

Université du 8 mai 1945 – Guelma
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Mécanique



04/531.593

Projet de fin d'étude

Présenté par : **Bouchelaghem Nassir**

Master

Conception et Production Industrielle



**Aptitude à l'emboutissage des tôles minces
évaluées au moyen des coefficients d'écrouissage et
d'anisotropie.**

Sous la Direction de :

Mr. Elaggoune Ali

Année Universitaire :
2010/2011



REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier en premier lieu notre dieu.

Je tiens à remercier plus vifs mon encadreur

*Mr. Elaggoune Ali qui nous a aidés à réaliser
ce travail avec son encadrement et son soutien,*

*Sans oubliés Mr Guendouz Abd ellah qui ne
avare pas aucun Chose, ainsi que les enseignants
du département mécanique et spécialement ceux de
2^{me} Master CPI.*



DEDICACE



Je dédie le fruit de mes années d'études à :

Ma douce mère pour son affection

Mon père pour son soutien et encouragement

Mes frères et sœurs et leurs enfants

A toute ma famille

A toutes mes amis et mes collègues

A toutes la classe de 2^{ème} master CPI

NASSIR

SOMMAIRE

INTRODUICION GENERALE	page 1
CHAPITRE I	
ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE	
I.1. NTRODUCTION	page 2
I.2. TECHNIQUES DE L'EMBOUITISSAGE	page 3
I.2.1. Conception de l'outil d'emboutissage	page 3
I.2.2. Comportement d'une tôle dans un outil d'emboutissage	page 4
I.2.3. Problèmes rencontrés par la tôle	page 5
I.2.4. Différents modes de déformation	page 6
- l'expansion biaxiale	page 7
- la traction plane	page 7
- l'extension	page 7
- la traction uniaxiale	page 7
- le cisaillement	page 7
- le rétreint	page 7
I.3. REVUE BIBLIOGRAPHIQUE DES REFERENCES CONSULTEES	page 7
I.3.1. ESSAIS DE LABORATOIRE	page 7
I.3.1.1. Essai Jovignot ou essai de gonflement hydraulique	page 7
I.3.1.2. Essai Swift ou de coupelle profonde	page 8
I.3.1.3. Essai Nakazima (1968)	page 9
I.3.1.4. Essais de traction	page 9
I.3.1.5. Essai Marciniak	page 10
I.4. ASPECTS EXPERIMENTAUX DE LA SRICTION DES TOLES	page 11
I.4.1. Présentation des Courbes Limites de Formage "CLF"	page 11
I.5. Influence des paramètres rhéologiques et d'anisotropie du matériau sur lesCLF14	
I.5.1. Influence de la sensibilité à la vitesse de déformation.....	page 14
I.5.2. Effet de température	page 14
I.5.3. Influence du coefficient d'anisotropie	page 15
I.5.4. Influence de l'exposant d'écrouissage	page 15
I.6. PROBLEMATIQUE	page 15
I.6.1. Définitions	page 16
➤ Coefficient d'écrouissage « n »	page 16
➤ Coefficient d'anisotropie « r »	page 16
I.6.2. Objectifs de notre étude	page 17
ETUDE EXPERIMENTALE	
CHAPITRE II	
TRAVAUX REALISES	
II. NUANCE ET CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX UTILISEES.....	page 18
II. 1 NUANCE DES TOLES ETUDIEES.....	Page 18
II.2 DETERMINATION DES CARACTERISTIQUES MECANIQUES	page 19
II.2.1 Description de l'appareillage utilisé.....	Page 19
II.2.1.1 Machine utilisée	page 19
II.2.1.2 Tôle	page 20
II.2.1.3 Procédé expérimental	page 20
II. 3 DETERMINATION DES COEFFICIENTS D'ECROUISSAGE « n » ET D'ANISOTROPIE « r ».	page 22
II. 4 Coefficient d'écrouissage « n ».	page 23
❖ RESULTATS.....	page 24
➤ Eprouvette en Acier.....	page 24



Sommaire

➤ Epreuve en Bronze.....	Page24
➤ Epreuve en Aluminium.....	page25
II. 5 Mesure des déformations par jauges d'extensomètre.	page25
II. 5. 1 Description du matériel utilisé	page25
II. 5. 2 Préparation des tôles.	page27
II. 5. 3 Construction des jauges	page27
II. 5. 4 Principe de fonctionnement des jauges:	page28
II. 5.5 Extensomètre.	page29
II. 5.5. 1 Principe de fonctionnement du pont.	page29
II. 5. 5. 2 Mode opératoire	page30
II. 5. 5. 3 Coefficient d'anisotropie « r ».	page30
❖ RESULTATS.....	page31
➤ Epreuve en Acier.....	page31
➤ Epreuve en Bronze	page32
➤ Epreuve en Aluminium	page32
II. 6 Etablissement des courbes limites de formage	page33
II. 7 Courbe limite à la rupture	page33
II. 8 Marquage des réseaux	page35
II. 8. 1 Choix des grilles	page35
II. 8. 2 Avantages et inconvénients du type de réseau	page36
II. 9 Technique utilisée pour la détermination expérimentale des (C. L. F.)	page37
II. 10 Présentation du matériel utilisée	page37
II. 10.1 Machine utilisée	Page37
II. 10. 2 Module d'emboutissage utilisé.....	page37
II. 10. 3 Préparation des tôles	page38
II.10.4 Manipulation.....	page39
II. 10. 5 Mesure des déformations :.....	Page39

CHAPITRE III

ANALYSE DES RESULTATS

III. 1: <i>Courbe limite de formage expérimental d'une tôle en acier.</i>	Page40
III. 2 : <i>Courbe limite de formage expérimental d'une tôle en bronze.</i>	Page41
III. 3 : <i>Courbe limite de formage expérimental d'une tôle en aluminium</i>	Page41
III. 4 : <i>Courbe limite de formage expérimental. Influence des coefficients d'écrouissage et d'anisotropie.</i>	Page42
III. 5 : <i>Evolution de l'allongement en fonction de la force pour les trois matériaux étudiés.</i>	Page43
III. 6 : <i>Comparaison des CLF fournis par Goodwin & Keeler, et CLF expérimental d'une tôle en acier</i>	Page44
III. 7 : <i>Courbe limite de formage expérimental. Influence de la base de mesure.</i> ...Page45	
III. 8 : <i>Courbe limite de formage expérimental. Influence de la déformation</i>	Page46
Conclusion	page 47
BIBLIOGRAPHIE	page 48

INTRODUCTION GENERALE

La tôle métallique (nue, revêtue, pré peinte, ...) sortant d'usine subit généralement une première transformation au cours d'une opération de mise en forme. Cette opération peut aller du simple pliage jusqu'à l'obtention d'une forme pouvant être très complexe selon différents procédés.

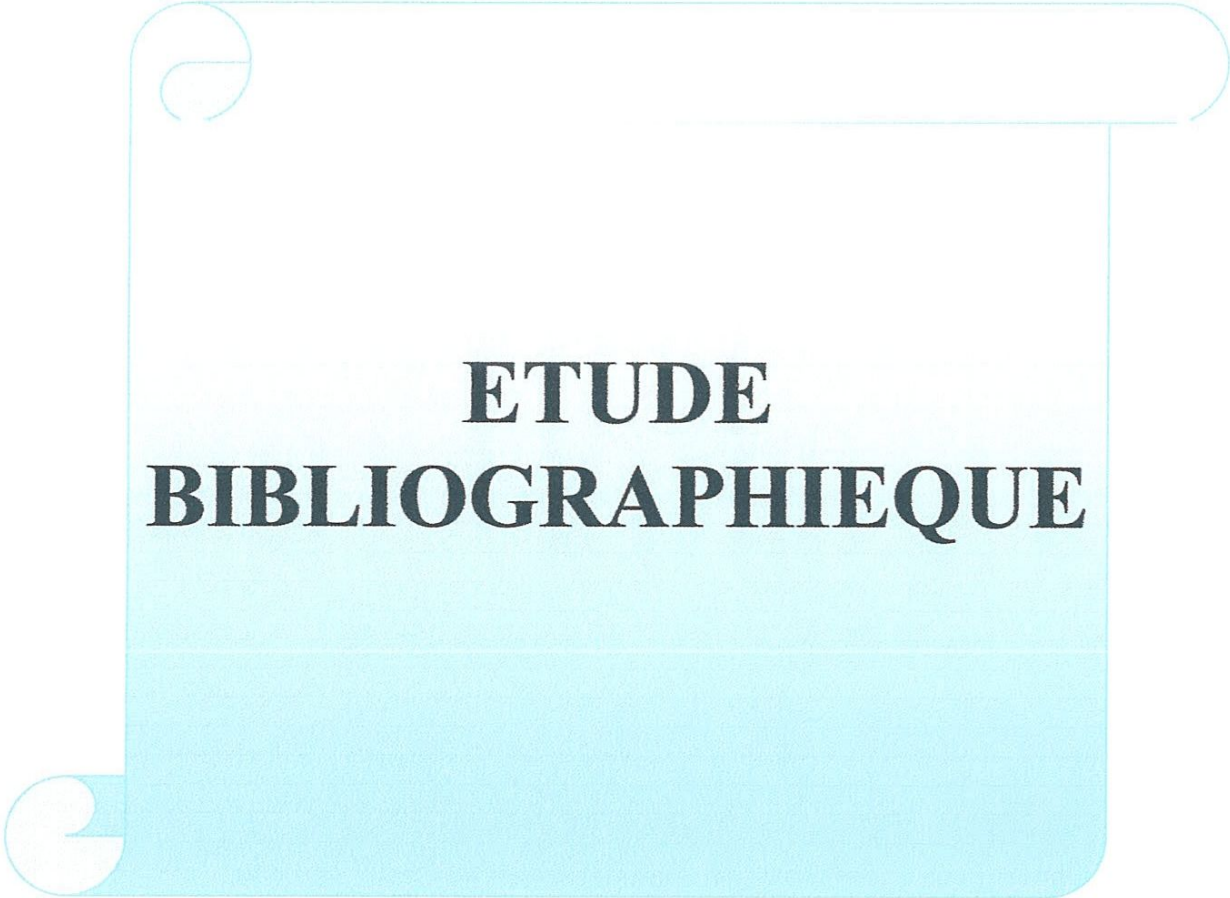
La technique de déformation des tôles la plus utilisée est l'emboutissage à froid, qui consiste à obtenir à partir de tôles planes prédécoupées (ou flans), une pièce dont la forme est constituée de surfaces non développables.

Cette pièce formée appelée 'embouti' doit conserver un bon état de surface et ne pas avoir de défauts de type amincissement localisé (appelé striction) ou ondulation (appelé plissement). Pour l'obtention de ces pièces, on utilise des outils d'emboutissage montés sous des presses mécaniques ou hydrauliques. Cette technique est utilisée dans tous les secteurs industriels : automobile, boîtes alimentaires, électroménager, ... et à un degré moindre dans l'aéronautique.

L'embouti n'est généralement pas la pièce finie utilisable, il n'est qu'une étape intermédiaire dans le processus de fabrication. Il est nécessaire après le formage, d'enlever la matière excédentaire qui a permis de maintenir l'embouti. Il est alors possible de réaliser des bords pour pouvoir accoster cette pièce avec d'autres et réaliser éventuellement une structure à partir de plusieurs pièces embouties.

L'emboutissage d'une tôle sera plus ou moins facile selon l'aptitude du matériau à subir des déformations plastiques. Plus un matériau est ductile, plus il sera facile de le mettre en forme par contre. Sa résistance mécanique pourra être insuffisante. Il est donc nécessaire de trouver un bon compromis entre la ductilité du matériau et sa résistance mécanique.

Les tôles métalliques utilisées en emboutissage présentent généralement de bonnes caractéristiques mécaniques et il est nécessaire de définir le processus de transformation adapté pour maintenir de bonnes propriétés sur le produit final.



**ETUDE
BIBLIOGRAPHIQUE**

I.1. INTRODUCTION

La transformation des tôles métalliques en produits finis a une importance considérable dans de nombreuses industries telles que la construction mécanique, l'automobile ou l'aéronautique. Les procédés de mise en forme des tôles sont multiples : emboutissage, pliage, gonflage, et de nouveaux procédés incluant l'utilisation combinée d'outils solides et de fluide sous pression. Au cours des dernières années, de nombreux efforts se sont portés sur l'étude de ces procédés. L'emboutissage consiste à déformer une tôle sous l'action d'un poinçon, le pourtour de la tôle étant souvent serré mécaniquement par un jonc de retenue permettant de contrôler l'écoulement de la tôle. La mise au point d'une gamme d'emboutissage exige la connaissance des contraintes et déformations induites dans le métal ainsi que les efforts subis par les outillages.

En raison de l'augmentation des limites élastiques des tôles et de la diminution des épaisseurs, les emboutis se situent souvent à la limite définissant le succès de l'opération, par rapport aux risques tels que la **striction** suivie d'une **rupture ductile**, ou le plissement.

Le comportement des tôles métalliques lors de la mise en forme dépend de façon très significative du comportement plastique du matériau utilisé, tant en ce qui concerne le niveau des efforts d'emboutissage. La répartition des déformations, la formation des cornes dans les processus avec avalement, que les risques d'instabilités (striction, plissement,...). Les efforts et distributions de déformation obtenus dans ces opérations d'emboutissage sont fortement sensibles au comportement plastique (écrouissage, anisotropie...), et aux conditions de frottement entre les outils et la tôle, c'est-à-dire aux paramètres tribologiques et rhéologiques du procédé. Il existe donc un fort besoin de modélisation du procédé qui permettrait d'éviter de longues et coûteuses séquences d'essais - erreurs - corrections.

Ce chapitre fournit d'abord une brève description des techniques usuelles d'emboutissage. Puis il s'attache à l'analyse de la striction en emboutissage, en détaillant les aspects expérimentaux des limites de formage. Les Courbes Limites de Formage (CLF) introduites pour prédire la limite supérieure de formage de la tôle avant l'apparition de la striction, sont plus particulièrement analysées. Nous verrons comment les paramètres rhéologiques et d'anisotropie du matériau peuvent influencer sur ces déformations limites.

