



HAL
open science

Dynamic Behavior of Metals to Magnetic Field Pulses

M. Leroy, C. Nicolazo, P. Louvigné, T. Thomas

► **To cite this version:**

M. Leroy, C. Nicolazo, P. Louvigné, T. Thomas. Dynamic Behavior of Metals to Magnetic Field Pulses. Journal de Physique IV Proceedings, 1997, 07 (C3), pp.C3-121-C3-126. 10.1051/jp4:1997323 . jpa-00255480

HAL Id: jpa-00255480

<https://hal.science/jpa-00255480v1>

Submitted on 4 Feb 2008

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.

Dynamic Behavior of Metals to Magnetic Field Pulses

M. Leroy, C. Nicolazo, P.F. Louvigné* and T. Thomas*

Institut Universitaire de Technologie de Nantes, 3 rue du Maréchal Joffre, BP. 34103, 44041 Nantes cedex 1, France

**DGA/DCE, Centre de Recherches et d'Études d'Arcueil, 16 bis avenue Prieur de la Côte d'Or, 94114 Arcueil, France*

Abstract. Mono and/or polycrystalline ring-shaped specimens are submitted to magnetic induction of several Teslas in a field concentrator. In this conditions biaxial stresses are induced inside the specimen, due to radial compression, and lead to the dynamic deformation of metal at strain rates of about 10^3 s^{-1} to 10^4 s^{-1} and for plastic deformation up to 40%. The test ring geometry allows to get stress and strain states involved and, in particular, to deform the monocrystal (111) in shearing according to $\langle 110 \rangle$. During the magnetic impulsion period, the evolution of deformation has been observed with a high speed camera and then the paths of stress and strain states have been plotted for different field intensities. We compare those paths and energy levels of CFC copper mono and polycrystals with aluminum.

Résumé. Nous soumettons, dans un concentrateur de champ, des mono et/ou polycristaux annulaires plans à des inductions magnétiques de quelques Teslas. La compression radiale induit des contraintes biaxiales avec une déformation dynamique de 40% à une vitesse de déformation moyenne de 10^4 s^{-1} . Nous étudions l'évolution de la déformation notamment pour des monocristaux (111) en cisaillement selon $\langle 110 \rangle$. Durant la première impulsion nous observons par caméra ultra-rapide les échantillons de métaux CFC de cuivres et d'aluminium. Les déformations biaxiales sont présentées et un comparatif est établi entre les valeurs de seuils d'écoulement plastique.

1. INTRODUCTION

L'objectif de cette étude est l'analyse du comportement à grande vitesse et à fort taux de déformation de métaux soumis à l'action de champs magnétiques intenses et pulsés. Les pressions électromagnétiques développées dans l'échantillon testé engendrent des chocs intenses sans contact mécanique dont on analyse l'effet sur les matériaux. Les essais ont été menés sur des échantillons annulaires [1 à 7] en cuivre et en aluminium. Deux types d'échantillons en cuivre et en aluminium ont été testés : mono et polycristallins. L'observation par caméra rapide des échantillons durant leur déformation a permis d'évaluer les vitesses de déformation subies ainsi que l'état de déformation dans le plan de l'anneau.

