Appareillage pour l'étude des propriétés rhéologiques des matériaux en régime biaxial à vitesses linéaires, contraintes (σ_{zz} , $\sigma_{z\theta}$) ou déformation (ϵ_{zz} , $\epsilon_{z\theta}$), constantes

P. Delobelle, C. Oytana, A. Mermet

► To cite this version:

P. Delobelle, C. Oytana, A. Mermet. Appareillage pour l'étude des propriétés rhéologiques des matériaux en régime biaxial à vitesses linéaires, contraintes (σ_{zz} , $\sigma_{z\theta}$) ou déformation (ϵ_{zz} , $\epsilon_{z\theta}$), constantes. *Revue de Physique Appliquée*, 1979, 14 (11), pp.933-938. 10.1051/rphysap:019790014011093300 . jpa-00244682

HAL Id: jpa-00244682

<https://hal.science/jpa-00244682>

Submitted on 1 Jan 1979

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Classification

Physics Abstracts

06.70 — 81.40L — 81.70

Appareillage pour l'étude des propriétés rhéologiques des matériaux en régime biaxial à vitesses linéaires, contraintes (σ_{zz} , $\sigma_{z\theta}$) ou déformation (ε_{zz} , $\varepsilon_{z\theta}$), constantes

P. Delobelle, C. Oytana et A. Mermet

Laboratoire de Mécanique Appliquée (*),
Faculté des Sciences, 25030 Besançon Cedex, France

(Reçu le 5 juillet 1979, accepté le 11 septembre 1979)

Résumé. — Description d'un appareillage adaptable sur une machine de traction classique type Instron et permettant d'étudier les propriétés rhéologiques à haute température des matériaux soumis à des efforts simultanés en traction et torsion. Un dispositif de cyclage de faible amplitude entre forces, selon chaque composante, est asservi en fonction de l'allongement de l'éprouvette (tube épais) et permet de réaliser des essais de fluage biaxiaux à contraintes σ_{zz} et $\tau_{z\theta}$ constantes. Des tests à vitesses linéaires imposées sont également réalisables. Dès lors, il est possible de combiner, selon chaque composante, en régime transitoire ou stationnaire, des essais à vitesse, contrainte ou déformation imposée (traction ou torsion, fluage ou relaxation) ce qui permet d'approcher les lois d'écoulement de manière plus complète.

Abstract. — A device adaptable on a classical type Instron traction machine is described. It allows the study of high temperature rheological properties of materials simultaneously in traction and torsion. Forces controlled cycling devices (one for each component) with a very weak cycle amplitude is controled through the lenthening of the sample (thick tube) insuch a way to perform biaxial creep tests with constant σ_{zz} and $\tau_{z\theta}$ stresses. Linear rate tests can also be realised. It is therefore possible to combine, along each component, in a transitory or stationary state, test with controled rate and/or stress and/or strain (traction, torsion, creep and relaxation) and to analyse flow laws more completely.

1. Intérêt de l'appareillage. — L'étude des propriétés mécaniques des matériaux à haute température ($T/T_F \geq 0,3$) sous sollicitation biaxiale, tant en régime stationnaire que transitoire, soulève encore de nombreux problèmes [1-4]. Nous nous proposons présentement de décrire un dispositif adaptable sur une machine de traction classique et permettant principalement de réaliser des tests de fluage biaxiaux à contraintes σ_{zz} et $\tau_{z\theta}$ constantes (d'où la nécessité d'asservir l'ensemble) en conservant la possibilité de réaliser des essais à vitesse linéaire imposée. A l'aide de cet appareillage, il est possible d'effectuer séparément et simultanément, suivant chaque composante, l'un des trois tests classiques, fluage, traction ou torsion à vitesse de déformation imposées, relaxation, ce qui augmente considérablement les possibilités de la machine dans l'étude des lois d'écoulement à chaud.

