angleterre introduira à partir de 1783 les premières augmentations de taille, de puissance et de capacité ouvrant ainsi une période d'évolution rapide des laminoirs. La force motrice nécessaire sera dans un premier temps la vapeur, remplacée au 20e siècle par l'énergieélectrique.[4]

I.2. le procédé delaminage:

Le laminage consiste à réduire l'épaisseur d'une tôle métallique de manière continue, par passages successifs entre des cylindres de travail (laminoir) (Figure 1), pour obtenir des tôles minces La production de tôles laminées s'e□ectue généralement en 3 phases. La première phase est la production de brames par fonderie en coulée continue. Ces brames ont généralement des épaisseurs très importantes (25 cm) sur plusieurs mètres et peuvent peser jusqu'à 20 tonnes.

La deuxième phase est le laminage à chaud. Elle consiste à transformer la brame en une

GENERALITE SUR LE LAMINAGE

bobine de tôle de quelques millimètres d'épaisseur (1 à 1.5 mm) et se réalise à une température comprise entre 1200 C et 1300 C. Elle se pratique à chaud afin de limiter les efforts de laminage nécessaires pour laminer la plaque.

La dernière phase est le laminage à froid qui est effectué à une température qui avoisine 100 C. Elle permet à partir d'une tôle précédemment laminée à chaud de réduire l'épaisseur et de réaliser des tôles minces à l'épaisseur souhaitée par le client. Les lots de bobines laminées pèsent au moins 10 tonnes. Le laminage à froid peut produire des tôles minces jusqu'à 0.1 mm en plusieurs passes sur des laminoirs indépendants ou montés en tandem. Cette dernière phase fait l'objet d'une attention constante sur la planéité et les caractéristiques mécaniques du produit laminé. Les applications potentielles des produits laminés sont diverses : carrosserie d'automobile (tôle mince d'épaisseur moyenne comprise entre 0.5 et 1 mm, l'emballage (fer blanc d'épaisseur inférieur à 0.2 mm), ... On se limitera dans la suite de ce document au laminage à froid.[5]

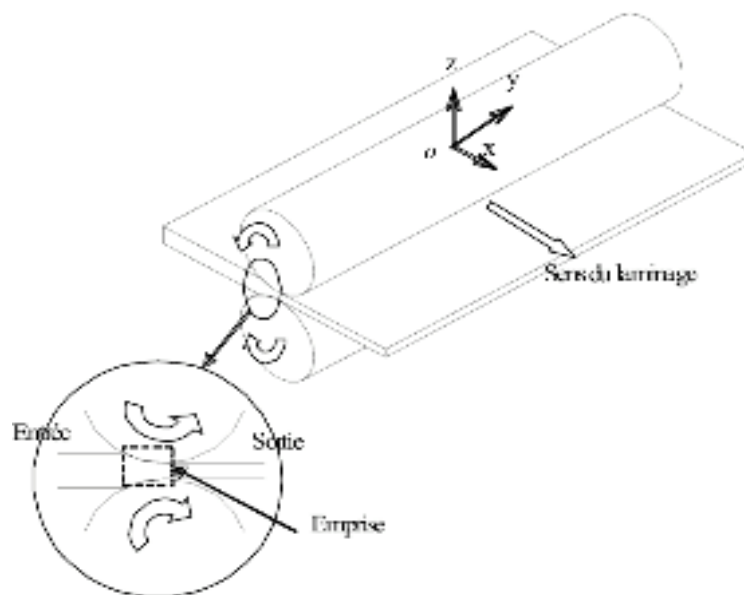


Figure 1: Schéma du principe du laminage d'une tôle. [5]

I.3. Les types de laminage:

I.3.1. Laminage à froid:

Le laminage à froid est une étape importante de la fabrication des tôles métalliques. Au cours du procédé, le métal est écrasé par passages successifs entre des cylindres jusqu'à obtenir l'épaisseur et les propriétés désirées. Pour rester compétitifs, les lamineurs cherchent

en permanence à maintenir et à accroître la qualité de leurs produits, la productivité et la flexibilité de l'outil industriel. Pour ce faire, il leur faut parfaitement comprendre et maîtriser toutes les étapes du procédé. (Figure 2)

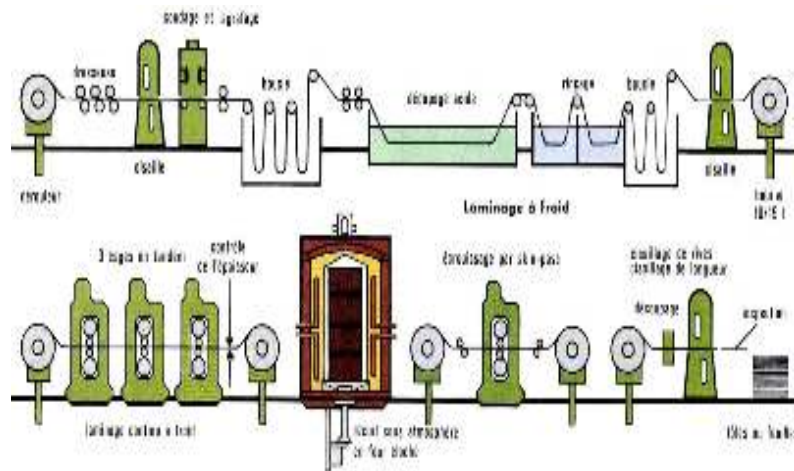


Figure 2: Les étapes de laminage à froid. [5]

I.3.2. Laminage à chaud:

Le laminage à chaud est un type de déformation à chaud. Du point de vue de la science des matériaux, la déformation à chaud se produit dans la plage de Température de recristallisation et de recuit des matériaux c à d au-dessus de la moitié du point de fusion. En technique de fabrication la déformation à chaud fait référence aux procédés dans lequel le matériau est chauffé pour être déformé. Le laminage à chaud permet de produire toutes les grandes familles de produits comme les plaques, les bobines, les carrés, les ronds, les fils, les poutrelles, etc. On distinguera 4 étapes successives (Figure 3): le réchauffage, le dégrossissage, les finisseurs et le refroidissement avant les opérations de finissage voire de parachèvement ou de traitement anti corrosion.[6]

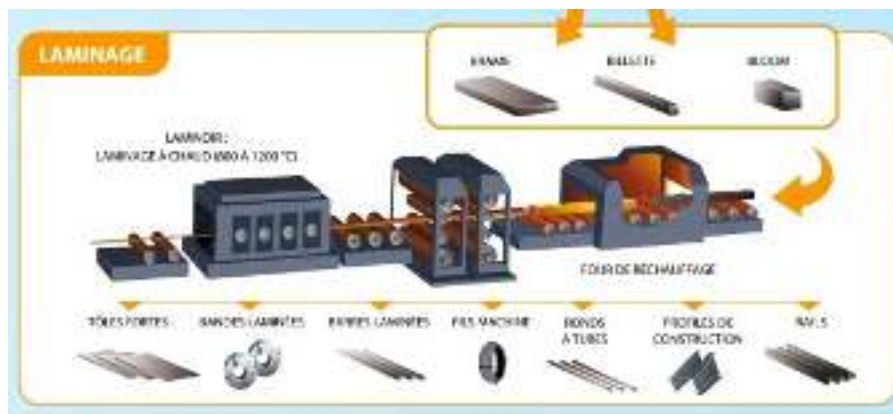


Figure 3: Les étapes de laminage à chaud. [6]

I.3.3. La cage quarto delaminage:

Les cages des laminoirs sont généralement « quarto », composées de deux cylindres de travail de faible diamètre (de l'ordre de 10 cm), assurant le laminage, et de deux cylindres d'appui de diamètre plus grand, comme schématisé sur la (Figure 4). Différents actionneurs de la cage (vis de serrage, vérins, etc.) permettent de régler l'épaisseur correcte en sortie d'emprise.[6]

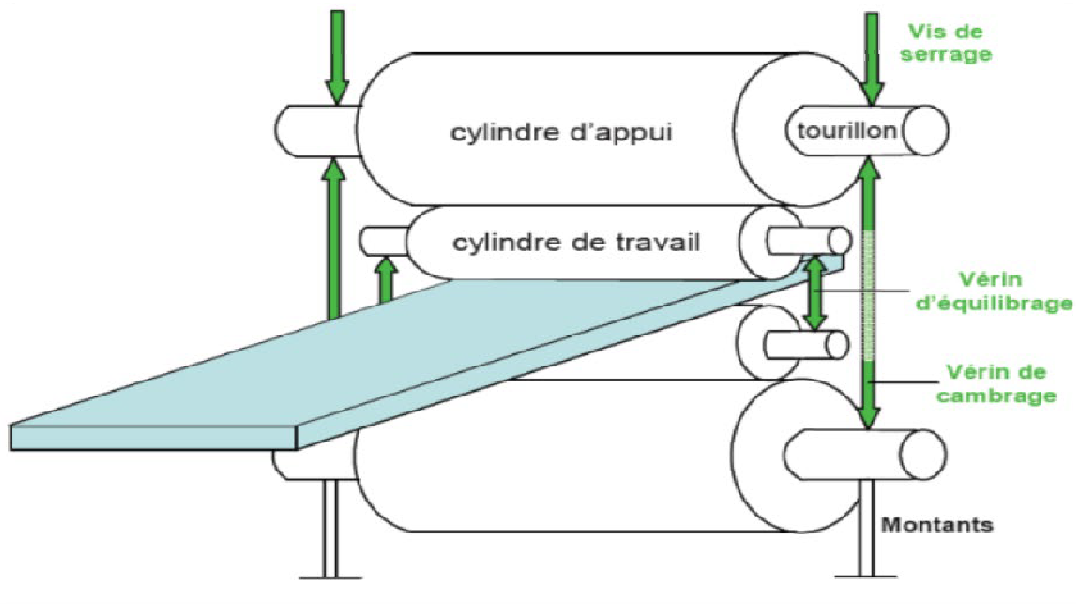


Figure 4: Schéma d'une cage quarto de laminage. [6]

I.4. Défauts delaminage:

I.4.1. Défauts géométriques:

Les machines et les outils (cylindres, cages...) ne sont pas infiniment rigides, se déforment, et cèdent élastiquement sous les efforts appliqués. Cela perturbe aussi la géométrie des produits, créant des problèmes de profil et de planéité des produits plats. Des problèmes de réglage des outils de production peuvent avoir des conséquences du même ordre.

Des défauts géométriques peuvent apparaître à la suite de la déformation locale du rouleau en contact avec la tôle dans l'emprise : Les contraintes de pression dans le contact sont relaxées par l'élargissement de la tôle qui est fort si les rapports.

Épaisseur/largeur et épaisseur/longueur de contact sont grands (c'est le cas du laminage à chaud). Cet élargissement est faible car inhibé par le frottement des outils dans le cas du laminage à froid ; les contraintes de contact, donc les déformations des cylindres, seront très fortes si on lamine des produits minces parce que les effets du frottement seront exacerbés par

le grand rapport surface/volume. Le rôle des efforts de tension et contre tension imposées par les moteurs de bobinage est dans ce cas primordial pour minimiser ces défauts.

A ces défauts d'origine mécaniques se superposent des déformations d'origine thermique, liées à la dilatation, qui conduit à une hétérogénéité du diamètre du cylindre le long de son axe. Ces dilatations peuvent entraîner des hétérogénéités d'épaisseur des produits finaux.[7]

I.4.2. Défauts de planéité:

On distingue deux types de défauts de planéité (Figure 5)

- Des défauts de planéité non développables, tels que les défauts appelés bords longs ou centre long.
 - Des défauts de planéité développables, tels que les défauts de cintre, tuile et vrillage.
- [8]

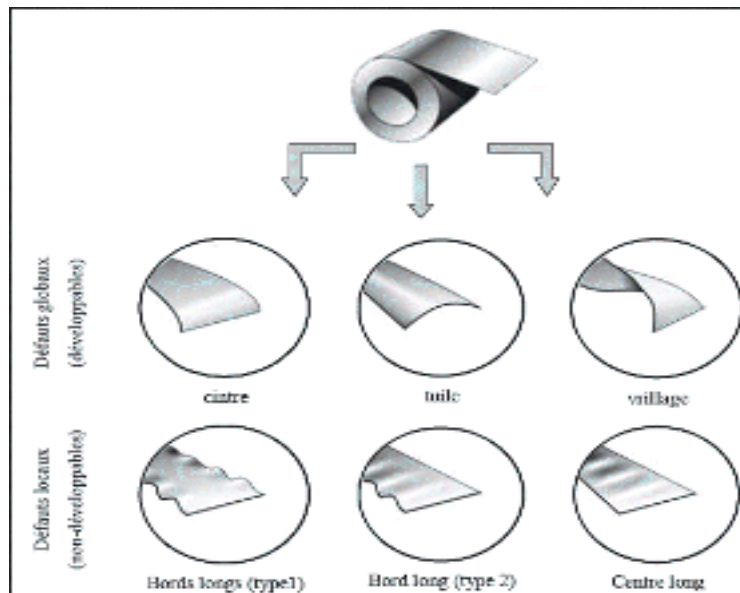


Figure 5: Différents types de défauts de planéité rencontrés en laminage. [8]

I.4.3. Contrôle des défauts de planéité:

Dans la littérature, on trouve plusieurs méthodes dont le lamineur dispose pour contrôler les défauts de planéité. Berger et al. Recensent quelques-unes de ces méthodes dans la (figure 6) Ces méthodes sont utilisées pour corriger la flexion des cylindres ou la distribution de la longueur sur la largeur de bande. Toutes ces méthodes se basent sur un procédé de réglage et d'ajustement des cylindres, donc de la distribution de la longueur de bande afin de corriger au mieux les défauts attendus. La figure 6 amontre des rouleaux inclinés qui peuvent être utilisés pour améliorer la planéité finale du produit laminé. Dans ce cas, les mesures de planéité sont

GENERALITE SUR LE LAMINAGE

utilisées pour détecter les irrégularités d'inclinaison de la bande et les rouleaux sont inclinés par rapport à la bande. Par ailleurs, appliquer des forces de serrage sur les tourillons des cylindres (cf. figure 6-b), permet de corriger les défauts au centre ou aux bords de la bande. Il s'agit d'appliquer des efforts pour fléchir les cylindres. On peut toutefois appliquer ces forces sur la surface des cylindres selon le type de défauts que l'on souhaite corriger (cf. figure 6-c). Cette méthode est souvent utilisée dans le laminage des tôles avec multi-cages (cage quarto, cage sexto...). Une autre méthode plus efficace est le déplacement axial des rouleaux (cf. figure 6-d) ou l'inclinaison des deux cylindres (cf. figure 6-e). Les cylindres sont ainsi décalés de manière à modifier les répartitions des contraintes et corriger les défauts attendus. La figure 6 montre une dernière méthode qui consiste à arroser de façon fractionnée les cylindres en contrôlant le débit des buses du système de refroidissement ou de lubrification. Cette méthode permet donc de modifier le profil thermique des cylindres et la répartition des contraintes de contact.