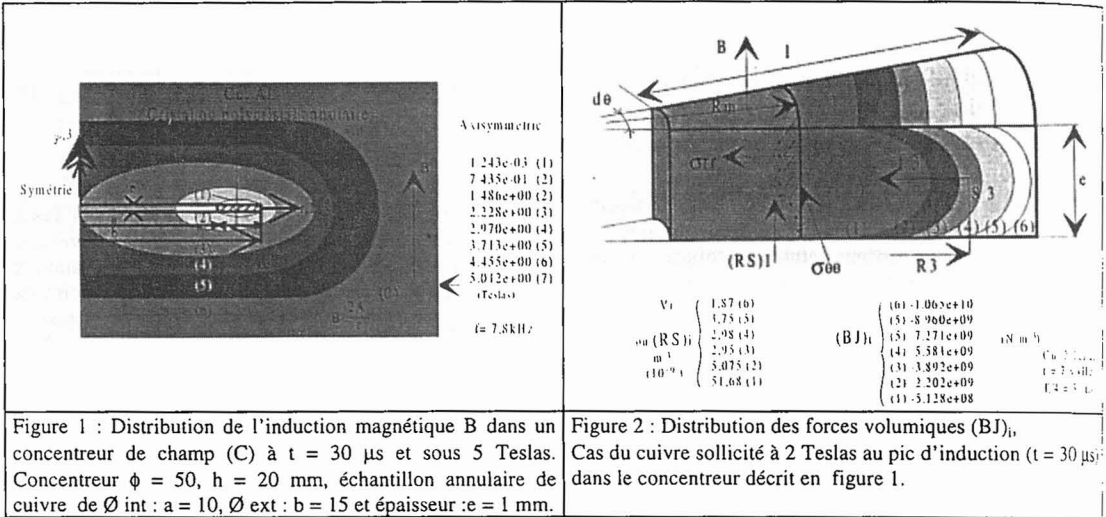
2. EXPERIMENTATION

Des impulsions d'induction magnétique B sont obtenues par décharge de capacités dans une bobine à haute résistance mécanique. Cette bobine est munie d'un concentrateur de champ de diamètre utile ϕ et de hauteur h. Des échantillons plans annulaires d'axe de révolution z subissent un chargement radial. L'observation de la déformation s'effectue par caméra ultra-rapide. Les images obtenus sont synchronisées avec les enregistrements des intensités de courant de bobine et ceux de l'induction dans le concentrateur. La détermination des distributions de densités de courants induits $J(\text{Am}^{-2})$, des forces volumiques (Nm^{-3}), est faite par éléments finis à l'aide du code axisymétrique ANSOFT. Les métaux qui ont été étudiés sont :

- des polycristaux d'aluminium 1050AH24 écroui (conductivité électrique $\gamma = 3.6 \cdot 10^7 \text{ } \Omega^{-1}\text{m}^{-1}$, limite d'élasticité statique $\sigma_E = 114 \text{ MPa}$)
- des polycristaux de cuivre recuit et écroui, CuA_1 ($\gamma = 5.8 \cdot 10^7 \text{ } \Omega^{-1}\text{m}^{-1}$, $\sigma_E = 88.7$ et 261 MPa)
- des monocristaux d'aluminium d'axes z $\langle 100 \rangle$, $\langle 110 \rangle$, $\langle 111 \rangle$ et de cuivre $\langle 111 \rangle$ de capacités thermiques massique respectives $C_{p\text{Cu}} = 385$ et $C_{p\text{Al}} = 890 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$.

3. CARACTERISATION DES CHOCS D'INDUCTION MAGNETIQUE

3.1 Caractéristiques électromagnétiques de la sollicitation



Pour connaître l'histoire de la sollicitation en contraintes subie par l'échantillon, il est nécessaire d'évaluer la distribution du champ magnétique à l'intérieur du concentrateur en présence de l'échantillon. Les calculs ont été menés dans la gamme de fréquences (4 à 16 Hz) [8, 9], pour une induction jusqu'à 5 Teslas. Les figures 1 et 2 présentent les résultats d'un calcul mené sur une éprouvette annulaire de cuivre (φ_{int}=20mm, φ_{ext}=30mm, e=1mm) pour un pulse magnétique d'amplitude B=5 Teslas et une durée de 60μs. Sur ces figures, on montre que la distribution de densité de courant varie de 10¹⁰ à 2.7 10¹⁰ Am⁻² alors que la même sollicitation sur de l'aluminium amène à une variation de 0.7 10¹⁰ à 1.7 10¹⁰ Am⁻². Pour les conditions d'essais des figures 1 et 2, la distribution des forces volumiques varie de 3.2 10⁹ à 6.6 10¹⁰ Nm⁻³ tandis que pour l'aluminium nous avons 2 10⁹ à 4.2 10¹⁰ Nm⁻³.

