

## HETEROGENEITES MACROSCOPIQUES DE LA PLASTICITE DE TYPE SENSIBILITE NEGATIVE A LA VITESSE DE DEFORMATION

Reçu le 10/11/1999 – Accepté le 19/11/2000

### Résumé

Les aspects des courbes de déformation non-uniforme sont différents selon les caractéristiques de la machine utilisée qui est définie par la rigidité du bâti, celle du dynamomètre, de la traverse mobile et du dispositif d'amarrage. Si les hétérogénéités de déformation plastique ne se développaient pas dans les alliages dilués et aciers, la déformation serait uniforme et la mise en forme des pièces de ces matériaux réussirait. Cependant, la plasticité s'accompagne souvent d'effets de localisation de la déformation à l'échelle macroscopique, qui limite leur ductilité et crée des zones mécaniquement plus faibles ou sujettes à la corrosion. Dans cet article, on montre que la raideur de la machine de traction a une influence sur l'aspect des courbes de déformation enregistrées. Les concepts de machine dure, machine douce, rigidité de la machine et rigidité de l'éprouvette deviennent importants lorsque la réponse du matériau n'est plus uniforme lors d'une sollicitation en traction.

**Mots-Clés:** Effet Portevin-Le Chatelier, déformation localisée, sensibilité à la vitesse, machine dure, machine douce, module équivalent "machine + échantillon".

### Abstract

The nonuniform stress - strain curves aspects are different and depend on the characteristics of the testing machine which are defined by the frame rigidity, the load cell, the mobile cross - head, and the joining bars. The negative practical consequences of this phenomenon in many dilute alloys and steels are the occurrence of undesired localised deformation, reduced ductility and diminished fracture toughness. In this paper we show that the main factors controlling the macroscopic feature of tensile instability of materials, with negative sensitivity to strain rate changes, are the influence of testing machine and the intrinsic properties of material, within a definite imposed deformation conditions. The instability associated with an inhomogeneous and nonuniform plastic flow and its dependence on the mode of testing are re-examined.

**Key words:** Portevin-Le Chatelier effect, strain rate sensitivity, localised strain, hard machine, soft machine, combined elastic "machine-specimen" modulus.

### K. CHIHAB

Equipe de Recherche  
Plasticité et Microstructures  
des Matériaux Métalliques  
Département de Physique  
Université A. Mira  
06000 Béjaïa (Algérie)

### L.P. KUBIN

Laboratoire d'Etude  
des Microstructures – ONERA  
29, Av. de la Division Leclerc  
B. P. 72, Châtillon  
92322 (France)

### ملخص

يختلف مظهر منحنيات التشوه غير المنتظم حسب خواص آلة الشد المستعملة التي تعرف بصلاية الهيكل والدينامومتر والعارضة المتحركة وقضبان الاتصال. إن كان عدم تطور التشوه اللدان واللامتجانس في السباتك المخففة والفوايد يعطي تشوها منتظما، فهذا يؤدي إلى نجاح تشكيل القطع المعدنية. يرفق التشوه اللدان الغير المتجانس عادة تشوه عياني محلي والذي يحدد من المطيلية وينتج مناطق ضعيفة الخواص الميكانيكية أو معرضة للتآكل. إن العوامل الأساسية التي تراقب الخواص العيانية لعدم استقرار التشوه خلال الشد تتمثل في الحساسية لتغيرات سرعة التشوه، التي تكون سالبة في هذه الحالة، في الخواص الذاتية للمعدن ولطبيعة آلة الشد المستعملة ضمن شروط معروفة ومفروضة للتشوه. سنهتم في هذه الدراسة باللاستقرار في انسياب التشوه اللدان المرتبطة بعدم التجانس في التشوه الغير المنتظم وتبعيته لطريقة الاختبار.