Notons qu'il est difficile de corriger complètement les défauts en laminage à froid. Généralement, en appliquant l'action des diverses méthodes précédemment citées, on peut obtenir d'autres défauts dus à des profils d'élongation plus complexes dans la largeur de la tôle. Ainsi lorsqu'on cherche par exemple à corriger une planéité défectueuse de la bande provenant du laminoir à chaud, on peut obtenir des défauts "bords longs" si les flexions des cylindres sont plus fortes qu'à chaud. Inversement, on peut obtenir des défauts centre long

».[9]

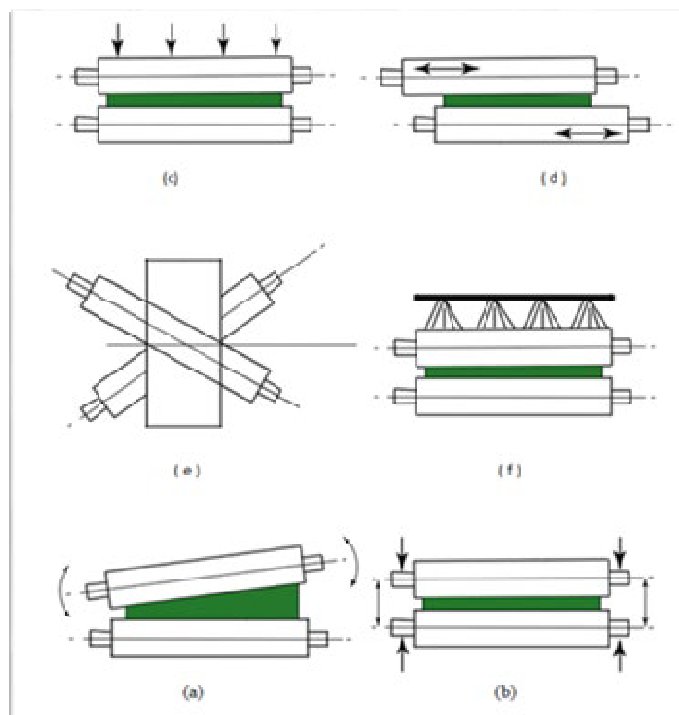


Figure 6 : Divers actionneurs de contrôle des défauts de planéité ; Figure (a) : cylindre supérieur incliné par rapport au cylindre inférieur ; Figure (b) : Forces de serrage sur les tourillons des cylindres ; Figure (c) : Forces de serrage sur la surface des cylindres ; Figure (d) : Décalage axial des cylindres ; Figure (e) : Croisement des cylindres ; Figure (f) : Refroidissement des cylindres par un arrosage. [9]

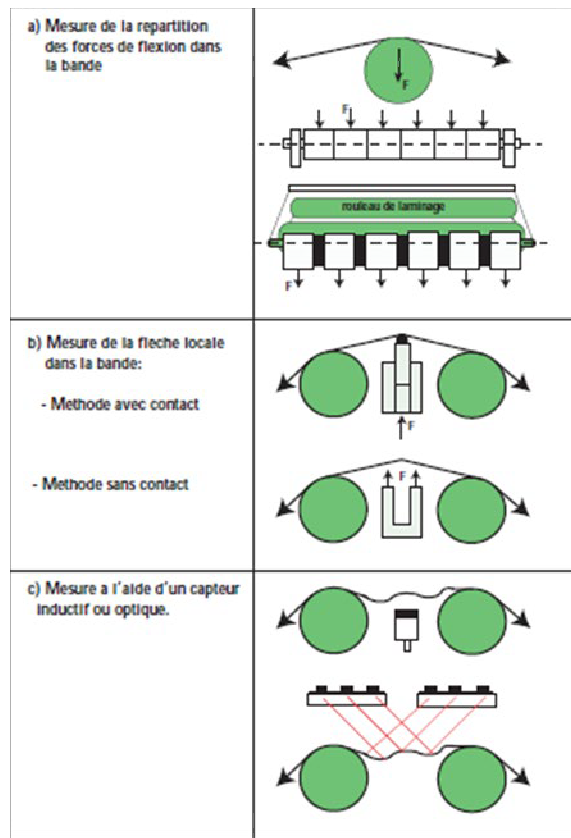


Figure 7: Mesure des défauts de planéité. [9]

I.5. Conclusion:

Ce chapitre nous a permis de présenter un bref aperçu historique de l'utilisation des laminoirs tandems et leurs utilisations et fonctionnements.



Chapitre II:
Généralité Sur L'emboutissage

II/ L'emboutissage :

II-1/Introduction:

La technique d'emboutissage est très répandue dans différents secteurs industriels comme : le transport, carrosserie automobile (Figure 8) et bac de brouette, appareils électroménagers, emballages métalliques, ... etc. Un des intérêts principaux expliquant le succès de ce procédé consiste dans la variété des composants réalisables et le taux de production élevée. [10]

La reconnaissance mondiale de procédé d'emboutissage est due en grande partie à la pression d'éléments extérieurs comme la nécessité croissante d'alléger les produits, la lutte contre la corrosion ou la concurrence des matériaux non métalliques. [11]

Ce chapitre, vise à présenter le principe et les généralités sur les modes d'emboutissage, et les formes d'emboutis, suivi d'une présentation des essais et de la mesure de déformations en emboutissage, et nous serons fini le chapitre par une description de l'aspect métallurgique et l'aspects opératoires d'emboutissage.

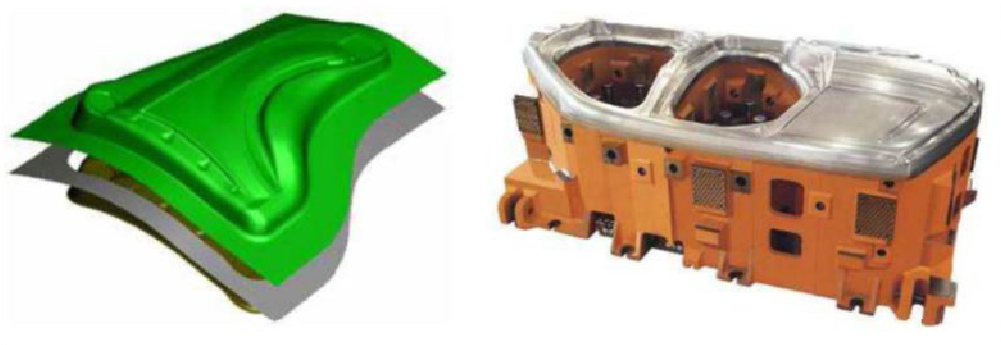


Figure 8 : Outils d'emboutissage de carrosserie automobile. [10]

II-1.1/ Généralités de l'emboutissage :

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

La technique d'emboutissage consiste à fabriquer, à partir d'un flan plan de faible épaisseur, une pièce de forme complexe non développable en générale (Figure 9). Le flan étant plaqué,

avec une certaine force contre la matrice, par le serre-flan et, mis en forme par avancée du poinçon à l'aide d'une presse [12]. Le procédé d'emboutissage est présenté comme suit :

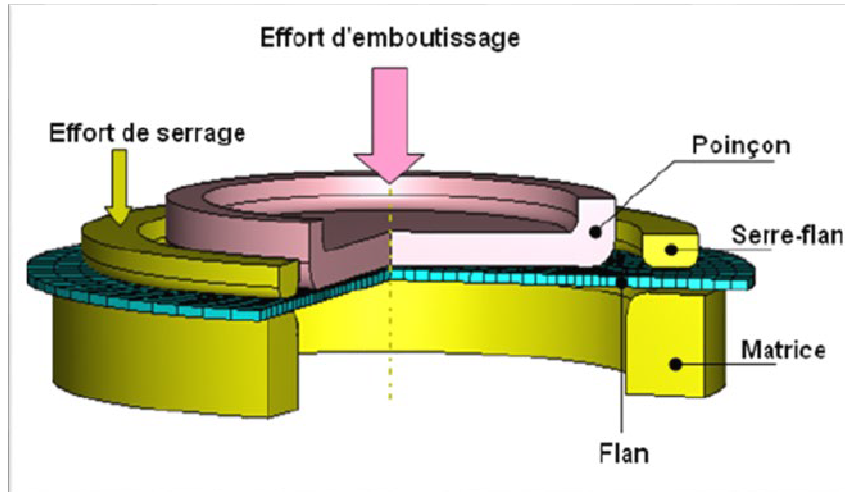


Figure 9 : Procédé d'emboutissage. [12]

L'emboutissage se décompose de la manière suivante :

- Définition de la direction de l'emboutissage.
- Définition du contour et de la position du flan initial.
- Descente du serre-flan pour plaquer la tôle sur la matrice.
- Mise en forme de la tôle par avancée du poinçon.
- Découpage des habillages de l'embouti afin d'obtenir la pièce finale.

Les paramètres principaux du procédé sont:

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

Donc la réalisation d'un emboutissage est complexe, et sa réussite est souvent liée à l'expérience. En effet, l'emboutissage se définit, rappelons-le, par une transformation permanente d'une feuille de métal en une forme tridimensionnelle par l'action d'outils.

Cela rend possible de mettre en exergue les aspects suivants :

- Les grandes transformations géométriques d'une structure mince.

- Le comportement élasto-plastique anisotrope du matériau.
- Les contacts et frottements entre les outils et la tôle.

Et alors, nombreux sont ceux qui, désireux de connaître mieux le processus pour l'améliorer, ont développés des aides à la conception des outils et autres outils d'analyses et de simulation. On peut répertorier des méthodes géométriques, expérimentales et analytiques sur des formes simples [13, 14]. Plus près de nous, l'ordinateur et l'avènement de la technique des éléments finis, qui ont permis le développement du calcul numérique, ont mené à la création de logiciels permettant la simulation de crashes, via la recherche militaire, et le calcul des structures. D'après ces codes, des logiciels de simulation numérique d'emboutissage des tôles sont apparus.

II-1.2/ Définition de l'emboutissage :

La méthode d'emboutissage des tôles minces est un procédé de mise en forme couramment utilisé dans l'industrie. Ce procédé consiste à déformer plastiquement des tôles minces à chaud ou à froid pour obtenir des pièces de formes complexes. Avec cela, cette méthode est confrontée au problème du retour élastique dû à la restitution de l'énergie élastique emmagasinée pendant la phase de chargement, ce qui conduit à un changement de géométrie de la pièce emboutie par tôles minces on veut dire les tôles qui se présente sous la forme d'une feuille de moins de 3 mm d'épaisseur, appelé flan aussi [15].

Ce formage s'effectue sur une presse au moyen d'un outillage dont la configuration détermine l'effet obtenu sur le flan :

- Outils à simple effet : la plus simple configuration, composée principalement d'une matrice et d'un poinçon.
- Outils double effet : comprend en plus de l'outil simple effet, un serre-flan. D'autres éléments caractérisant le type de presse et dont nous parlerons ultérieurement.

Donc l'outillage utilisé en emboutissage comprend (la figure 10) :

- **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.
- **Un serre flan** : pour 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.
- D'autres éléments caractérisant le type de presse.

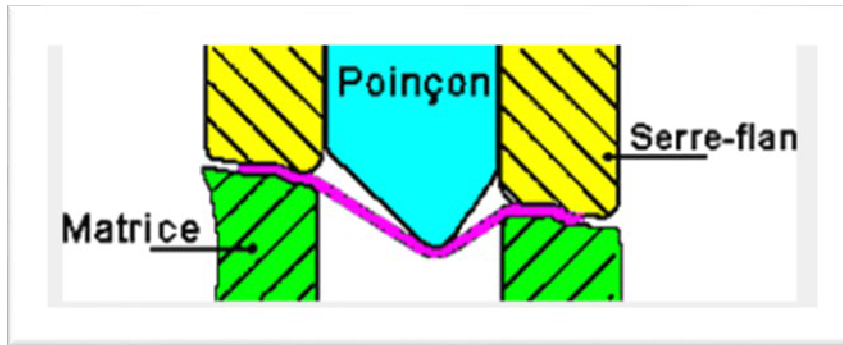


Figure 10 : Procédé d'emboutissage avec freinage de la tôle sous serre-flan. [15]

II-2/ Principe d'emboutissage :

La méthode d'emboutissage est un procédé de formage par déformation plastique à froid des métaux (tôle). Cette méthode transforme une feuille appelée flan en une surface ordinairement non développable. Il est effectué sur une presse au moyen d'un outillage qui inclut deux pièces principales : le poinçon et la matrice (Figure 11).

Le poinçon a la forme intérieure de la pièce à obtenir et la section de la matrice est similitude à celui du poinçon. Au cours d'opération d'emboutissage, le flan est exposé à la fois aux forces radiales et tangentielles ou de combinaison variable. [16]

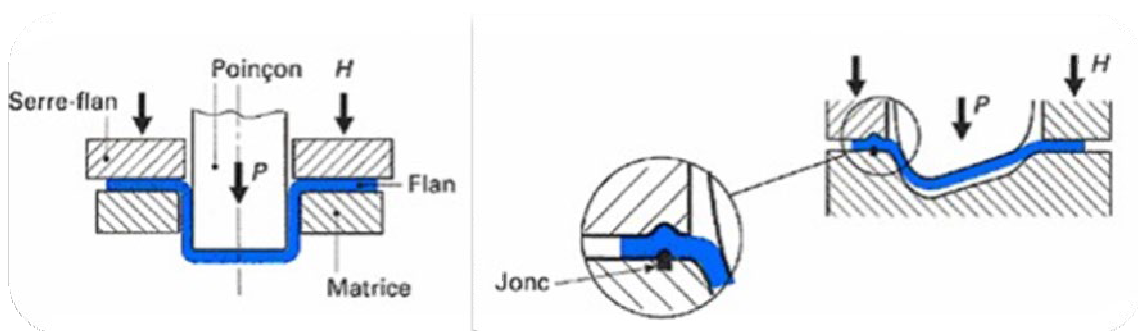


Figure 11 : Emboutissage avec serre flan et Emboutissage d'une pièce complexe. [17]

II-3/ Modes d'emboutissage :

Le procédé d'emboutissage impose à la tôle différents modes de déformation pour obtenir une surface creuse. Le type d'outillage conditionne les deux cas limites de déformation [17] :

II-3.1/ Emboutissage en expansion :

C'est l'accroissement du diamètre d'un corps creux, à partir d'une action sur sa paroi interne à l'aide d'un outil, d'un fluide ou d'un matériau élastique. Le schéma (Figure 12-a) présente un emboutissage par expansion sur le poinçon, le flan étant bloqué sous le serre-flan, et l'épaisseur sous le poinçon diminue.