2. Principe de l'appareillage et réalisation. — 2.1 CALCUL DES RELATIONS LIANT LES DIFFÉRENTES GRANDEURS MESURABLES AUX PARAMÈTRES PHYSIQUES DE L'ÉCOULEMENT. — Comme nous le verrons ultérieurement, les seules grandeurs mesurables expérimentalement sont les forces axiale et tangentielle appliquées à l'éprouvette ainsi que les déformations qui leur sont associées ou réciproquement. Il faut donc se fixer une forme d'éprouvette et calculer les contraintes qui en résultent. Compte tenu des possibilités d'obtention des différents matériaux et de leur transformation par filage et usinage, nous adoptons la forme de tubes épais de 1 mm d'épaisseur pour un diamètre extérieur de 6,5 mm et une longueur utile de 25 mm.

Pour traiter ce problème et pour la suite des calculs, nous utiliserons la méthode de Hill [5] qui conduit à une déformée des tubes minces telle que, non seulement le volume de matière, mais également celui du trou restent constants, d'où il résulte que l'on peut considérer le tube épais comme un assemblage

(*) Associé au C.N.R.S.

concentrique de tubes minces dans chacun desquels l'état de contrainte et de déformation se développe indépendamment. La conservation du volume intérieur des tubes entraîne que les rayons intérieur et extérieur r_1, r_2 du tube sont liés à sa longueur instantanée l par :

$$r_1 = r_{10} \sqrt{\frac{l_0}{l}} \quad \text{et} \quad r_2 = r_{20} \sqrt{\frac{l_0}{l}} \quad (1)$$

l'indice zéro étant relatif à l'état initial de l'éprouvette. De plus, compte tenu des hypothèses précédentes, si l'on se place en coordonnées cylindriques r, θ, z et que l'on admet que la vitesse de déformation est uniquement fonction de r , les composantes u, v, w de la vitesse de déplacement d'un élément de matière, sont respectivement :

$$u = -\frac{\dot{l}r}{2l} \quad (2)$$

$$v = \frac{\dot{\theta}rz}{l} \quad \text{et} \quad w = \frac{\dot{z}}{l} \quad (3)$$

L'extension des lois de la plasticité à basse température au domaine des hautes températures conduit aux relations (4) :

$$\left. \begin{aligned} \dot{\varepsilon}_{rr} &= \frac{\partial u}{\partial r} = -\frac{\dot{l}}{2l} = C\bar{\sigma}^{n-1} S_{rr} \\ \dot{\varepsilon}_{\theta\theta} &= \frac{u}{r} = -\frac{\dot{l}}{2l} = C\bar{\sigma}^{n-1} S_{\theta\theta} \\ \dot{\varepsilon}_{zz} &= \frac{\partial w}{\partial z} = \frac{\dot{l}}{l} = C\bar{\sigma}^{n-1} S_{zz} \\ \dot{\varepsilon}_{z\theta} &= \frac{\dot{\gamma}}{2} = \frac{1}{2} \frac{\partial v}{\partial z} = \frac{r\dot{\theta}}{2l} = C\bar{\sigma}^{n-1} S_{z\theta} \\ \dot{\varepsilon}_{rz} &= \dot{\varepsilon}_{r\theta} = 0. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Dans ce système, C est une constante thermiquement activée, n le coefficient de sensibilité du matériau testé, les S_{ij} sont les composantes du déviateur des contraintes et $\bar{\sigma}$ une contrainte équivalente qui est égale, compte tenu des lois de Levy Mises utilisées, à :

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\sigma_{zz}^2 + 3\tau_{z\theta}^2}. \quad (5)$$

Les relations intégrales (6) liant la force F à la contrainte axiale σ_{zz} et le couple C à la contrainte tangentielle $\tau_{z\theta}$;

$$F_{zz} = \int_{r_1}^{r_2} 2\pi r \sigma_{zz} dr \quad \text{et} \quad C = \int_{r_1}^{r_2} 2\pi r^2 \tau_{z\theta} dr; \quad (6)$$

conduisent aisément aux rapports σ_{zz}/F_{zz} et $\tau_{z\theta}/C$.

