

**RELATION ENTRE L'IRRÉVERSIBILITÉ DES  
CYCLES ATTÉNUATION-CONTRAÎNTE  
QUASI-STATIQUE ET LE FROTTEMENT  
INTÉRIEUR BASSE FRÉQUENCE ASSOCIÉ AU  
DÉSANCORAGE DES DISLOCATIONS**

M. Omri, A. Vincent

► **To cite this version:**

M. Omri, A. Vincent. RELATION ENTRE L'IRRÉVERSIBILITÉ DES CYCLES ATTÉNUATION-CONTRAÎNTE QUASI-STATIQUE ET LE FROTTEMENT INTÉRIEUR BASSE FRÉQUENCE ASSOCIÉ AU DÉSANCORAGE DES DISLOCATIONS. Journal de Physique Colloques, 1983, 44 (C9), pp.C9-575-C9-580. <10.1051/jphyscol:1983985>. <jpa-00223435>

**HAL Id: jpa-00223435**

**<https://hal.archives-ouvertes.fr/jpa-00223435>**

Submitted on 1 Jan 1983

**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.

## RELATION ENTRE L'IRRÉVERSIBILITÉ DES CYCLES ATTÉNUATION-CONTRAINTÉ QUASI-STATIQUE ET LE FROTTEMENT INTÉRIEUR BASSE FRÉQUENCE ASSOCIÉ AU DÉSANCRAGE DES DISLOCATIONS

M. Omri et A. Vincent\*

*Groupe d'Etudes de Métallurgie Physique et de Physique des Matériaux<sup>†</sup>,  
\*Laboratoire de Traitement du Signal et d'Ultrasons,  
I.N.S.A., Bât. 502, 69621 Villeurbanne Cedex, France*

**Résumé** - Dans ce travail, nous proposons une méthode permettant de comparer quantitativement l'hystérésis des cycles atténuation contrainte quasi statique et le frottement intérieur basse fréquence associé au désancrage des dislocations. Ce calcul est appliqué au cas du désancrage dislocations-défauts ponctuels extrinsèques dans un aluminium de pureté 5N. L'hystérésis vue par ondes ultrasonores et la relaxation observée au pendule de torsion apparaissent comme deux manifestations du même phénomène ce qui confirme l'hypothèse du désancrage proposée dans des travaux antérieurs.

**Abstract** - In this paper a quantitative analysis of the hysteresis in attenuation versus bias stress cycles is propounded : this calculus is applied to the effect ascribed to dislocation-impurity breakaway in aluminium of purity 5N ; the results are compared to torsion pendulum measurements done on the same material. This comparison demonstrates that the hysteresis observed by ultrasonic waves and the internal friction measured by the pendulum are two appearances of the same mechanism : this conclusion allows us to confirm the breakaway hypothesis treated in previous works.

### I - INTRODUCTION

Le frottement intérieur basse fréquence est généralement mesuré avec un pendule de torsion ; les pics observés dans les spectres relevés en fonction de la température  $\delta = f(T)$  et les variations en fonction de l'amplitude  $\delta = f(\epsilon)$  constituent les manifestations les plus utilisées afin de déterminer les mécanismes microscopiques qui les provoquent. Néanmoins, il est souvent difficile d'identifier parfaitement ces mécanismes microscopiques /1/ notamment parce que le coefficient  $\delta$  représente l'intégrale de la réponse contrainte-déformation  $\epsilon - \sigma$  de l'échantillon étudié. Ainsi, l'étude du comportement des pics et de l'anomalie de période associée, en fonction des paramètres expérimentaux, et la confrontation avec les modèles microscopiques constituent les seuls moyens complémentaires d'accéder au mécanisme responsable du phénomène.