II-3.2/ Emboutissage en retreint :

C'est la réduction diamétrale de l'extrémité ouverte d'un corps creux. Le schéma (Figure 12 – b) met en évidence un emboutissage profond avec rétreint du métal glissant sous le serre-flan, l'épaisseur entre serre-flan et matrice peut augmenter.

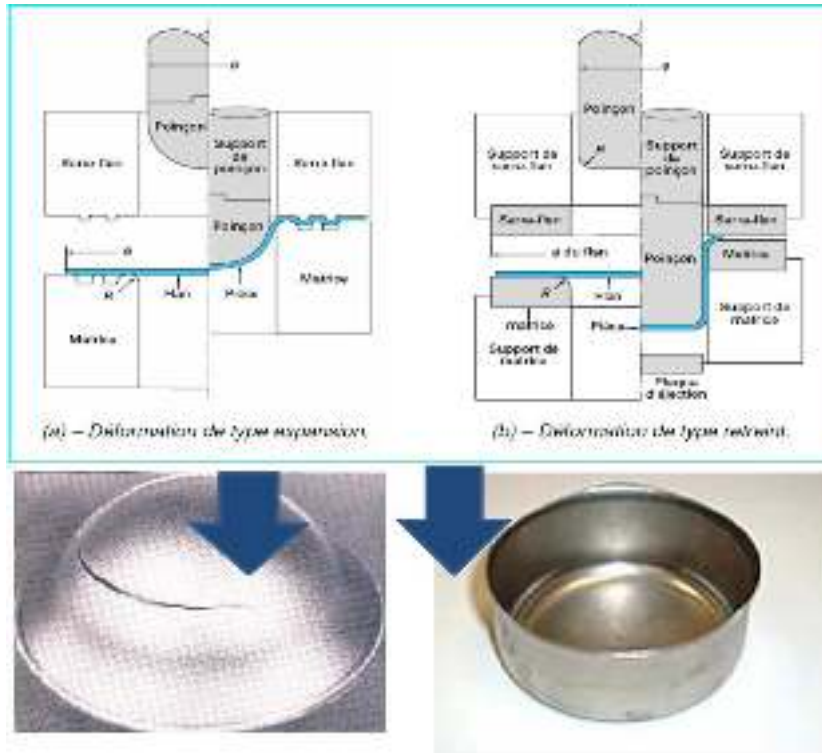


Figure 12 : a) Emboutissage par expansion, b) Emboutissage profond avec rétreint. et Exemples des pièces. [17]

Remarque :

- ✓ L'épaisseur de la pièce finie diffère de l'épaisseur du flan, l'épaisseur du fond de la pièce étant proche de celle du flan. Aux endroits de passage du fond à la paroi latérale on peut constater un amincissement de 10 à 25%, et près de la face d'about un épaissement de 15 à 25%.
- ✓ Le critère industriel de faisabilité de pièces automobiles est donné par:
 $\%25 \leq \text{épaisseur de variation} \leq +\%15$: Si on est en dessous de la limite inférieure on a une déchirure, si on est en dessus de la limite supérieure, alors, on a des plis.
- ✓ La valeur de l'amincissement dans la zone de passage du fond à la paroi est fonction du rayon du congé des angles de la matrice et du poinçon, du degré de déformation, du jeu entre la matrice et le poinçon, de l'effort de serrage, elle dépend aussi des conditions de frottement de contact [17]

II-4/ L'emboutissage en température :

Il existe deux méthodes d'emboutissage :

II-4.1/ L'emboutissage à froid :

L'emboutissage à froid est réalisé sur des presses mécaniques. Il est réservé aux matériaux d'épaisseur inférieure à 6mm (aluminium, aciers inoxydables, laiton, aciers doux), cette technique impose, sauf rares exceptions, un outillage double effet. Les emboutis peu profonds ou ne nécessitant pas d'importants efforts de serrage, sont exécutés sur des presses double effet. Le serre-flan applique la tôle sur la matrice au cours de toute la durée du travail du poinçon, l'opération terminée, la pièce est dégagée soit à l'aide de l'éjecteur, soit au travers de la matrice. [16]

II-4.2/ L'emboutissage à chaud :

L'emboutissage à chaud est réalisé exclusivement sur presses hydrauliques. Ce procédé est réservé aux matériaux peu ductiles (magnésium, titane, zinc, ...), aux emboutissages profonds, et aux tôles de forte épaisseur nécessitant de grands efforts (épaisseur supérieure à 7 mm pour l'acier). Les cadences de production sont inférieures et les aspects de surface sont moins bons, par rapport à l'emboutissage à froid. [16]

II-5/Machines utilisées en emboutissage :

Les presses mécaniques travaillant par chocs sont réservées pour les emboutis de faibles hauteurs ($h < d$), et les cadences de production importantes (jusqu'à 400 coups par minute). Les capacités de ces machines peuvent aller de 2 000 à 10 000 kN selon la structure de la machine. Les presses hydrauliques travaillant par pression sont réservées pour les emboutis profonds ($h > d$), donc on peut moduler l'effort appliqué sur le flan dans les cas délicats. [16]

II-6/ Caractérisation en emboutissage:

Pour réussir au plus vite un nouvel embouti, et réduire le temps entre deux séries et donc pour caractériser l'emboutissage, le recours à des machines de traction est souvent nécessaire. Cette machine permet de reproduire de petits emboutis sans demander un outillage perfectionné. Pour permettre cette caractérisation, deux approches sont possibles mais surtout complémentaires. D'une part, un aspect que l'on peut qualifier de métallurgique et qui correspond aux relations entre les propriétés du métal et ses performances. D'autre part, un aspect opératoire ayant pour objectif de préciser l'influence des différents paramètres de la presse sur la réussite de la pièce. Quand même, il est important de préciser que l'étude de ces deux aspects nécessite une analyse préalable des déformations subies par le flan. Les mesures s'effectuent à l'aide d'une grille gravée sur la face externe de la future pièce. [18]

II-6.1/ Mesure de déformations en emboutissage :

II-6.1.1/ Principe et analyse des déformations :

Les déformations d'un élément de flan est décrit correctement à partir des déformations dans trois directions principales [18]:

- Dans le sens de la longueur (en générale la direction de laminage):

$$\varepsilon_1 = \ln(L/L_0) \dots \dots \dots (1)$$

- Dans le sens de la largeur (en générale la direction perpendiculaire):

$$\varepsilon_2 = \ln(b/b_0) \dots \dots \dots (2)$$

- Dans le sens de l'épaisseur:

$$\varepsilon_3 = \ln(h/h_0) \dots \dots \dots (3)$$

Tel que :

L_0, b_0, h_0 longueur, largeur et épaisseur initiales, respectivement, L, b, h longueur, largeur et épaisseur finales de l'élément, respectivement.

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

$$\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = 0 \dots \dots \dots (4)$$

II-6.1.2/ Courbes limites de formage :

La courbe qui forme la frontière inférieure du secteur c'est la courbe limite de formage [19]. La courbe décrit le niveau de la contrainte a fin le matériau réel peut résister l'échec, le fendage ou le ridage se produit. Après un principe de base l'expérience assure que le composant ne cassera pas si le niveau de contrainte ne devrait pas excéder 80% du niveau de la courbe limite de formage.[20]

Les secteurs différents du diagramme (Figure 13) 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 : Tendence au ridage.
- G : Rides entièrement développées.

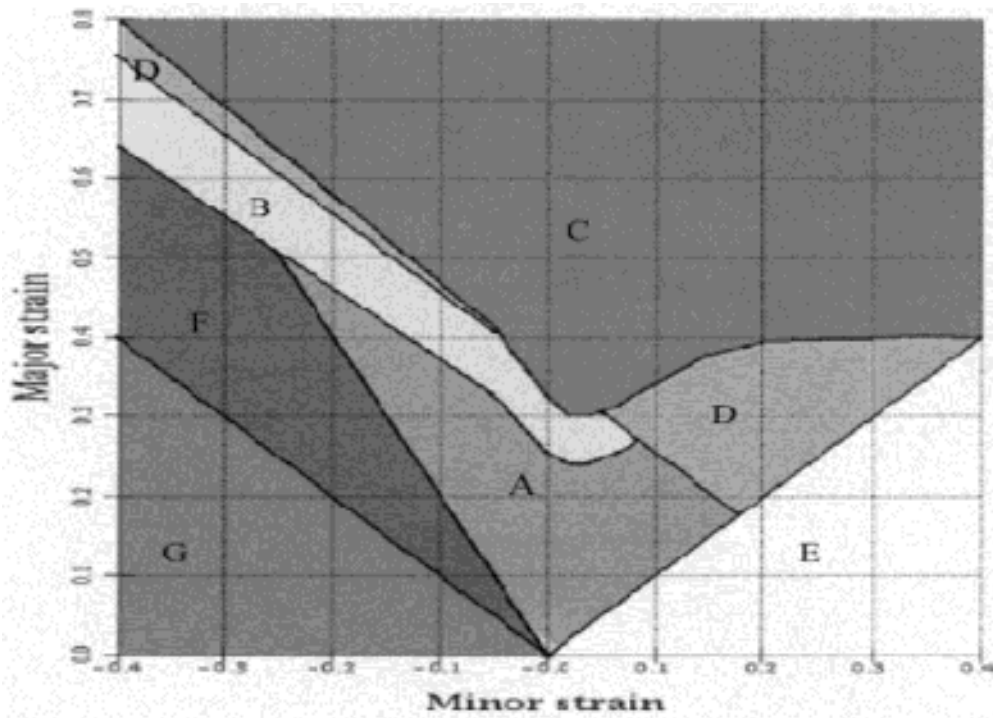


Figure 13 : Courbe limite de formage pour différents domaines. [20]

II-6.1.3/ Mesure des déformations :

L'emboutissabilité d'une tôle (sa capacité à être emboutie), pose le problème de la mesure de ses caractéristiques. Donc Il faut trouver un système de mesure des déformations qui permettrait de comparer la réussite d'un embouti suivant le matériau, les paramètres opératoires (la lubrification, la pression, les frottements, les jeux entre poinçon et matrice, ...) et les paramètres métallographiques (état de surface du flan, orientation cristallographique, ...). Dans cette optique, il est commun de s'aider d'une petite grille tracée sur le flan. En générale cette grille est formée de petits cercles et de carrés tendant à se déformer lors de l'emboutissage. Beaucoup procédés sont employés pour effectuer ce tracé [21]:

- Tracé à la pointesèche.
- Tracé à l'encre, à l'aide d'untampon.
- Tracé par gravageélectrochimique.
- Tracé à l'aide de résine ou de vernisphotosensible.

De nombreux modèles ont été imaginés mais chacun se doit de respecter trois points essentiels desquels dépendent la précision et la signification des mesures effectuées. Il s'agit de :

La nature de grille la plus utilisée est celle proposée par Caillot (Figure 14), consistant en un quadrillage régulier de carrés auxquels viennent s'ajouter un réseau de cercles tangents. D'autres motifs ont été imaginés comme des réseaux de cercles disjoints, tangents ou enchevêtrés. Ces motifs bien que moins communs, apportent des résultats des plus satisfaisants dans le cas

d'essais de rétreint pur. [21]

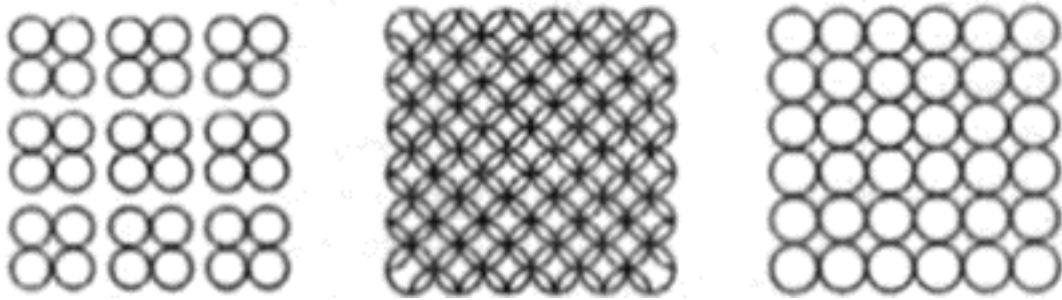


Figure 14 : Différentes nature de grille de déformation [21].

Les dimensions à donner aux mailles ne dépendent pas de celles de la pièce mais ils dépendent du gradient de déformation local à un endroit critique. En effet, ces gradients sont très localisés et ne permettent pas de considérer la déformation tel qu'homogène à l'échelle du motif. Pour réaliser une mesure précise dans les zones critiques, il est important d'utiliser un pas de 2 à 5 mm. Un pas supérieur peut conduire à une étude sans grand intérêt.

La position de la rupture est primordiale si l'on souhaite étudier de manière réaliste une rupture. Cette scission doit prendre naissance dans le cercle et passer par son centre. Lors de la déformation du flan, la grille de Caillot entraîne la création de parallélépipèdes et d'ellipses (Figure 15).

De la direction et de la mesure des axes d'une ellipse, nous pouvons déduire la direction et la grandeur des deux déformations principales au centre du cercle. De par ces déformations, nous déterminons les allongements et les trois déformations principales.

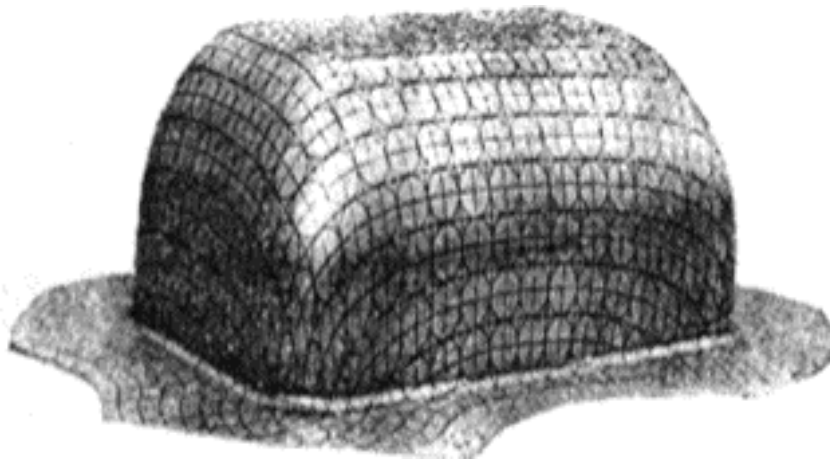


Figure 15 : Exemple de grille déformée. [22]

Maintenant, la mesure des déformations s'effectue à partir des méthodes plus sophistiquées, parmi ces méthodes : Mesure par Méthode Optique (GOM1) (Figure 16), où une grille de points est déposée par électro-marquage sur le flan avant emboutissage. Lors de la mise en forme, ce réseau de points suit les mouvements de la matière et reste visible malgré les forces et les

frottements mis en jeu.

