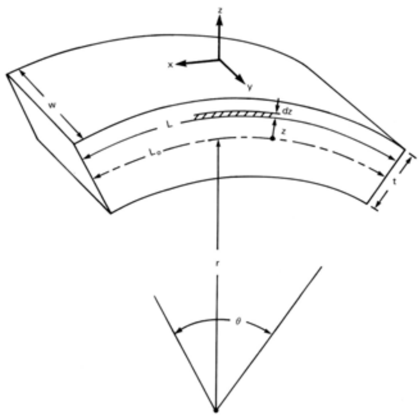
TD 15 : EMBOUTISSAGE - CORRIGE

EXERCICE 1 : RETOUR ELASTIQUE

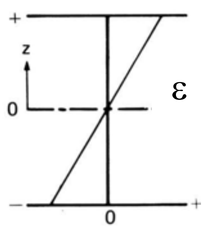
On applique un effort sur une tôle d'épaisseur 1 mm et d'acier de limite d'élasticité $\sigma_x = Y$ en traction 300 MPa est pliée sur un long outil de rayon 5 cm.

a) Dessiner le profil des déformations dans l'épaisseur ?



Sur la ligne neutre : $L_0 = r\,\theta$, en périphérie : $L = (r + z)\,\theta$

$$\frac{\Delta L}{L_0} = \frac{z\,\theta}{r\,\theta} = \frac{z}{r} \qquad \varepsilon_x = \ln\left(1 + \frac{z}{r}\right) \approx \frac{z}{r}$$



Profil de déformation dans l'épaisseur de la tôle

b) Si la tôle présente un comportement élastoplastique sans écrouissage, quelle proportion de l'épaisseur de la tôle reste élastique ?

On prendra un module d'Young E = 210 GPa, coefficient de Poisson ν = 0,3, et on supposera des déformations planes et que la tôle est fine par rapport au rayon.

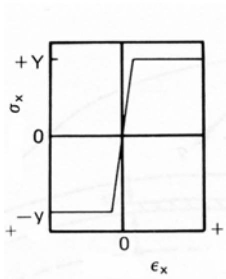
$$\varepsilon_y = \frac{1}{E}\left[\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z)\right] = 0 \qquad \text{d'où : } \sigma_y = \nu\sigma_x$$

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E}\left[\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)\right] \qquad \text{avec } \sigma_z = 0 \qquad \text{d'où } \varepsilon_x = \frac{1-\nu^2}{E}\sigma_x$$

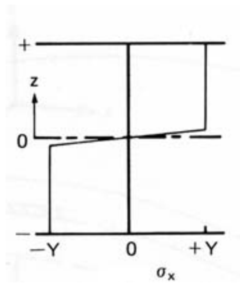
Pour la limite d'élasticité Y, on trouve : $\varepsilon_x = \dfrac{1-\nu^2}{E}Y = \dfrac{z}{r}$

$z = 50.\dfrac{1-0.3^2}{210000}.300 = 0.065 \text{ mm}$ de chaque côté de la ligne neutre, soit une épaisseur pour le cœur élastique d'environ 0.13 mm sur 1 mm: 13%

c) En supposant que cet acier ne s'écrouit pas, tracer le profil de contrainte dans l'épaisseur de la tôle



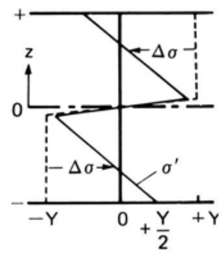
Loi de comportement élastoplastique sans écrouissage



Distribution des contraintes dans l'épaisseur de la tôle

d) Si on relâche totalement l'effort appliqué, la tôle se déplie en partie : c'est le retour élastique.

Dessiner le profil de contrainte dans l'épaisseur à l'équilibre.

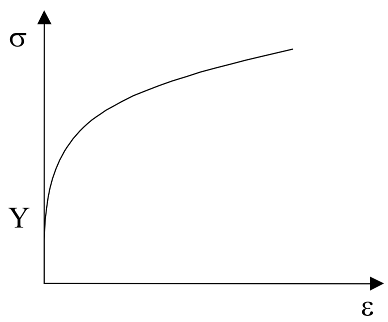
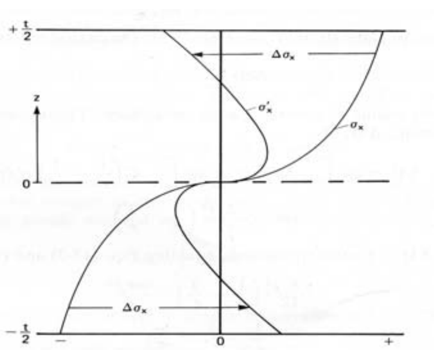


Distribution des contraintes dans l'épaisseur de la tôle après décharge

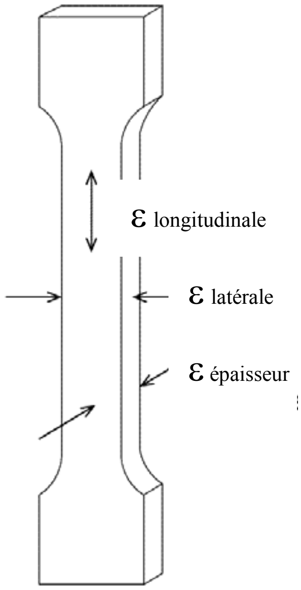
e) En fait, à froid, l'acier se durcit, s'écrouit. Expliquer l'origine physique de ce durcissement.