Par ailleurs, depuis quelques années, les mesures de variation d'atténuation  $\Delta\alpha$  et de vitesse  $\Delta V/V$  des ondes ultrasonores effectuées en fonction de l'application d'une contrainte quasi statique (basse fréquence) ont permis une meilleure identification des mécanismes associés à la mobilité des dislocations /2,3/ : en effet les courbes  $\Delta\alpha = f(\sigma)$  représentent un équivalent des lois  $\epsilon = f(\sigma)$  auxquelles on ne peut accéder que difficilement ; ainsi la corrélation entre ces mesures ultrasonores et les mesures basses fréquences (réalisées sur pendule de torsion) a permis de préciser ou de confirmer les mécanismes mis en jeu.

Le but de cet article est de montrer que dans le cas du désancrage des dislocations un coefficient de frottement intérieur basse fréquence peut être obtenu à partir des mesures ultrasonores et conduire ainsi à une comparaison quantitative avec les mesures réalisées au pendule.

<sup>†</sup>Laboratoire associé au C.N.R.S

## II - RESULTATS EXPERIMENTAUX

L'appareillage utilisé pour la mesure de  $\Delta\alpha$  et  $\Delta V/V$  a été décrit par ailleurs /4/. Rappelons qu'il utilise un microordinateur permettant de moyenniser les signaux correspondant à plusieurs trains d'onde (8 dans les résultats présentés) ainsi que de tracer et traiter directement les courbes  $\Delta\alpha$  et  $\Delta V/V = f(\sigma)$ . La fréquence des ondes ultrasonores est de 16 Mhz. Nous avons travaillé sur un aluminium de pureté 5N recristallisé avec des grains de l'ordre de 0,5 mm de diamètre. Après déformation de 2,4% à la température ambiante, l'échantillon est soumis à différentes conditions de vieillissement jusqu'à 370 K ; ensuite il est refroidi dans le domaine 100-200 K et il est alors sollicité en traction suivant la loi  $\sigma(t)$  représenté figure 1.

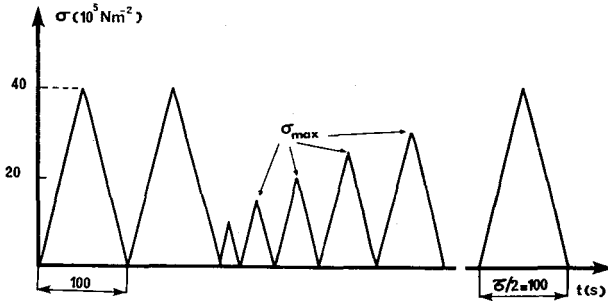


Figure 1 - Cycles successifs  $\sigma(t)$  mis en oeuvre lors des études  $\Delta\alpha = f(\sigma)$  à amplitude  $\sigma_{\max}$  croissante.

Les cycles  $\Delta\alpha = f(\sigma)$  ainsi obtenus à 120 K (par exemple) sont représentés figure 2 : avec le processus expérimental précisé précédemment, on observe des cycles  $\Delta\alpha = f(\sigma)$  parfaitement fermés à  $\sigma = 0$  ; par ailleurs, l'hystérésis à  $\sigma \neq 0$  est d'abord nulle pour les cycles d'amplitude inférieure à  $2,5 \cdot 10^5$  N/m<sup>2</sup>, puis elle apparaît progressivement pour devenir maximale pour les cycles d'amplitude 25 à  $35 \cdot 10^5$  N/m<sup>2</sup>. Un phénomène analogue est observé pour les cycles  $\Delta V/V = g(\sigma)$ .

D'autre part, la figure 3 fait apparaître l'effet du vieillissement sur les cycles  $\Delta\alpha = f(\sigma)$  : l'hystérésis est plus important après vieillissement à 370 K.