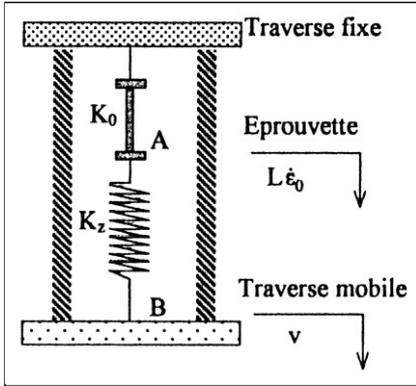
**الكلمات المفتاحية:** ظاهرة PLC، الحساسية لسرعة التشوه، التشوه المحلي، آلة شد صلب، آلة شد لين، معامل الشد المكافئ "آلة الشد-عيانة".

On discute actuellement, en mécanique et en sciences des matériaux, le problème de ductilité en termes de sensibilité à la le problème de ductilité en termes de sensibilité à la vitesse. On montre, dans certaines conditions de déformation plastique, que la contrainte d'écoulement aux faibles vitesses peut être supérieure à celle en grande vitesse, ce qui conduit à une sensibilité négative à la vitesse de déformation. Lorsque la sensibilité à la vitesse de déformation devient négative, la déformation uniforme n'est plus stable et il y a des sauts discontinus dans la vitesse de déformation [1,2]. Les instabilités de l'effet Portevin - Le Chatelier (PLC) sont associées à une sensibilité négative à la vitesse de déformation, et sont caractérisées, selon le mode de sollicitation imposée, par l'apparition de hachures ou de paliers au cours de la déformation plastique [3-5]. L'étude expérimentale et théorique [6-9] a montré que l'allure des instabilités de l'écoulement plastique est fortement dépendante du type de machine utilisée.

### ASPECTS MACROSCOPIQUES DES INSTABILITES

Lors d'un essai de traction normal, dans lequel on impose une vitesse de déformation constante, la contrainte varie généralement de façon monotone et l'on enregistre une courbe régulière. Pour les matériaux montrant l'effet PLC, la courbe de traction n'est plus uniforme,

ses aspects dépendent des caractéristiques de la machine utilisée, définie par la rigidité du bâti, celle du dynamomètre, de la traverse mobile et du dispositif d'amarrage. La traverse mobile subit un déplacement à vitesse constante  $v$  par rapport au bâti fixe. Il en résulte une variation de longueur de l'éprouvette, mais aussi une déformation des autres éléments de la machine. On admet que seule l'éprouvette d'essai se déforme plastiquement. L'ensemble des liaisons, schématisé par un ressort de rigidité  $K_z$ , se déforme de façon essentiellement élastique (fig. 1).



**Figure 1:**  
Représentation schématique d'un système de traction uniaxiale.

Une instabilité correspond à une accélération momentanée de la déformation qui provoque, dans un intervalle de temps très faible, un allongement plastique supérieur à celui imposé par la machine suivi d'une chute de contrainte appliquée [10,11]. Dans cette étude nous déterminons l'expression reliant la chute de contrainte appliquée,  $\Delta\sigma$ , et la déformation plastique,  $\Delta\varepsilon$ , qui en résulte suite à une instabilité mécanique instantanée. L'éprouvette de section  $S$  est caractérisée par son module d'Young  $E$  ou par sa rigidité  $K_0$  (avec  $K_0=ES/L$ ). A un déplacement élémentaire de la traverse mobile, correspond une variation  $\Delta P$  de la force appliquée à l'éprouvette. Le type de courbe observée est fonction du module de rigidité équivalent de l'ensemble "machine + échantillon" qui est défini par la rigidité combinée,  $K$ , de l'éprouvette, du bâti, de la traverse et des lignes d'amarrage. L'association des rigidités mécaniques en comportement élastique de l'ensemble "machine + échantillon" est donnée par:  $K^{-1} = K_0^{-1} + K_z^{-1}$ . La rigidité équivalente peut s'écrire sous la forme:  $K = MS/L$ , avec  $M$  le module équivalent du système. Lorsqu'une bande de déformation plastique, produisant un écrouissage  $\Delta\varepsilon$ , se déplace d'une longueur  $L$  dans l'éprouvette en un temps  $\Delta t$ , le point  $A$  (fig. 1) se déplace d'une quantité:  $AA' = L\Delta\varepsilon$  tandis que le point  $B$  se déplace de:  $BB' = v \Delta t$ . Au cours de la déformation pendant un temps  $\Delta t$ , la force de traction est modifiée de la quantité  $\Delta P = K (BB' - AA')$ , soit:

$$\Delta P = K (v - L \dot{\varepsilon}) \Delta t \quad (1)$$

avec  $\dot{\varepsilon} = \Delta\varepsilon/\Delta t$  la vitesse de déformation plastique de l'éprouvette. On peut expliquer l'allure des différentes courbes de traction à l'aide de la relation (1):

– Pour un essai de traction sur un matériau ne présentant pas l'effet PLC, l'écrouissage progressif de l'éprouvette

diminue  $\dot{\varepsilon}$  et rend ainsi positif le terme entre parenthèse. Alors  $\Delta P$  reste toujours positif.

– En revanche, lors de l'apparition du phénomène PLC, quand une bande se forme, la vitesse de déformation de l'éprouvette dépasse la vitesse de la traverse mobile et  $\Delta P$  devient négatif. Pour de grandes vitesses de déformation, où les bandes parcourent l'éprouvette d'une manière continue (type  $A$ ), l'accommodation entre  $v$  et  $\dot{\varepsilon}$  conduit à des valeurs faibles de  $\Delta P$ . Tandis qu'aux faibles vitesses (ou aux vitesses intermédiaires):  $L \dot{\varepsilon} > v$  et  $\Delta P < 0$ , l'adoucissement soudain augmente l'anomalie de sensibilité à la vitesse du matériau et les bandes parcourent l'éprouvette par bonds successifs (type  $B$  ou type  $C$ , respectivement). Une instabilité correspond à une relaxation quasi-instantanée de la contrainte ou de la déformation plastique et la traverse mobile pendant la durée de l'instabilité reste pratiquement immobile, il vient:  $v = 0$ , d'où, d'après l'expression (1):

$$\Delta P = -K L \Delta \varepsilon \quad (2)$$

qui représente la chute instantanée de l'effort appliqué, pour une déformation donnée  $\Delta\varepsilon$ , grandeur caractéristique des instabilités PLC. En sachant que  $\Delta\sigma = \Delta P/S$ , on montre aisément qu'une déformation instantanée  $\Delta\varepsilon$ , au cours d'une instabilité, entraîne une variation instantanée  $\Delta\sigma$  de la contrainte appliquée, et d'après la relation (2), l'amplitude de la chute de contrainte s'écrit:

$$\Delta\sigma = -(KL/S) \Delta\varepsilon \quad (3)$$

L'expression (3) montre que l'on peut distinguer, selon la rigidité de la machine, deux cas extrêmes:  $K = \infty$  (machine dure) et  $K = 0$  (machine douce). D'une façon générale, l'équation "de machine" s'écrit:

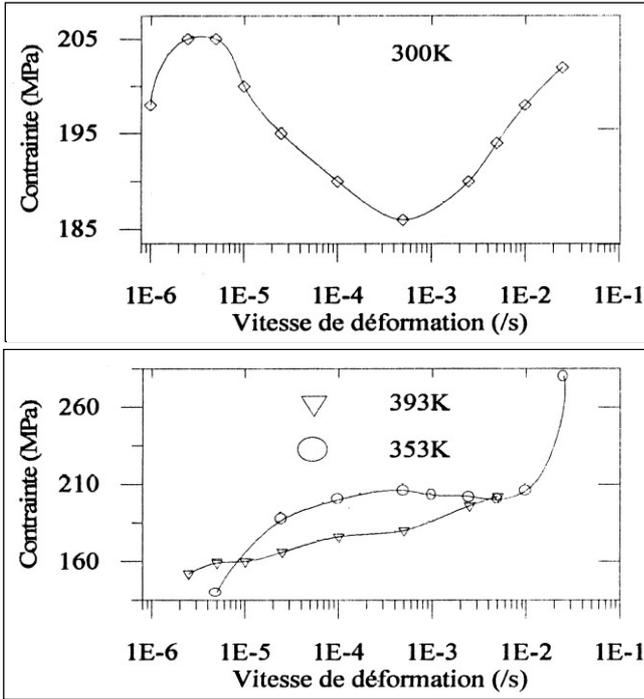
$$\Delta\sigma + M \Delta\varepsilon \approx 0 \quad (4)$$