La déformation plastique implique des créations de nouvelles dislocations, et des mouvements de ces dislocations qui vont se bloquent mutuellement de plus en plus.

Exemple de loi avec écrouissage, du profil de contrainte dans l'épaisseur sous charge et retour élastique :

	
Exemple de loi de comportement avec écrouissage	Distribution des contraintes dans l'épaisseur de la tôle pendant la charge et après décharge

EXERCICE 2 : ANISOTROPIE VIA LES COEFFICIENTS DE LANKFORD ET COURBES LIMITES DE FORMAGE



Mesures effectuées couramment à l'aide d'extensomètres lors d'un essai de traction : $\varepsilon^p_{\text{longitudinale}}$ et $\varepsilon^p_{\text{latérale}}$

Coefficient de Lankford : $R = \dfrac{\varepsilon^{p}_{\text{latérale}}}{\varepsilon^{p}_{\text{épaisseur}}}$

Courbe Limite de Formage :

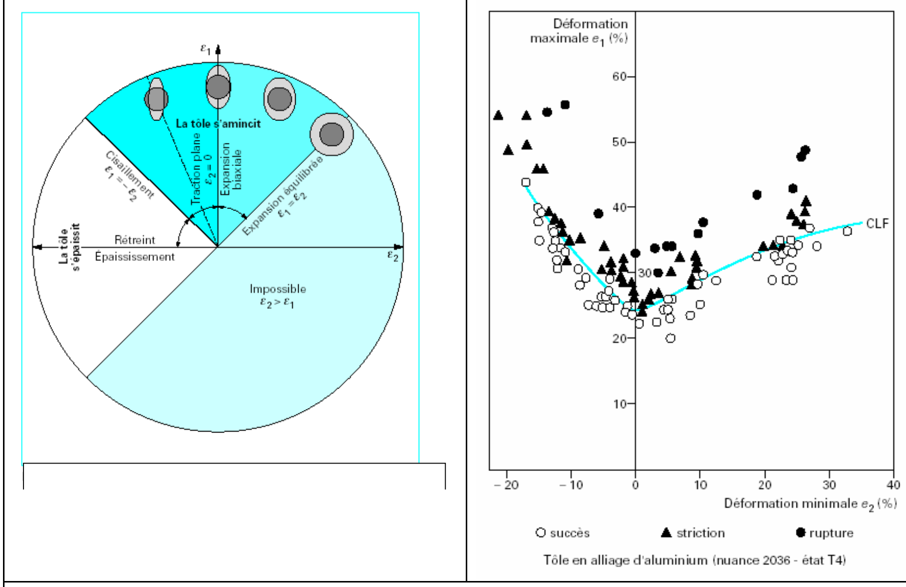


Diagramme des déformations principales et Courbe Limite de Formage

a) Quelle est la valeur du coefficient de Lankford pour une déformation isotrope ?

$$\varepsilon^{p}_{\text{longitudinale}} = -2\varepsilon^{p}_{\text{épaisseur}} = -2\varepsilon^{p}_{\text{latérale}}$$

donc : $R = 1$

b) Dans un cas général (matériau anisotrope), calculer le coefficient de Lankford en fonction de mesures d'extensomètres en traction simple, et en déduire la pente d'un essai de la traction simple dans un diagramme de Courbe Limite de Formage en fonction de R

La déformation plastique s'effectue sans changement de volume, donc :

$$\varepsilon^{p}_{\text{épaisseur}} + \varepsilon^{p}_{\text{latérale}} + \varepsilon^{p}_{\text{longitudinale}} = 0$$

d'où :

$$R = \frac{\varepsilon^{p}_{\text{latérale}}}{\varepsilon^{p}_{\text{épaisseur}}} = \frac{-\varepsilon^{p}_{\text{latérale}} - \varepsilon^{p}_{\text{longitudinale}}}{\varepsilon^{p}_{\text{épaisseur}}} = -\frac{\varepsilon^{p}_{\text{longitudinale}}}{\varepsilon^{p}_{\text{épaisseur}}} - 1$$

La pente d'un chargement dans le plan tangent à la tôle (celui de la Courbe Limite de Formage) est p qui s'écrit ainsi :

$$p = \frac{\varepsilon^{p}_{\text{longitudinale}}}{\varepsilon^{p}_{\text{latérale}}} = \frac{\varepsilon^{p}_{\text{longitudinale}}}{-\varepsilon^{p}_{\text{longitudinale}} - \varepsilon^{p}_{\text{épaisseur}}}$$

$$p = \frac{-\varepsilon^{p}_{\text{épaisseur}}}{-\varepsilon^{p}_{\text{longitudinale}} - \varepsilon^{p}_{\text{épaisseur}}} + \frac{\varepsilon^{p}_{\text{longitudinale}} + \varepsilon^{p}_{\text{épaisseur}}}{-\varepsilon^{p}_{\text{longitudinale}} - \varepsilon^{p}_{\text{épaisseur}}} = -\frac{1}{R} - 1$$

c) Certaines tôles en alliage d'aluminium peuvent présenter un R de 0,7, alors que d'autres en acier doux ont un R de 3. Quelle est l'origine de cette anisotropie ? Quelles valeurs de R permettent, a priori, d'envisager une opération d'emboutissage profond ?

La déformation plastique d'un grain/monocristal est anisotrope par nature. Comme la distribution d'orientation des différents grains d'une tôle n'est pas aléatoire du fait de son passé thermomécanique, la réponse globale sera également anisotrope.

Plus R est élevé, plus l'amincissement sera lent, et plus on pourra envisager d'emboutir profondément la tôle sans rupture.