

TP : ESSAIS DE FLUAGE DU PLOMB

Axelle COCHERY
Bruno MILLION
Benjamin LEFEBVRE

I. <u>Qu'est ce que l'essai de fluage ?</u>	2
1. Définition	2
2. Mécanismes microscopiques du fluage	3
II. <u>Expérience</u>	3
1. Démarche	3
2. Résultats	4
a. Influence de la contrainte	4
b. Influence de la température	4
3. Validité des résultats, calcul d'erreur	5
a. Influence de l'inclinaison du bras de levier	5
b. Erreur due à la variation de section	6
III. <u>Modèle de Norton</u>	7
1. Modélisation mathématique	7
2. Détermination des coefficients K et N à partir des essais	7
IV. <u>Modèle de Katchanov</u>	7
1. Modélisation mathématique	7
2. Détermination des coefficients r et A à partir des essais	8
V. <u>Bibliographie</u>	8

I. Qu'est ce que l'essai de fluage ?

1. Définition

Le fluage est l'une des caractéristiques essentielles des matériaux plastiques. Il peut être mis en évidence par un essai de traction.

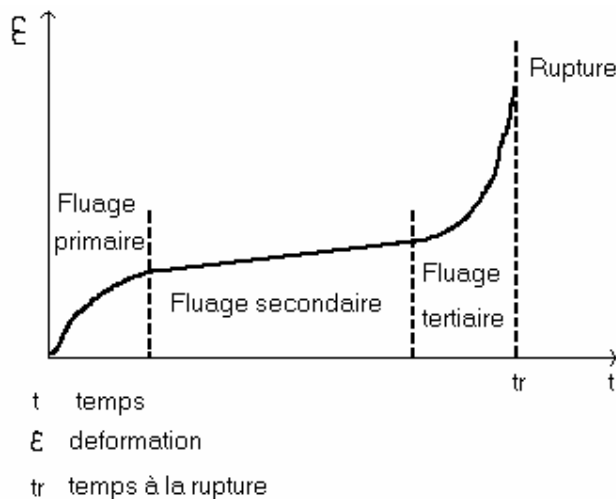
A la mise en charge de l'éprouvette, un allongement dL_0 se produit instantanément. Si la charge F est maintenue, l'éprouvette continue progressivement de s'allonger au cours du temps (allongement retardé).

Plus la température est élevée, plus le phénomène est accentué.

Si la charge F est supprimée, le phénomène s'inverse, l'éprouvette récupère rapidement une partie de l'allongement réalisé, puis progressivement et plus lentement une autre partie.

La déformation résiduelle qui subsiste mesure le fluage.

La destruction des liaisons, le glissement entre les macromolécules, le frottement interne retardant les déformations sont les principales causes du fluage. Le phénomène apparaît également pour les métaux travaillant sous charge.



Courbe théorique d'un essai de fluage 1

Pour que l'effet du fluage soit observable, il faut que $T > 0,3 T_f$ (en Kelvin).

Lors d'un essai de fluage, on représente ϵ en fonction du temps. Sur la courbe ainsi obtenue, on peut remarquer trois zones différentes :

- le fluage primaire pendant lequel la vitesse de déformation diminue, ce qui correspond à une augmentation de résistance du matériau
- le fluage secondaire qui fait apparaître une vitesse de déformation constante, qui est d'ailleurs la vitesse minimale
- le fluage tertiaire caractérisé par une augmentation de la vitesse de déformation qu'il faut associer à l'apparition d'un endommagement sensible à l'échelle mécanique ou à un adoucissement du matériau

2. Mécanismes microscopiques du fluage

Il faut tout d'abord savoir que l'on modélise le matériau sous forme de grains constitués de plusieurs mailles d'atomes.

Le phénomène de fluage dépend de l'intensité de la contrainte et est amplifié lorsque la température augmente.

Les diffusions des atomes aux joints de grains interviennent à faible température et à des niveaux de contraintes faibles.

A haute température et sous faible contrainte, il y a une diffusion en volume (à l'intérieur des grains). Le mouvement de dislocation par diffusion d'atomes est le mécanisme prépondérant sous contrainte élevée.

Voici l'origine des trois phases du fluage :

- le fluage primaire correspond à un écrouissage : il y a création et propagation des dislocations jusqu'au joint du grain.

- le fluage secondaire comprend des phénomènes de diffusion et de dislocation au niveau inter-granulaire (modèle d'Herring) et intra-granulaire (modèle de Coble).

La dislocation correspond à une diffusion d'atomes (possible seulement à haute température) le long des joints ou à l'intérieur des grains. Ces atomes migrent vers des lacunes des mailles et ainsi on obtient un déplacement qui change la configuration du grain ou du joint.