## III - CALCUL DU FROTTEMENT INTERIEUR BASSE FREQUENCE. RESULTATS

Les cycles  $\Delta\alpha = f(\sigma)$  et  $\Delta V/V = g(\sigma)$  observés sont caractéristiques du phénomène d'anélasticité associé au désancrage des dislocations /2/. Précisons, dès maintenant que le choix des conditions expérimentales a permis de tendre vers deux objectifs : travailler sur un mécanisme de désancrage pur et éviter une évolution de la micro-structure des dislocations lors des sollicitations successives ; en effet, d'une part dans le domaine 100-200 K on est assuré de l'immobilité des défauts ponctuels extrinsèques /5/ et d'autre part les sollicitations initiales à la contrainte maximale stabilisent les répartitions des dislocations qui étaient encore dans des positions instables après les traitements précédents. Un coefficient de frottement intérieur peut alors être calculé à partir de ces cycles, sur la base de cette hypothèse d'un mécanisme de désancrage.

Pour nos cycles ondulés (figure 1)  $\delta$  est défini par  $\delta = \Delta W/W$  où  $W$  est la densité maximale d'énergie élastique mise en jeu et  $\Delta W = \oint \sigma d\varepsilon$  représente la densité d'énergie dissipée c'est-à-dire du cycle  $\sigma - \varepsilon$ . Cette aire, ainsi que celle du cycle  $\Delta\alpha = f(\sigma)$  sont liées à la différence entre le nombre de dislocations désancrées à  $\sigma$  lorsque la contrainte est décroissante  $N_d(\sigma)$  et celui  $N_c(\sigma)$  lorsque la contrainte était croissante. La contribution de ces dislocations désancrées à l'allongement relatif  $\varepsilon$  de l'échantillon est :

$$\varepsilon = L_N^3 \cdot \sigma \cdot b^2 \cdot N(\sigma) \cdot f^2 / 12 \varphi$$

où  $L_N$  est la distance séparant les ancrages durs non désancrables,  $b$  la longueur du vecteur de Burgers,  $f$  le facteur de Schmid et  $\varphi$  la tension deligne. L'énergie dissipée peut alors s'écrire :

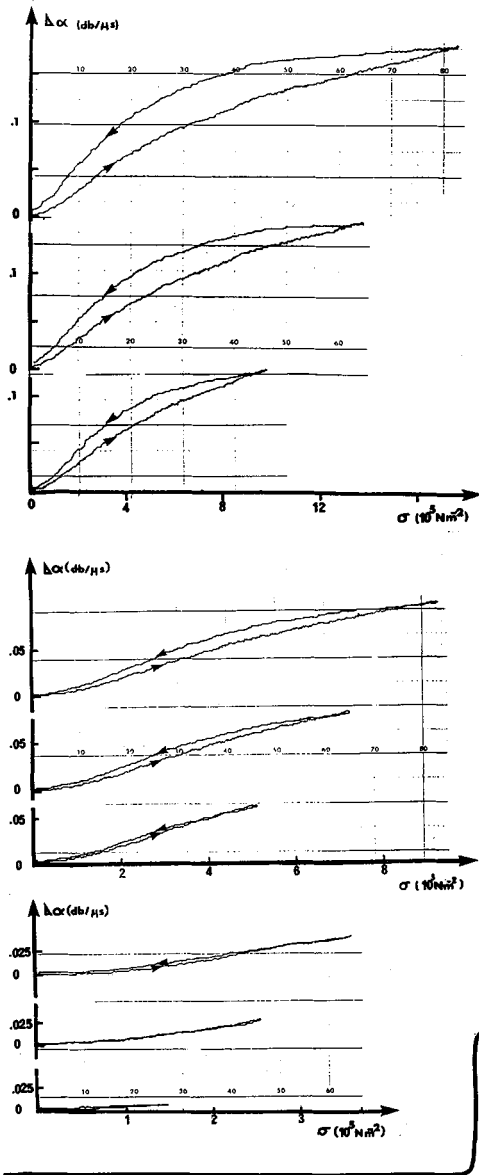


Figure 3 - Cycle  $\Delta\alpha = f(\sigma)$  à  $T = 120$  K et  $\sigma_{\max} = 9,3 \cdot 10^5$  N/m<sup>2</sup>  
 a : après déformation 2,4 % et vieillissement 15 h à l'ambiante.  
 b : après vieillissement 3 h à 370 K.