L'expression (4) permet de constater qu'à une instabilité instantanée on peut associer deux quantités équivalentes: la diminution de la charge,  $\Delta\sigma$  apparaît comme une résorption partielle de l'énergie élastique emmagasinée sous forme de déformation plastique,  $\Delta\varepsilon$ . Il y a lieu de souligner que le système mécanique de la figure 1 ne prend pas en compte les effets de l'écrouissage. Néanmoins, nos résultats montrent que les paramètres expérimentaux caractéristiques de l'ensemble du système "machine + échantillon" ont une influence non négligeables sur l'aspect de l'instabilité. C'est donc, selon la valeur du module équivalent du montage, que l'on fait distinction entre les différents types de machines utilisées.

## EFFET MACHINE ET CINETIQUE DES BANDES PLC

Il est généralement admis que le comportement macroscopique d'un matériau obéit à une loi constitutive du type:  $\sigma = \sigma_e + h\varepsilon + F(\dot{\varepsilon})$ , où  $\sigma_e$ ,  $h\varepsilon$  et  $F(\dot{\varepsilon})$  représentent respectivement la limite élastique du matériau, le durcissement et la contribution de la vitesse de déformation à la contrainte appliquée, avec  $h$  et  $\varepsilon$  les taux respectifs de durcissement et de déformation. Comme dans les modèles de [1,2], l'étude des références [9,11-13] montre que  $F(\dot{\varepsilon})$ , dans certaines conditions de température et de composition du matériau, peut prendre les formes représentées sur la

figure 2 et peut admettre, dans les matériaux présentant l'effet PLC, un minimum et un maximum entre lesquels la sensibilité à la vitesse est négative.



**Figure 2:** Comportement  $F(\dot{\epsilon})$  du matériau, à 10% de déformation dans A9G5 à 300K, 353K et 393K. Il y a apparition d'un palier précurseur de l'effet PLC à 393K ou d'une sensibilité négative à la vitesse à 300K et 353K.

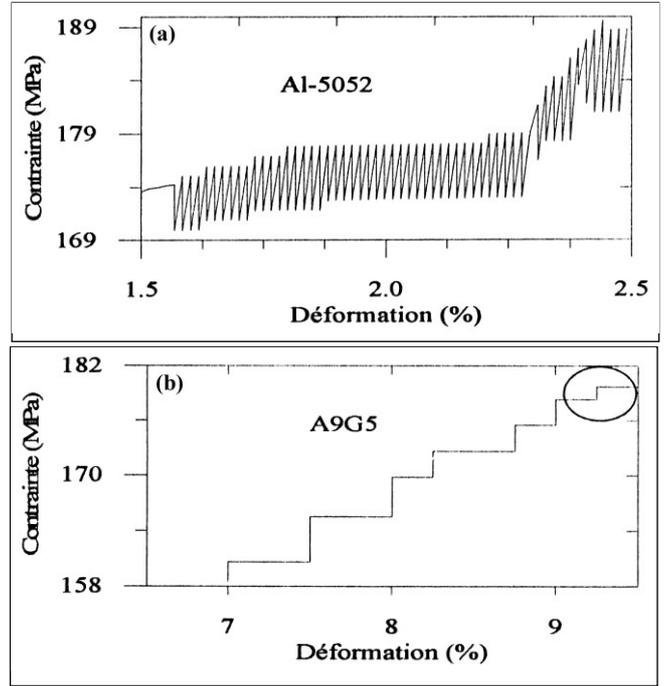
En régime de déformation uniforme la vitesse de déformation,  $\dot{\epsilon}$ , est donnée par la relation suivante [10,13]:

$$\dot{\epsilon} = (M/M+h) \dot{\epsilon}_0 = \dot{\sigma}_0 / h \quad (5)$$

A vitesse de déformation imposée ou à vitesse de chargement imposée, les deux types d'essais, pour être réalisés dans des conditions physiquement équivalentes, doivent mettre en jeu la même vitesse de déformation plastique. Dans le domaine d'instabilité, l'échantillon ne peut se déformer d'une manière uniforme avec une vitesse  $\dot{\epsilon}$ , mais tourne autour de cette vitesse (oscillations de relaxation) et qui lui est égale en moyenne (en régime permanent) [13 - 16].

### 1- Machine dure

En machine, dure  $M \gg h$  et l'on a d'après l'expression (5):  $\dot{\epsilon} \approx \dot{\epsilon}_0$ ; au cours d'une déformation uniforme, on impose à l'échantillon sa vitesse de déformation plastique. Lorsqu'il y a instabilité,  $\dot{\epsilon}$  augmente instantanément et la chute périodique de la contrainte résulte de la relaxation de la déformation plastique lorsque la vitesse de déformation plastique de l'éprouvette dépasse soudainement celle imposée par la machine; par conséquent  $d\sigma/dt < 0$ . La traverse mobile s'arrête quand la contrainte appliquée devient inférieure à une valeur critique. Il existe ainsi une contrainte critique pour l'initiation de l'instabilité et une seconde contrainte critique pour son arrêt. Si l'éprouvette se déforme plus faiblement que ne l'impose la vitesse de



**Figure 3:** Exemple de courbes contrainte - déformation à température ambiante: (a) en machine dure,  $\dot{\epsilon}_0 = 2.8 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ , (b) en machine semi-douce,  $\dot{\sigma}_0 = 0.3 \text{ MPa s}^{-1}$  (Le palier secondaire entouré par un cercle correspond à un décrochement de contrainte dû à la rigidité résiduelle de la machine).

traverse, la contrainte appliquée augmente progressivement jusqu'à l'initiation d'une bande de déformation qui se propage rapidement et produit un allongement brusque de l'éprouvette. Au cours de cette déformation plus rapide que le déplacement de la traverse, la machine se décharge élastiquement et la contrainte appliquée décroît jusqu'au seuil inférieur de propagation de la bande. La déformation cesse et la machine se recharge par déplacement de la traverse jusqu'à ce que le seuil de contrainte correspondant à la mise en mouvement de la bande soit à nouveau atteint. Le déplacement des bandes se fait par bonds successifs provoquant ainsi des traces sur la surface de l'échantillon et l'ensemble de ces cycles fait apparaître des aspects de décrochements sur la courbe contrainte - déformation. La forme de ces décrochements dépend des caractéristiques de la machine, de l'état structural du matériau déformé ainsi que les conditions expérimentales de températures et de vitesses (fig. 3a).

### 2- Machine douce

En machine douce où la charge appliquée  $\dot{\sigma}_0$  reste constante, l'éprouvette est seule responsable de sa déformation vis-à-vis de la contrainte appliquée et la complexité de l'interaction "machine + échantillon" est levée. La contrainte, qui est à peu près uniforme le long de l'échantillon, est donc linéaire en fonction du temps:  $\sigma = \sigma_e + \dot{\sigma}_0 t$ . La vitesse de déformation plastique en régime permanent est reliée à la vitesse de chargement imposée par:  $\dot{\sigma}_0 = h \dot{\epsilon}$ . En réduisant le module de rigidité telle que  $M \ll h$ , on réalise une machine douce et l'on obtient:  $\dot{\sigma}_0 = h \dot{\epsilon} = M \dot{\epsilon}_0$ . La courbe de déformation est constituée

par une succession de paliers  $\Delta\varepsilon$  à consolidation croissante et dont l'amplitude dépend des conditions imposées. A chaque palier correspond une bande localisée de déformation qui s'étend immédiatement à toute la longueur de l'éprouvette à un niveau de contrainte constant.