Le courant I induit dans la section (5*1 mm²) de l'éprouvette annulaire est important. Il varie de 30 à 75 kA pour le cuivre et 19 à 47 kA pour l'aluminium pour une induction variant de 2 à 5 Teslas et une durée d'impulsion de 60 μs (soit f=7800 Hz).

La puissance W permet d'évaluer l'élévation moyenne de la température due au courant induit dans l'échantillon au temps 30μs (maximum de l'induction). Les résultats présentés dans le tableau 1 montrent que cette élévation de température peut être négligée durant l'analyse mécanique des essais. Ceci a été confirmé par une analyse post-mortem.

tableau 1 : valeurs à T/4 des courants induits $I = C_1 \gamma B f$ et des puissances $W = \frac{1}{2} \int_V \mathbf{J} \cdot \mathbf{J} \cdot dV \equiv C_2 \gamma B^2 f^2$ dissipées par

ces courants dans les échantillons annulaires de cuivre et d'aluminium (conductivité $\gamma_{Cu} = 5.8 \cdot 10^7 \Omega^{-1}m^{-1} = 1.61 \gamma_{Al}$) avec $C_1 = 0.332 \cdot 10^{-7}$, $C_2 = 0.133 \cdot 10^{-7}$, B (Teslas), f (kHz), $\gamma (\Omega^{-1}m^{-1})$

Fréquences (kHz)	Induction B(àT/4) (Tesla)	Cu		Al	
		I (kA)	W (kW)	I (kA)	W (kW)
4	2	15.44	49		
7.8	1	15.06	47	9.35	29
	2	30.11	188	18.7	117
	5	75.3	1180	47	731
16	2	61.8	920		

3.2 Distribution des contraintes induites par le choc magnétique

La simulation numérique permet de déduire des informations sur la distribution des produits $(BJ)_i$. L'examen des distributions de $(BJ)_i$ dans les sections S_i montre qu'à même valeur de R_i , S_i varie peu. Nous avons donc $(RS)_i = \text{constante}$ quelque soient B et à f d'où des forces $F_i/d\theta = (RS)_i(BJ)_i$ directement proportionnelles à $(BJ)_i$; à même distance R_i , $S_i \cong \text{constante}$ avec pour tous les domaines i : $(BJ)_i \cong C_i \gamma B^2 f$. La figure 2 présente des exemples de cartographies des forces volumiques $2AJ/r$ (Nm^{-3}) développées dans le cuivre et l'aluminium. A partir des surfaces S_i de distribution des forces volumiques $(BJ)_i$ situées respectivement à des distances moyennes R_i de l'axe des éprouvettes annulaires et, pour un angle $d\theta$, nous avons des forces F_i telles que : $F_i = R_i d\theta S_i(BJ)_i$. Compte tenu d'une durée voisine de $1\mu\text{s}$ de parcours des ondes de compression pour $l=5\text{mm}$, nous effectuons une sommation des forces F_i au rayon moyen R_m et en tenant compte de la géométrie de l'échantillon :

$$\sigma_r = \sigma_1 = \frac{\sum_i (RSBJ)_i}{R_{me}} \quad \text{et} \quad \sigma_{\theta\theta} = \sigma_2 = \frac{\sum_i (RSBJ)_i}{l_e} = K\sigma_r \quad \text{avec} \quad K = \frac{R_m}{l}$$