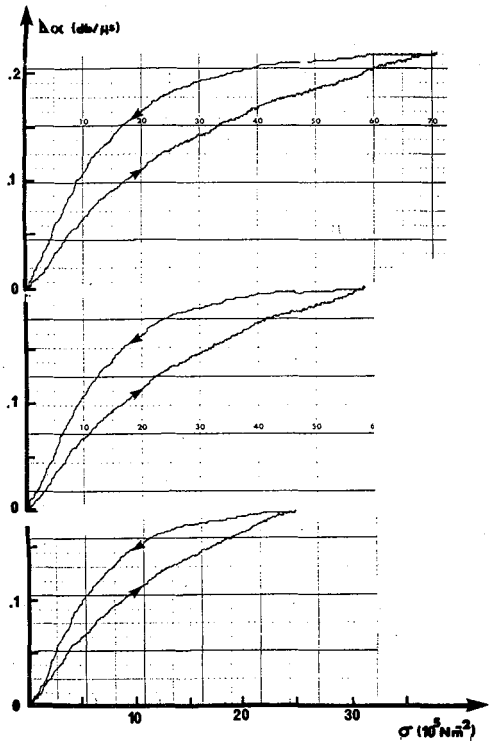
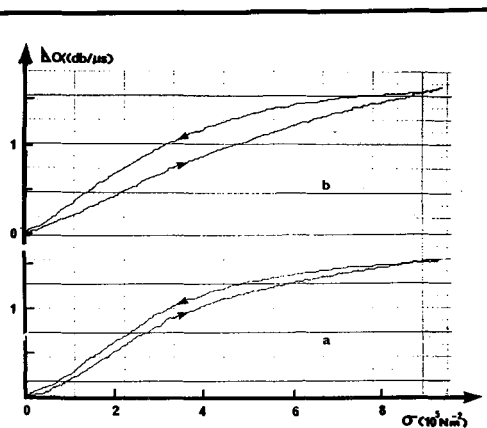


Figure 2 - Cycles  $\Delta\alpha = f(\sigma)$  pour  $1,5 \cdot 10^5 < \sigma_{\max} < 40 \cdot 10^5$  N/m<sup>2</sup>  $T = 120$  K après déformation de 2,4 % puis vieillissement 3 h à 370 K.



$$\Delta W = L_N^3 b^2 f^2 / (12 \mathcal{E}) \int_0^{\sigma_{\max.}} (N_d(\sigma) - N_c(\sigma)) \sigma \cdot d\sigma$$

Par ailleurs, il est possible de traiter les cycles  $\Delta\alpha = f(\sigma)$  en calculant une aire corrigée AC suivant la formule :

$$AC = (1 / (\Delta\alpha_{\max} \cdot \sigma_{\max}^2)) \cdot \int_0^{\sigma_{\max.}} ((\Delta\alpha_d - \Delta\alpha_c) \cdot \sigma \cdot d\sigma$$

En négligeant la contribution à l'atténuation des dislocations à l'état ancré devant celle à l'état désancré on a :

$$\Delta\alpha \approx K(\omega, T, L_N) \cdot N_d(\sigma)$$

$$\text{d'où} \quad (\Delta\alpha_d - \Delta\alpha_c) / \Delta\alpha_{\max.} = (N_d(\sigma) - N_c(\sigma)) / N_{\max.}$$

L'intégrale intervenant dans le calcul du frottement intérieur peut alors s'exprimer en fonction de AC :

$$\Delta W = AC \cdot L_N^3 \cdot b^2 \cdot f^2 \cdot N_{\max} \cdot \sigma_{\max} / 12 \mathcal{E}$$

Le produit  $N_{\max} \cdot L_N^3$  peut être obtenu à partir de la mesure de  $\Delta V/V$  : en négligeant la contribution à l'anomalie de vitesse des dislocations ancrées devant celle à l'état désancré, on peut écrire /6/

$$(\Delta V/V)_{\max} \approx \Omega \cdot 4 G b^2 q(\omega, L_N) \cdot N_{\max} \cdot L_N^3 / (\pi^4 \mathcal{E})$$

où  $\Omega$  est le facteur d'orientation pour les ondes ultrasonores, et  $q$  est de l'ordre de 1 dans le domaine basse et moyenne fréquence.