L'analyse de ce nouveau réseau de points conduit directement à l'analyse des déformations subies par le flan. La mesure de ces centres de points se fait par photogrammétrie en utilisant une caméra numérique haute résolution.

Beaucoup d'images sont enregistrées sous des angles variés. Par la suite un logiciel calcule la position 3D des points. Ce jeu de points permet la définition de la forme de l'embouti, forme indispensable à la projection du champ de déformation sur la surface du flan pour un réel calcul des déformations à la surface de l'objet. Par conservation du volume, puis le système détermine l'amincissement subi par les tôles.

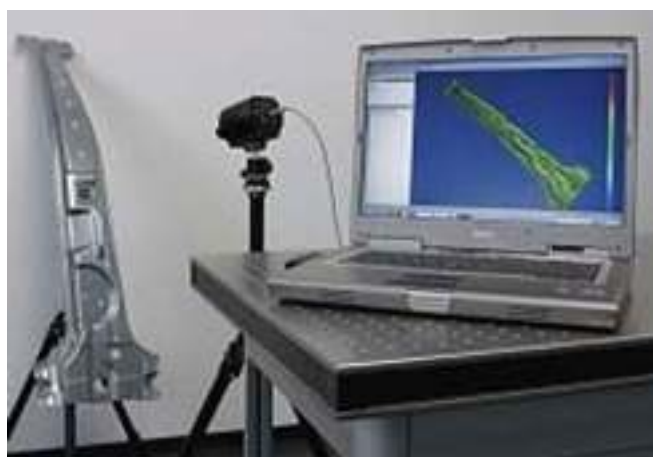


Figure 16 : Mesure par méthode optique GOM. [21]

En plus de la forme 3D de la pièce, le logiciel calcule et visualise sous forme de cartographie 3D couleur les déplacements, les déformations, l'amincissement et même la raideur due à la mise en forme pour les nouveaux matériaux (Figure 17). Des sections peuvent être librement définies pour estimer l'évolution des paramètres.

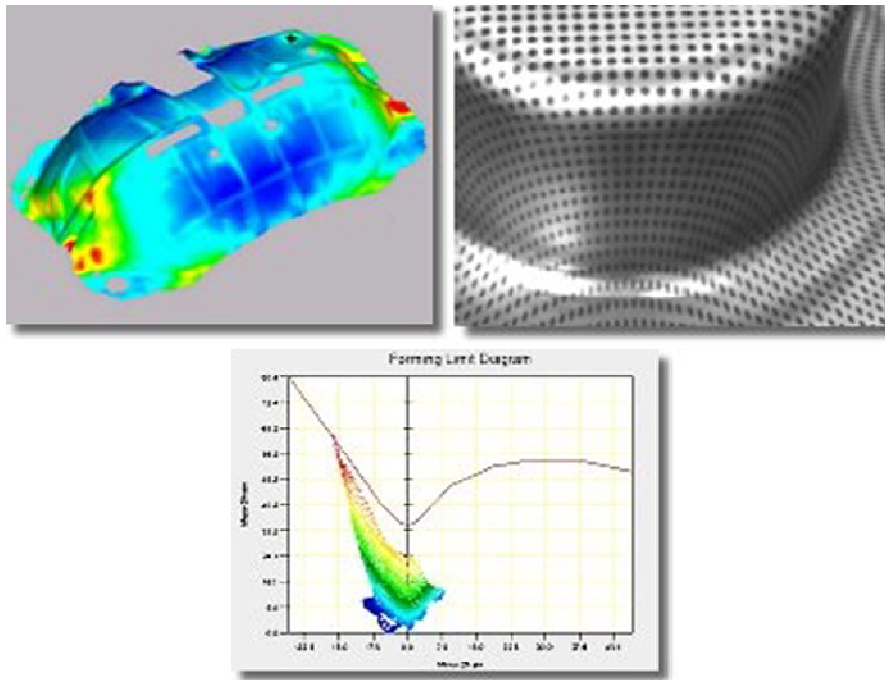


Figure 17 : Résultats obtenus par GOM. [21]

La comparaison par rapport à la CLF (Figure 17), incluant beaucoup de limites de sécurité, des courbes d'iso-amincissement, le choix du matériau dans la base de données, permet un diagnostic rapide et précis des points chauds. Ensuite, l'interaction directe entre les points mesurés, les images acquises et toutes les données de calcul permet de les localiser à coup sûr.

II-6.1.4/ Les modes de déformations :

L'étude des déformations à l'aide de ces grilles a permis de mettre en évidence les différents modes de déformations existant lors d'un emboutissage. Principalement on distingue [18]:

- L'expansion biaxiale.
- L'expansion symétrique.
- La déformation plane.
- L'allongement uniaxial.
- La distorsion pure.
- La compression pure.
- Le rétreint.
- Le pliage sous tension.

II-6.2/ Essais d'emboutissage :

De nombreux essais spécifiques ont été imaginés et utilisés à fin de juger l'aptitude d'une tôle à subir l'opération d'emboutissage. Nous les avons classés selon le mode de déformation prédominant.

La Figure 18, représente les principaux modes de déformations comme ils apparaissent sur des emboutis servant à des essais de caractérisation (essais Swift, Erichsen, ... etc.), [22]. Les cercles sur le graphe montre l'état des déformations de la matière, c'est à dire on dessine sur la tôle initiale des petits cercles ensuite on fait l'emboutissage et après formage on regarde la forme du cercle, il devient ellipse où l'axe Y (vertical) de l'ellipse est ϵ_1 et l'axe X (horizontal) est ϵ_2 .

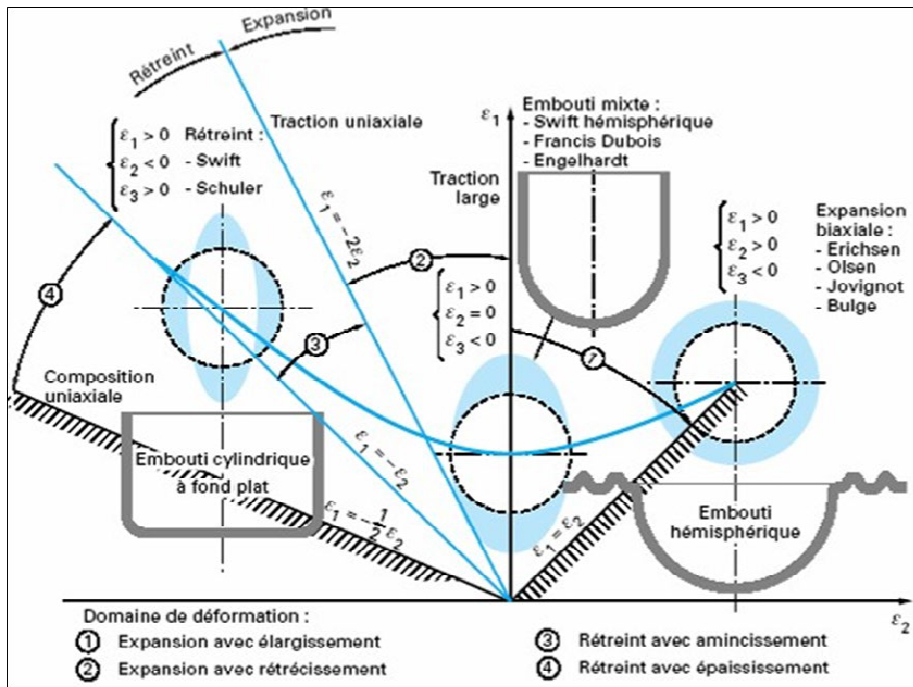


Figure 18 : Principaux modes de déformation en emboutissage illustrés par des emboutis servant à des essais de caractérisation. [22]

La représentation la plus fidèle des déformations sur un embouti au cours et après formage est donnée par les déformations rationnelles qui peuvent être représentées dans un diagramme tel que les axes orthogonaux sont les déformations principales ϵ_1 et ϵ_2 . Le domaine de l'expansion est défini par la surface comprise entre les demi-droites :

- $\epsilon_1 = \epsilon_2$ et $\epsilon_1 = -2\epsilon_2$

Le domaine du rétreint est défini par les demi-droites :

- Et $\epsilon_1 = -2\epsilon_2$ et $\epsilon_1 = -1/2\epsilon_2$

Dans le mode de déformation en rétreint, on notera, en particulier, l'augmentation d'épaisseur au sommet de la jupe de l'embouti ($\epsilon_3 > 0$), alors que dans le mode en expansion il y a amincissement de l'épaisseur du flan sous le nez du poinçon ($\epsilon_3 < 0$).

II-6.2.1/ Essais d'expansion Biaxiale :

En raison des frottements modifie la répartition des déformations dans la tôle, il faut distinguer

le cas des essais sans frottement (gonflement hydraulique : Jovignot, Bulge test) de celui avec frottements (poinçon hémisphérique : Erichsen modifié; essai suédois; Persoz; et Renault). [22,23]

II-6.2.2/ Essais de rétreint :

On a deux familles de ces essais, celles des essais élémentaires (déformation d'une éprouvette de tôle de forme trapézoïdale) et celle des essais simulatifs (essais Swift).

Les essais simulatifs consistent à emboutir des coupelles profondes à fond plat et à flan non bloqué sous le serre-flan. En effet, si le rayon de raccordement du poinçon est suffisamment petit, il n'y a pas d'expansion sous le nez du poinçon, et la déformation dominante est le rétreint sous serreflan.

Dans le cas de l'essai Swift, le flan est transformé en coupelle cylindrique (Figure 19). Cette expérimentation caractérise le rapport entre le diamètre d du poinçon et le diamètre D du flan.

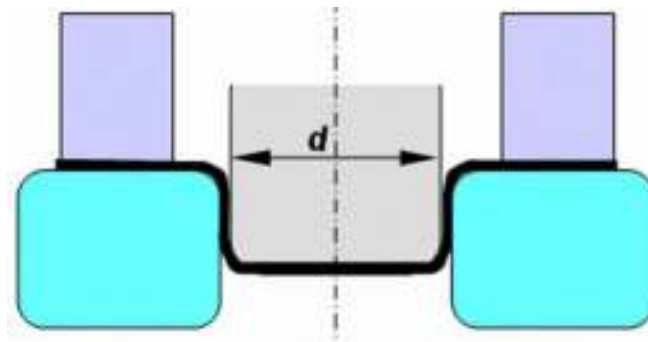


Figure 19 : Essai Swift. [23]

Malgré ses difficultés d'exécution, cet essai a connu un certain développement récemment principalement suite à l'excellente corrélation trouvée par Witheley entre le rapport limite d'emboutissage d/D et le coefficient d'anisotropie r que nous présenterons par la suite. [22,23]

II-6.2.3/ Essais mixtes :

Les essais mixtes sont les plus répandus car ils permettent d'analyser tous les modes de déformation présentés précédemment. Nous noterons par exemple la présence d'essais [23] :

- ✓ De coupelle cylindrique à flan non bloqué et à poinçon hémisphérique (Erichsen, Swift) ou ellipsoïdal (Renault), hémicylindriques (Chausson).
- ✓ De coupelle cylindrique à fond plat mais à grand rayon de raccordement (Dubois).
- ✓ De coupelle à fond plat avec successivement emboutissage à flan non bloqué puis rupture à Flanbloqué.
- ✓ D'expansion d'un trou sur un poinçon où la fibre située le long du trou s'allonge jusqu'au

rupture.

- ✓ De coupelle conique, sans serre-flan, à fond plat, ou hémisphérique (Fukui) (Figure20).

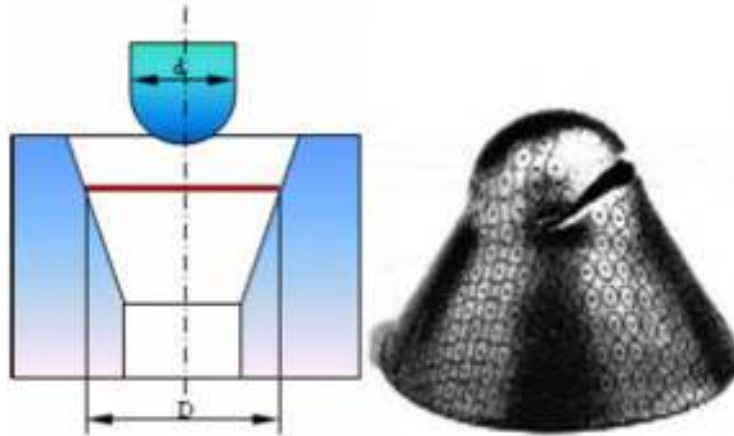


Figure 20: Essai Fukui et rupture caractéristique. [23]

L'essai mixte a connu une grande reconnaissance justifiée par sa grande simplicité, sa rapidité d'exécution et son excellente reproductibilité. Celle-ci est en grande partie attribuable à la suppression de la dispersion due aux frottements par suite de l'absence du serre-flan et l'emploi d'un outillage (matrice et poinçon) poli. Il permet de calculer le rapport entre le diamètre d du poinçon et le diamètre à mi-hauteur D de la matrice conique.

II-6.3/ Aspects métallurgiques d'emboutissage :

Les études de l'emboutissage suivant l'aspect métallurgique tendent à mettre en évidence une relation générale entre l'influence des caractéristiques du métal et les performances obtenues sur presse. Nous parlons dans ce cas des critères d'emboutissabilité, de la taille des grains, de la structure cristallographique ainsi que des éléments constitutifs du métal. [22, 20]

II-6.3.1/Prise en compte de directions de laminage :

L'anisotropie de déformation plastique des tôles tient un rôle prépondérant dans la caractérisation d'une tôle. L'étendue de ce critère a été mis en évidence grâce à l'analyse de la déformation du flan sur le serre flan (rétreint) dans les parois d'une coupelle ou aux pôles d'embouti (expansion). 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. C'est sur ce point que Lankforda décidé de baser le second critère d'emboutissabilité, qui est une proportionnalité entre la déformation rationnelle dans le sens du largeur ϵ_2 et celle dans le sens de l'épaisseur ϵ_3 , définie par le coefficient d'anisotropie [24, 25]:

$$R = \frac{\ln(b/b_0)}{\ln(h/h_0)} = \varepsilon_2 / \varepsilon_3 \dots \dots \dots (5)$$

le coefficient d'anisotropie représente, en fait, la façon dont l'alliage se comporte entre le rétrécissement et l'amincissement.