La figure 2 montre, pour une induction $B=2$ Teslas (à $t=T/4=30\mu\text{s}$) les domaines $(RS)_i$ et les valeurs $(BJ)_i$ effectuées aux domaines i pour le concentrateur figure 1. Les valeurs déduites C_i avec $\gamma = 5.8 \cdot 10^7 \Omega^{-1}\text{m}^{-1}$, $f=7.8$ kHz et $B=2\text{T}$ valent respectivement $C_1=0.2834$, $C_2=4.29C_1$, $C_3=7.59C_1$, $C_4=10.88 C_1$, $C_5=15.82 C_1$, $C_6=20.76 C_1$. Nous pouvons en déduire la force radiale F : $F = \sum_i (RSBJ)_i = 64.15 \cdot 10^{-9} \gamma B^2 f$ (1) et la contrainte équivalente $\bar{\sigma}$ au premier pic d'induction B pour $t=T/4=30\mu\text{s}$:

$$\bar{\sigma} \cong \frac{\alpha}{R_{me}} (1 - K + K^2)^{1/2} \gamma B^2 f \quad (\text{Mpa}) \quad (2)$$

avec $\alpha = 64.15 \cdot 10^{-9}$ pour B (Tesla), f (kHz), γ ($\Omega^{-1}\text{m}^{-1}$), R_m et e en mm, $K = R_m/l$ et pour des fréquences comprises entre 5 et 15 kHz; concentrateur : $\phi = 50$ mm, $h = 20$ mm ; échantillon : $a = 10$, $b = 15$, $e = 1$ mm.

3.3 Tenseurs des contraintes

Pour nos géométries d'échantillons $K(t) \cong 2$ (de 2.8 à 1.7 en $20 \mu\text{s}$) et avec $\sum_i (RSBJ)_i$ à R_m :

$$[\sigma]_{(t)} \cong \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 = K\sigma_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_1 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_1 & 0 \\ 0 & 0 & -\sigma_1 \end{bmatrix}$$

4. DEFORMATION PLASTIQUE

Les figures 3 à 6 montrent les courbes expérimentales des déformations et leur évolution pour des chocs d'induction $B(t) = B_e^{-\frac{t}{\tau}} \sin \omega t$ avec $\tau = 2 \cdot 10^{-4}$ s. Par des chocs d'intensités variables, nous obtenons les inductions B_0 de seuil d'écoulement plastique (figure 7) et les contraintes $\bar{\sigma}_0$ en résultant par (2). Avec le même critère, ces seuils sont comparés à ceux en statique sous pression $p = \sigma_1$ appliquée en $r = b$; $\sigma_E = \bar{\sigma}_{ost} = (\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1 \sigma_2)^{1/2} = \sigma_1 b^2 [1 + 3a^4 / r^4]^{1/2} / (b^2 - a^2)$ avec pour une plasticité globale de seuil $\bar{\sigma}_{ost} = \sigma_1 [b^4 + 3a^4]^{1/2} / (b^2 - a^2) \cong 2.27 \sigma_1$. Nous obtenons des rapports $\bar{\sigma}_0 / \bar{\sigma}_{ost} = 0.29 \text{ Cu}_R$, 0.20 Cu_E , 0.13 Al1050 . Valeurs non explicables par l'échauffement dans $V \cong 400\text{mm}^3$ pour W dissipé durant $t \cong T/2 = 60\mu\text{s}$. Pour des inductions $B \geq 2B_0$ de seuil, les vitesses de déformation sont constantes et, aux environs de 4 teslas, nous obtenons $\dot{\epsilon} = C^{te} \cong 10^4 \text{s}^{-1}$ pendant une durée totale de déformation de $30\mu\text{s}$ (figure 6). Pour les polycristaux, le rapport des déformations est voisin de celui des contraintes de valeur K (figure 4 et 6).