Avec  $W = \sigma_{\max}^2 / 2 E$  ( $E$  module d'Young) il vient finalement :

$$\delta = AC \cdot (\Delta V/V)_{\max} \cdot f^2 \pi^4 E / (\Omega 24 G q) \approx 12 \cdot AC \cdot (\Delta V/V)_{\max} \quad (\text{pour l'aluminium})$$

Les figures 4, 5 et 6 présentent les principales caractéristiques du frottement intérieur  $\delta$  ainsi calculé : la figure 4 montre que  $\delta(\sigma_{\max})$  est pratiquement nul en dessous du seuil  $\sigma_{\max} \approx 2,5 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$  et croît d'autant plus rapidement que le vieillissement est plus long et réalisé à température plus élevée.

La figure 5 présente, dans le cas du traitement à 370 K, l'effet de la vitesse de cyclage sur les résultats obtenus à haute amplitude : à vitesse lente (courbe a), il apparaît un maximum dans le spectre  $\delta(\sigma_{\max})$ , celui-ci est déplacé hors du domaine étudié pour la vitesse la plus élevée (courbe b : vitesse 10 fois plus rapide). Enfin la figure 6 montre l'augmentation de  $\delta$  observée avec  $T$  croissant dans le domaine 120-200 K (pour une amplitude  $\sigma_{\max} = 20 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$ ).

#### IV - DISCUSSION

Nos précédents travaux effectués dans ce domaine ont démontré que l'augmentation d'atténuation sous l'effet de la contrainte quasi statique était provoquée par le désancrage des dislocations à partir des défauts ponctuels d'origine extrinsèque ; de plus l'apparition de l'hystérésis des cycles  $\Delta\alpha = f(\sigma)$  a été associée à un désancrage s'effectuant hors d'équilibre thermodynamique lorsque le nombre de défauts ponctuels sur les dislocations augmente /2/. Par ailleurs le pic  $P_c$  et les maxima dans les spectres  $\delta(\epsilon)$  obtenus au pendule basse fréquence ont été attribués à ce même mécanisme notamment par PEREZ /7/. Nous proposons d'examiner les relations entre ces manifestations expérimentales attribuées à ce mécanisme de désancrage.

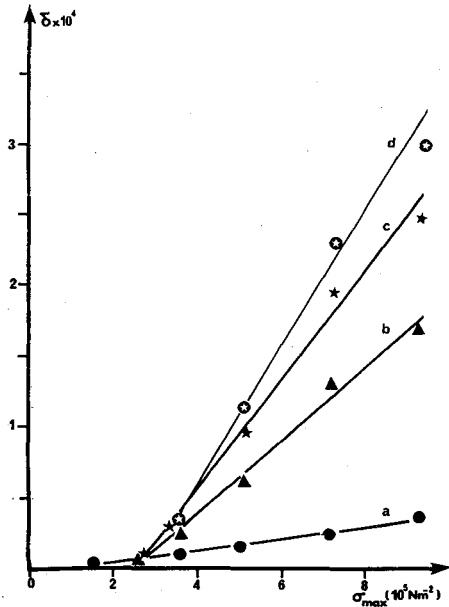


Figure 4 - Courbes  $\delta_{\text{calculé}} = f(\sigma_{\text{max}})$  à

$T = 120 \text{ K}$ .

a : après déformation plastique de 2,4% et un vieillissement d'1 h à l'ambiante.