On obtient :

$$\frac{\sigma_{zz}}{F_{zz}} = \frac{n+1}{2n\pi} \cdot \left(\frac{\dot{\gamma}}{r}\right)^2 \cdot \frac{(\gamma^2 + 3\dot{\varepsilon}_{zz}^2)^{\frac{1-n}{2n}}}{[\dot{\gamma}^2(r_2/r)^2 + 3\dot{\varepsilon}_{zz}^2]^{\frac{n+1}{2n}} - [\dot{\gamma}^2(r_1/r)^2 + 3\dot{\varepsilon}_{zz}^2]^{\frac{1+n}{2n}}} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \frac{\tau_{z\theta}}{C} &= \frac{3n+1}{2n\pi} \cdot \left(\frac{\dot{\gamma}}{r^3}\right) \times \\ &\times \frac{(\gamma^2 + 3\dot{\varepsilon}_{zz}^2)^{\frac{1-n}{2n}}}{\left[[\dot{\gamma}^2(r_2/r)^2 + 3\dot{\varepsilon}_{zz}^2]^{\frac{n+1}{2n}} \cdot \left[\dot{\gamma}^2(r_2/r)^2 - \frac{6n\dot{\varepsilon}_{zz}^2}{n+1} \right] - \left[[\dot{\gamma}^2(r_1/r)^2 + 3\dot{\varepsilon}_{zz}^2]^{\frac{n+1}{2n}} \cdot \left[\dot{\gamma}^2(r_1/r)^2 - \frac{6n\dot{\varepsilon}_{zz}^2}{n+1} \right] \right] \right]}. \end{aligned} \quad (8)$$

Les relations (7) et (8) sont assez complexes et montrent que les contraintes σ_{zz} et $\tau_{z\theta}$ sont fonctions de n, r et des vitesses $\dot{\varepsilon}_{zz}$ et $\dot{\gamma}$.

Les variations des deux rapports σ_{zz}/F_{zz} et $\tau_{z\theta}/C$ pour $r = r_2$ sont reportées sur la figure 1 pour différentes vitesses $\dot{\varepsilon}_{zz}$ et $\dot{\gamma}$ et conduisent à plusieurs remarques :

Fig. 1. — Evolution des rapports σ_{zz}/F et $\tau_{z\theta}/C$ en fonction de n , pour différentes valeurs des vitesses $\dot{\varepsilon}_{zz}$ et $\dot{\gamma}$.

[Variation of the ratios σ_{zz}/F and $\tau_{z\theta}/C$ with n , for various values of the strain rates $\dot{\varepsilon}_{zz}$ and $\dot{\gamma}$.]

1) Pour $n = 1$, les contraintes ne dépendent plus des vitesses et n'interfèrent plus l'une sur l'autre, on obtient ainsi :

$$\frac{\sigma_{zz}}{F_{zz}} = \frac{1}{S} = \frac{1}{\pi(r_2^2 - r_1^2)} \quad (\text{traction pure}) \quad (9)$$

et

$$\frac{\tau_{z\theta}}{C} = \frac{2}{S} \frac{r}{(r_2^2 + r_1^2)} = \frac{2}{\pi} \frac{r}{(r_2^4 - r_1^4)} \quad (10)$$

(cas de la torsion pure).

Ce cas simple est celui des solides dont l'écoulement est Newtonien et ne se produit dans les matériaux métalliques que sous de très faibles charges [6].

1.1) Hormis le régime d'écoulement superplastique ($n \simeq 2$) qui se produit en général dans les alliages biphasés à grains très fins et pour des contraintes assez faibles [7], la majeure partie des matériaux soumis à des sollicitations moyennes ont un coefficient n compris entre 3 et 5 [6]. Pour ce domaine d'exposant, à $\dot{\epsilon}_{zz}$ et $\dot{\gamma}$ fixées, les rapports σ_{zz}/F_{zz} et $\tau_{z\theta}/C$ dépendent très peu de celui-ci, donc, même une assez grande incertitude sur sa valeur n'entraîne qu'une faible erreur sur la détermination des contraintes (Fig. 1).