Si $r < 1$, le métal aura tendance à s'amincir plutôt qu'à se rétrécir alors que si $r > 1$, le métal aura plutôt tendance à se rétrécir qu'à s'amincir. Le coefficient d'anisotropie r dépend de la direction de la déformation. Ainsi, pour caractériser l'anisotropie d'un matériau, il est nécessaire de la mesurer à 45°, à 90° et dans le sens de laminage (direction 0°). Ainsi, on définit le coefficient d'anisotropie moyen:

$$r_n = \frac{1}{4} (r_0 + r_{90} + 2r_{45}) \dots \dots \dots (6)$$

Et le coefficient moyen d'anisotropie plane :

$$\Delta r = \frac{1}{2} (r_0 + r_{90} - r_{45}) \dots \dots \dots (7)$$

Pour les aciers inoxydables on lui préfère souvent la formule :

$$\Delta r_n = [(r_0 - r_n)^2 + (r_{90} - r_n)^2 + (r_{45} - r_n)^2] \dots \dots \dots (8)$$

La détermination du coefficient d'anisotropie est simple parce qu'il suffit de mesurer la largeur et l'épaisseur d'une éprouvette ayant subi un allongement déterminé, par exemple de 20 ou 40%.

Le coefficient d'anisotropie moyen permet de traduire l'aptitude au rétreint de la tôle et le coefficient d'anisotropie plane Δr présente une bonne corrélation avec la hauteur des cornes observées sur embouti (Figure 21).

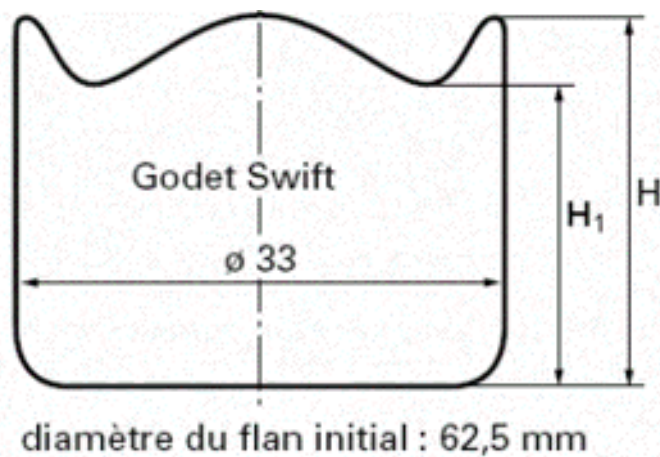


Figure 21 : Hauteur relative des cornes. [25]

Pour déterminer les caractéristiques des coefficients d'écroutissage et d'anisotropie, beaucoup d'études ont été effectuées parmi lesquelles celle de l'emboutissage.

Ces essais ont consisté à noter le pourcentage de pièces réussies (ou de casse) dans la

fabrication de 3 pièces particulières : un panneau de portière de voiture correspondant à de l'expansion pur, un capot de ventilateur pour le rétreint et un tableau de bord pour les essais mixtes. Les essais ont été réalisés sur beaucoup séries de lots caractérisées par leur valeur de r et n tel que :

- r et n élevé.
- r élevé et n faible.
- r et n faible.
- r faible et n élevé.

Il faut déduire que les pièces à dominance d'expansion obtiennent un pourcentage de réussite pour n fort alors que celles à dominance de rétreint correspondent à un coefficient r fort. Dans le cas de pièces mixtes, ce sont les tôles à r et n forts qui conduisent à un minimum de casses.

Donc Il est possible de généraliser en disant que les pièces ayant des critères d'emboutissage de fortes valeurs permettent de faire toutes les pièces alors que celles à faibles valeurs aboutissent à des casses.

II-6.4/ Aspects opératoires :

Lors de l'emboutissage d'une pièce, beaucoup paramètres permettent d'aboutir à un embouti de bonne qualité. Ces réglages doivent tenir compte de la nature de la tôle, ainsi que de la forme souhaitée. Une presse, ou une machine de traction ayant pour réaliser d'emboutis, sont composées d'une matrice, d'un poinçon et d'un serre flan. Cet outillage offre beaucoup possibilités deréglages:

- La pression dupoinçon.
- La vitesse dupoinçon.
- La pression de serrage des serresflan.
- Le jeu entre le poinçon et lamatrice...etc.

Avec ces paramètres, il faut ajouter la lubrification, la taille optimale de la tôle ainsi que son épaisseur. Les nombreuses interactions existant entre ces paramètres font que au cours de longtemps, l'emboutissage est resté un art.

Ces réglages doivent être précis puisque ce sont eux qui déterminent la qualité du produit final, mais doivent également tenir compte du besoin de rentabilité de l'entreprise. En effet, si la vitesse de poinçon est trop faible, la durée de mise en forme d'une pièce dépasserait son niveau derentabilité.

II-6.4.1/Paramètres liés à la presse :

- a) **Le jeu entre le poinçon et la matrice :** Quand l'espace 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. Cette augmentation a une influence favorable sous l'effet du poinçon mais entraîne certains inconvénients comme :

- ✓ 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 l'espace existant entre le poinçon et la matrice, il se produit un écrasement et un amincissement indésirables de la paroi. Il est courant d'utiliser des tables donnant le jeu en fonction de l'épaisseur du flan h . Elles sont basées sur les formules suivantes [22] :

- Pour l'acier:

$$Jeu = h + 0.07(10 h)^{1/2} \dots\dots\dots (9)$$

- Pour l'aluminium:

$$Jeu = h + 0.02(10 h)^{1/2} \dots\dots\dots (10)$$

- Pour métaux non ferreux:

$$Jeu = h + 0.04(10 h)^{1/2} \dots\dots\dots (11)$$

b) **Le rayon sur la matrice** : Ce paramètre a une très grande importance autant pour la qualité de l'embouti que pour la répartition des forces. En effet, on comprend parfaitement que dans les deux cas

Extrêmes (Figure 22), l'emboutissage n'est pas viable. On observera pour $r_m = 0$ et pour $r_m = (D - d)/2$ la formation de plis.

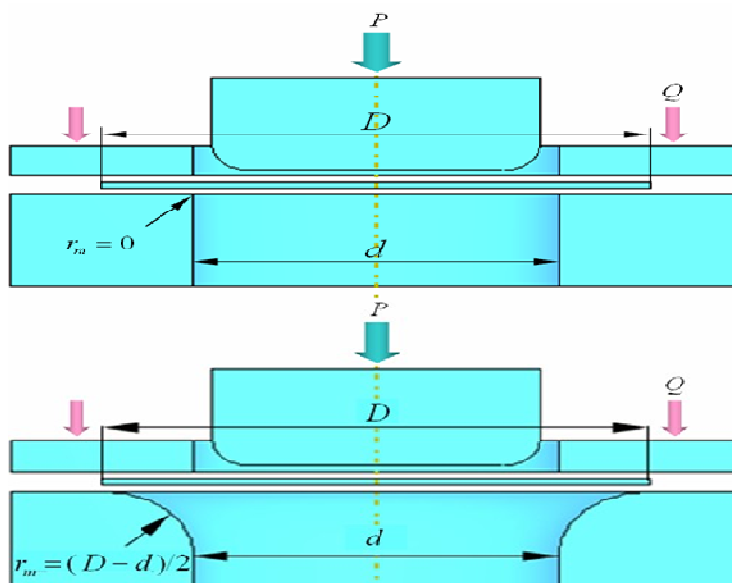


Figure 22: Variation de l'arrondi sur la matrice. [22]

Afin de déterminer le rayon efficace, on utilise la relation de Kaczmarek donnant :

➤ Pour l'acier:

$$r_m = 0.8[(D - d)h]^{1/2} \dots\dots\dots(12)$$

➤ Pour l'aluminium:

$$r_m = 0.9[(D - d)h]^{1/2} \dots\dots\dots (13)$$

D diamètre du flan (mm), d diamètre de l'embouti (mm) et h épaisseur du flan (mm).

c) **Arrondi sur le poinçon** : La partie de la tôle qui se trouve en contact avec la surface inférieure du poinçon subit l'action des forces de frottements qui empêchent la matière de bouger. L'effort du poinçon se transmet aux parois de l'embouti. Le poinçon doit contenir un arrondi pour ne pas percer le flan. En générale, on prend le rayon du poinçon inférieur à celui de lamatrice.

d) **La vitesse d'emboutissage** : 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 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. Alors cette altération pouvant se traduire par une rupture du flan. D'après BLISS1, il existe une vitesse optimale pour chaque métal:

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

e) **La pression du serre-flan** : La suppression des plis est un des objectifs majeurs de l'emboutissage. Le rôle du serre-flan consiste à empêcher la formation de plis sur le rebord du flan en exerçant une pression appropriée. La présence du serre-flan ne s'impose que si $d < 0.95 D$ ou $h < 0.2(D - d)$.

Dans la pratique, il faut que le serre-flan soit bien trempé et rectifié. La pression est réglée à l'aide de clés dynamométriques, de ressorts ou de caoutchouc, en fonction de l'aspect de l'embouti :

- ✓ Si la paroi est sans plis et d'aspect brillant, la pression est adaptée.
- ✓ Si la paroi est bonne mais que les bords supportent des marques de dentures, c'est que la pression est trop faible.
- ✓ S'il se produit un déchirement lors de la descente du poinçon, c'est que la pression est trop importante.

Pour un embouti cylindrique de diamètre d et de flan de diamètre D, l'effort de serrage appliqué

sur le serre-flan sera :

$$Q = (p/4)[D^2 - (d + 2r_m)^2] p \dots\dots\dots (14)$$

Où p pression spécifique :

- ✓ Pour les aciers doux : $p = 25 \text{ daN/cm}^2$
- ✓ Pour les aciers inox : $p = 20 \text{ daN/cm}^2$
- ✓ Pour l'aluminium : $p = 10 \text{ daN/cm}^2$

Il est possible de faire appel à une installation pneumatique ou hydraulique offrant un réglage de la pression plus facile qu'avec un dispositif à ressort ou en caoutchouc.

f) L'effort d'emboutissage : L'effort nécessaire pour emboutir des pièces cylindriques dépend tout d'abord des diamètres de l'embouti et du flan primitif, de l'épaisseur et de la qualité de la tôle. Il dépend de la pression de serre-flan, de la vitesse d'emboutissage, de l'arrondi de la matrice, du jeu entre poinçon et matrice et de la lubrification. Il est difficile de tenir compte de tous ces facteurs dans la détermination de l'effort du poinçon, c'est pourquoi il est commun d'employer la formule simplifiée suivante:

$$P = \pi d h k R_m \dots\dots\dots (15)$$

Avec k coefficient en fonction de d/D , h épaisseur du flan, R_m résistance à la rupture en traction.

II-6.4.2/Paramètres liés à la tôle :

- 1) **La taille du flan** : déterminer la taille du flan primitif pour d'une part économiser la matière et d'autre part faciliter l'emboutissage. La détermination des dimensions du flan a pour base l'égalité des volumes de l'embouti et du flan primitif.
 - **Flan pratique** : déterminer qu'à la suite d'essais sur des outils d'emboutissage réalisés. L'outil de découpage du flan n'est exécuté qu'après ces essais.
 - **Flan théorique** : D'après le dessin de l'embouti désiré et en ajoutant de 2 à 3 mm autour du flan pour détourage (Figure 23), on détermine le diamètre du flan donné par :

$$D^2 = 4S/\pi \dots\dots\dots (16)$$

Avec :

S est la surface de l'embouti, calculée par le théorème de Guldin :

La surface engendrée par une ligne plane tournante autour d'un axe situé dans son plan et ne le traversant pas est égale au produit de la longueur développée de cette ligne par la circonférence décrite par son centre de gravité. [22]

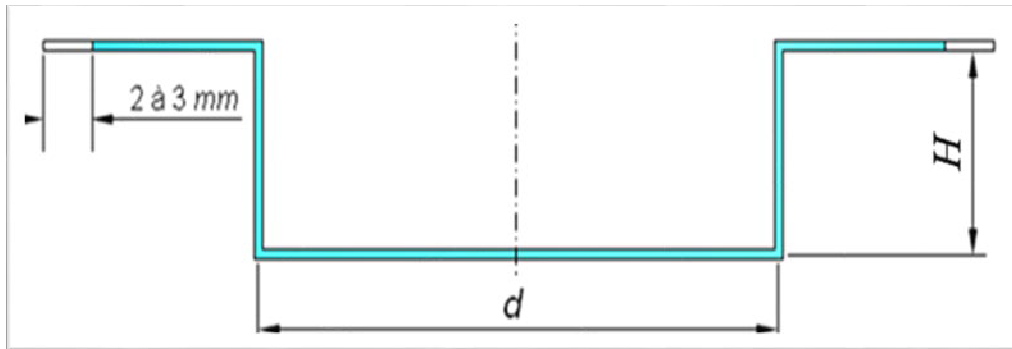


Figure 23 : Ajout de 2 à 3 mm pour détourage. [22]

- 2) **La lubrification** : Parmi les méthodes permettant de maîtriser le frottement, l'adhésion et l'usure entre deux corps, la lubrification est certainement la plus courante et la plus anciennement pratiquée. Cette méthode 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. Cependant, la lubrification de la partie centrale du flan a un effet néfaste. Nous pouvons expliquer ce phénomène par le fait que lubrifier diminue l'adhérence entre le poinçon et les parois de l'embouti. L'effort est alors concentré sur le fond de l'embouti à proximité duquel il y a rupture. C'est pour ça il n'est utile de lubrifier que la face du flan opposée au poinçon. Dans le cas d'un poinçon de petit rayon, il est préférable de ne pas lubrifier voire même d'augmenter la rugosité du poinçon pour éviter une forte déformation par expansion localisée. [22, 23,26]

II.7/ Conclusion:

Après la définition de procédé d'emboutissage et la démonstration d'importance de ce procédé dans ce chapitre, on a mis en clair tout ce qui concerne le procédé d'emboutissage. Premièrement, une description des modes du procédé, les types d'emboutissage et les machines utilisées en emboutissage. Ensuite, nous avons montré les différentes caractéristiques du procédé comme : les modes de déformation lors de l'opération du procédé et leur mesure, les différents essais du procédé, l'aspect métallurgique et les différents paramètres entrant en jeu liés aux outils et à la tôle. Finalement, une représentation de l'aspect opératoire de l'emboutissage.