I.2. TECHNIQUES DE L'EMBOUTISSAGE

Avant la réalisation des emboutis dans un outil sous presse, tout un processus d'étude doit être respecté pour permettre une bonne fiabilité de la production en série de la pièce.

Au départ, le concepteur de la pièce finie prend en compte l'environnement de cette pièce, mais aussi le cahier des charges mécanique pour définir la géométrie la mieux appropriée, ainsi que l'épaisseur et les caractéristiques mécaniques du matériau, Il est important pour lui de savoir si les contraintes dues à la géométrie et au matériau sont compatibles entre elles et si le procédé de transformation permet d'obtenir la géométrie, tout en garantissant une bonne tenue mécanique.

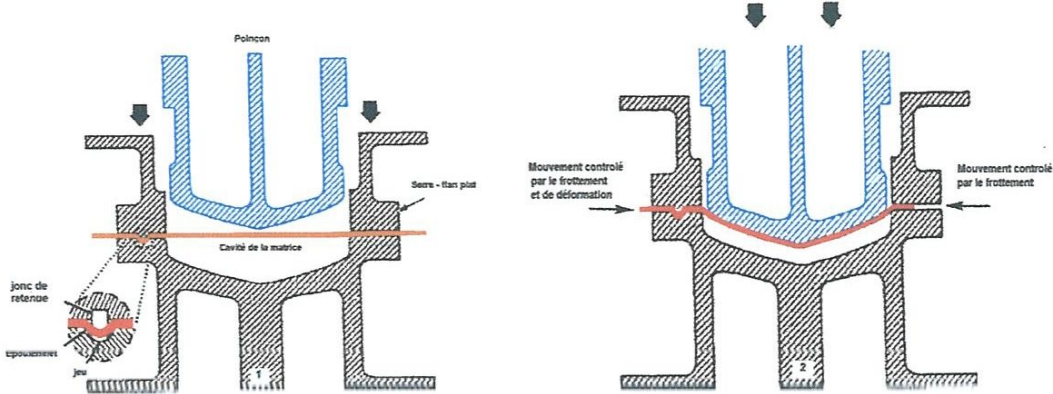
La gamme de formage représente la succession des opérations nécessaires pour obtenir la pièce finie. Elle comprend les étapes suivantes :

- découpe de la forme du flan de départ.
- Une ou plusieurs opérations d'emboutissage qui correspondent à plusieurs profondeurs d'emboutissage ou à plusieurs formes d'ébauche.
- Des opérations de finition plus ou moins importantes et difficiles selon la géométrie: poinçonnage, ajourage, relevage des bords, calibrage,...

1.2.1. Conception de l'outil d'emboutissage

L'emboutissage consiste à fabriquer, à partir d'un flan plan de faible épaisseur (< 3 mm) pratique à l'aide de presses à emboutir de fortes puissances munies d'outillages spéciaux qui comportent dans le principe, trois pièces : (Figure I-1)

- Une matrice dont une partie de la forme est la forme femelle de la pièce et l'autre partie correspond à la forme de serre-flan.
- Un poinçon, dont la forme correspond à la géométrie de l'embouti à réaliser.
- Un serre-flan généralement annulaire, qui permet de contrôler l'écoulement du métal dans un passage calibré en plaquant le flan sur la matrice.
- Des joncs sont parfois utilisés pour freiner le glissement de la tôle.



Action 1 : Descente du serre flan et maintien en position de la tôle avant emboutissage.

Action 2 : détente du poinçon avec étirage de la tôle et formage de la pièce.

Figure I-1 : Description de l'outil d'emboutissage

Le serre-flan presse le métal contre la matrice et contrôle son écoulement le long du poinçon. La forme du flan de départ a une grande importance : il permet de maîtriser et d'orienter l'écoulement du métal dans des directions privilégiées en fonction de la forme de la pièce. Pour minimiser la quantité de matière mise en jeu ou pour maîtriser l'écoulement, l'emboutisseur utilise dans la zone sous serre-flan des moyens mécaniques de blocage ou freinage appelés joncs.

I.2.2. Comportement d'une tôle dans un outil d'emboutissage

En analysant les mécanismes de déformation d'un matériau dans un outil de formage. Il n'y a que deux actions mécaniques transmises par la presse : (Figure I.2).

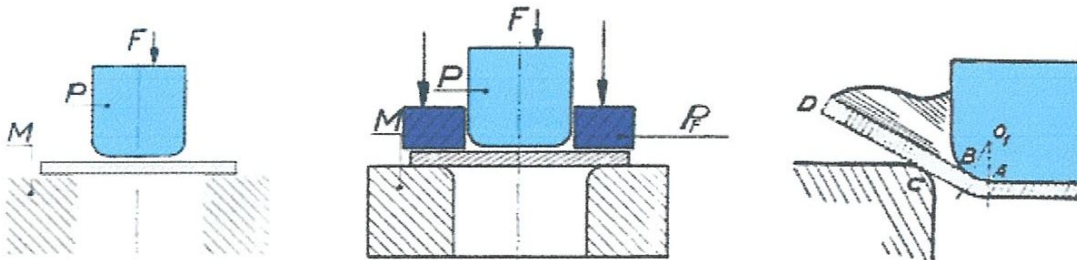


Figure I-2 : Forces appliquées

- Une force motrice générée par le poinçon. Elle va déformer le flan et l'obliger à prendre sa forme dans la matrice.
- Une force perpendiculaire au plan de la tôle assurant la pression du serre-flan.

Le poinçon dans sa descente vient en contact avec la tôle puis l'oblige à se fermer progressivement sur son contour suivant l'arc **BO1A**, la partie opposée de la matière s'appuyant en **C** sur la matrice, prend la forme conique **D**.

On remarque dans ce mouvement que des plis se forment sur la pièce en œuvre. Ces plis vont augmenter d'amplitude au fur et à mesure du déroulement de l'opération d'emboutissage et empêcher par coincement l'écoulement de la matière entre matrice et poinçon.

Le poinçon poursuit sa course, et casse la pièce du fait que le processus de déformation plastique est interrompu.

Pour éviter cette formation de plis sur la pièce en œuvre, on adjoint à l'outil d'emboutissage un troisième élément actif nommé "serre-flan" ou "presse-flan".

Ce serre-flan monté sur pression additionnelle réglable, permet de conserver l'épaisseur originelle sans formation de plis [9].

I.2.3. Problèmes rencontrés par la tôle

- Lors de l'opération d'emboutissage la tôle va réagir de différentes façons : des contraintes vont être localisées au niveau des points d'attaque et d'entraînement de la matière en provenance de la zone sous serre-flan.
- Des contraintes de compression vont généralement apparaître sous serre-flan et dans les zones en brins libres (où le métal n'est pas soutenu), car les points correspondants vont subir un avalement.
- Des contraintes localisées apparaissent aussi lors de l'écoulement du métal sur le rayon d'entrée matrice. Si le rayon matrice est trop petit, il peut y avoir rupture de la tôle, par contre si le rayon est trop grand des plis peuvent apparaître car le métal n'est pas maintenu par le serre-flan.
- Des contraintes résiduelles en fin de cycle de formage, dues à des répartitions non

homogènes des déformations, vont entraîner une modification de forme de l'embouti lorsqu'il va être sorti de l'outillage. Ce phénomène est appelé 'retour élastique'.

- Des problèmes de grippage peuvent apparaître lorsque les pressions de contact dans l'outil sont trop élevées.

I.2.4. Différents modes de déformation

Analysons maintenant les différents modes de déformations possibles en emboutissage à partir des considérations précédentes.

La Figure I-3 représente différents trajets de déformation linéaires, ainsi que les différentes zones caractérisant le mode de déformation subi par la tôle. Cette représentation est effectuée dans les axes des déformations principales dans le plan de la tôle.

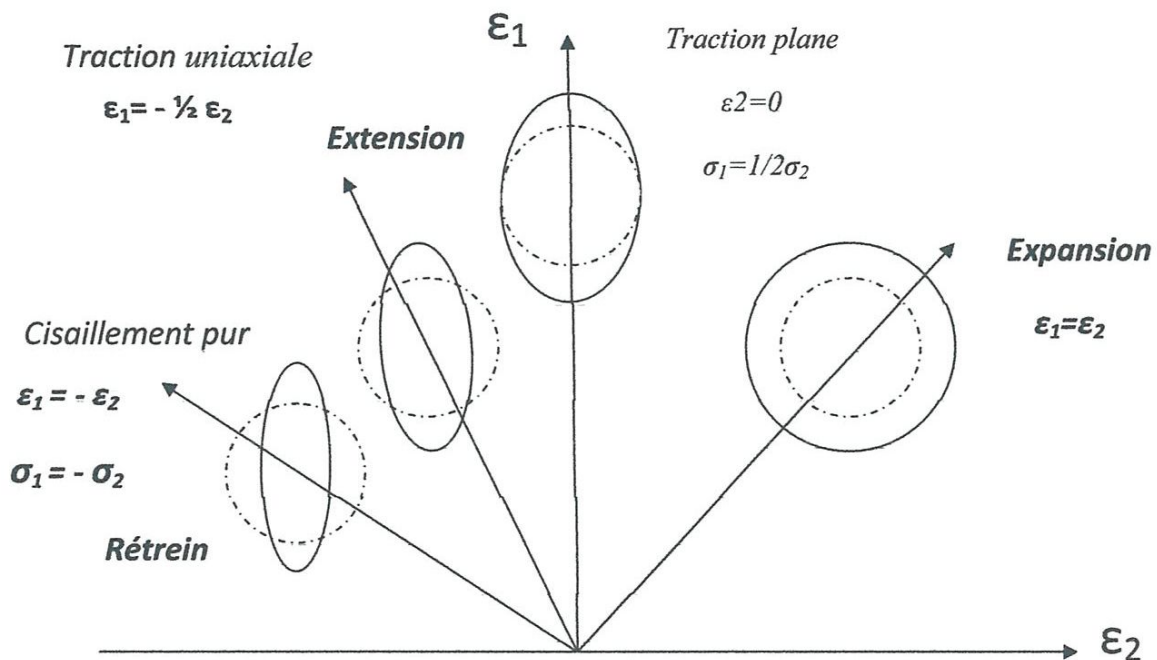


Figure I-3 : Diagramme de différents tests de déformation dans le plan des déformations principales de surface de la tôle.

Sur le diagramme apparaissent les différentes déformations possibles sur un embouti, qui peuvent être visualisées par les modifications d'un réseau de cercles ou de carrés préalablement déposés sur le flan avant l'emboutissage. Les différents chemins ou types de déformation rencontrés sont définis par:

- **L'expansion biaxiale** : cela correspond à ce qui se passe au nez du poinçon au début du formage, elle est d'autant plus importante que le métal est bloqué sous serre-flan.
- **La traction plane** : cela correspond aux déformations dans les parois verticales de l'embouti, qui sont générées par la tension dans la tôle pour entraîner la matière sous serre-flan ou pour marquer une forme en fin de formage lorsque la matière ne peut plus beaucoup glisser dans l'outil.
- **L'extension** : ce type de déformation est associé à des déformations circonférentielles négatives bien que la contrainte correspondante Soit positive.
- **La traction uniaxiale** : cela correspond à ce qui se passe sur une éprouvette de traction.
- **Le cisaillement** : c'est le trajet idéal de formage toute déformation en traction est compensée par une déformation en compression tout en maintenant l'épaisseur constante. Ce type de sollicitation serait obtenu dans la zone sous serre-flan si la pression était suffisante pour empêcher tout épaissement de la tôle.
- **Le rétreint** : ce type de chargement est observé dans les zones de l'embouti subissant un avalement il s'accompagne d'un épaissement de la tôle.

I.3. REVUE BIBLIOGRAPHIQUE DES REFERENCES CONSULTEES

I.3.1. ESSAIS DE LABORATOIRE

Nous présentons maintenant les différents types d'essais de laboratoire usuels servant à caractériser le comportement plastique et la formabilité des tôles.

I.3.1.1. Essai Jovignot ou essai de gonflement hydraulique

Le flan est bloqué sur la matrice et par pression hydraulique, il est gonflé sur une matrice présentant une ouverture circulaire ou elliptique (Figure I-4) [1].

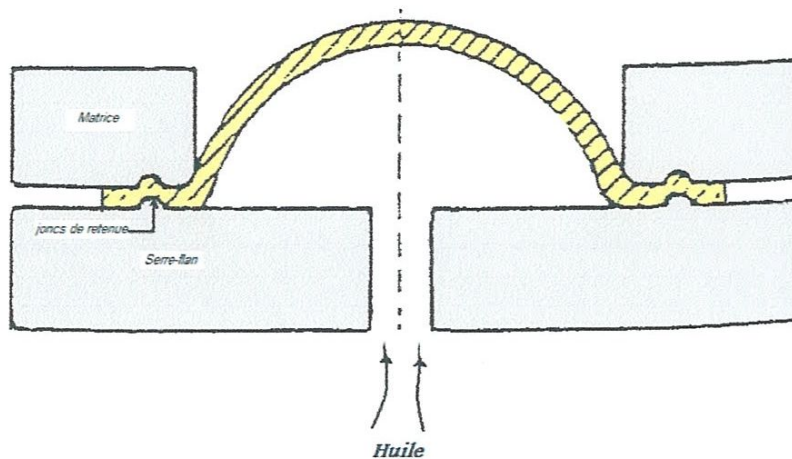


Figure 1-4 : Essai Jovignot.

L'écoulement est contrôlé par des jons de retenue situés sous le serre-flan. Cet essai est apprécié car il donne des mesures sans frottement et permet de connaître les caractéristiques de la tôle dans le domaine de l'expansion ($\rho = \varepsilon_1 / \varepsilon_2 > 0$).

Les états de déformation et de contrainte bi axiaux peuvent être déterminés à partir de la pression du fluide, du rayon de courbure et de l'épaisseur.

Le gonflement hydraulique a les applications suivantes :

- Caractérisation intrinsèque du matériau en traction bi axiale.
- Caractérisation de l'écroutissage à des niveaux de déformation plus élevés qu'en traction uni axiale.