- le fluage tertiaire conduit à la rupture du matériau : il y a endommagement. Il y a création de cavitations et de fissions au niveau des joints.

On distingue :

- amorçage : les cavités apparaissent au niveau des lignes des joints.

- croissance : augmentation du nombre de cavité due à la diffusion inter-granulaire et la présence d'un champ de contrainte au niveau de ces cavités.

- coalescence : la fusion entre cavités entraîne des fissures qui vont se propager.

- rupture : la contrainte augmente du fait de la diminution de la section de l'éprouvette.

II. Expérience

1. Démarche

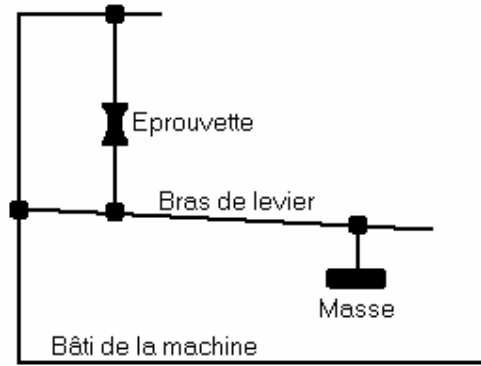
Dans le but de réaliser l'étude de l'influence de la température et de la contrainte sur les différents domaines du fluage, on va réaliser cinq essais sur des éprouvettes en plomb :

- 3 à température ambiante (25°C) et à charge variable (120N, 140N, 160N)

- 2 à charge constante (120N) et à 40°C puis 60°C

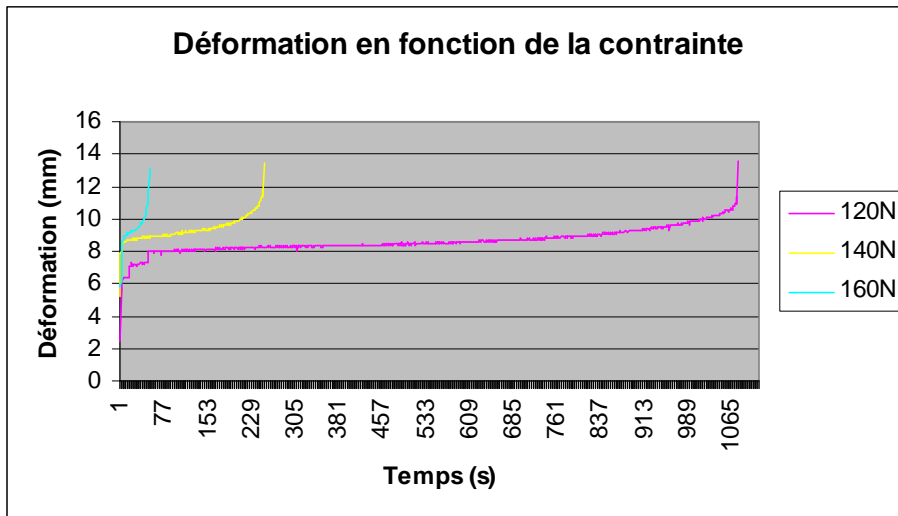
Les températures lors des essais sont bien supérieures à 0,3 Tf, cependant la contrainte n'est pas tout à fait constante (voir le calcul d'erreur en 3). L'essai ne correspond pas tout à fait au fluage théorique mais en est très proche.

schéma de la machine d'essai de fluage :