### 3- Machine semi-douce

Lorsque  $M \approx h$ , à cause de la rigidité résiduelle du montage, on peut réaliser une machine qu'on peut qualifier de semi-douce où la vitesse de déformation en régime permanent est donnée par l'expression (5). Lorsque le montage est de module équivalent intermédiaire, il y a présence simultanée des deux types d'instabilités. La cinétique des bandes de déformation est en relation directe avec les réactions de la machine: une décharge plus ou moins rapide de la machine produira une propagation plus ou moins lente de la (ou des) bande(s) PLC. Il ressort que l'amplitude des hachures et la longueur du saut de déformation dépendent essentiellement du module équivalent du montage. Le module équivalent "machine + échantillon" détermine, donc, la forme de la courbe enregistrée lors de l'essai de traction (fig. 3b).

### MODELISATION DES INSTABILITES

A partir de la loi de comportement  $F(\dot{\varepsilon})$  du matériau [1], la différence entre les valeurs consécutives de deux points:  $(\sigma, \varepsilon, \dot{\varepsilon})_i$  et  $(\sigma, \varepsilon, \dot{\varepsilon})_j$  des courbes de déformation permet d'écrire:

$$\Delta F = \Delta(\sigma - h\varepsilon) \quad (6)$$

Les expressions (4) et (6) donnent:

$$\Delta\sigma = + \frac{\Theta}{1+\Theta} \Delta F \quad (7)$$

$$h\Delta\varepsilon = - \frac{1}{1+\Theta} \Delta F \quad (8)$$

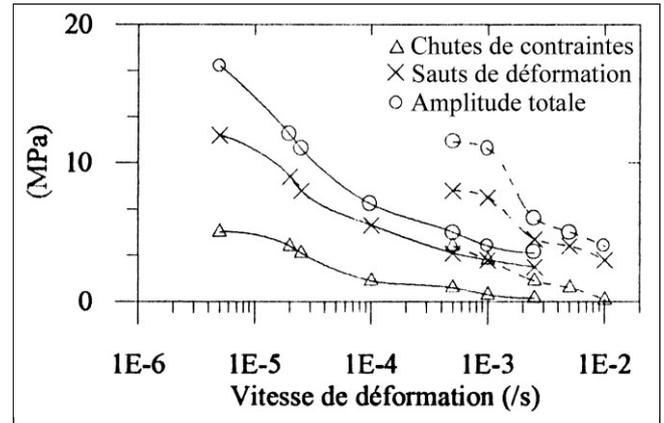
avec  $\Theta = M/h$  est le module équivalent réduit du système "machine + échantillon". Nous désignons par  $\Delta F = F_2 - F_1$  (avec  $F_2 > F_1$ ) l'amplitude totale d'une instabilité;  $F_2$  et  $F_1$  représentent les valeurs des extréma de contrainte sur la courbe  $F(\dot{\varepsilon})$ .  $F_1$  représente la contrainte d'initiation de l'instabilité totale et  $F_2$  celle de son arrêt. La grandeur  $-\Delta F$  varie comme  $F_1$ , car  $F_2$  (courbe d'écrouissage inférieure) varie très peu avec  $\dot{\varepsilon}$ . Comme  $F(\dot{\varepsilon})$ , l'amplitude  $\Delta F$  est une grandeur intrinsèque du matériau étudié et est fonction des conditions expérimentales [14].