Chapitre III:
Etude Expérimentales,
Résultats Et Discussion

Partie spéciale

Modelisation

Nomenclature

DL, DT,DD,DN	Directions du Laminage, Transverse, Diagonale et Normale
F, G, H, L, M, N	Paramètres d'anisotropie de Hill48
$A, b..Q$	Paramètres d'anisotropie de BBC2005
k	Coefficient non quadratique du critère de BBC2005
θ	Angle dans le plan de la tôle par rapport à la direction DL
$r(\theta)$	Coefficient de <i>Lankford</i> exprimé dans le plan de la tôle
$\sigma(\theta)$	Contrainte d'écoulement exprimée dans le plan de la tôle
σ_{ij}	Composantes du tenseur de contraintes
σ_0	Contrainte d'écoulement équivalente
$\sigma_{ref} = \sigma_0$	Contrainte de référence suivant la direction DL
σ_b	Contrainte éqibiaxiale
r_b	Coefficient d'anisotropie éqibiaxial
$\dot{\varepsilon}_j$	Composantes du tenseur de déformation
E	Module de Young
AFR	Associated Flow Rule (en français Plasticité Associée)

❖ Tôle homogène

Considérons une tôle homogène industrielle formée d'une seule couche, comme il est schématisé en (**Figure 24**). Les champs de contraintes et de déformations correspondants, sous les diverses sollicitations imposées, sont considérés (macroscopiquement) les mêmes et uniformes à travers toute la tôle.

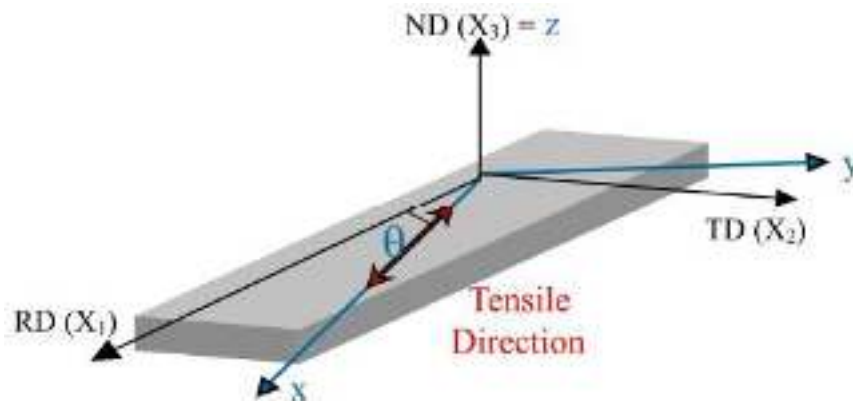


Figure 24: Schéma de l'essai de traction pour la détermination du coefficient de Lankford R (θ) d'une tôle homogène.

III- 1/Présentation du formalisme mathématique:

Critère de Hill quadratique (1948) [22]

Du point de vue historique le critère de Hill48 est le premier critère proposé pour prendre en considération de l'anisotropie orthotrope des tôles laminées. Le comportement de certains matériaux peut varier en fonction de la direction de sollicitation, dans ces conditions, le matériau est dit anisotrope. L'orthotropie est une anisotropie particulière qui se caractérise par trois plans de symétries orthogonaux dont les intersections définissent les trois axes d'orthotropie (x, y, z). Compte tenu des conditions d'élaboration, le comportement des tôles laminées s'inscrit dans le cadre d'une anisotropie orthotrope pour laquelle le repère (x, y, z) s'identifie par :

- ✓ x : direction de laminage(DL),
- ✓ y : direction perpendiculaire à la direction de laminage dans le plan de la tôle(DT),
- ✓ z : direction normale au plan de la tôle(DN).

La fonction d'écoulement de Hill48 décrivant une tôle homogène, est insensible à l'effet Bauschinger et tenant compte de l'anisotropie initiale du matériau. Mathématiquement, ce critère de plasticité se présente comme une fonction convexe dans l'espace des contraintes. Ainsi, la fonction de charge $f(\sigma_{ij})$ doit être convexe si elle est deux fois différentiable et sa matrice

Hessienne H est semi-définie positivement, ce qui implique que ses valeurs propres doivent être positives ou nulles.

La matrice Hessienne H s'écrit :

$$H_{ij} = \frac{\partial^2 f}{\partial \sigma_i \partial \sigma_j} = C_{ij} \dots \dots \dots (17)$$

Le critère proposé est un critère quadratique qui s'exprime dans le repère orthotrope sous la forme suivante :

$$f(\sigma_{ij}) = F(\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + G(\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + H(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + 2L\sigma_{23}^2 + 2M\sigma_{13}^2 + 2N\sigma_{12}^2 = \sigma_0^2 \dots (18)$$

L'écriture abrégée de la fonction d'écoulement précédente peut être transcrite sous forme tensorielle :

$$f(\sigma_{ij}) = \sigma : C : \sigma = C_{ijkl} \sigma_{ij} \sigma_{kl} \dots \dots \dots (19)$$

Les indices de sommation tensorielle sont $i, j, k, l = 1, 2, 3$ et C représente le tenseur d'élasticité d'ordre 4 et de dimension 3. Il est courant de représenter les tenseurs de ce type sous forme d'une matrice 6 x 6 symétriques. La forme matricielle s'écrit pour une symétrie orthotrope :

$$f(\sigma_{ij}) = \begin{matrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sqrt{2}\sigma_{23} \\ \sqrt{2}\sigma_{13} \\ \sqrt{2}\sigma_{12} \end{matrix} \begin{bmatrix} G+H & -H & -G & 0 & 0 & 0 \\ -H & F+H & -F & 0 & 0 & 0 \\ -G & -F & F+G & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & L & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & M & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & N \end{bmatrix} \begin{matrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sqrt{2}\sigma_{23} \\ \sqrt{2}\sigma_{13} \\ \sqrt{2}\sigma_{12} \end{matrix} \dots \dots \dots (20)$$

Tels que F, G, H, L, M et N sont les paramètres d'anisotropie de Hill, déterminant la forme de la surface d'écoulement et son degré d'anisotropie. Pour assurer l'indépendance à la pression hydrostatique (l'incompressibilité plastique) il faut respecter les trois conditions de **Karafilis** et

Boyce (1993) : $C_{1K} + C_{2K} + C_{3K} = 0$ pour $k = 1, 2, 3$.

Il faut noter qu'un des paramètres F, G, H peut être négatif, par contre L, M, N sont toujours positifs (**Hill, 1998 ; Liu et al. 1997**).

Si : σ_0, σ_0^2 et σ_0^3 sont des contraintes d'écoulement en traction uniaxiale suivant les directions principales d'anisotropie, on voit que :

$$G + H = \frac{\sigma_0^2}{(\sigma_0^1)^2} \quad (21)$$

$$F + H = \frac{\sigma_0^2}{(\sigma_0^2)^2} \dots \dots \dots (22)$$

$$F + G = \frac{\sigma_0^2}{(\sigma_0^3)^2} \quad (23)$$

Si : σ_0^{23} , σ_0^{13} et σ_0^{12} sont des contraintes en cisaillement simples par rapport aux axes principaux d'anisotropie, on obtient :

$$2L = \frac{\sigma_0^2}{(\sigma_0^3)^2} \quad \dots\dots\dots (24)$$

$$2M = \frac{\sigma_0^2}{(\sigma_0^3)^2} \quad (25)$$

$$2N = \frac{\sigma_0^2}{(\sigma_0^2)^2} \quad (26)$$

Les coefficients F, G, H, L, M, N doivent satisfaire les conditions de convexité du critère en lequel lui est associé la matrice Hessienne : $H_{ij} = \frac{\partial^2 f}{\partial \sigma_i \partial \sigma_j}$ qui est définie semi positive ($\det H \geq 0$ et la diagonale positives ou nulles).

$$H_{ij} = \begin{vmatrix} G+H & -H & -G & 0 & 0 & 0 \\ -H & F+H & -F & 0 & 0 & 0 \\ -G & -F & F+G & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & L & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & M & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & N \end{vmatrix} \quad \dots\dots\dots (27)$$

Les valeurs propres sont déterminées selon la relation caractéristique suivante :

$$\det (H_{ij} - KI) = 0$$

Pour K^5 , on trouve :

$$F+G+H+L+M+N \leq 0 \quad \dots\dots\dots (28)$$

Pour K^4 , on trouve:

$$3(FG+FH+GH)+4LM \geq 2(F+G+H)+2(L+M+N)+4(L+M)N \quad \dots\dots\dots (29)$$

Pour K^3 , on trouve:

$$8N(F+G+H)(LM+(L+M)) \geq 6(FG+FH+GH)(L+M+N)+8LMN \quad \dots\dots\dots (30)$$

Pour K^2 , on trouve :

$$12(FG+FH+GH)(LM+(L+M))+16LMN(F+G+H) \geq 0 \quad \dots\dots\dots (31)$$

Pour K^1 , on trouve :

$$24(FH+FG+HG)(LMN) \leq 0 \quad \dots\dots\dots (32)$$

Selon l'hypothèse de contraintes planes, consistant à négliger toutes les composantes du tenseur des contraintes hors plan de la tôle ($\sigma_{33} = \sigma_{13} = \sigma_{23} = 0$), ce critère peut se réduire à l'expression suivante:

$$f(\sigma_{ij}) = (G + H)\sigma_{11}^2 - 2H\sigma_{11}\sigma_{22} + (H + F)\sigma_{22}^2 + 2N\sigma_{12}^2 = \sigma_0^2 \dots \dots \dots (33)$$

Si l'on pose $F = G = H = 1/2$, $L = M = N = 3/2$, le critère de Hill se réduit au critère de Von Mises correspondant à un matériau incompressible isotrope.

❖ **Traction uniaxiale**

Généralement, la caractérisation mécanique d'une tôle passe par un essai de traction uniaxiale, dans lequel seule la composante non nulle du tenseur des contraintes est $\sigma_{xxxx} = \sigma$ dans le repère de l'éprouvette (x, y, z). Ceci est vrai lorsque la longueur de l'éprouvette est très grande devant sa largeur (**Figure 25**).



Figure 25 : Eprouvettes de traction uniaxiale

L'effet de bords est alors négligé mais une vitesse de cisaillement $\dot{\epsilon}_{xxx}$ est généralement observée dans son plan. Dans ce cas, les deux tenseurs de contraintes et de vitesse de déformations s'expriment par:

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \dot{\epsilon} = \begin{bmatrix} \dot{\epsilon} & \dot{\epsilon}^{xy} & 0 \\ \dot{\epsilon}^{xy} & \dot{\epsilon}^{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \dot{\epsilon}^{zz} \end{bmatrix} \dots \dots \dots (34)$$

En reprenant les mêmes démarches que dans le cadre général, le tenseur de contraintes dans le repère de la tôle peut être écrit :

$$\sigma = P^T \sigma_P = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma \cos \theta & -\sigma \sin \theta & 0 \\ \sigma \sin \theta & \sigma \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \dots \dots \dots (35)$$

$$= \begin{bmatrix} \sigma \cos^2 \theta & -\sigma \cos \theta \sin \theta & 0 \\ -\sigma \cos \theta \sin \theta & \sigma \sin^2 \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (36)$$

Parsubstitution dans le critère de Hill, la contrainte d'écoulement $\sigma(\theta)$, en fonction de la rotation des différentes sollicitations dans le plan (DL, DT), peut s'écrire:

$$f(\sigma_{ij}) = F(\sigma_{11}^2) + G(\sigma_{33}^2) + H(\sigma_{22}^2) + 2N(-\sigma_{11}\sigma_{33}) = \sigma_0^2 \dots \dots \dots (37)$$

$$\alpha(\theta) = \frac{\sigma_0}{(F \sin^4 \theta + G \cos^4 \theta + H \cos^2 2\theta + 2N \sin^2 \theta \cos^2 \theta)^{\frac{1}{2}}} \dots \dots \dots (38)$$

III-2/Loi d'écoulement associée au critère de Hill :

$$f(\sigma_{ij}) = F(\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + G(\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + H(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + 2L\sigma_{23}^2 + 2M\sigma_{13}^2 + 2N\sigma_{12}^2 = \sigma_0^2 \quad (39)$$

La loi d'évolution associée au critère de Hill s'écrit :

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \lambda \frac{\partial f(\sigma_{ij})}{\partial \sigma_{ij}} \dots \dots \dots (40)$$

$$\begin{cases} \dot{\epsilon}_{11} = 2\lambda [H(\sigma_{11} - \sigma_{22}) - G(\sigma_{33} - \sigma_{11})] \times F \\ \dot{\epsilon}_{22} = 2\lambda [F(\sigma_{22} - \sigma_{33}) - H(\sigma_{11} - \sigma_{22})] \times -G \\ \dot{\epsilon}_{33} = 2\lambda [G(\sigma_{33} - \sigma_{11}) - F(\sigma_{22} - \sigma_{33})] \times H \end{cases} \quad \text{Et} \quad \begin{cases} \dot{\epsilon}_{23} = 2\lambda L \sigma_{23} \\ \dot{\epsilon}_{13} = 2\lambda M \sigma_{13} \\ \dot{\epsilon}_{12} = 2\lambda N \sigma_{12} \end{cases}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} \frac{F\dot{\epsilon}_{11} - G\dot{\epsilon}_{22}}{2\lambda} = (FG + GH + HF)(\sigma_{11} - \sigma_{22}) \\ \frac{F\dot{\epsilon}_{11} - H\dot{\epsilon}_{33}}{2\lambda} = (FG + GH + HF)(\sigma_{11} - \sigma_{33}) \dots \dots \dots (41) \\ \frac{H\dot{\epsilon}_{33} - G\dot{\epsilon}_{22}}{2\lambda} = (FG + GH + HF)(\sigma_{33} - \sigma_{22}) \end{cases}$$

D'où, en reportant ces valeurs dans le critère de Hill, on obtient après quelques calculs.

$$\lambda = \frac{1}{2\sigma_0} \left[\left(\frac{H\dot{\epsilon}_{11} - G\dot{\epsilon}_{22}}{2\dot{\epsilon}_{11}^2 - 2\dot{\epsilon}_{22}^2} \right)^2 + G \left(\frac{F\dot{\epsilon}_{11} - H\dot{\epsilon}_{33}}{2\dot{\epsilon}_{11}^2 - 2\dot{\epsilon}_{33}^2} \right)^2 + H \left(\frac{F\dot{\epsilon}_{11} - G\dot{\epsilon}_{22}}{2\dot{\epsilon}_{11}^2 - 2\dot{\epsilon}_{22}^2} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \dots \dots \dots (42)$$

III-3/Coefficient d'anisotropie (Lankford) :

Après les brèves présentations des critères de plasticité anisotropes les plus courants, il convient d'introduire le coefficient d'anisotropie $r(\theta)$, appelé coefficient de Lankford qui caractérise l'anisotropie plastique d'une tôle. Ce paramètre est mesurable à l'aide d'une essai de traction uni-axiale en déterminant le rapport des déformations de la largeur ϵ_{yy} sur celle de l'épaisseur ϵ_{zz} :

$$r(\theta) = \frac{\dot{\epsilon}_{yy}}{\dot{\epsilon}_{zz}} \dots\dots\dots (43)$$

Une grande valeur de ce coefficient indique la tendance d'un tôle à se déformer plastiquement en largeur plutôt qu'en épaisseur, ce qui peut favoriser certains états de contrainte où l'écoulement sur la largeur peut se produire plus facilement que sur l'épaisseur.