I.3.1.2. Essai Swift ou de coupelle profonde

Le plus courant des tests utilisés pour l'emboutissage profond est l'essai Swift. Cet essai consiste à emboutir à l'aide d'un poinçon à fond plat un flan circulaire maintenu entre matrice et serre-flan. Cet essai est très sensible au frottement tôle - outil. Le mode de déformation est le rétreint : $\rho < 0$. L'emboutissabilité est exprimée par un rapport limite d'emboutissage noté LDR (Limiting Drawing Ratio). Pour un rayon de poinçon considéré ce rapport est donné par :

$$\text{LDR} = \frac{\text{Rayon du flan non déformé}}{\text{Rayon poinçon}}$$

Ce rapport définit la valeur limite qu'il est possible d'effectuer en une seule passe sans obtenir de rupture de l'embouti [2].

I.3.1.3. Essai Nakazima

Cet essai (Figure 1-5) consiste à emboutir sur un poinçon hémisphérique des bandes de différentes largeurs. On couvre ainsi avec un seul outil toute la gamme des déformations ce qui permet de réaliser des Courbes Limites de Formage, mais avec frottement. Ce test est appelé test mixte car il fait intervenir l'expansion et l'extension [3].

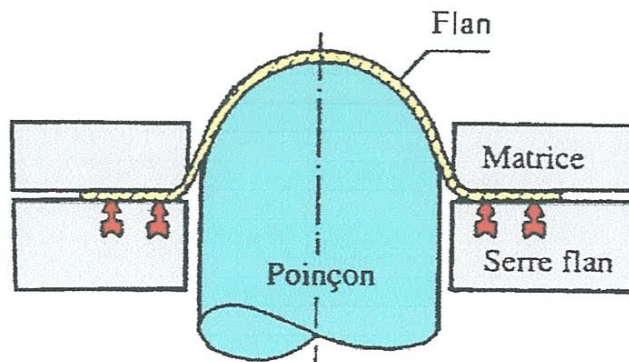


Figure I-5 : Essai Nakazima

I.3.1.4. Essais de traction

Une géométrie élancée d'éprouvette (Figure I.6) permet de réaliser une sollicitation de traction simple : $\rho = \varepsilon_2 / \varepsilon_1 = -R / (1+R)$ avec R , coefficient de Lankford.

Par contre, les géométries très courtes (éprouvette de traction large) ou présentant des entailles (éprouvette de traction entaillée) permettent de se rapprocher d'un état de déformation plane ($\rho \cong 0$) [4].

$$R = \frac{\varepsilon^p_{latérale}}{\varepsilon^p_{épaisseur}}$$

Coefficient de Lankford :

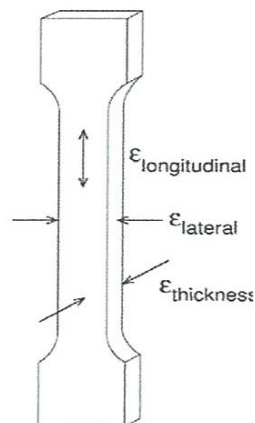


Figure I.6 : ϵ_p longitudinale et ϵ_p latérale mesurés à l'aide d'un extensomètre lors d'un essai de traction

I.3.1.5. Essai Marciniak

Cet essai (Figure I-7) (avec le gonflement hydraulique) permet de déterminer les propriétés des tôles métalliques en traction bi axiale, sans avoir le désavantage d'un contact et donc d'un frottement avec un poinçon solide.

Cet essai peut être réalisé en utilisant un poinçon cylindrique de section carrée, elliptique ou circulaire. Ce poinçon possède un fond plat évidé et un contre-flan est utilisé pour obtenir une zone déformée plane sans surface de frottement [5].

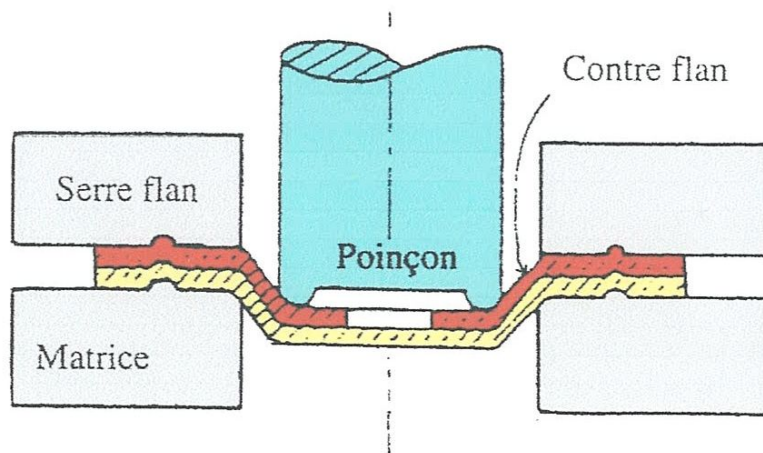


Figure 1-7: Essai Marciniak.

Le test a les applications suivantes :

- Détermination des déformations limites du matériau en traction bi axiale, par traction dans le plan de la tôle et sans contact avec le poinçon dans la zone utile.
- Application à des tôles de grandes dimensions pouvant être ensuite utilisées dans d'autres tests. Afin de déterminer les effets de trajets de déformation complexes sur l'écroutissage et les niveaux des déformations limitent.
- Détection des défauts Comme les inclusions, par application de grandes déformations uniformes sur des éprouvettes de grandes dimensions.

1.4. ASPECTS EXPERIMENTAUX DE LA STRICTION DES TOLES

1.4.1. Présentation des Courbes Limites de Formage "CLF"

La notion de courbe limite de formage (CLF) a été introduite par Keeler [6] lorsqu'il observa que l'allongement local maximum était insuffisant pour déterminer le niveau de déformation possible pour une tôle. Il constata qu'en reportant sur un même diagramme les valeurs respectives ϵ_1 et ϵ_2 des allongements à rupture dans les deux directions principales des déformations de surface, tous les points (ϵ_1, ϵ_2) se situaient sur la même courbe la CLF. Cette courbe initialement limitée au quadrant $\epsilon_2 > 0$ a été complétée dans le domaine de l'extension ($\epsilon_2 < 0$) par Goodwin [7].

Cette CLF à rupture représente la limite supérieure de déformation d'une tôle. Cette courbe s'est révélée insuffisante car le phénomène de rupture ductile est en général précédé par le phénomène de striction localisée. Celui-ci se traduit par un amincissement local qui est inadmissible tant pour des raisons de résistance mécanique que pour des raisons esthétiques Aussi, la courbe limite à striction a été introduite pour prédire la limite supérieure de formage de la tôle avant l'apparition de l'instabilité.

Sur le diagramme des déformations principales de surface de la tôle. La courbe limite de formage à striction est la frontière qui sépare les états de déformations correspondant au succès et à l'échec d'un embouti. Elle est obtenue en réalisant les différents trajets de déformation susceptibles d'entraîner la striction des pièces à emboutir. Pour des raisons de symétrie, et compte tenu des conditions d'apparition de la

striction, la zone de représentation des limites de formage est comprise entre deux trajets extrêmes : l'expansion équi-biaxiale et la traction uni axiale.

Les CLF sont par définition déterminées pour des trajectoires de déformation rectilignes, c'est-à-dire telles que le rapport ρ des déformations principales ε_1 et ε_2 reste pratiquement constant tout au long de la déformation soit :

$$\varepsilon_2 = \rho \cdot \varepsilon_1$$

Ces courbes sont de plus en plus fréquemment utilisées dans l'industrie pour évaluer les chances de réussite ou d'échec d'un embouti et pour essayer de diagnostiquer les causes d'un échec éventuel. Cependant une des limitations à l'emploi généralisé des CLF est due au fait qu'elles dépendent largement de l'histoire de déformation du matériau caractérisée par la trajectoire de déformation.

De nombreux travaux expérimentaux ont en effet montré que le niveau des limites de formage est très largement influencé par la forme des trajectoires de déformation. Ainsi dans le cas de trajectoires de déformation brisées constituées de deux ou plusieurs segments le long desquels $d\varepsilon_2/d\varepsilon_1 = \text{cte}$, il est maintenant bien connu par exemple qu'une pré déformation par expansion abaisse le niveau des limites de formage tandis qu'une pré déformation par traction en élève le niveau.

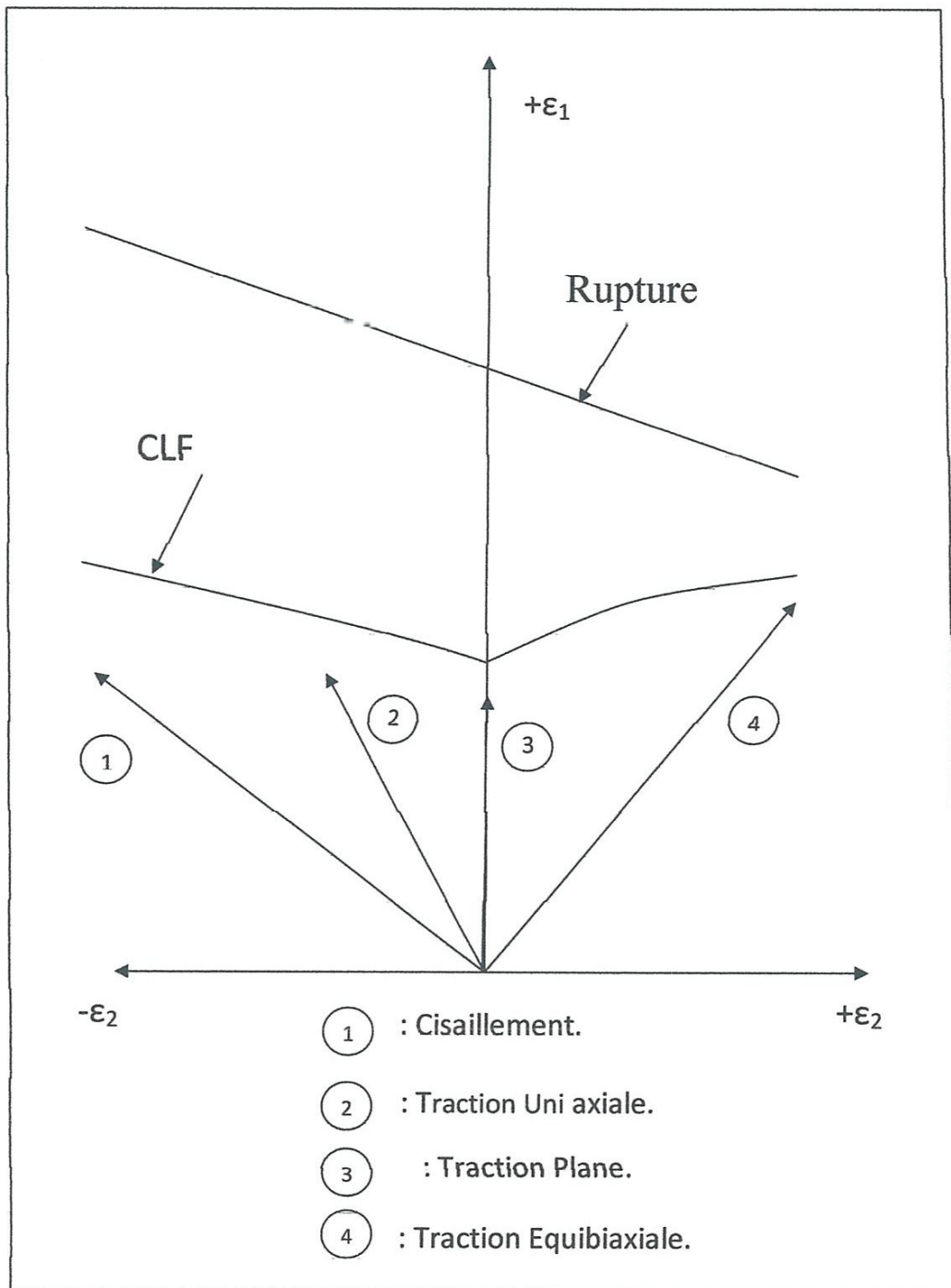


Figure I-8: Diagramme schématique de limite de formage avec différents trajets de déformation réalisables.

Pour la plupart des métaux, les CLF ont la forme présentée sur la Figure I-8, mais la position verticale de la courbe dépend de l'épaisseur de la tôle, de la valeur de l'exposant d'écrouissage et du coefficient de sensibilité à la vitesse de déformation. L'intersection de la courbe avec l'axe vertical, qui correspond à la déformation plane, est aussi le minimum de la courbe. On observe expérimentalement, sur un matériau donné, une augmentation linéaire de la déformation limite en traction plane avec l'épaisseur.

Le diagramme standard est basé sur l'approximation d'un chemin de déformation quasi rectiligne. Les diagrammes générés par une déformation uniaxiale succédant à une déformation biaxiale, ou l'inverse, diffèrent considérablement du diagramme standard. Pour cette raison, les effets des trajets de déformation doivent être pris en compte quand on utilise un diagramme pour analyser un problème de formage.

I.5. Influence des paramètres rhéologiques et d'anisotropie du matériau sur les CLF

I.5.1. Influence de la sensibilité à la vitesse de déformation

Une sensibilité à la vitesse de déformation peut être introduite en définissant la contrainte équivalente sous la forme suivante :

$$\sigma = K (\varepsilon + \varepsilon_0)^n \dot{\varepsilon}^m$$

Où σ est la contrainte équivalente, ε est la déformation équivalente, ε_0 est la déformation initiale équivalente, n est l'exposant d'écrouissage et m le coefficient de sensibilité à la vitesse.

I.5.2. Effet de température

L'influence de l'échauffement engendré par les déformations plastiques peut être importante aux grandes vitesses de déformation. Il est connu que la plus grande partie de l'énergie de déformation plastique est dissipée sous forme d'énergie thermique (environ 90 %). Si la déformation est rapide ou si le matériau est faiblement conducteur, une augmentation locale de la température peut conduire à une localisation thermoplastique. Quand la température augmente, la limite d'écoulement diminue (matériau thermo-

adoucissant). Par suite la déformation plastique va être favorisée par le défaut et le couplage thermomécanique accélère la localisation.