1.1.1) Par contre, ces rapports dépendent des vitesses de manière non négligeable et pour le calcul des contraintes, il sera impératif de les prendre en compte de manière précise. Les cas extrêmes où l'une des vitesses est très supérieure à l'autre, c'est-à-dire que l'on tend vers une sollicitation uniaxiale, sont représentés sur la figure 1 et sont donnés par :

— Cas proche de la torsion $\dot{\gamma} \gg \dot{\epsilon}_{zz}$:

$$\frac{\sigma_{zz}}{F_{zz}} = \frac{n+1}{2n\pi} \left(\frac{r^{\frac{1-n}{n}}}{r_2^{\frac{1+n}{n}} - r_1^{\frac{1+n}{n}}} \right) \quad (11)$$

et

$$\frac{\tau_{z\theta}}{C} = \frac{3n+1}{2n\pi} \left(\frac{r^{\frac{1}{n}}}{r_2^{\frac{3n+1}{n}} - r_1^{\frac{3n+1}{n}}} \right) \quad (12)$$

— Cas proche de la traction $\dot{\epsilon}_{zz} \gg \dot{\gamma}$:

$$\frac{\sigma_{zz}}{F_{zz}} = \frac{1}{\pi(r_2^2 - r_1^2)} \quad (13)$$

et

$$\frac{\tau_{z\theta}}{C} = \frac{3n+1}{(n+1)\pi} \left(\frac{r}{r_2^4 - r_1^4} \right) \quad (14)$$

On peut remarquer, lorsque $r_2 - r_1 \simeq e$ et $e/r_1 \ll 1$, que l'on retrouve les différentes formes classiques pour les tubes minces, à savoir

$$\frac{\sigma_{zz}}{F_{zz}} = \frac{1}{2\pi re} \quad \text{et} \quad \frac{\tau_{z\theta}}{C} = \frac{1}{2\pi er^2} \quad (15)$$

dans le cas de la torsion et :

$$\frac{\sigma_{zz}}{F_{zz}} = \frac{1}{2\pi re} \quad \text{et} \quad \frac{\tau_{z\theta}}{C} = \frac{3n+1}{n+1} \cdot \frac{1}{4\pi r^2 e} \quad (16)$$

pour la traction.

Sur la figure 2, on représente l'évolution de σ_{zz}/F_{zz} et $\tau_{z\theta}/C$ pour $n = 3$ et r variant de r_1 à r_2 et pour différentes vitesses. Alors que σ_{zz}/F_{zz} décroît de l'intérieur à l'extérieur de l'éprouvette, inversement $\tau_{z\theta}/C$ croît. Par la suite, les valeurs des contraintes que l'on donnera seront obtenues à l'aide des formules (7) et (8) pour $r = r_2$.

Fig. 2. — Variation des rapports σ_{zz}/F et $\tau_{z\theta}/C$ avec le rayon courant r , pour différentes vitesses et $n = 3$.

[Variation of the ratios σ_{zz}/F and $\tau_{z\theta}/C$ with r , for different strain rates and $n = 3$.]

2.2 LOIS D'ASSERVISSEMENT À RÉALISER. — Lors d'un essai de fluage uniaxial, il est bien connu que ce n'est pas la force mais la contrainte appliquée à l'éprouvette qu'il faut garder constante malgré son allongement. Il en est de même en régime biaxial où l'on doit réaliser σ_{zz} et $\tau_{z\theta}$ constantes. A l'aide des relations de conservations des volumes (1), on montre aisément que l'on peut mettre (7) et (8) sous la forme :

$$\frac{\sigma_{zz}}{F_{zz}} = A \left(\frac{l}{l_0} \right) \quad (17)$$

et

$$\frac{\tau_{z\theta}}{C} = B \left(\frac{l}{l_0} \right)^{3/2} \quad (18)$$

qui se réduit à $\sigma_{zz}/F_{zz0} = A$ et $\tau_{z\theta}/C_0 = B$ pour $l = l_0$.