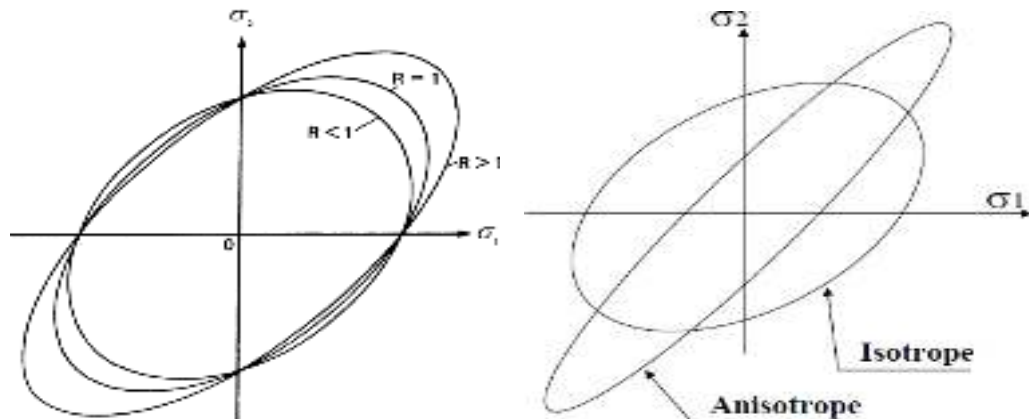


Figure 26: Évolution de la surface d'écoulement issue du critère de Hill (1948) en fonction du coefficient de Lankford.

L'anisotropie plastique des tôles est généralement caractérisée par le coefficient de Lankford $r(\theta)$, au moyen d'essais de traction uniaxiale effectués dans le plan de laminage suivant diverses directions faisant un angle θ par rapport à la direction du laminage.

$$r(\theta) = \frac{\dot{\epsilon}_{yy}}{\dot{\epsilon}_{zz}} = \frac{[H \cos^2 2\theta - (F + G - 2N) \cos^2 \theta \sin^2 \theta]}{F \sin^2 \theta + G \cos^2 \theta} \dots\dots\dots (44)$$

Les paramètres d'anisotropies de Hill48 peuvent ainsi calculer à partir des valeurs expérimentales des valeurs des coefficients de Lankford ou à partir des contraintes d'écoulement.

Les possibilités suivantes ont été considérées :

Notant que la contrainte de référence pour toutes les variantes est $\sigma_{ref} = \sigma_0$

III-4/Critère de plasticité de BBC2005 :

Une autre expression analytique non quadratique appelée BBC2000 (Banabic - Balan - Comsa) a été développée en s'inspirant de la formulation isotrope proposée par Hershey [28]. En ajoutant des coefficients de pondération dans le modèle, on a réussi à développer un critère de plasticité plus flexible, appelé BBC 2005 [27]. Cette formulation a intégré 08 coefficients anisotropes (a, b, L, M, N, P et Q) et, par conséquent, sa procédure d'identification utilise aussi 08 paramètres mécaniques (03 contraintes d'écoulement uniaxiales, 03 coefficients uniaxiaux d'anisotropie, la contrainte d'écoulement biaxiale et le coefficient biaxial d'anisotropie plastique). La contrainte

ETUDE EXPERIMENTALES, RESULTATS ET DISCUSSION

équivalente est définie par la formule suivante :

$$\sigma_0 = [aa(\Delta + \Gamma)^{2k} + aa(\Delta - \Gamma)^{2k} + bb(\Delta + \Psi)^{2k} + bb(\Delta - \Psi)^{2k}]^{1/2k} \dots (45) [19]$$

Où $k \in \mathbb{N}^*$ et $a, b > 0$ sont des paramètres de matériau, tandis que Γ, Δ et Ψ sont des fonctions dépendant des composantes planes du tenseur de contraintes :

$$\Gamma = LL\sigma_{11} + MM\sigma_{22} \dots (46)$$

$$\Delta = \sqrt{(NN\sigma_{11} - PP\sigma_{22})^2 + \sigma^2} \dots (47) [20]$$

$$\Psi = \sqrt{(QQ\sigma_{11} - RR\sigma_{22})^2 + \sigma^2} \dots (48)$$

Les équations ci-dessus montrent que la forme de la surface d'écoulement est définie par les paramètres du matériau a, b, L, M, N, P, Q, R et k . Les tests numériques effectués par les auteurs ont montré que des valeurs positives de ces paramètres conduisent à de meilleures prédictions du critère de plasticité BBC 2005. Trois contraintes d'écoulement uniaxiales et trois valeurs du coefficient de Lankford r sont obtenues à partir de trois directions différentes ($0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$). Les six (06) paramètres sont obtenus à l'aide des sollicitations uniaxiales qui doit être complété par d'autres types de caractérisation : de compression par exemple pour calculer la valeur r_b biaxiale [29]. A partir de ces paramètres, l'exposant entier k a un statut spécial. Sa valeur est fixée à 3 pour les alliages bcc, $k=4$ comme les aciers et pour les matériaux fcc comme l'Aluminium. Tandis que Γ et Ψ sont des fonctions des deuxième et troisième invariants d'un tenseur de contraintes transformé $S' = L\sigma$, où L est un tenseur de 4ème ordre. La formule pour évaluer la contrainte d'écoulement uniaxiale avec l'angle θ par rapport à la direction de laminage est:

$$\sigma(\theta) = \frac{\sigma_0}{f(\theta)} \dots (49)$$

Où :

$$f(\theta) = [aa(\Delta_{\theta\theta} + \Gamma_{\theta\theta})^{2k} + aa(\Delta_{\theta\theta} - \Gamma_{\theta\theta})^{2k} + bb(\Gamma_{\theta\theta} + \Psi_{\theta\theta})^{2k} + bb(\Delta_{\theta\theta} - \Psi_{\theta\theta})^{2k}]^{1/2k} \dots (50) [21]$$

Avec:

$$\Gamma_{\theta\theta} = LL\sigma_{11}^2 + MM\sigma_{22}^2 \dots (50)$$

$$\Delta_{\theta\theta} = \sqrt{(NN\sigma_{11}^2 - PP\sigma_{22}^2)^2 + \sigma^2} \dots (51)$$

$$\Psi_{\theta\theta} = \sqrt{(QQ\sigma_{11}^2 - RR\sigma_{22}^2)^2 + \sigma^2} \dots (52)$$

Le coefficient de Lankford est évalué dans ce cas par :

$$r(\theta) = \frac{[f(\theta)]^{2k}}{GG(\theta)} = 1 \dots (53) [21]$$

Où:

$$GG(\theta) = aa \frac{(NN - PP) \Delta_{\theta\theta}^{2k} - PP\sigma_{22}^{2k}}{\Delta_{\theta\theta}^{2k}} + LL + MM \Delta_{\theta\theta}^{2k-1} + aa \frac{(NN - PP) \Delta_{\theta\theta}^{2k} - PP\sigma_{22}^{2k}}{\Delta_{\theta\theta}^{2k}} - LL - MM \Delta_{\theta\theta}^{2k-1} + bb \frac{(NN - PP) \Delta_{\theta\theta}^{2k} - PP\sigma_{22}^{2k}}{\Delta_{\theta\theta}^{2k}} + \frac{(QQ - RR) \Psi_{\theta\theta}^{2k} - RR\sigma_{22}^{2k}}{\Psi_{\theta\theta}^{2k}} + \Psi_{\theta\theta}^{2k-1} + bb \frac{(NN - PP) \Delta_{\theta\theta}^{2k} - PP\sigma_{22}^{2k}}{\Delta_{\theta\theta}^{2k}} - \frac{(QQ - RR) \Psi_{\theta\theta}^{2k} - RR\sigma_{22}^{2k}}{\Psi_{\theta\theta}^{2k}} (\Delta_{\theta\theta} - \Psi_{\theta\theta})^{2k-1} \dots (54)$$

Le coefficient de Lankford equibiaxial est :

$$r_r(bb) = \frac{[f_f(bb)]^{2\zeta}}{GG(bb)} - 1 \dots \dots \dots (55) [22]$$

$$f_f(bb) = [aa(\Delta_{bb} + \Gamma_{bb})^{2aa} + aa(\Delta_{bb} - \Gamma_{bb})^{2aa} + bb(\Gamma_{bb} + \Psi_{bb})^{2\zeta} + bb(\Delta_{bb} - \Psi_{bb})^{2aa}]^{2\zeta} \dots \dots \dots \frac{1}{GG(bb)} \dots \dots \dots (56)$$

$$GG(bb) = aa \frac{NN(NN-PP)}{\Delta_{bb}} + LL \frac{(\Delta_{bb} + \Gamma_{bb})^{2\zeta-1} + aa \frac{NN(NN-PP)}{\Delta_{bb}} - LL \frac{(\Delta_{bb} - \Gamma_{bb})^{2\zeta-1} + bb \frac{LL(NN-PP)}{\Delta_{bb}} + \frac{QQ(QQ-RR)}{\psi_{bb}} \frac{(\Delta_{bb} + \psi_{bb})^{2\zeta-1}}{\Delta_{bb}} + bb \frac{NN(NN-PP)}{\Delta_{bb}} - \frac{QQ(QQ-RR)}{\psi_{bb}} \frac{(\Delta_{bb} - \psi_{bb})^{2\zeta-1}}{\Delta_{bb}} \dots \dots \dots (57)$$

III-4.1/Identification des paramètres d’anisotropie du critère BBC2005 :

Huit (08) paramètres anisotropes sont intégrés dans le critère BBC2005 pour caractériser le comportement anisotrope des tôles. Ces paramètres anisotropes sont calibrés comme suit :

Les huit coefficients inconnus sont obtenus en utilisant les huit données expérimentales (quatre contraintes de rendement, $\sigma_0, \sigma_{45}, \sigma_{90}$ et σ_b , ainsi que quatre valeurs r_0, r_{45}, r_{90} et r_b). Afin de déterminer ces paramètres, il est recommandé de résoudre un système non linéaire de huit équations des huit inconnues, en utilisant la méthode de *Newton-Raphson*.

III-4.1.1/Présentation des résultats:

III-4.1.1.1/ Application des critères de l’anisotrope:

Pour déterminer les grandeurs mécaniques de l’anisotropie nous présentant le résultat de l’essai de traction et du coefficient d’anisotrope pour les deux critères de Hill48 et de BBC2005. Les deux tableaux (Tableau 1 et Tableau 2) présentent les données expérimentales des grandeurs mécaniques telles que les contraintes d’écoulement et les coefficients de Lankford suivant les sept directions (0°, 45°, 90°) plus celles de sollicitation équiaxiale (σ_b, r_b) adoptée dans l’identification des coefficients d’anisotropie relatifs à chaque critère et pour chaque comportement de plasticité (associée ou non associée).

Tableau 1 Les contraintes d’écoulement en (MPa) et les coefficients de l’anisotropie de Lankford suivant les directions (0°, 45°, 90° et équiaxiale [29])

Parameters	σ_0	σ_{45}	σ_{90}	σ_b	r_0	r_{45}	r_{90}	r_b
Acier calmé (IF-steel)	180	188	184	183.5	2.01	1.52	2.42	2.21
Aluminum	128	127	126	126	0.78	0.47	0.53	0.65

ETUDE EXPERIMENTALES, RESULTATS ET DISCUSSION

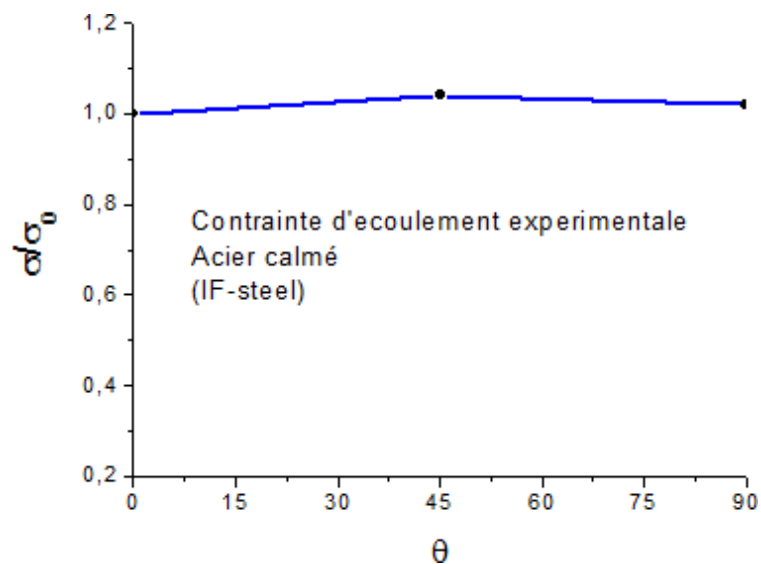
A6XXX-T4								
----------	--	--	--	--	--	--	--	--

III-4.2/Détermination de la contrainte d'écoulement expérimentale

Selon l'hypothèse d'homogénéité des champs de contraintes et de déformations au niveau de la partie utile de l'éprouvette, et à partir des grandeurs globales (contraintes-déformations) fournies par la machine de traction, on peut déterminer la fonction d'écrouissage $\sigma=f(\epsilon)$. Il sera préférable de normaliser les valeurs des contraintes d'écoulements $\sigma(\theta)$ et les coefficients de Lankford par la contrainte de référence σ_0 et r_0 .