2. Résultats

a. Influence de la contrainte

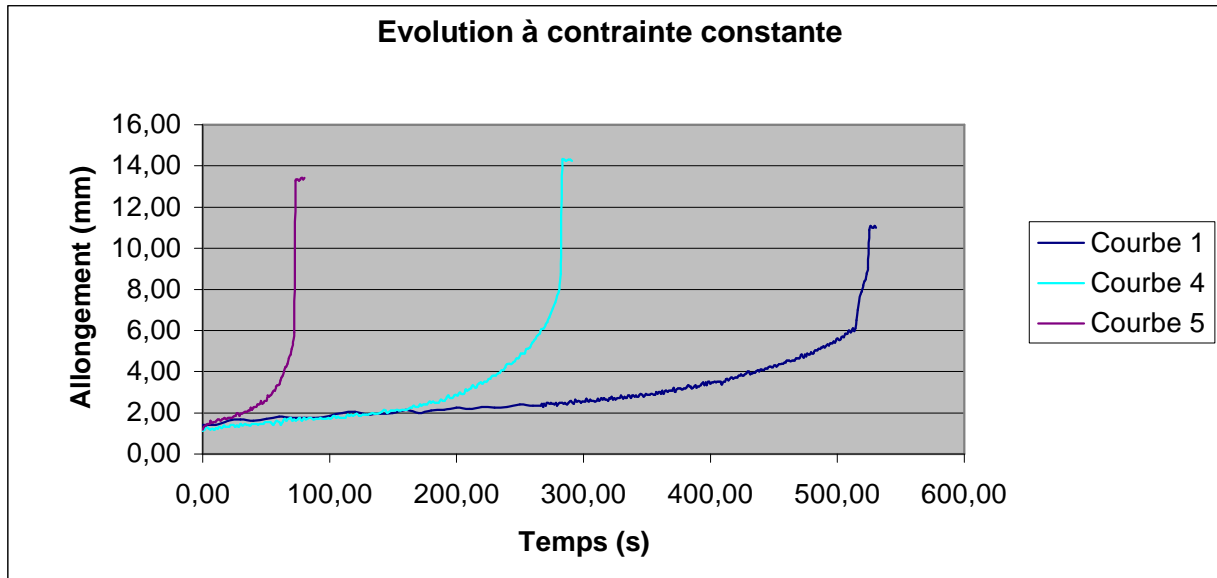


Observation générale

Lorsque la contrainte augmente, la vitesse de déformation augmente et :

- la durée du fluage primaire augmente ;
- la durée du fluage secondaire diminue ;
- la durée du fluage tertiaire augmente.

b. Influence de la température



Observations générales

Lorsque la température croît, la vitesse de déformation augmente et :

- le fluage primaire disparaît
- la durée du fluage secondaire diminue
- la durée du fluage tertiaire diminue et allongement augmente

En théorie

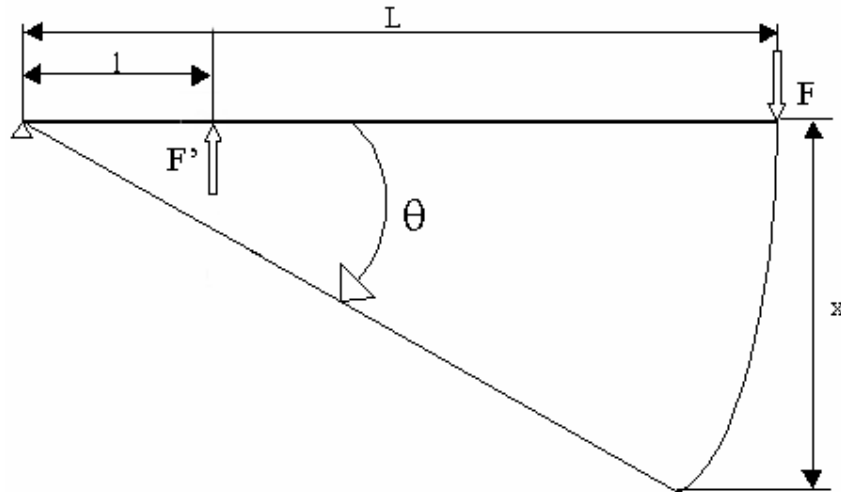
- Le fluage primaire augmente. Toutefois, à haute température et sous de faibles contraintes le premier stade peut disparaître.
- La durée du fluage secondaire diminue et peut même ne plus exister, la courbe ne présente alors plus qu'un point d'inflexion.
- L'allongement lors du fluage tertiaire augmente. Il dépend beaucoup de la ductilité à chaud du matériau. C'est ainsi qu'en cas de rupture fragile sans striction ce troisième stade peut disparaître totalement.

Conclusion

Les résultats expérimentaux correspondent bien à la théorie. Lorsqu'on augmente la température, le fluage primaire disparaît, la durée du fluage secondaire diminue fortement et si on avait encore augmenté la température celui-ci aurait totalement disparu.

3. Validité des résultats, calcul d'erreur

- a. Influence de l'inclinaison du bras de levier



Pour $\theta = 0$: $FL = F'l$

Pour $\theta \neq 0$: $FL \cos(\theta) = F'l$

$$\text{Donc } F' = \frac{L}{l} \cos(\theta) F$$

$$\text{En dérivant : } dF' = -\frac{L}{l} \sin(\theta) d\theta$$

$$\text{D'où } \frac{\Delta F'}{F'} = -\tan(\theta) \Delta \theta$$

AN : $x=23\text{mm}$, $L=125\text{mm}$

Donc $\theta = 11^\circ$

$$\text{D'où } \frac{\Delta F'}{F'} = 19\%$$

b. Erreur due à la variation de section

En utilisant la conservation du volume :

$$V = S \cdot L$$

$$\text{Dérivons logarithmiquement : } \frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta S}{S} + \frac{\Delta L}{L}$$

Or avec la conservation du volume, on a $\frac{\Delta V}{V} = 0$.

$$\text{D'où } \frac{\Delta S}{S} + \frac{\Delta L}{L} = 0$$

$$\text{Donc } \frac{\Delta S}{S} = -\frac{\Delta L}{L}$$

AN : $L_{\text{final}}=100\text{mm}$, $L=88\text{mm}$

Donc $\Delta L=12\text{mm}$

$$D'ou \frac{\Delta L}{L} = 13\%$$

$$\text{Par suite } \boxed{\frac{\Delta S}{S} = 13\%}$$

A la suite de ces calculs, nous pouvons considérer que les résultats obtenus sont valables car la section diminue ainsi que la force donc la contrainte reste presque constante.