Les lois d'asservissement à réaliser sont donc :

$$F_{zz} \times l = \text{Cte} = F_{zz0} l_0 \quad (19)$$

et

$$C \left(\frac{l}{l_0} \right)^{3/2} = \text{Cte} = C_0 \quad (20)$$

2.3 RÉALISATION MÉCANIQUE DE L'ENSEMBLE. — Ce dispositif est prévu pour s'adapter sur un portique

de traction à vis, classique, du type Instron réalisant le déplacement vertical suivant l'axe zz . La rotation transmise à l'éprouvette par l'intermédiaire du mors inférieur, solidaire d'un plateau diviseur, est assurée par un moteur à courant continu *motomatic* asservi à vitesse constante. Un réducteur de rapport 1/15 assure la liaison moteur-plateau.

L'éprouvette est maintenue en place et rendue solidaire des mors à l'aide d'un système contre-écrou goupillé.

La figure 3 schématise le montage mécanique pour la mesure des forces selon les axes zz et $z\theta$. Il s'agit de deux cellules de forces type Instron ① et ② assemblées à 90° suivant l'axe zz par l'intermédiaire de deux pièces massives, en acier, soudées ③. La cellule de torsion ② est excentrée, dans un plan horizontal, de l'axe zz du mors tubulaire ④, d'une valeur $d = 1$ cm. Le couple C transmis par l'éprouvette est donné par $C = F_{z\theta} \cdot d$, le contact ponctuel entre la plaquette ⑤ solidaire du mors et la cellule s'effectuant à l'aide du prolongateur ⑥ terminé par une petite bille d'acier. Le découplage des efforts de traction F_{zz} et torsion $F_{z\theta}$ est réalisé en amont de la cellule de torsion à l'aide d'une butée double à billes ⑦. Le mors ④, rectifié, est guidé suivant l'axe zz , de manière à supprimer les effets de flexion, par une douille à billes double mouvement ⑧, elle-même centrée par rapport à la partie supérieure du portique à l'aide du fourreau ⑨. L'ensemble est équipé d'un four ouvrant vertical type Adamel à régulation P.I.D. et permet de travailler de 200 à 900 °C. Celui-ci est solidaire de la traverse mobile du portique.

Fig. 3. — Représentation schématique du montage des deux cellules de force.

[Mounting of the two strength cells.]

2.4 ASSERVISSEMENT ÉLECTRONIQUE DU DISPOSITIF.

— Il ne se pose pas de problème pour les essais à vitesses linéaires constantes puisque, d'une part la machine de départ est prévue à cet effet ($dl/dt = Cte$), et que d'autre part, le moteur commandant la torsion est asservi en vitesse ($d\theta/dt = Cte$). On enregistre donc les forces, d'où les contraintes, correspondant aux vitesses imposées.

Par contre, il est plus difficile de réaliser des essais de fluage, c'est-à-dire d'imposer des contraintes σ_{zz} et $\tau_{z\theta}$ constantes et de mesurer les vitesses $\dot{\epsilon}_{zz}$ et $\dot{\gamma}$ qui en résultent. Pour ce faire, nous avons imaginé un système de cyclage entre forces, de faible amplitude et hystérésis, selon les deux composantes F_{zz} et $F_{z\theta}$. Celui-ci est réalisé à l'aide de deux boîtiers de seuils qui pilotent les relais d'inversion des commandes de mouvement et dont les valeurs limites supérieure et inférieure sont ajustables. Compte tenu de l'hystérésis, de l'inertie des commandes et des organes de transmission, on arrive à optimiser les amplitudes de cyclage à $\pm 0,3$ kg, ce qui pour une force de 20 kg, par exemple, représente une oscillation de $\pm 1,5\%$ à 0,9 Hz. Evidemment, ce pourcentage est fonction de la charge nominale.