Tableau 2 : Les valeurs des contraintes d'écoulements et des coefficients de l'anisotropie de Lankford normalisées

<i>Parameters</i>	σ_0/σ_0	σ_{45}/σ_0	σ_{90}/σ_0	σ_{bb}/σ_0	r_{r0}/r_{r0}	r_{45}/r_0	r_{90}/r_0	r_{bb}/r_0
Acier calmé (IF-steel)	1	1.04	1.02	1.02	1	0.75	1.2	1.09
Aluminum A6XXX-T4	1	0.99	0.98	0.98	1	0.6	0.68	0.83



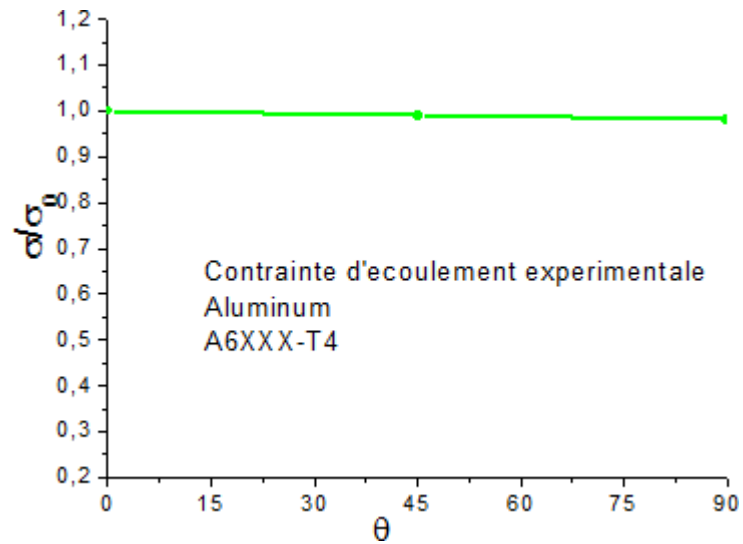


Figure 27: Résultats de calcul de contraite d'écoulement expérimentale $\sigma(\theta)$ normalisée pour les matériaux

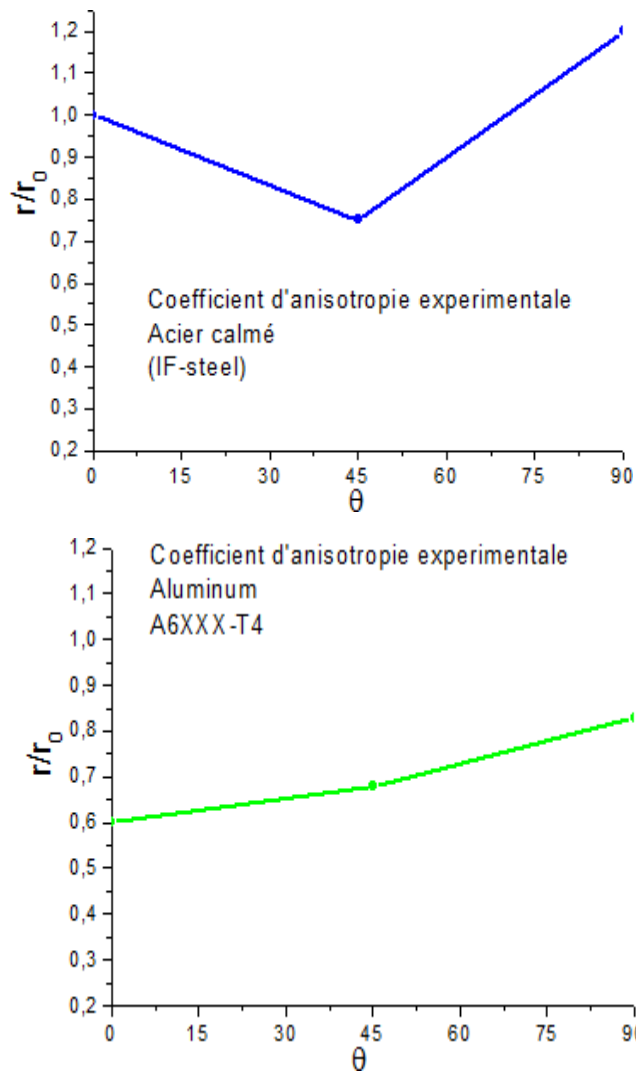


Figure 28: Résultats de calcul du coefficient de Lankford expérimentale $r(\theta)$ normalisée pour les matériaux

III-5/Détermination des grandeurs mécaniques à partir de des 2 critères de plasticités:

La détermination des paramètres de l'anisotropie s'effectue à partir du mélange entre les contraintes d'écoulement et les coefficients de Lankford issus de l'expérimental.

➤ Les 04 paramètres de Hill48 s'obtiennent par le biais de l'équation suivante:

$$F = \frac{\sigma_{90}^2}{2\sigma_{90}^2(1+r_{90})} \quad (58)$$

$$G = 2 - \frac{2\sigma_{90}^2 r_{90}}{\sigma_{90}^2(1+r_{90})} \quad (59)$$

$$H = \frac{2\sigma_{90}^2 r_{90}}{\sigma_{90}^2(1+r_{90})} \quad (60)$$

$$N = \frac{4\sigma_{45}^2}{\sigma_{45}^2} \frac{1 + \frac{\sigma_{90}^2(r_{90}-1)}{\sigma_{90}^2(1+r_{90})}}{\sigma_{90}^2(1+r_{90})} \dots\dots\dots (61)$$

➤ Les 08 paramètres de BBC2005 s'obtiennent numériquement par la méthode de Newton-Raphson programmée sous Matlab en posant comme 'Input' les paramètres expérimentaux suivants: $\sigma_0, \sigma_{45}, \sigma_{90}, r_0, r_{45}, r_{90}$ en plus de ceux qui biaxiaux σ_b et r_b .

a) Identification des paramètres associés des deux critères:

Tableau 3 : Identification des paramètres associés des deux critères

Acier calm é (IF- steel)	Hill4	F		G		H		N	
	8	0.437		0.475		0.524		0.54	
	BBC	a	b	L	M	N	P	Q	R
	2005	1.	0.5	0.	0.4	0.4	0.4	0.5	0.
	K=3	01	04	4	29	23	41	61	61
		3		7					0
				7					

Al A6X XX- T4	Hill4	F		G		H		N	
	8	0.619		0.578		0.421		0.540	
	BBC	a	b	L	M	N	P	Q	R
	2005	0.	0.3	0.	0.4	0.4	0.4	0.5	0.
	K=4	84	18	4	8	88	70	81	51

		4		3					8
				7					

b) Résultats graphiques dans le cadre de la plasticité associée:

La variation de l'anisotropie des contraintes $\sigma(\theta)$ et du coefficient de Lankford $r(\theta)$ dans le plan de tôle est adressée ci-dessous et ce pour les deux critères. Sachant que l'anisotropie mécanique est anciennement évaluée moyennant le critère de Hill proposée en 1948, depuis les fonctions mathématiques ne cessent d'évoluer jusqu'aujourd'hui. Le critère BBC2005 est proposer récemment afin de mieux prévoir le comportement mécanique des matériaux métalliques.

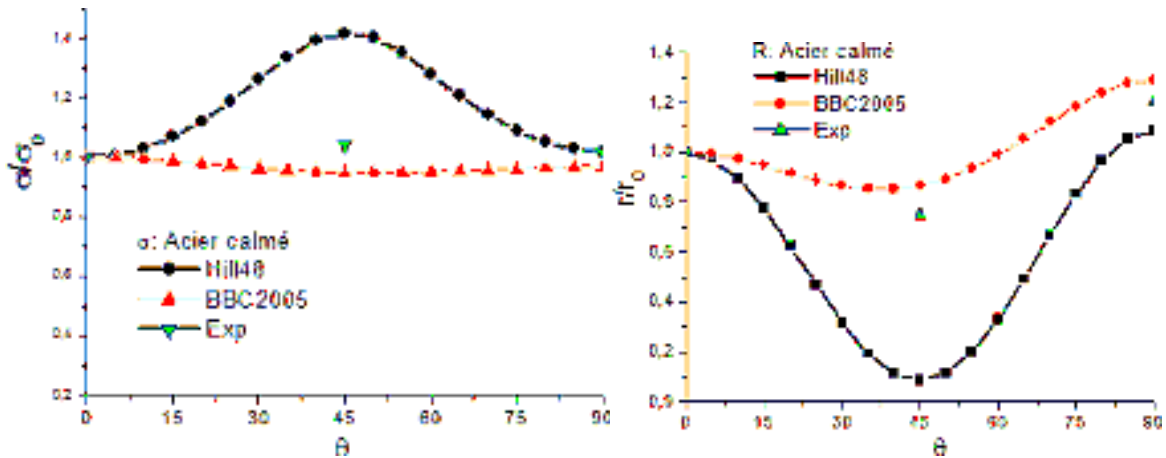


Figure 29: Comparaison du Critère de Hill48 avec les données expérimentales des contraintes et du coefficient d'anisotropie (AFR)

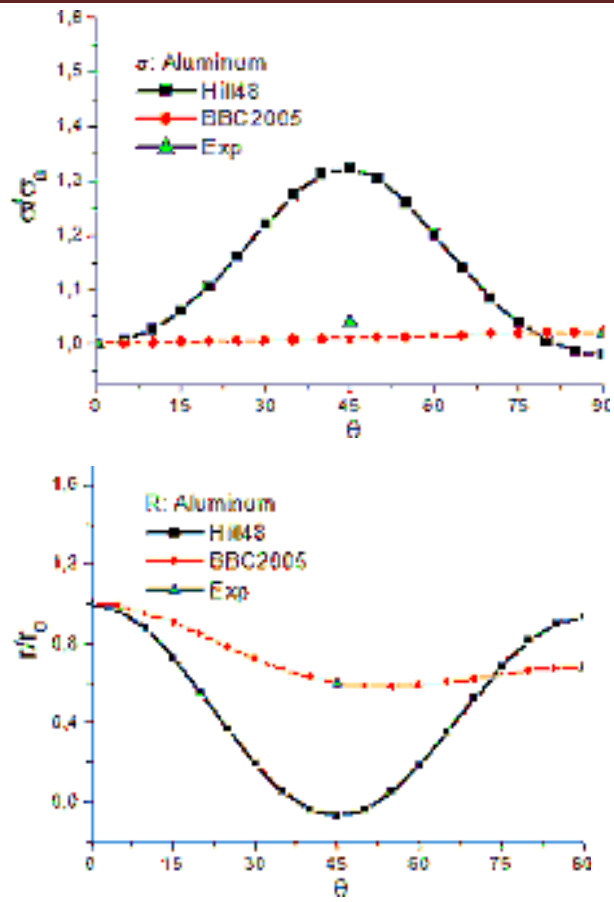


Figure 30: Comparaison du Critère Yld2000-2d avec les données expérimentales des contraintes et du coefficient d'anisotropie (AFR)



*Conclusion
Générale*

CONCLUSION GÉNÉRALE

L'évolution des paramètres d'anisotropie de contraintes et de déformations dans le plan de la tôle et dans le cadre de l'hypothèse de plasticité associée pour les deux critères de comparaison, montre bien l'importance des points suivant :

- Pour le critère de Hill48, l'identification des paramètres d'anisotropie (F, G, H et N) issus du jumelage des contraintes et des valeurs du coefficient de Lankford, présente une variation décalée par rapport à l'expérimental.
- Pour le critère BBC2005, qui est basé sur le principe d'identification numérique de huit (8) coefficients d'anisotropie, assure une certaine harmonie et de cohérence dans l'évolution des courbes expérimentales et théoriques.
- La comparaison entre les deux critères donne un certain favori d'utilisation de BBC2005. Ce dernier prévoit mieux le comportement mécanique des tôles laminées.
- Comme perspective, on propose de simuler ces essais de traction par logiciel des éléments finis tel que Abaqus, comsol...etc.

REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE

- [1] O. GHELLOUDJ, D. ZELMATI, M. HASSANI, D. BERDJANE, T. Chouchane « Influence des défauts de laminage sur l'évolution de la qualité des produits»
- [2] D. Banabica, T. Kuwabara, T. Balan, D.S. Comsa, D. Julean, Non-quadratic yield criterion for orthotropic sheet metals under plane-stress conditions, International Journal of Mechanical Sciences 45 (2003)797–811
- [3] Daniel MEYER. « Rôle du laminoir dans le cycle de fabrication » Date de publication : 10 mars1997
- [4] <https://www.techniques-ingenieur.fr/ref.intM7830>
- [5] Philippe Mangin : Identification des paramètres clés du laminage transversal : vers la formalisation des connaissances scientifiques et technologiques
- [6] Modélisation mécanique et thermique du procédé de laminage asymétrique Anouar Halloumi
- [7] P. Fabrègue, "Métallurgie du laminage à chaud, Techniques de l'ingénieur. M7860,2000
- [8] G. Béranger, G. Henry, G. Sanz, "Le livre de l'acier". Eds Lavoisier Paris,1996.
- [9] B. Berger, E. Neuschutz, G. Mucke, Experiences with a flatness control system including axial roll shifting, in: 4 th International steel rolling conference—the science and technology of flat rolling., Vol. 2,1987.
- [10] R. RADJAI, Thèse de doctorat « conception et optimisation de surfaces additionnelles dans le procédé d'emboutissage par l'approche inverse»,(2006).
- [11] Element Methods for Analysis of Sheet Forming Problems", VDI Berichte No. 894,1991.
- [12] Felder E., "Tribologie de l'emboutissage", Techniques de l'ingénieur, Traité Mécanique et Chaleur, B7535
- [13] Salanon M, Mallard M., Fiches techniques Découpage Emboutissage Pliage, EMS 740-A19/N 3625,1994.
- [14] Marciniak Z., Duncan J.L., Mechanics of Sheet Metal Forming, Ed. Edward Arnold, 1992.
- [15] M. BOIVIN, "Prévision du retour élastique lors du pliage des tôles", Physique et Mécanique de la Mise en Forme des Métaux, 5ème partie, Chapitre 9, Presses du C.N.R.S., Paris, 1990, p. 471-480.
- [16] Mourad JERBI. Procédé de mise en forme. Institut supérieure des études technologiques de Nabeul.2017.
- [17] É. Felder, Tribologie de l'emboutissage, Techniques de l'ingénieur, M 7535,1994.
- [18] R. Djabri, I. Mihoubi, Etude Et Réalisation D'une Emboutisseuse Des Tôles De Faible Epaisseur, Mémoire Master, Université Mohamed Boudiaf-MSILA,2018.

REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE

- [19] A.Cornet et F. Hlawka, « Science des matériaux, propriétés et comportement des matériaux du microscopique ou macroscopique»
- [20] Z. Marciniak, J. L. Duncan, S. J. Hu, «Sheet metal forming», Butterworth-Heinemann,2002
- [21] Gesellschaft für Optische Messtechnik
- [22] Col A., Emboutissage des tôles : Importance des modes de déformation, Techniques de l'ingénieur, BM 7 510,2002.
- [23] P. Poloukhine, V. Tiourine, P. Davidkov, D. Vitanov, Traitement des métaux par déformation. Mir Moscou,1987.
- [24] « Formage à la presse » BT2, 7510,PB7510-3
- [25] A.Cornet et F. Hlawka, « Science des matériaux, propriétés et comportement des matériaux du microscopique ou macroscopique»
- [26] R. Quatremer, Déformation plastique des tôles. Delagrave, Paris,1981.
- [27] Banabic, D., Aretz, H., Comsa, D.S., Paraianu, L., 2005. An improved analytical description of orthotropy in metallic sheets. Int. J. Plast. 21 (3),493e512.
- [28] Hershey A.V.: The plasticity of an isotropic aggregate of anisotropic face centred cubic crystals. J. Appl. Mech. 21(2):241-249,1954.
- [29] L. Lăzărescu, I. Nicodim, I. Ciobanu, D.S. Comşa, D. Banabic, Determination of Material Parameters of Sheet Metals Using the Hydraulic Bulge Test, Acta Metall. Slovaca. 19 (2013) 4–12.