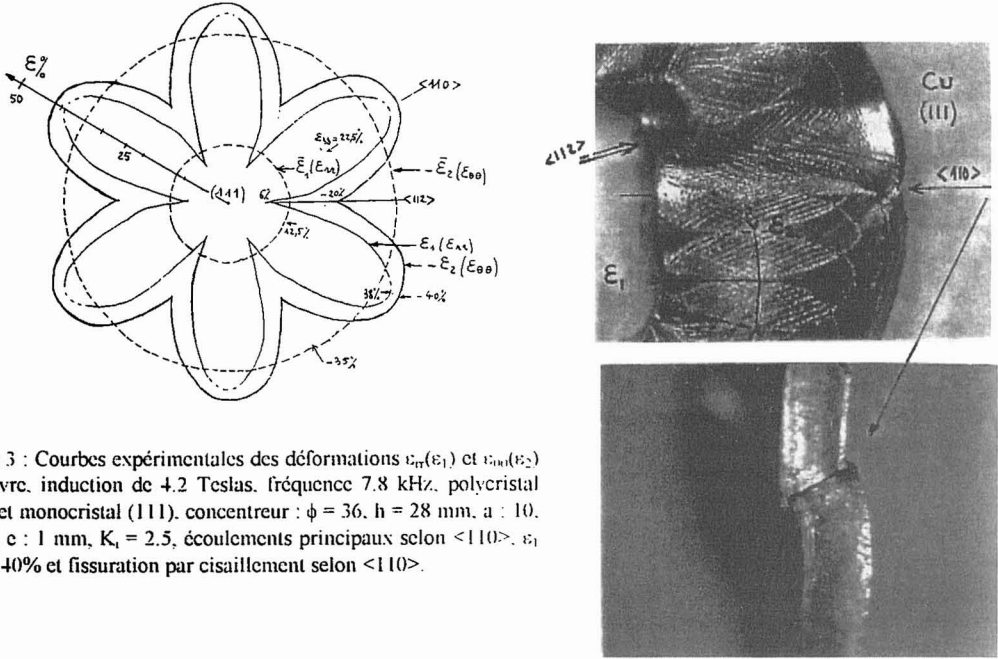
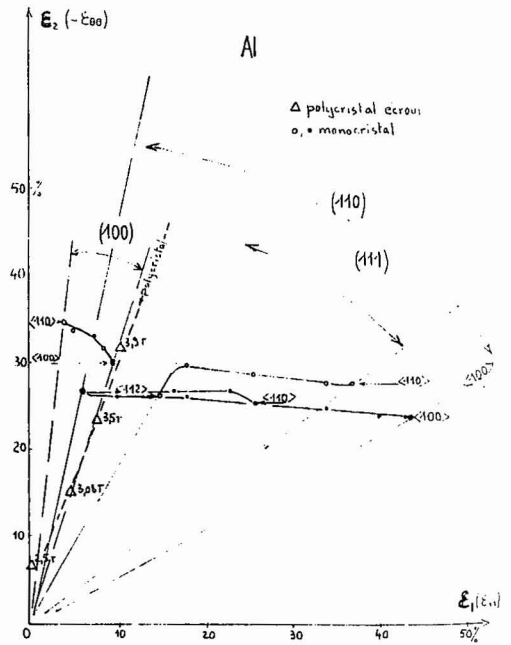


Figure 3 : Courbes expérimentales des déformations $\epsilon_{11}(\epsilon_1)$ et $\epsilon_{22}(\epsilon_2)$ du cuivre, induction de 4.2 Teslas, fréquence 7.8 kHz, polycristal recuit et monocristal (111), concentré : $\phi = 36$, $h = 28$ mm, $a : 10$, $b : 15$, $c : 1$ mm, $K_1 = 2.5$, écoulements principaux selon $\langle 110 \rangle$, $\epsilon_1 = \epsilon_2 = 40\%$ et fissuration par cisaillement selon $\langle 110 \rangle$.

Figure 4 : Anisotropie des déformations ϵ_1 et ϵ_2 de cristaux d'aluminium (100), (110) et (111), chocs à 4.7 Teslas avec $K_1 = 2.83$. Déformations de polycristaux d'aluminium 1050 AH24 écroui sous chocs d'inductions variables avec $K_1 = 2.5$.