Notons que ce système non asservi et pour un état de contrainte uniaxial (σ_{zz}) a déjà donné de nombreux résultats positifs tant en fluage qu'en relaxation [8, 9].

Les lois d'asservissement des forces en fonction de la longueur de l'éprouvette sont données par (19) et (20). Pour la loi (19), on réalise à l'aide d'un circuit *Multiplieur* le produit des tensions délivrées, d'une part, par un potentiomètre qui mesure l'allongement de l'échantillon et d'autre part, le signal redressé sortant de la cellule ① (F_{zz}). La tension obtenue est ensuite comparée à la valeur maximum affichée en début d'essai au détecteur de seuil et qui correspond à $F_{zz0} l_0 = Cte$. Ainsi, lorsque l croît, F_{zz} décroît de façon à obtenir le produit constant; la loi (20) est réalisée selon le même principe, mais compte tenu de la technologie du circuit intégré réalisant la fonction puissance, on effectue directement le produit $F_{z\theta}(L/L_0)^{3/2}$ et on le compare à la valeur maximum $F_{z\theta0}$ fixée sur l'autre boîtier de seuil. Comme précédemment, lorsque l croît, le couple diminue selon (20). Les fonctions réalisées ont été testées sur tables et approchent les lois réelles à 0,5 % près.

Les différentes grandeurs l , θ , F_{zz} , $F_{z\theta}$, la température T et la vérification d'un des produits, sont simultanément obtenues sur un enregistreur rapide six voies. Ainsi, les contraintes σ_{zz0} et $\tau_{z\theta0}$ sont calculables à partir des relations (7) et (8), lorsque $\dot{\epsilon}_{zz}$ et $\dot{\gamma}$ ont été mesurées.

Un schéma synoptique de ce montage est donné sur la figure 4.

Un autre intérêt de ce montage est qu'il permet de réaliser des essais de relaxation consécutifs à des tests de fluage. Ce procédé permet de fixer les niveaux de contraintes initiales de la relaxation, contrairement aux essais classiques où la relaxation est précédée

Fig. 4. — Synoptique de l'asservissement électronique de l'ensemble permettant d'assurer σ_{zz} et $\tau_{z\theta}$ constantes.

[Block diagram of the stress control system (σ_{zz} and $\tau_{z\theta}$ constants).]

par un essai de traction classique et où les contraintes initiales sont fixées par la température et les vitesses de déformation imposées [8, 9].

Notons de plus qu'il est possible de faire d'une manière discrète des incréments ou des décréments de contraintes en changeant simplement la valeur de la force correspondant à la pleine échelle, d'où la possibilité de l'étude des phénomènes transitoires.

3. Présentation de quelques résultats. — Nous donnons quelques résultats, relatifs au laiton β UZ48, obtenu à l'aide de ce dispositif. Ce matériau a été choisi, d'une part, parce qu'il a été testé au laboratoire [10] sur d'autres machines uniaxiales classiques [11] et d'autre part, parce qu'il présente un faible écrouissage cinématique, ce qui permet par conséquent d'utiliser, dans un premier temps, les lois d'écoulement classiques (type Von Misès) sans tenir compte des contraintes internes (solide de Prager), conformément aux eq. (4).

Sur la figure 5, on représente $\ln \dot{\epsilon}_s = f(\ln \bar{\sigma}/G)_T$ pour deux isothermes et différents modes de sollicitation. $\dot{\epsilon}_s$ est la vitesse stationnaire généralisée donnée par

$$\dot{\epsilon}_s = \left[\frac{2}{3} \sum_i \sum_j \dot{\epsilon}_{ij} \right]^{1/2} \quad (21)$$

et $\bar{\sigma}/G$ la contrainte réduite généralisée, c'est-à-dire la contrainte généralisée,

$$\bar{\sigma} = \frac{\sqrt{2}}{2} [\sum (\sigma_i - \sigma_{IV})]^{1/2} \quad (22)$$

Fig. 5. — Exemple de résultats obtenus sur le laiton β pour différents modes de sollicitation. Détermination du coefficient n .