I.5.3. Influence du coefficient d'anisotropie

Graf et Hosford ont étudié l'influence du coefficient d'anisotropie sur les déformations limites en expansion en utilisant le critère quadratique de Hill. Ils se limitent au cas particulier d'une tôle présentant une anisotropie normale au plan de la tôle. L'exemple est pris avec une valeur du défaut égale à 0,98 et un coefficient d'écrouissage de 0,2 [10].

I.5.4. Influence de l'exposant d'écrouissage

Graf et Hosford ont trouvé qu'une augmentation du coefficient d'écrouissage élève le niveau de la déformation limites, de façon comparable au coefficient de sensibilité à la vitesse de déformation [10].

I.6. PROBLEMATIQUE

L'aptitude à l'emboutissage des tôles minces peut-être évaluée au moyen d'essai simulatifs tel que Jovignot, Swift, Nakazima, traction, ou Marciniak par exemple. Ces essais présentent l'inconvénient outre qu'ils font intervenir des facteurs difficilement contrôlable, de se traduire par des indices dont les variations ne permettent que difficilement de distinguer les qualités des tôles pourtant différentes.

On tend depuis quelques années à leur adjoindre deux nouvelles caractéristiques : le coefficient d'anisotropie et le coefficient d'écrouissage. Le premier est fortement lié à l'aptitude du *retreint* d'une tôle, le second à la *capacité de déformation en expansion*. Ces deux caractéristiques mécaniques qui font l'objet de garanties dans les normes de produit ou qui attestent la conformité d'une fabrication sont déterminées suivant des processus normalisés : tel que les essais de traction.

Les résultats qu'ils fournissent ne sont pas des indications absolues, mais constituent une échelle de valeurs comparatives étroitement liées aux conditions d'exécution des essais [12].

Dans ce cadre général nous nous proposons le contrôle de l'aptitude de formabilité de la tôle par essai de traction se basant sur la mesure des coefficients

d'écrouissage « n » et d'anisotropie « r », et juger de degré de sévérité d'un embouti en se référant à la courbe limite de formage.

1.6.1. Définitions

➤ Coefficient d'écrouissage « n »

Il caractérise la ductilité du matériau, c'est à dire son aptitude à se déformer, ainsi que son aptitude à répartir la déformation.

n est calculé à partir de la courbe de traction rationnelle $\sigma = f(\epsilon_1)$ et respecte la loi D'HOLLOMON : $\sigma = f(\epsilon^n)$

Plus **n** est élevé, plus l'acier peut se déformer.

➤ Coefficient d'anisotropie « r »

L'allongement de l'éprouvette sous traction s'accompagne d'une réduction de la largeur et de l'épaisseur. **r** est le rapport entre la variation de largeur et l'amincissement.

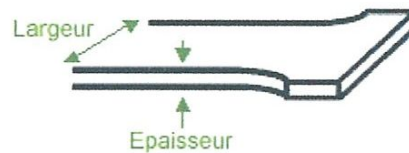


Figure I-9 : Géométrie de l'éprouvette.

La valeur de **r** varie en fonction de l'orientation de l'éprouvette prélevée. Le coefficient d'anisotropie normale « **r** » est calculé par la relation :

$$r = \frac{r_0 + 2r_{45} + r_{90}}{4}$$

Le coefficient d'anisotropie plane Δr est calculé par la relation :

$$\Delta r = \frac{r_0 + r_{90} - 2r_{45}}{2}$$

Plus la valeur de « **r** » est élevée, moins il y a amincissement à l'emboutissage [8].

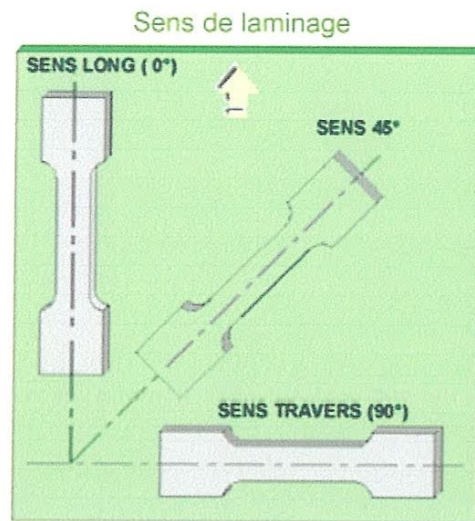



Figure I-10 : Schéma de mesure de « r »

1.6.2. Objectifs de notre étude

Ces deux coefficients présentent l'intérêt d'être mesurables au cours d'un simple essai de traction et par conséquent de refléter, plus directement que les essais simulatifs, les caractéristiques intrinsèques du métal.

Pour obtenir des résultats reproductibles dans un laps de temps raisonnable, il est nécessaire d'établir un mode opératoire très strict et que le dépouillement des résultats soit relativement rapide, et permettre, un choix motivé de la qualité de la tôle par comparaison aux C.L.F.

- Par la mise en œuvre de nos essais nous déterminons sur une tôle donnée:
 - contrôler les caractéristiques mécaniques conventionnelles :
 - limite élastique,
 - résistance à la rupture,
 - allongement total,



**ETUDE
EXPERIMENTALE**

CHAPITRE II

TRAVAUX REALISES

Du point de vue matériel dont nous disposons, et par suite de sa mise en œuvre nous pouvons sur une tôle donnée :

1- contrôler les caractéristiques mécaniques conventionnelles :

- Résistance à la rupture,
- limite d'élasticité,
- allongement A%,

2- contrôler ses qualités de formabilité :

- par essai simulatif de traction,
- par la mesure des coefficients d'écrouissage « n » et d'anisotropie « r ».

3- exploiter la méthode des grilles (réseaux de carrés) qui peut permettre de :

- juger du degré de sévérité d'un embouti en se référant à la courbe limite de formage,
- permettre si besoin un choix motivé de la qualité de la tôle, à condition de connaître les courbes limites de formage, et les coefficients d'écrouissage « n » et d'anisotropie « r ».

II. NUANCE ET CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX UTILISEES.

II. 1 NUANCE DES TOLES ETUDIEES.

Une gamme de **03** matériaux a été sélectionnée pour l'étude expérimentale : des tôles en aciers, des tôles en aluminium, et des tôles en bronze.

Les matériaux testés au laboratoire de R.D.M. du département de Génie Mécanique de l'Université 08 Mai 45 de Guelma ont la dénomination suivante :

- 1- Acier non allié : C 41**
- 2- Bronze : CuSn12**
- 3- Aluminium : AlCuMg**

II.2 DETERMINATION DES CARACTERISTIQUES MECANIQUES

II.2.1 Description de l'appareillage utilisé

II.2.1.1 Machine utilisée

Pour pouvoir faire les expériences, on a utilisé la machine HOYTON-S-L. C'est une machine d'essai universelle pour traction et compression ayant une capacité de charge de 100 KN. Elle est assistée par ordinateur, ce dernier est menu d'un logiciel appelé HOYWIN. Ce logiciel est installé pour piloter la machine numériquement, ainsi qu'il nous donne directement toutes les informations concernant l'essai en question à savoir : l'identification de l'essai, les paramètres de l'éprouvette, et les résultats de l'essai (charge maxi, résistance à la rupture, charge à la limite d'élasticité conventionnelle, A%) et le tracé du diagramme de traction.



Figure II. 1 : *Machine d'essai universelle assistée par ordinateur.*

II.2.1.2 Tôle

La figure présente une éprouvette classique de traction sur laquelle sont portées les dimensions de sa partie active et la base de mesure des grilles.

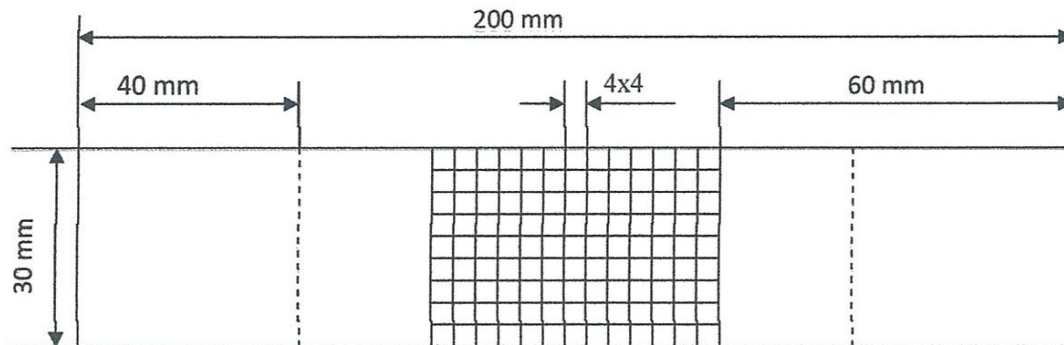


Figure II. 2 : *Eprouvette classique de traction.*

II.2.1.3 Procédé expérimental

Pour déterminer expérimentalement les caractéristiques mécaniques des différents matériaux, on a réalisé des essais de traction pour chacune des nuances dans le sens du laminage sur la machine d'essai universelle pour traction et compression modèle HOYTON-S-L.

Les dimensions des éprouvettes sont : 200x30x1. La mise en place de l'éprouvette dans les mors à serrage automatique, est facilitée par un tracé préalable de traits distants de 40mm de l'extrémité de l'éprouvette.

Les résultats de ces essais sont donnés par les graphiques suivants :

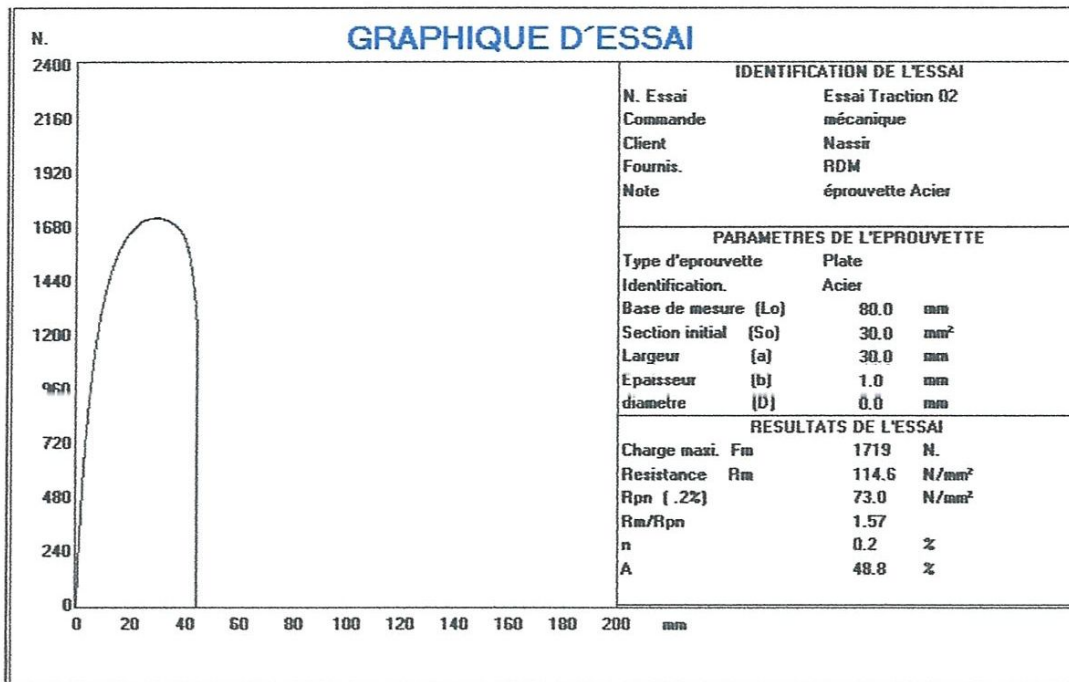


Figure II. 3 : Diagramme de traction (Acier).

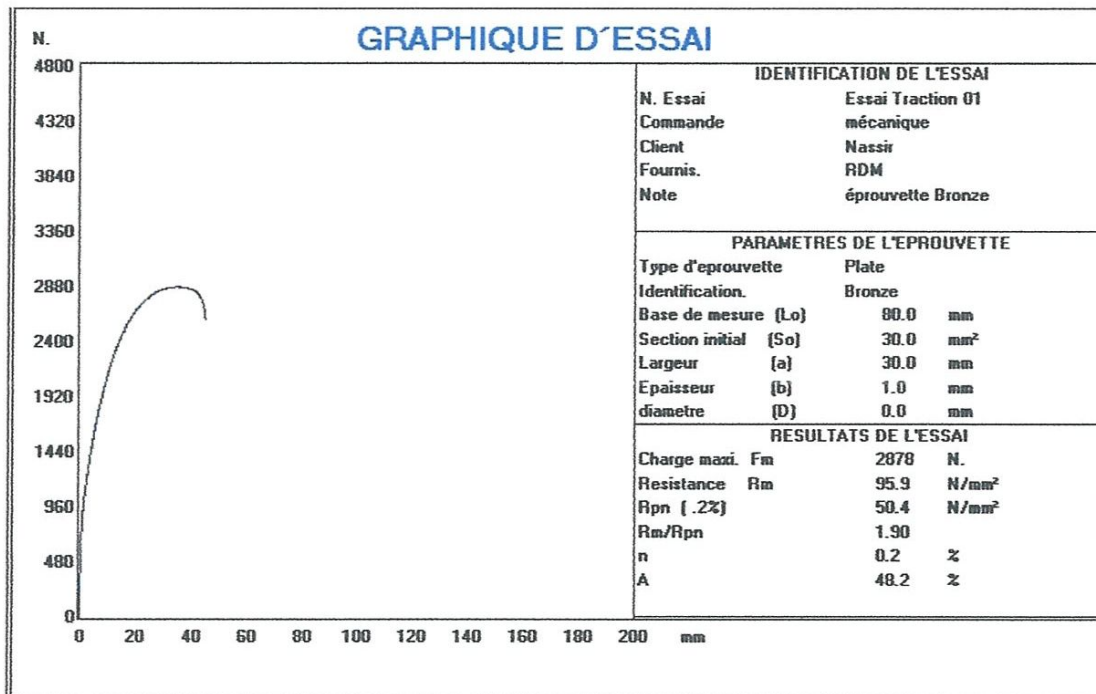


Figure II. 4 : Diagramme de traction (Bronze).