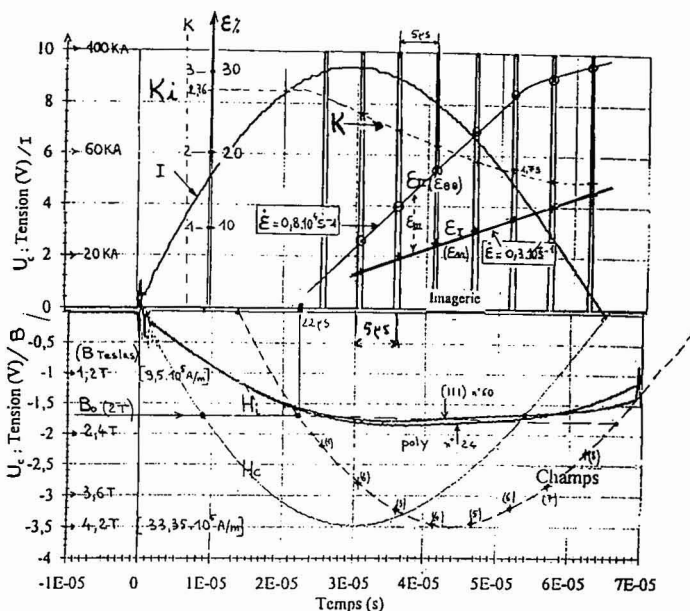


Figure 5 : Imagerie de la déformation dynamique, cas du cuivre polycristallin recuit sollicité à 4.2 Teslas ; H_z : induction dans le concentrateur, fréquences 7.8 kHz ; concentrateur $\phi = 36$ et $h = 28$ mm, $K_i = 2.76$.

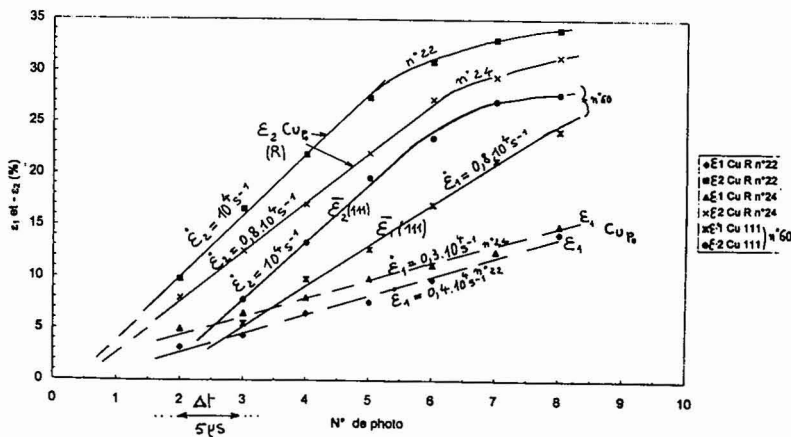


Figure 6 : Evolution des déformations ϵ_1 et ϵ_2 de Cu polycristallin recuit et monocristallin $\langle 111 \rangle$ en fonction du n° de photo. Choc de 4.2 Teslas ; 7.8 kHz ; durée de la déformation d'environ 30 μs ; $\dot{\epsilon} \cong 10^4 s^{-1}$; $K_{i\text{poly}} = 2.76$; $K_{i\text{mono}} = 2.5$.