[Example of results obtained on β brass for various sollicitations. Determination of the n coefficient.]

divisée par le module de Coulomb G . Dans le cas de la traction-torsion, (21) s'écrit

$$\dot{\epsilon}_s = \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{3 \epsilon_{zz}^2 + \gamma^2}$$

Fig. 6. — Présentation du dépouillement d'un essai de relaxation biaxiale, détermination de n .

[Analysis of a biaxial relaxation test. Measurement of n .]

et (22) est identique à (5). Quel que soit le type de sollicitation, tous les points s'alignent sur une même droite, identique à celle obtenue en fluage uniaxial, ce qui conduit à une valeur de $n = (\partial \ln \dot{\epsilon}_s / \partial \ln (\bar{\sigma}/G))_T$ de l'ordre de 3,5.

La figure 6 donne un exemple de résultat obtenu lors d'un essai de relaxation biaxiale. Dans le cadre

du modèle viscoélastique, la déformation plastique relaxe la déformation élastique et conformément aux équ. (4), les représentations :

$$\ln - \frac{\dot{\sigma}_{zz}}{\sigma_{zz}} = f(\ln \bar{\sigma}) \quad \text{et} \quad \ln - \frac{\dot{\tau}_{z\theta}}{\tau_{z\theta}} = f(\ln \bar{\sigma})$$

conduisent à l'exposant $(n - 1)$ ou $\left(\frac{n - 1}{2}\right)$ si l'on prend $f(\ln \bar{\sigma}^2)$. On obtient $n \simeq 3,5$, valeur en accord avec celle obtenue précédemment. De plus, si l'on prend $E \simeq 2 G(1 + \nu) \simeq 2,5 G$, les deux courbes doivent être traduites l'une par rapport à l'autre de 0,18 unité, ce qui se vérifie sensiblement sur la figure 6.

A l'aide de ces deux exemples, nous avons montré que cet appareillage permet d'étudier de manière satisfaisante le comportement rhéologique à haute température des matériaux soumis à différentes sollicitations biaxiales. L'étude de matériaux présentant un fort écrouissage cinématique, est présentement en cours, à l'aide de ce dispositif. (Mise en évidence des composantes σ_{zz1} et $\tau_{z\theta1}$ du tenseur des contraintes internes $\bar{\sigma}_i$ à l'aide d'essais transitoires en fluage et relaxation.)

Acknowledgments. — Nous tenons à remercier Messieurs Cosme, Myotte et Burtheret, techniciens, pour leur participation à la réalisation et à la mise au point de cet appareillage.

Bibliographie

- [1] PHILLIPS, A., *The foundations of plasticity* ICMS, Udine 1974.
- [2] POIRIER, J. P., *Acta Metall.* **25** (1977) 913.
- [3] OYTANA, C., DELOBELLE, P., MERMET, A., *J. Mater. Sci.* **14** (1979) 549.
- [4] OYTANA, C., MERMET, A., DELOBELLE, P., *Biaxial Stress Change Experiments during high temperature creep* ICM 3, Cambridge, 20-24 août 1979.
- [5] HILL, R., *The mathematical theory of plasticity* (1964), Oxford University Press, London.
- [6] BIRD, J. E., MUKHERJEE, A. K., DORN, J. E., Israël University Press july 1969, 255.
- [7] HAYDEN, H. W., FLOREEN, S., GOODELL, P. D., *Metall. Trans.* **3** (1972) 833.
- [8] BORNIER, L., DELOBELLE, P., OYTANA, C., *Mater. Sci. Eng.* **34** (1978) 13.
- [9] VARCHON, D., OYTANA, C., DELOBELLE, P., *Phys. Status Solidi* **47 a** (1978) 259.
- [10] DELOBELLE, P., DRUOT, P., MERMET, A., OYTANA, C., *Rev. Phys. Appl.* **13** (1978) 867.
- [11] OYTANA, C., DELOBELLE, P., VARCHON, D., *Rev. Phys. Appl.* **11** (1976) 159.