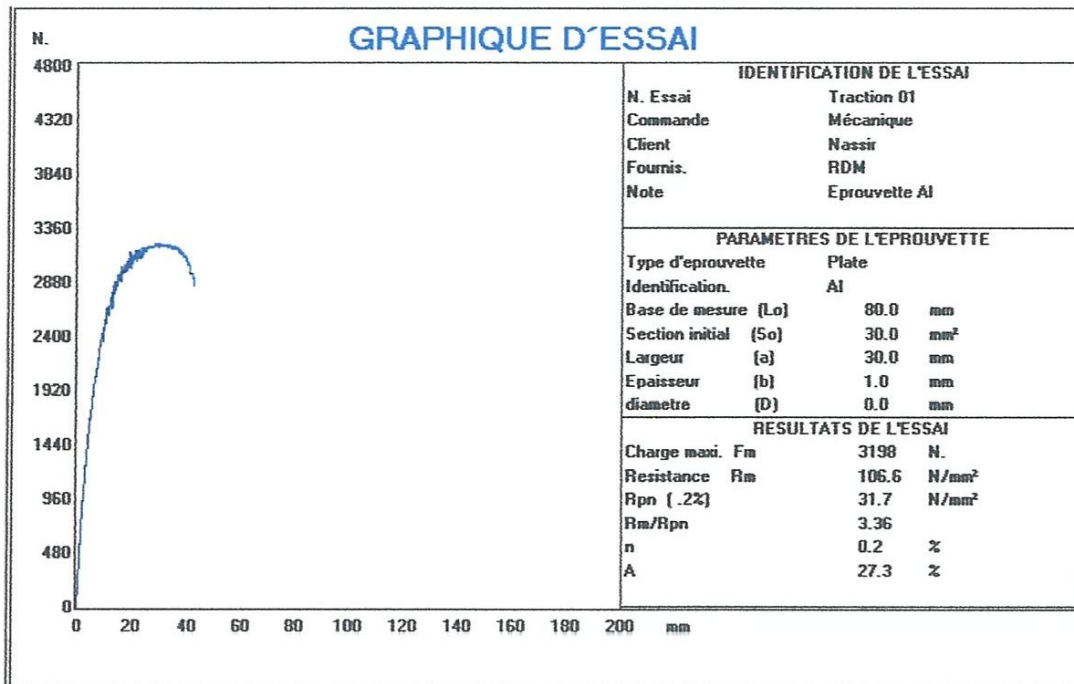


Figure II. 5 : Diagramme de traction (Aluminium).

II. 3 DETERMINATION DES COEFFICIENTS D'ECROUISSAGE « n » ET D'ANISOTROPIE « r ».

L'aptitude à l'emboutissage des tôles minces peut être évaluée au moyen d'essais simulatifs tels que Jovignot, Swift ou Nakazima par exemple. Ces essais Présentent l'inconvénient, outre qu'ils font intervenir des facteurs difficilement contrôlables (états de surfaces, lubrification, vitesse des essais...) de se traduire par des indices dont les variations ne permettent que difficilement de distinguer les qualités de tôles pourtant différentes. On tend depuis quelques années à leur adjoindre deux nouvelles caractéristiques : le coefficient d'anisotropie « r » et le coefficient d'écrouissage « n ». Le premier est fortement lié à l'aptitude au rétreint d'une tôle, le second à la capacité de déformation en expansion.

Ces coefficients présentent l'intérêt d'être mesurables au cours d'un simple essai de traction et par conséquent de refléter, plus directement que les essais simulatifs, les caractéristiques intrinsèques du métal.

Il est apparu à l'expérience que, pour obtenir des résultats reproductibles dans un laps de temps raisonnable, il était nécessaire d'établir un mode opératoire très strict et que le dépouillement des résultats exigeait un temps relativement long. Afin d'assurer une mesure précise, fidèle et rapide de ces coefficients, nous avons donc étudié et réalisé une instrumentation adaptée à leur détermination.

II. 4 Coefficient d'érouissage « n ».

L'expression analytique du coefficient d'érouissage :

$$\sigma_1 = k \varepsilon_1^n$$

K = constante.

σ = contrainte de traction.

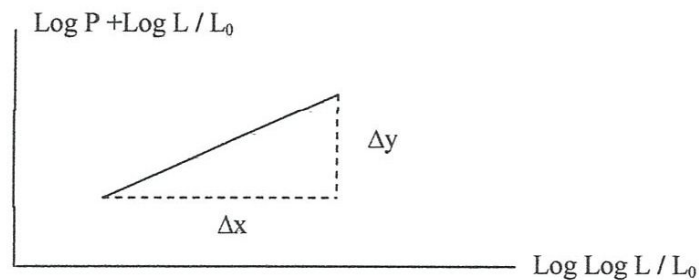
ε = déformation unitaire correspondante = $\text{Log } L / L_0$

$$\sigma = \frac{p}{S} = \frac{PL}{S_0 L_0} \quad \text{et} \quad \varepsilon = \text{Log} \frac{L}{L_0}$$

$$\text{Log } P + \text{Log } L / L_0 = \text{Log } K + \text{Log } S_0 + n \text{Log } \text{Log } L / L_0.$$

$$n = \frac{\Delta(\text{Log } P + \text{Log} \frac{L}{L_0})}{\Delta(\text{Log } \text{Log} \frac{L}{L_0})}$$

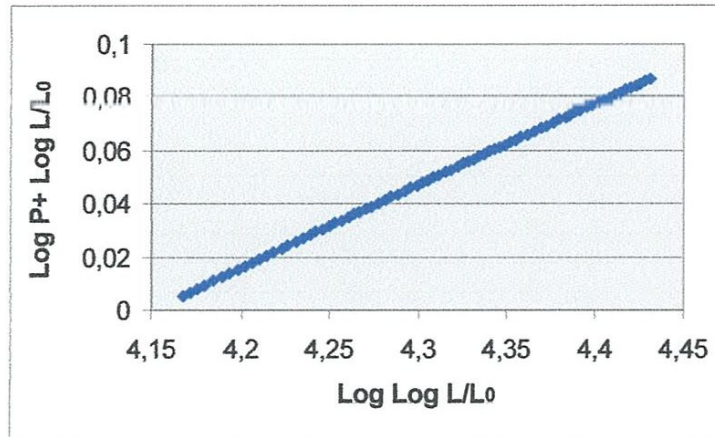
$n = \frac{\Delta y}{\Delta x}$ Pente de la droite sur graphe : $\text{Log } P + \text{Log } L / L_0 = f(\text{Log } \text{Log } L / L_0)$



❖ RESULTATS

Lors de l'essai de traction, les résultats sont enregistrés sur un fichier Excel. Ce qui nous permis de tracer après calcul, les graphes : $\text{Log } P + \text{Log } L / L_0$ en fonction de : $(\text{Log } L / L_0)$.

➤ Epreuve en Acier



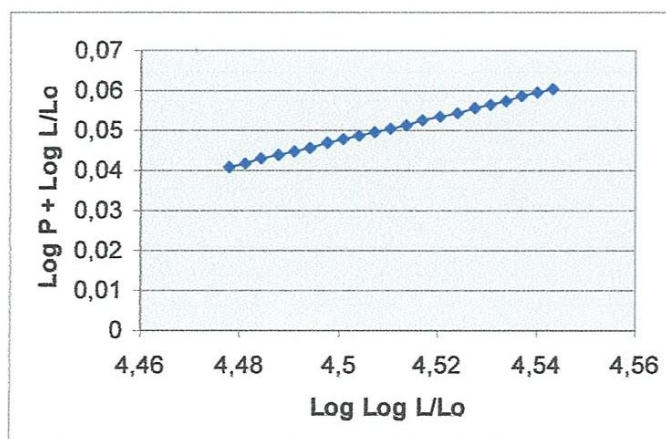
Coefficient d'écrouissage n pour l'acier.

$$\Delta x = 4,3283 - 4,222 = 0,106$$

$$\Delta y = 0,055 - 0,0231 = 0,031$$

$$n = \Delta y / \Delta x = 0,031 / 0,106 = 0,29$$

➤ Epreuve en Bronze



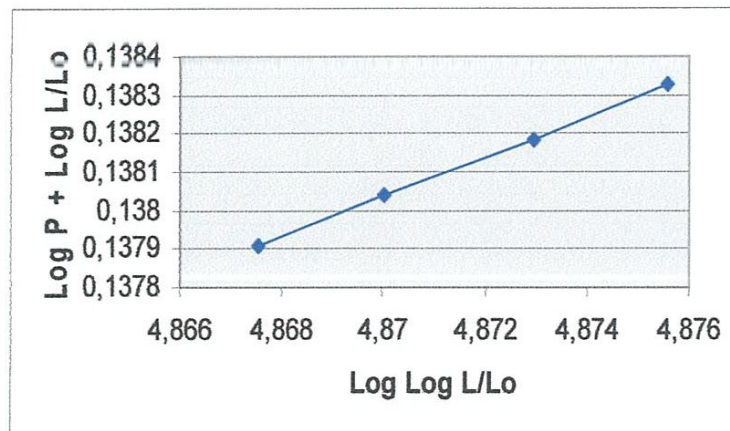
Coefficient d'érouissage n pour le bronze.

$$\Delta x = 4,46 - 4,42 = 0,04$$

$$\Delta y = 0,036 - 0,025 = 0,011$$

$$n = \Delta y / \Delta x = 0,011 / 0,04 = 0,27$$

➤ Eprouvette en Aluminium



Coefficient d'érouissage n pour l'aluminium.

$$\Delta x = 4,446 - 4,441 = 0,005$$

$$\Delta y = 0,010 - 0,009 = 0,001$$

$$n = \Delta y / \Delta x = 0,001 / 0,005 = 0,2$$

II. 5 Mesure des déformations par jauges d'extensomètre.

II. 5. 1 Description du matériel utilisé :

- Jauges électriques de déformation. (rosette tri- directionnelle).
- Produit de nettoyage :
 - coton, coton—tige.
 - catalyseur (trichloréthylène).
 - Neutra liseur (Fréon—TF).

II. 5. 4 Principe de fonctionnement des jauges:

Lorsque l'on désire connaître l'allongement d'une structure suivant une direction donnée, on colle la jauge, fils parallèles à cette direction. La mesure des variations de la résistance est liée à l'allongement relatif à la déformation longitudinale. Une jauge peut servir très longtemps ou elle a été collée.

La connaissance des déformations sert à calculer les contraintes lorsqu'on connaît les lois qui lient ces grandeurs. Généralement on utilise les relations linéaires dans le domaine élastique proportionnel.

La théorie la plus communément admise est celle qui considère que le fil subit les mêmes déformations que s'il était tendu par ses extrémités.

Sachant que la résistance d'un fil de longueur ' l ', de section ' s ' et de résistivité ' ρ ',

$$\text{est : } R = \rho \cdot l / s$$

Si le fil subit une traction, les grandeurs l et s varient, ce qui introduit une variation de résistance du fil. Connaissant la loi de variation $\Delta R/R$ en fonction de $\Delta l / l$, on peut alors traduire toute variation de longueur du fil en une variation de résistance à l'aide d'un pont d'extensomètre.

Pour mesurer les déformations d'une structure, il suffit alors de relier les déformations du fil aux déformations de la structure (par collage des jauges).

Nous rencontrerons alors les problèmes suivants :

- Détermination de la relation entre $\Delta R/R$ et $\Delta l / l$.
- Choix des jauges en fonction de leur emploi.
- Choix du pont de mesure.

Pour déterminer le coefficient d'anisotropie normal, il suffit de coller une rosette tri- directionnelle, sur l'éprouvette.

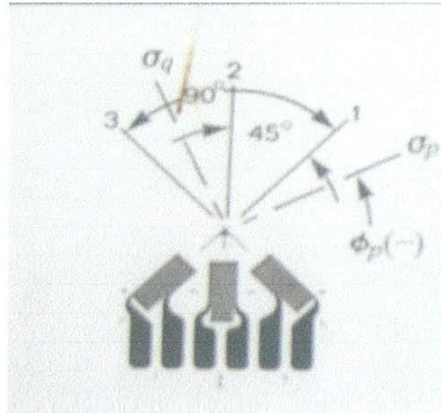


Figure II. 9 : rosette tri-directionnelle.

II. 5.5 Extensomètre.

II. 5.5.1 Principe de fonctionnement du pont.

Le pont d'extensomètre est en fait un pont de WEASTONE à haute sensibilité. En effet 04 résistances R_1 , R_2 , R_3 et R_4 sont montées en pont, une des branches est soumise a une tension U et la tension E dans l'autre branche est mesurée par un galvanomètre de résistance G .

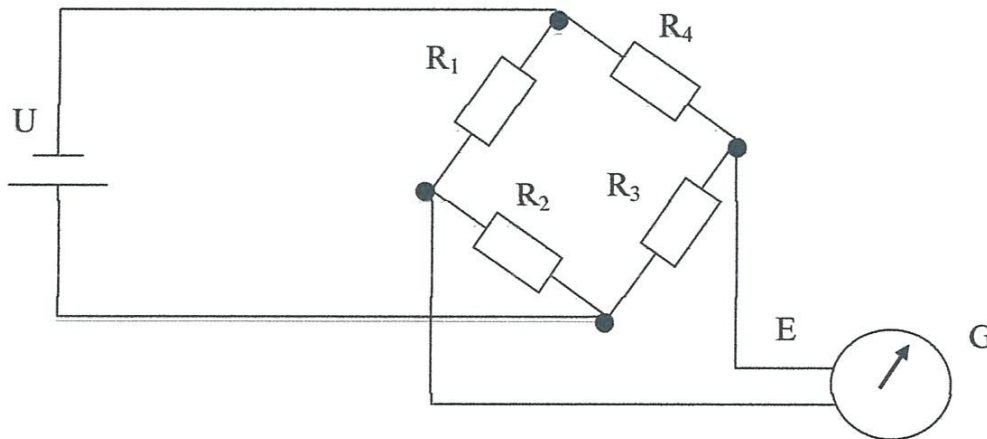


Figure II. 10 : Pont de WEASTONE.

Lorsque le pont est équilibré, aucun courant ne traverse le galvanomètre et $R_1.R_2=R_3.R_4$.