b : + vieillissement de 25 h -

c : + " 3 h à 320 K

d : + " 3 h à 370 K

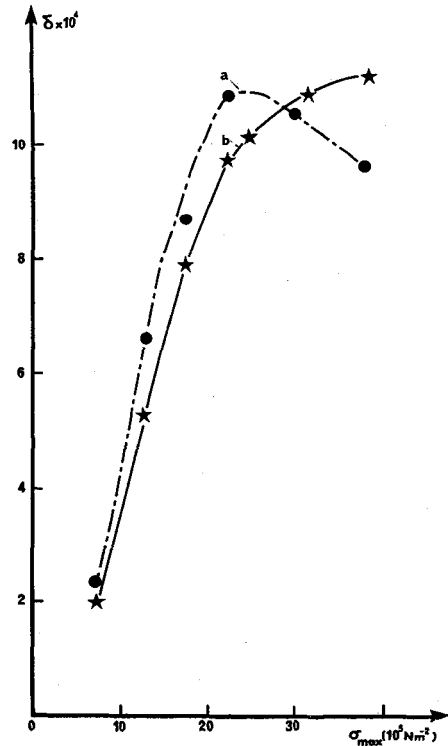


Figure 5 - Courbes  $\delta_{\text{calculé}} = f(\sigma_{\text{max}})$  à

$T = 200 \text{ K}$  après traitement à 370 K.

courbe a : vitesse lente ( $\tau/2 = 250 \text{ s}$  pour  $\sigma_{\text{max}} = 40 \cdot 10^5 \text{ N m}^{-2}$ )

courbe b : vitesse rapide : ( $\tau/2 = 25 \text{ s}$  pour  $\sigma_{\text{max}} = 40 \cdot 10^5 \text{ N m}^{-2}$ ).

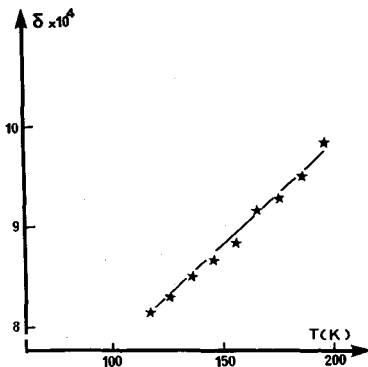


Figure 6 - Courbe  $\delta_{\text{calculé}} = f(T)$  pour

$\sigma_{\text{max}} = 20 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$

Niveau du frottement intérieur : le niveau de frottement intérieur dérivé de nos mesures ultrasonores apparaît sensiblement plus faible que celui obtenu directement au pendule basse fréquence /7/. Cette différence n'est pas fondamentale ; en effet elle peut s'expliquer à la fois par le mode de calcul de  $\delta$  où le facteur  $q$  (cf. paragraphe III) est probablement surestimé (l'approximation basse fréquence du modèle de la corde n'étant pas parfaitement vérifiée), et par des conditions expérimentales sensiblement différentes : en particulier la sollicitation triangulaire (figure 1) pourrait conduire à un frottement intérieur plus faible que la sollicitation sinusoïdale du pendule de torsion.

Effet du vieillissement : l'augmentation du niveau de frottement intérieur avec le temps et la température de vieillissement (figure 5) est analogue au phénomène

d'apparition du pic  $P_C$  observé au pendule ; en effet celui-ci présente l'amplitude la plus grande après vieillissement à 370 K.

Maximum de la courbe  $\delta(\sigma_{max})$  (figure 6) : lors d'un désancrage Lücke et al./8/ ont montré que le frottement intérieur est proportionnel à  $(\sigma_{Td}^2 - \sigma_{Tr}^2)/\sigma_{max}$  (où  $\sigma_{Td}$  est la contrainte de désancrage thermique et  $\sigma_{Tr}$  est la contrainte de réancrage thermique) ;  $\delta$  sera donc maximum lorsque  $\sigma_{max} \approx \sigma_{Td}$  : nous noterons  $\sigma_p$  l'amplitude  $\sigma_{max}$  satisfaisant cette condition. D'autre part,  $\sigma_{Td}$  est fonction des paramètres température T et période de sollicitation ;  $\sigma_{Td}$  sera atteint lorsque l'énergie d'activation du désancrage  $U'_d$  satisfait la condition :  $U'_d(\sigma) \approx k.T.Ln(v'_d \cdot \tau \cdot \theta)$  avec  $v'_d$  fréquence d'attaque pour le désancrage de l'ordre de 1011 Hz,  $\theta$  fraction de la période de mesure  $\tau$  qui est prise de l'ordre de 1/100 /7/. Par ailleurs, dans le cas d'un désancrage collectif  $U'_d$  peut s'écrire sous la forme /2,8/ :