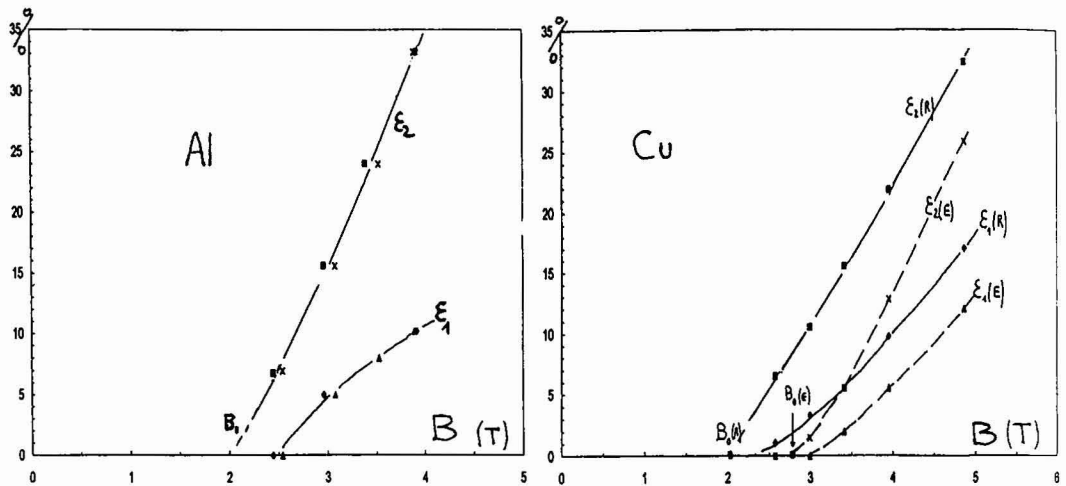


Figure 7 : Déformations ϵ_1 et ϵ_2 selon les pics d'induction B et valeurs des seuils B_0 d'écoulement plastique. Concentreur $\phi = 36$, $h = 28$ avec $\alpha = 76 \cdot 10^{-9}$. Puissance W_0 à $t = 30 \mu s$. Cas de Al 1050 AH24 écroui : $K_1 = 2.5$, $B_0 = 2T$, $W_0 = 160 \text{ kW}$ et $\bar{\sigma}_0 = 15 \text{ MPa}$. Cas de Cu, $K_1 = 2.76$ et pour recuit (R) $B_0 = 2T$, $W_0 = 260 \text{ kW}$ et $\bar{\sigma}_0 = 27 \text{ MPa}$; écroui (E), $B_0 = 2.9T$, $W_0 = 550 \text{ kW}$ et $\bar{\sigma}_0 = 56.5 \text{ MPa}$.

5. CONCLUSION

La méthodologie présentée a permis l'étude de la rhéologie dynamique de mono et polycristaux en sollicitations biaxiales. L'instrumentation par caméra ultra-rapide donne l'histoire de la déformation dynamique de l'échantillon et permet de comparer les cinétiques d'écoulement plastique. Nous constatons pour le cuivre et l'aluminium des contraintes équivalentes de seuil d'écoulement plastique très inférieures à celles en statique. Dès que l'échantillon est mis en vitesse par l'effet de la pression magnétique, la vitesse de déformation est constante et fonction du champ magnétique appliqué. Les conditions de chargement biaxiales due à la géométrie annulaire des échantillons permet d'étudier les cartographies des écoulements plastique notamment dans le cas des monocristaux.

Remerciements.

Les auteurs remercient J. Clisson et P. Longère (DGA/DCE/CREA, Paris), C. Bergmann et J.C. Pascual (IUT, Université de Nantes), D. Priem et D. Le Breton (ECN, Nantes).

Références

- [1] Leroy M., C.R. Acad. Sc. Paris, t.270, série C (9 mars 1970) p899-902.
- [2] Leroy M., Offret S., C.R. Acad. Sc. Paris, série C (27 oct 1971) p29 (1972).
- [3] Chiem C.Y., Renaud J.Y., Leroy M., C.R. Acad. Sc. Paris, t.280, série B (1975) p279.
- [4] Chiem C.Y., Leroy M., C.R. Acad. Sc. Paris, t.282, série C (1976) p323-326.
- [5] Pouliquen F., Chiem C.Y., Leroy M., C.R. Acad. Sc. Paris, t.282, série B (1976) p235-238.
- [6] Leroy M., thèses docteur ingénieur (1970) et docteur ès-sciences physiques (1972) ; Viscoplasticité des métaux, application au formage magnétique, Ref. CNRS AO-76 59, ENSM Univ. Nantes, France.
- [7] Chiem C.Y., thèse docteur ingénieur(1976); Ref CNRS AO-12247, Univ. Nantes, France.
- [8] Revue : Technique de l'ingénieur, travail des métaux aux grandes vitesses de déformation, M708, Formage magnétique et électrohydraulique.
- [9] Electra, Induction, conduction électrique dans l'industrie, (CFE. Dopee 85, Espace Elec CNIT, Paris, 1996),Chap 7.