Si une ou plusieurs des résistances se trouvent modifiées, on agit sur R4 de manière à rétablir l'équilibre du pont.

II. 5. 5. 2 Mode opératoire

- Une fois la tôle est prête, on relie les fils à l'amplificateur (montage quart de pont).
- Encasturer la poutre à l'aide de la vis de serrage du dispositif.
- Régler la distance du centre de la jauge au point d'application de la charge sur la poutre à l'autre extrémité à 125mm.
- Pousser la touche ZERO AMP. Régler le potentiomètre ZERO AMP pour obtenir ± 0000 sur l'indicateur.
- Pousser la touche FACTEUR DE JAUGE. A l'aide des réglages FACLEUR DE JAUGE mettre la valeur correspondant à la rosette montée : 120 ± 0.5 . - Bloquer le bouton FACTEUR DE JAUGE.
- Pousser la touche MESURE - Régler l'ÉQUILIBRAGE pour lire ± 0000 sur le galvanomètre. Bloquer le potentiomètre ÉQUILIBRAGE.
- Mettre en charge la rosette. La lecture se fait en microdéformations ($\mu\text{m}/\text{m}$).

II. 5. 5. 3 Coefficient d'anisotropie « r ».

Soit une éprouvette classique de traction, (figure II.2) sur laquelle on peut porté les notations des trois dimensions de sa partie active : b_0, b, L_0, L, e_0, e .

Dans une direction donnée, le coefficient d'anisotropie est défini par la relation :

$$r = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_3} \quad \text{Avec : } \varepsilon = \int_{L_0}^L \frac{dL}{L} = \text{Log} \frac{L}{L_0}$$

$$\text{Tout calcul fait donne : } r = \frac{\text{Log} \frac{b_0}{b}}{\text{Log} \frac{e_0}{e}}$$

En tenant compte de l'hypothèse du volume constant : $L_0 \cdot b_0 \cdot e_0 = L \cdot b \cdot e$, le coefficient d'anisotropie se ramène finalement à l'expression suivante :

$$r = \frac{\text{Log} \frac{b_0}{b}}{\text{Log} \frac{b \cdot L}{b_0 \cdot L_0}}$$

Le coefficient d'anisotropie normal est donné par la relation suivante.

$$r_n = \frac{1}{4}(r_{0^\circ} + r_{90^\circ} + 2r_{45^\circ})$$

❖ RESULTATS

➤ Eprouvette en Acier

Charge (N)	0,5	1	1,5	2	2,5	angle
ε_1	249	467	677	924	1304	0
ε_2	83	126	176	213	401	45
ε_3	86	167	246	344	512	90

$$r_0 = \varepsilon_1 / \varepsilon_3 = 0.96 + 0.75 + 0.71 + 0.61 + 0.78 = 3.81/5 = 0.76$$

$$r_{90} = \varepsilon_1 / \varepsilon_2 = 0.33 + 0.26 + 0.25 + 0.61 + 0.3 = 1.75/5 = 0.35$$

$$r_{45} = \varepsilon_2 / \varepsilon_3 = 2.89 + 2.79 + 2.75 + 2.68 + 2.54 = 13.56/5 = 2.71$$

Le coefficient d'anisotropie normal est donné par la relation suivante.

$$r_n = \frac{1}{4}(r_{0^\circ} + r_{90^\circ} + 2r_{45^\circ})$$

Alors :

$$r_n = 1/4 (0.76 + 0.35 + 2(2.71))$$

$$r_n = 1.63$$

➤ **Eprouvette en Bronze**

Charge (N)	0,5	1	1,5	2	2,5	angle
ε_1	94	182	273	371	467	0
ε_2	39	71	110	151	193	45
ε_3	34	66	99	133	166	90

$$r_0 = \varepsilon_1 / \varepsilon_3 = 1.14 + 1.07 + 1.11 + 1.13 + 1.16 = 5.61 / 5 = 1.12$$

$$r_{90} = \varepsilon_1 / \varepsilon_2 = 0.41 + 0.39 + 0.4 + 0.4 + 0.41 = 2.01 / 5 = 0.4$$

$$r_{45} = \varepsilon_2 / \varepsilon_3 = 2.76 + 2.75 + 2.75 + 2.78 + 2.81 = 13.85 / 5 = 2.77$$

$$r_n = 1/4 (r_0 + r_{90} + 2 r_{45})$$

Alors : $r_n = 1/4 (1.12 + 0.4 + 2(2.77))$

$$r_n = 1.06$$

➤ **Eprouvette en Aluminium**

Charge (N)	0,5	1	2	2,5	angle
ε_1	194	375	716	876	0
ε_2	51	94	178	212	45
ε_3	84	161	298	365	90

$$r_0 = \varepsilon_1 / \varepsilon_3 = 0.6 + 0.58 + 0.59 + 0.58 = 0.58$$

$$r_{90} = \varepsilon_1 / \varepsilon_2 = 0.26 + 0.25 + 0.24 + 0.24 = 0.25$$

$$r_{45} = \varepsilon_3 / \varepsilon_2 = 0.43 + 0.42 + 0.41 + 0.41 = 0.41$$

$$r_n = 1/4 (r_0 + r_{90} + 2 r_{45})$$

Alors : $r_n = 1/4 (0.58 + 0.25 + 2(0.41))$

$$r_n = 0.48$$

Le tableau suivant résume les résultats des coefficients d'écroutissage « n » et d'anisotropie « r » pour différents matériaux.

Matériaux Coefficients	Acier	Bronze	Aluminium
« r »	1.63	1.06	0.48
« n »	0,29	0,27	0,2

II. 6 Etablissement des courbes limites de formage

La notion des courbes limites de rupture est due à Keeler et Gouwin [6, 7]. Pour un métal donné, cette courbe reflète l'existence de sa limite de formabilité qui se traduit naturellement par l'apparition d'une amorce de rupture. On la trace expérimentalement à partir du relevé des déformations dans la zone de rupture. Pour l'obtenir, il faut donc :

- Imposer au métal tous les modes de déformation compris entre le rétreint pur et l'expansion pure, qui représentent les deux limites extrêmes rencontrées dans la pratique de l'emboutissage.
- Mesurer avec une précision suffisante les déformations subies par la tôle au niveau de l'amorce de rupture.

II. 7 Courbe limite à la rupture

Un outil d'expansion simple monté sur la presse hydraulique de 1000 KN, permet à partir d'une série de flans d'obtenir tous les modes de déformations utiles au tracé de la courbe. Chaque flan est auparavant marqué par une grille qui permettra la mesure des déformations subies par la tôle en tout point et en particulier au niveau de l'amorce de rupture. Sur les éléments de base de la grille qui peuvent être des cercles ou des carrés, on mesure les déformations dites principales, qui se trouvent portées par deux directions perpendiculaires (Figure II.11).

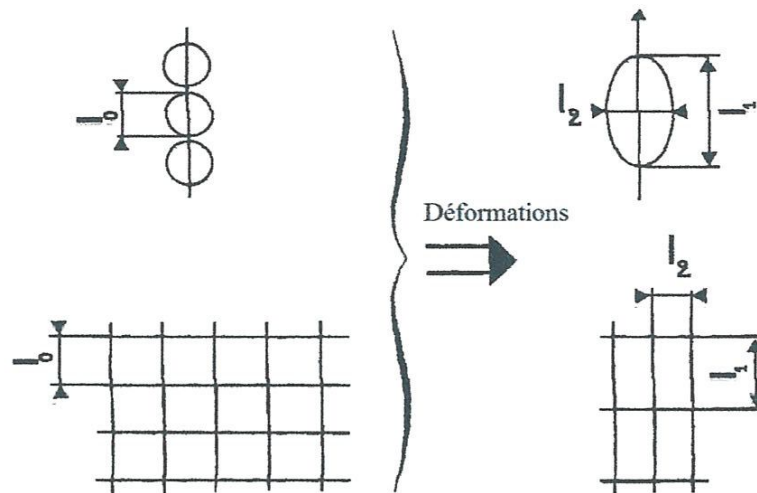


Figure II. 11 : Modes de déformation des grilles.

Pour traduire les déformations deux notations peuvent être utilisées :

- Notation arithmétique :

$$\varepsilon_1 = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \quad \varepsilon_2 = \frac{l_2 - l_0}{l_0} \quad \text{Avec } \varepsilon_1 > \varepsilon_2$$

- Notation rationnelle :

$$\varepsilon_1 = \log \frac{l_1}{l_0} \quad \varepsilon_2 = \log \frac{l_2}{l_0} \quad \text{Avec } \varepsilon_1 > \varepsilon_2$$

La notion rationnelle permet de déduire facilement la déformation en épaisseur ε_3 , quand on connaît ε_1 et ε_2 à partir de la relation :

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

De chaque essai d'emboutissage on déduit un couple de valeurs ultimes $(\varepsilon_1, \varepsilon_2)$ représentatif d'un point de rupture. En balayant tous les modes de déformations entre le rétreint et l'expansion on doit obtenir une courbe $\varepsilon_1 = f(\varepsilon_2)$.

II. 8. 2 Avantages et inconvénients du type de réseau

Type de grille	Avantages	Inconvénients
Cercles	<ul style="list-style-type: none"> • Peuvent être facilement entrelacés • Indication claire des directions principales (mais pas du cisaillement) • Appréciation aisée « à l'œil » des déformations principales • Caractère didactique utile (un cercle devient une ellipse) 	<ul style="list-style-type: none"> • Mesure optique très longue et pénible • Mesure automatique possible mais plus difficile
Carres	<ul style="list-style-type: none"> • Mesure automatique facile • Base de mesure aisément modulable (en groupant plusieurs carrés) • Prend mieux en compte les changements de trajectoire • Détection plus facile du cisaillement • Algorithmes de calcul plus efficaces • Meilleure précision 	<ul style="list-style-type: none"> • Directions principales moins évidentes à l'œil • Calculs « à la main » plus complexes
Mouchetis	<ul style="list-style-type: none"> • Base de mesure non figée (peut se définir durant la mesure). • Possibilité d'avoir une base très petite (dizaine de micromètres) • Très grande précision 	<ul style="list-style-type: none"> • Pas de possibilité de visualiser les déformations ou leur direction • Temps de calcul encore long dans certains cas • Nécessité d'une capacité mémoire importante

II. 9 Technique utilisée pour la détermination expérimentale des courbes limites de formage (C. L. F.)

La détermination expérimentale des C. L. F. représente encore un travail assez conséquent et ceci malgré les nombreuses tentatives d'automatisation à la fois de la mesure des déformations de surface et de la manipulation. L'obtention expérimentale des déformations limites composant les C. L. F. peut être résumée par les principales opérations suivantes :

- la pose de réseaux géométriques (réseaux des grilles) sur la tôle,
- la détermination des points de rupture et la mesure des déformations.

Remarque :

L'extensométrie optique bidimensionnelle a d'abord été développée par l'utilisation de marqueurs de formes géométriques particulières et de répartition régulière [14, 15]. Par exemple, durant l'opération d'emboutissage, un réseau de formes géométriques particulières se déforme de la même façon que le matériau. L'obtention du champ de déformation peut alors se faire en mesurant le réseau déformé et en le comparant à la taille du réseau initial non déformé.

II. 10 Présentation du matériel utilisée

II. 10.1 Machine utilisée :

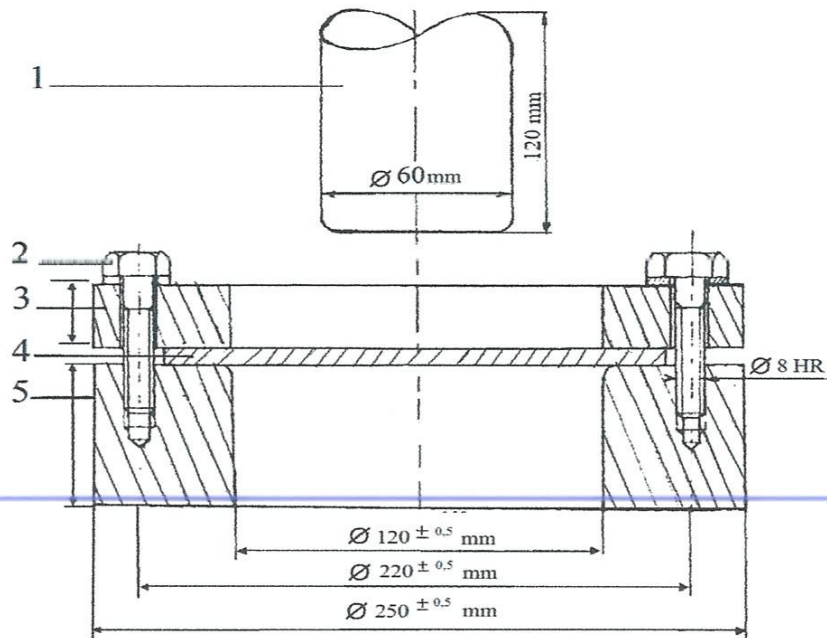
La machine utilisée pour faire nos essais d'emboutissage est la machine HOYTON-S-L pilotée par micro-ordinateur (voir description au paragraphe II.2.1.1). Pour les essais d'emboutissage, la cellule de charge est placée sous la traverse mobile afin que l'on puisse travailler en compression.

II. 10.2 Module d'emboutissage utilisé:

Un montage à poinçon fixe et à matrice mobile est réalisé. La matrice et le serre flan sont mobiles, ils sont reliés au mors (mobile) de la presse. La tôle à emboutir est placée entre la matrice et le serre flan qui sont solidarisés par huit vis H.

Au cours du mouvement de descente, la tôle vient s'emboutir sur le poinçon qui est fixe. Les efforts sont essentiellement axiaux. En effet, les efforts radiaux et transversaux

ainsi que les moments sont négligeables. Donc, seuls les efforts axiaux pour tous les calculs de dimensionnement de la structure sont pris en compte.



(1- Poinçon, 2- Vis (08), 3- Serre flan, 4- Flan (la Tôle), 5- Matrice).

Figure II. 13 : Module d'emboutissage.

II. 10. 3 Préparation des tôles

Pour le marquage des réseaux de grilles, on a utilisé le marqueur permanent. La base de mesure est 4x4mm.