$U'_d \approx (A/\sigma) + B$  (où A et B sont des constantes dépendant du matériau et de sa microstructure. Nous avons alors reporté sur la figure 7, dans le diagramme  $kT.Ln(v'_d \cdot \tau \cdot \theta) = f(1/\sigma_p)$ , le résultat de la figure 6 et les résultats expérimentaux obtenus au pendule basse fréquence par PEREZ /7/. La loi est vérifiée par l'ensemble des résultats, montrant ainsi que nous sommes bien en présence du même phénomène.



Figure 7 - Diagramme  $kT.Ln(v'_d \cdot \tau \cdot \theta) = f(1/\sigma_p)$ .

● Points expérimentaux obtenus au pendule basse fréquence

★ point expérimental de la figure 5.

Effet de la température de mesure : Nous pouvons utiliser la loi expérimentale précédente afin de déterminer le maximum de  $\delta$  en fonction de T : avec l'amplitude  $\sigma_{max} = 2.10^6 \text{ N/m}^2$  et la période  $\tau = 50 \text{ s}$  nous devons obtenir un maximum de  $\delta$  pour T de l'ordre de 210 K ; les mesures de la figure 6 sont tout à fait cohérentes avec ce résultat.

V - CONCLUSION

Ce travail montre que les manifestations expérimentales, attribuées au désancrage des dislocations en frottement intérieur basse fréquence et en mesures ultrasonores sous contraintes quasi statique, sont tout à fait cohérentes. Cette cohérence contribue à la confirmation réciproque des interprétations proposées : ainsi, le pic  $P_C$ , qui est habituellement observé au voisinage de la température ambiante où se produit une compétition entre le désancrage et le trainage des défauts ponctuels, et dont l'interprétation a été souvent discutée /1/ doit bien être attribué au mécanisme de désancrage des dislocations.

Enfin, rappelons que les lois expérimentales  $\Delta\alpha = f(\sigma)$  permettent de discuter très précisément les modèles proposés pour l'interprétation du frottement intérieur : notamment, ceux qui supposent que le réancrage a lieu à  $\sigma = 0$  présentent un caractère très approché au vu des résultats de la figure 2.

Références

1. W. Benoit, Int. Friction and Ultrasonic attenuation in solids, Univ. of Tokyo PRESS Tokyo, 1977 p. 109-116.
2. A. Vincent and J. Perez Phil. Mag. 40, 377-397 (1979).
3. G. Gremaud and W. Benoit, J. Phys. 42, C5, 369-374 (1981).
4. A. Vincent, J. L. Bouvier Volaille et P. Fleischmann, J. Phys. E, 15, 765-770(1982).
5. A. Vincent, S.M. Seyed Reihani and J. Perez, Phys. Stat. Sol. a, 39, 651-660(1977).
6. A.V. Granato and K. Lücke, J. Appl. Phys., 27, 583-593 (1956).
7. J. Perez, P. Peguin et P.F. Gobin, J. Phys. 32, C2, 127-136 (1971).
8. K. Lücke, A.V. Granato and L.J. Teutonico, J. of Appl. Phys. 39, 11, 5181-5191(1969).
9. D.G. Blair, T.S. Hutchison and D.H. Rogers Can. Journ. of Phys. 49, 6, 633-662 (1971).