III. Modèle de Norton

1. *Modélisation mathématique*

Pour modéliser le fluage secondaire, on utilise la vitesse de déformation pour une température fixée.

Cette loi est empirique et lie la contrainte avec la vitesse de déformation

$$\dot{\epsilon} = \left(\frac{\sigma}{K}\right)^N \text{ où } K \text{ et } N \text{ sont des constantes typiques du matériau.}$$

Cependant cette loi de Norton ne fait pas intervenir la température. Le fluage étant une déformation activée thermiquement, on affine la loi de Norton par :

$$\dot{\epsilon} = \left(\frac{\sigma}{K}\right)^N e^{\left(\frac{-Q}{RT}\right)} \text{ où } K, Q, \text{ et } N \text{ sont des constantes typiques du matériau.}$$

Le terme en exponentiel correspond à l'énergie d'activation (loi d'Arrhenius) qui est égale à l'énergie d'auto-diffusion dans le cas des métaux purs (ici le Plomb).

2. *Détermination des coefficients K et N à partir des essais*

Pour déterminer K et N, il faut connaître les différentes valeurs de σ . Pour cela, il faut la taille de la section de l'éprouvette. Après mesure, ceci fait 7.94mm². Donc les différentes valeurs des contraintes pour les forces de 120N, 140N et 160N sont respectivement 15.11Mpa, 17.63Mpa et 20.15Mpa.

Les différentes valeurs de $\dot{\epsilon}$ se déterminent en calculant les coefficients directeurs de chaque droite dans les zones de fluage secondaire. On trouve : 0.016mm/s, 0.037mm/s et 0.33mm/s.

Après calcul, on trouve que N vaut 5.38 et K vaut 32.52.

IV. Modèle de Katchanov

1. *Modélisation mathématique*

La loi de Katchanov traduit le fait qu'il y ait apparition de cavités dans le fluage tertiaire et donc diminution de la section de l'éprouvette, mais il y a toujours continuité de la matière. La section devient : $\tilde{S} = S \cdot (1 - D)$

D : désigne la section résistante.

La contrainte se trouve donc modifiée :

$$\sigma = \frac{\sigma_0}{(1-D)}$$

Pour tenir compte de cette augmentation, on modifie la loi de Norton en remplaçant σ par σ_0

$$\dot{\epsilon} = \left(\frac{\sigma_0}{K.(1-D)} \right)^n$$

et on obtient la loi de Katchanov qui s'écrit :

$$\dot{\epsilon} = \left(\frac{\sigma_0}{A.(1-D)} \right)^r$$

A et r sont des coefficients caractéristiques de l'endommagement de fluage pour chaque matériau.

2. Détermination des coefficients r et A à partir des essais

Le temps à rupture T_c dans un essai de fluage à contrainte constante s'exprime par la solution de l'équation différentielle du modèle par la valeur critique de l'endommagement $D=D_c$. Avec la condition initiale pour $t=0$, $D=0$

$$T_c = \left(\frac{1 - (1 - D_c)^{r+1}}{r + 1} \right) \left(\frac{\sigma_r}{A_0} \right)^{-r}$$

Les valeurs usuelles de r autorisant à négliger $(1-D_c)^{r+1}$ devant 1, on peut exprimer l'évolution de l'endommagement sous une forme particulièrement simple par l'intégration de la loi différentielle entre 0 et D.

$$D = 1 - \left(1 - \frac{T}{T_c} \right)^{\frac{1}{r+1}}$$

$$\text{avec } T_c = \left(\frac{1}{r + 1} \right) \left(\frac{\sigma_r}{A_0} \right)^{-r}$$

Les coefficients A_0 et r dépendent fortement de la température.

V. Bibliographie

-Cours de matériaux

-Guide des sciences et technologies industrielles par JL Fanchon

-Application de la théorie du fluage N. Kh. Aroutiounian
ref bibliothèque ENS : 691.1 ARO

-Techniques de l'ingénieur : Essais de fluage

ref M140

-Matériaux tome 1 et 2 par Ashby et Jones
ref 692 ASH

-Comportement mécanique des matériaux par D François, A. Pineau, A. Zaoui
ref 532.1 FRA

-Le fluage des métaux collection Irsid ortua par G. Murry
ref 693.3 MUR

-Structures des métaux par C.S. Barrett