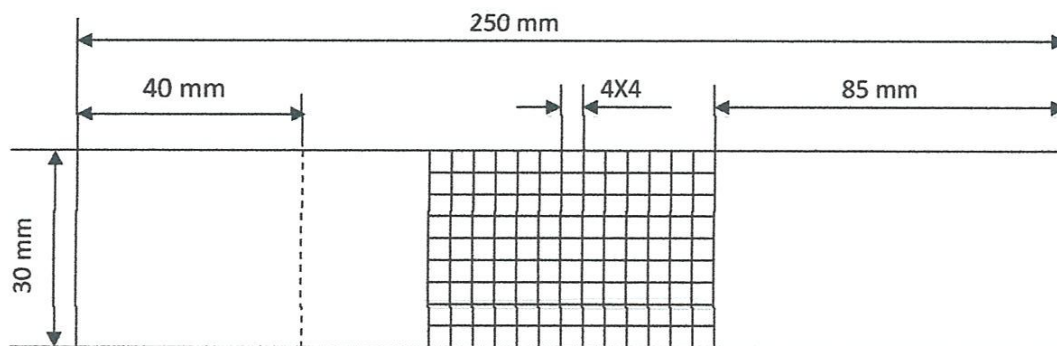


Figure II. 14 : Eprouvette d'emboutissage.

II.10.4 Manipulation:

Les différentes étapes de cette manipulation sont :

- a) Mise en place du dispositif sur la machine (HOYTON-S-L).
- b) Fixation de l'éprouvette entre la matrice et le serre flan, tout en tenant compte du centrage de l'éprouvette.
- c) Réglage de l'échelle initiale de la machine et la vitesse de l'opération d'emboutissage (On a choisit une vitesse de 0.35mm/min).
- d) Lancer l'opération jusqu'à la rupture de l'éprouvette.

II. 10. 5 Mesure des déformations :

- Pour obtenir le tracé des C. L. F. le choix des emboutis doit être fait de façon très rigoureuse : La rupture doit passer à l'intérieur d'une base de mesure dont la longueur initiale 4x4mm.
- Après l'essai, les emboutis sont photographiés avec une caméra numérique Canon 8 Méga pixels. Les prises de vues se font avec une distance focale de 300mm.
- A partir de l'image initiale et de l'image finale, on peut connaître le champ de déformations suivant les directions principales. (Détermination des points de rupture)
- Les images sont enregistrées sur un P. C.
- Mesure des déplacements par la technique de pixel ruler, et conversion des pixels aux mm.
- Enregistrement des résultats sur Excel, et tracé des courbes.

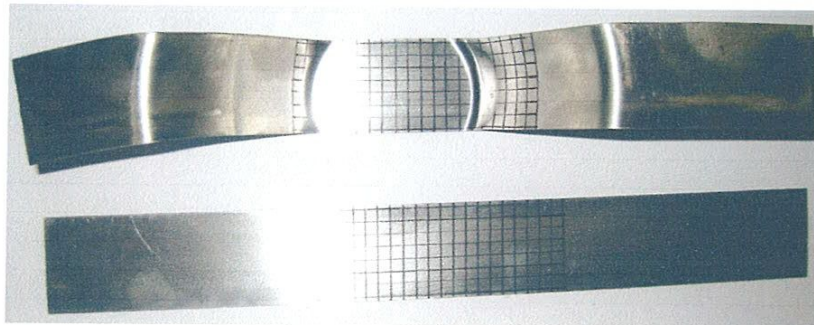


Figure II. 15 Eprouvette avant et après l'essai.

CHAPITRE III

ANALYSE DES RESULTATS

Dans cette étude expérimentale nous avons comme objectif d'obtenir les courbes ou quelques points des courbes limites de formage (CLF) pour un acier, un alliage d'aluminium, et un alliage de cuivre et traduire l'influence des coefficients d'écroutissage et d'anisotropie sur l'aptitude d'emboutissage des tôles minces.

La manipulation pour l'obtention des CLF est assez délicate à mettre en œuvre, si l'on prend en compte tous les paramètres entrant dans les résultats finaux. En effet la qualité de découpe du flan, la qualité du serrage, mais aussi et surtout la bonne localisation de la contrainte au centre du flan, qui donne naissance à la rupture à l'intérieur des réseaux de grilles.

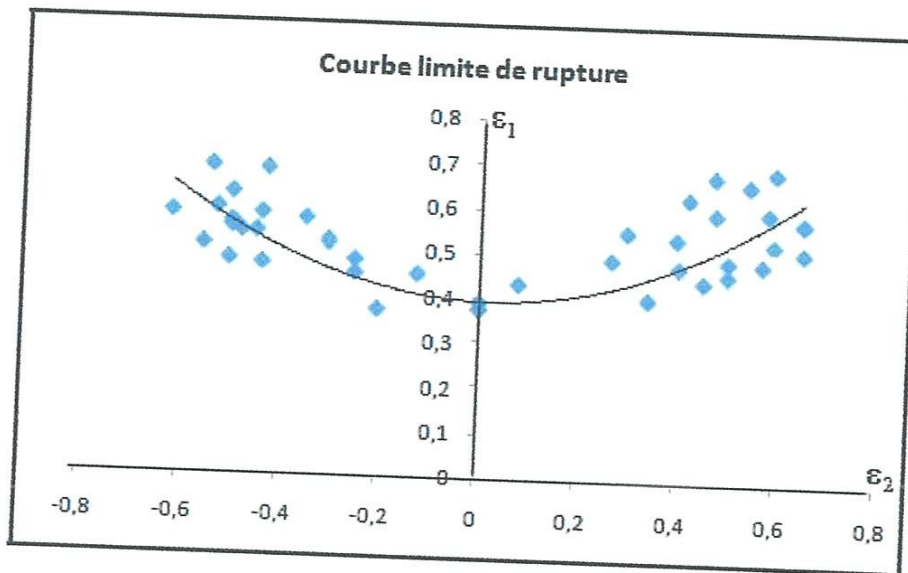


Figure III. 1 : Courbe limite de formage expérimental d'une tôle en acier.

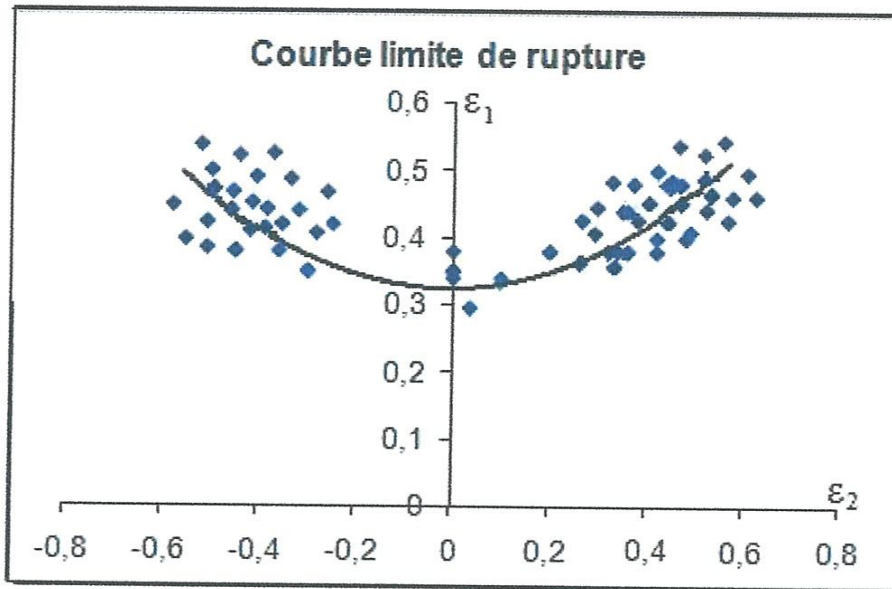


Figure III. 2 : *Courbe limite de formage expérimental d'une tôle en bronze.*

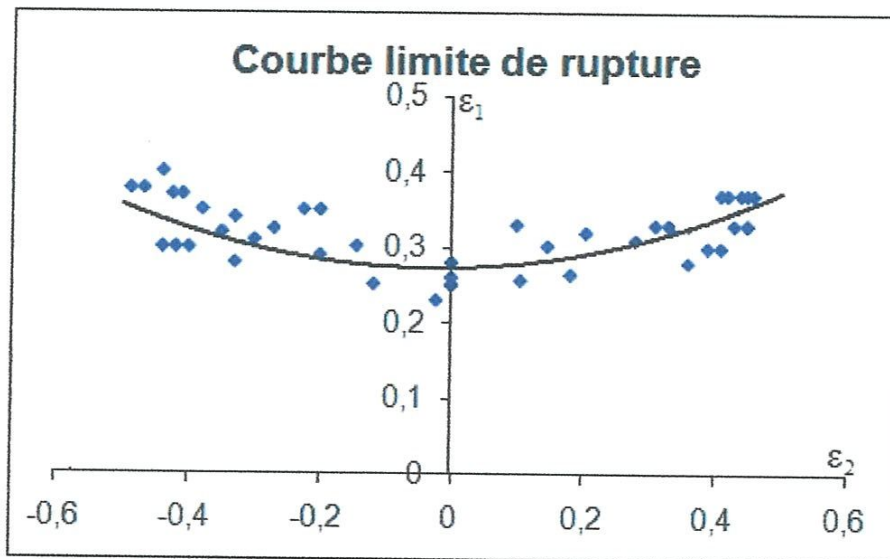


Figure III. 3: *Courbe limite de formage expérimental d'une tôle en aluminium.*

Analyse

En réalité les imprécisions de mesure ne permettent pas le tracé d'une courbe mais d'une zone plus ou moins étroite (figure 1, 2, 3). Les progrès réalisés dans le domaine de l'impression des grilles permettent actuellement de l'affiner.

Pour obtenir le tracé d'une telle courbe, il est indispensable :

- d'améliorer la qualité du marquage du réseau, en utilisant d'autre procédé de marquage, tel que : méthode électrolytique ; méthode photochimique ; procédé de décalcomanie ; emploi du laser...),
- d'utiliser un grand nombre de flan,
- l'orientation de la rupture par rapport au sens de laminage doit être constante,
- la rupture ne doit pas naître sur les bords de la tôle,
- la rupture doit passer au centre d'une base de mesure.

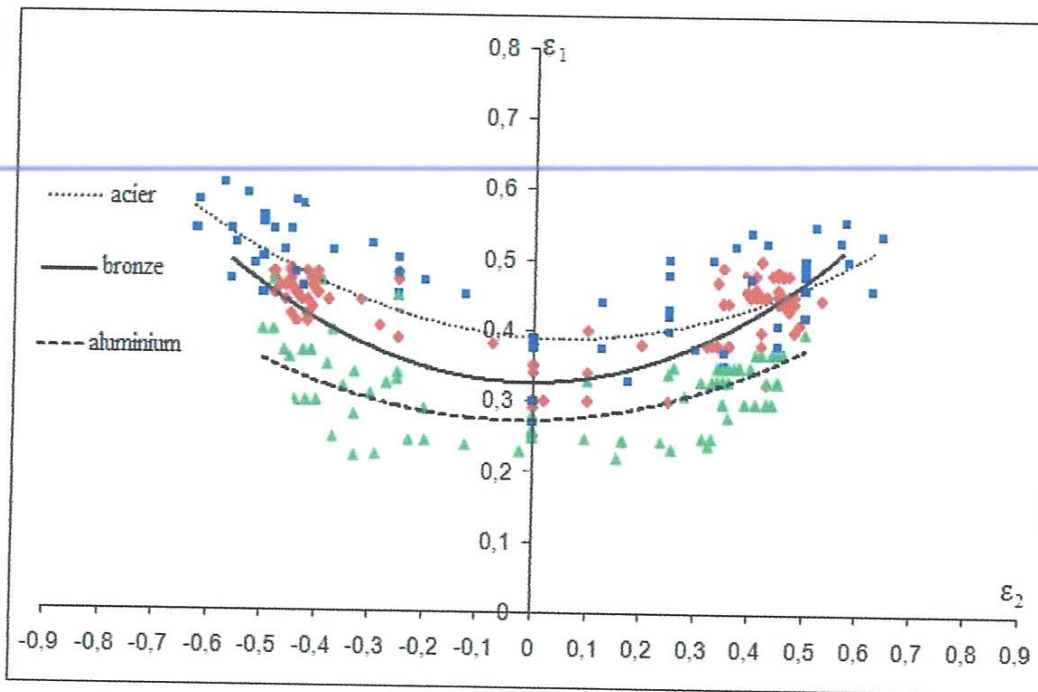


Figure III. 4 : Courbe limite de formage expérimental. Influence des coefficients d'écroutissage et d'anisotropie.

Analyse

L'aptitude à l'emboutissage des tôles minces peut être évaluée au moyen du coefficient d'anisotropie « r » et du coefficient d'écroutissage « n ». Le premier est fortement lié au rétreint, le second a la capacité de déformation en expansion.

La figure III. 4 présente une comparaison des CLF des trois matériaux étudiés. On constate que l'augmentation des coefficients d'érouissage et d'anisotropie élève le niveau de précision des CLF.

(X) On peut conclure que les matériaux à fort coefficient d'érouissage et d'anisotropie, conduit à la réussite de l'opération d'emboutissage.

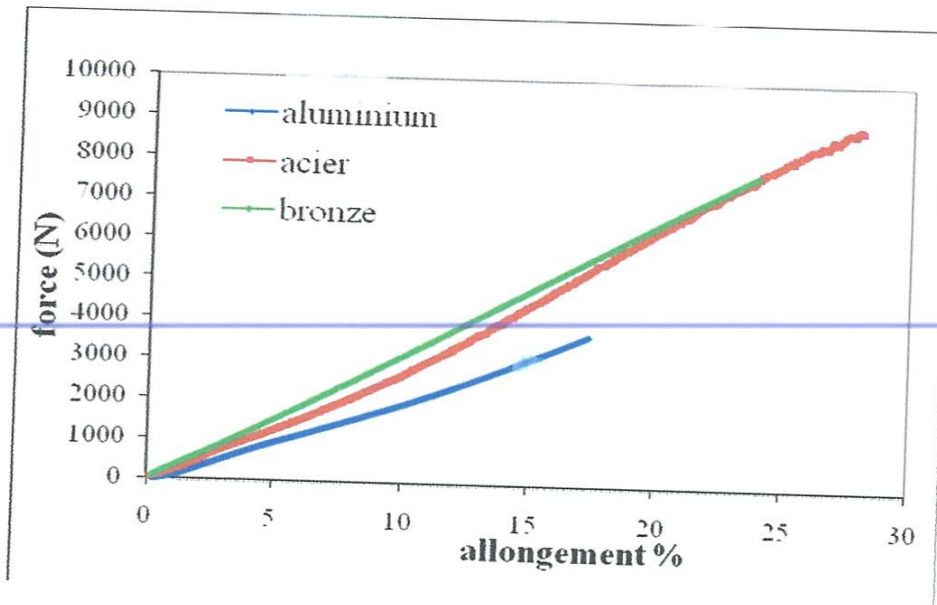


Figure III. 5 : Evolution de l'allongement en fonction de la force pour les trois matériaux étudiés.

Analyse

Aux coefficients d'érouissage et d'anisotropie, on peut adjoindre à ces deux caractéristiques, mais à un degré moindre, l'allongement $A\%$. Comme on peut le constater sur la figure III.5, il existe une certaine corrélation entre les coefficients d'érouissage et d'anisotropie. En effet, avec l'augmentation de l'allongement, le matériau s'apprête mieux à l'opération d'emboutissage.

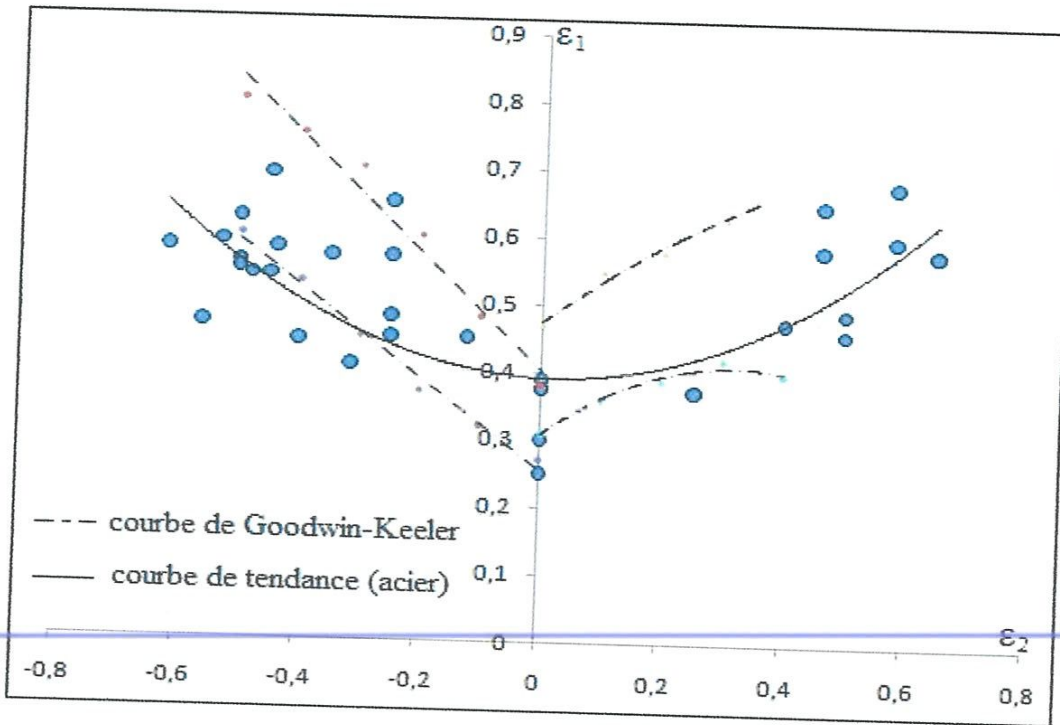


Figure III. 6 : Comparaison des CLF fournis par Goodwin & Keeler, et CLF expérimental d'une tôle en acier

Analyse

Comme le montre la figure III. 6, la courbe limite de formage expérimental qu'on a obtenue par l'essai d'emboutissage au laboratoire de RDM du département de génie mécanique, est très proche des CLF fournis par Goodwin & Keeler.

Donc nous concluons que nos résultats sont très acceptable.

La forme polynomiale de notre CLF diffère légèrement des courbes standard qui sont basées sur l'hypothèse d'un chemin de déformation quasi rectiligne.

La position verticale de la courbe dépend de l'épaisseur de la tôle ainsi que de la valeur des coefficients d'écroutissage et d'anisotropie et de la vitesse de déformation.

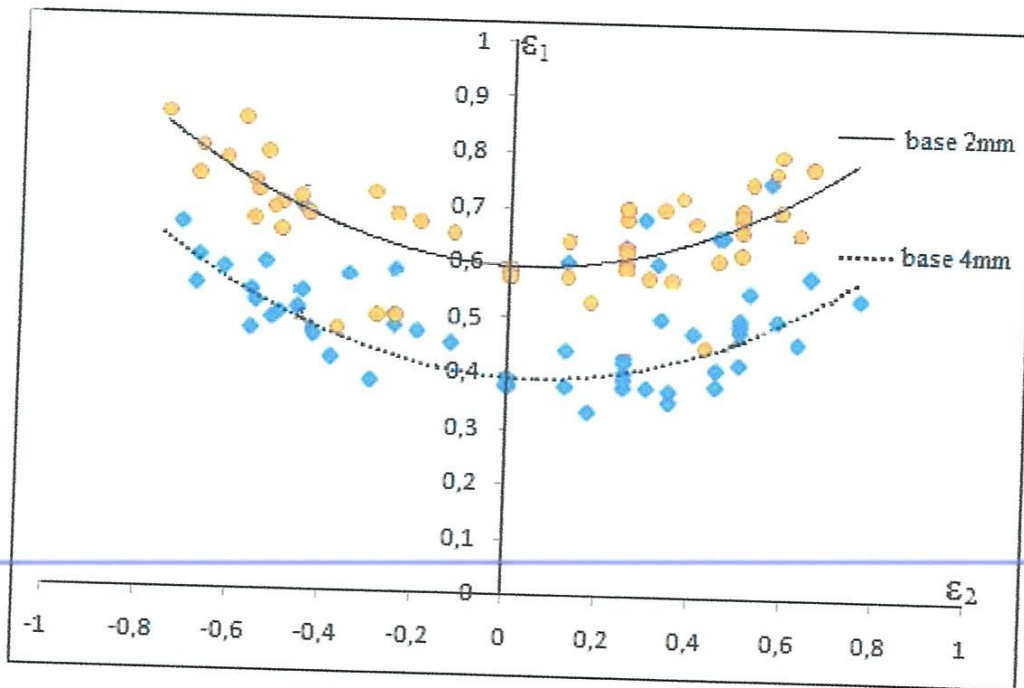


Figure III. 7: Courbe limite de formage expérimental. Influence de la base de mesure.

Analyse

La figure III. 7 présente les résultats obtenus pour une tôle en acier avec des bases de mesure de 4mm et 2mm, la précision augmente avec la base de mesure de 2mm, et permet ainsi d'approcher au plus près les valeurs limites vraies, mais nous constatons que la dispersion augmente sensiblement tout en restant acceptable.

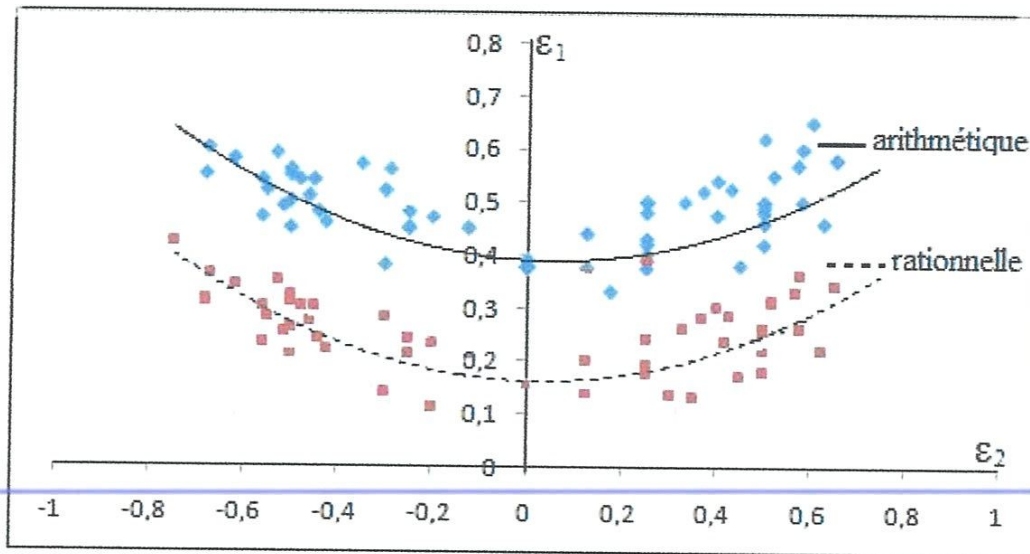


Figure III. 8 : Courbe limite de formage expérimental. Influence de la déformation.

Analyse

Les résultats expérimentaux obtenus pour la tôle en acier peuvent être exploités, soit en coordonnées arithmétiques, soit en coordonnées rationnelles : On observe sur le graphe que la dispersion entre les deux courbes obtenues est de l'ordre de 9 %. Ce qui est très faible.

Conclusion

Pour les industriels travaillant dans le domaine de l'emboutissage, la connaissance des C. L. F. est essentielle pour réaliser leurs gammes de fabrication pour une nouvelle pièce. En effet, c'est grâce à ces courbes qu'ils peuvent utiliser d'une manière la plus optimale une tôle sans risque d'apparition de striction localisée. Mais, ces courbes bien qu'elles puissent être obtenues de deux manières différentes expérimentalement ou purement théoriquement restent à ce jour difficile à obtenir.

Ce travail est basé sur l'utilisation de marquage d'une grille de forme carré sur le flan, qui permettra après mise en forme la mesure des déformations subies par la tôle en tout point et en particulier au niveau de l'amorce de rupture. La technique de mesure utilisée est le ruler pixel.

Les résultats expérimentaux obtenus ont permis de tracer dans un premier temps pour trois tôles, l'une en acier, l'autre en bronze, et la troisième en aluminium les CLF correspondantes, et d'apprécier l'influence des coefficients d'écroutissage et d'anisotropie sur l'aptitude à l'emboutissage de ces tôles. Ces courbes ont certes encore besoin d'être affinées pour donner des résultats représentatifs de ceux susceptibles d'être obtenus aux laboratoires spécialisés

Une comparaison des CLF fournis par Goodwin & Keeler avec celle qu'on a obtenue expérimentalement a été faite, on a constaté que nos résultats sont très acceptable.

Une suite logique de ce travail consiste à étudier les courbes limites de formage à la striction, tout en utilisant les moyens de marquage des grilles récents tels que le mouchetis et comme technique de mesure des déformations l'emploi d'un logiciel de corrélation d'image.

BIBLIOGRAPHIE

▪ **Article dans une revue scientifique:**

- [1]: **TAYLOR B.**, Sheet metal formability, AISI Committee of Sheet Steel Producers, American Iron and Steel Institute, Washington D.C., 1984
- [2]: **SWIFT H. W.**, Plastic instability under plane stress, J. Mech. Phys. Solids, vol 1, p 1-18, 1952
- [3]: **NAKAZIMA K.**, Study on the Formability of Sheet Steels. Yawata Tech. Rept., n°264, p 141. 1968
- [5]: **MARCINIAK Z., KUCZINSKI K. et POKORA T.**, Influence of the plastic properties of a material on the forming limit diagram for sheet metal in tension, Lot.J. Mech. Sci., vol 15, p 789- 805, 1973

-
- [6]: **KEELER S. P.**, Determination Of forming limits in automotive stampings, Sheet Metal Industries, vol 42, p 683-691. 1965
- [7]: **GOODWIN G. M.**, Application of the strain analysis to steel metal forming in press shop, La Metallurgia Italiana, n°8, p 767-772. 1968
- [14]: **M.GASPERINI.** Mesure par micro grilles des déformations en étirage plan dans l'épaisseur de la tôle minces d'alliage d'aluminium. Dans Photomécanique, Marne la Vallée (France), Avril 2007
- [15]: **R.TIE BI.** Mesure par suivi de marqueurs et thermographie infrarouge de paramètre thermomécanique, Poitiers (France), Avril 2009

▪ **Rapport technique :**

- [10]: **MAKKOUK R. et FERRON G.**, Etude du comportement mécanique des aciers et alliages . . légers en vue de la caractérisation de leur emboutissabilité. Projet CEDRE, Rapport Scientifique., I.S.G.M.P. (L.P.M.M.) Université de Metz. Juin 2006
- [12]: **R. Martin** : « Mise en forme par déformation » : CETIM (Etablissement de Senlis). Octobre 2008.

PFE :

- [11]: **CHABBI H. MEZIANE D.** Application de la méthode des grilles au calcul des déformations en emboutissage. Mémoire d'Ingénieur d'Etat. Département de Génie Mécanique. Université 8 mai 45 de Guelma. Juin 2004.

▪ **Thèse :**

[13] : **Sylvie Fromentin**, Etablissement d'un critère de striction intrinsèque des tôles et validation numérique par simulations d'emboutissage. Thèse pour l'obtention du grade de Docteur. .S.G.M.P. (L.P.M.M.) Université de Metz.03 juillet 1998.

▪ **Site Internet :**

[4]: Articles scientifiques et documentation *technique* dans tous les domaines.

<http://www.techniques de L'ingénieur.fr>

[8]: © OTUA - Office Technique pour l'Utilisation de l'Acier -

<http://www.otua.org/FABACIER/PropMecaniques/Anisotropie.html>

[9]. FICHE 1. QU'EST CE QUE LE DECOUPAGE-EMBOUTISSAGE ?

<http://www.metiers-mecanique.com/ufimo/decoupage/impression.asp?fiche=8>