En pratique, un montage en machine douce n'est pas parfait, compte tenu de l'existence d'une rigidité résiduelle non nulle, et l'on enregistre à la fois une variation de contrainte,  $\Delta\sigma < 0$ , et un saut de déformation,  $\Delta\varepsilon > 0$ , dans des proportions régies par le rapport  $\Theta$ . Les expressions (7) et (8) montrent que l'amplitude totale disponible pendant l'instabilité se partage en deux parts que l'on peut détecter sur les courbes  $\sigma(t)$  ou  $\varepsilon(t)$ .

En machine dure,  $\Theta \approx \infty$ , on n'obtient que des chutes de contrainte avec une amplitude  $\Delta\sigma = \Delta F$  et  $\Delta\varepsilon = 0$ . En machine douce,  $\Theta \approx 0$ , on obtient  $\Delta\sigma = 0$  et des sauts de déformation  $\Delta\varepsilon = -\Delta F/h$ . Cependant, il y a lieu de souligner que la valeur de la vitesse de déformation plastique

déterminée en prenant la pente qui passe en moyenne par les paliers de la courbe  $\varepsilon(t)$ ,  $\dot{\varepsilon} = \Delta\varepsilon/\Delta t$ , correspond à la vitesse calculée en fonction des caractéristiques de la machine. Cependant, pour des vitesses de déformation assez élevées, il faut prendre en considération l'effet de rechargement mécanique pendant l'instabilité. Dans ce cas, on n'enregistre qu'une partie de l'instabilité, l'autre partie est dissimulée par l'effet de rechargement de contrainte. Enfin, pour savoir si l'on peut négliger l'effet de rechargement mécanique pendant l'instabilité, il suffit de calculer  $\Delta\sigma + M\Delta\varepsilon$  qui doit être proche de zéro ou faible devant  $\Delta\sigma$  et  $M\Delta\varepsilon$ .

Les résultats expérimentaux sur machine semi-douce, sur un alliage industriel A9G5 (après recuit thermique), sont en bon accord avec la formulation de ce modèle. Nous avons reporté les valeurs  $h\Delta\varepsilon$  et de  $-\Delta\sigma$  mesurées indépendamment à  $\varepsilon = 10\%$  à 300K et 353K, en fonction de la vitesse de déformation,  $\dot{\varepsilon} = \dot{\sigma}_0/h$ . Lors d'une instabilité, la déformation enregistrée est de l'ordre de 1%. Nous obtenons également une chute de contrainte, de l'ordre du MPa, due à la rigidité résiduelle de la machine. Le rapport de ces deux contributions est  $h\Delta\varepsilon/-\Delta\sigma \approx 3$  (fig. 4). L'équation "de machine" montre que ce rapport doit être égal à  $h/m$ , à condition que l'on puisse négliger la contrainte de rechargement pendant l'instabilité. Avec  $m = 370$  MPa et  $h = 10^3$  MPa, nous déterminons  $h/m = 2.7$ , résultat en parfait accord avec les données expérimentales.



**Figure 4:** Chutes de contraintes ( $-\Delta\sigma$ ), sauts de déformation ( $h\Delta\varepsilon$ ) et amplitude totale ( $-\Delta F$ ) associés aux instabilités PLC en fonction de la vitesse de déformation. Valeurs relevées à 10% de déformation dans A9G5 à 300K (trait continu) et 353K (trait discontinu).

### CONCLUSION

Lors d'un essai de traction d'un matériau se déformant de façon macroscopiquement hétérogène, il est bien important de différencier les différents types de machines et de ne pas attribuer à l'échantillon ce qui appartient au montage. Cette étude met en évidence l'interaction dynamique échantillon - machine pendant une instabilité instantanée. La connaissance du module de rigidité de la machine de traction et la donnée d'une loi de comportement  $F(\dot{\varepsilon})$  du matériau permettent de prédire l'amplitude d'instabilité PLC.

En machine douce, l'éprouvette est seule responsable de sa déformation vis-à-vis de la contrainte appliquée. Au contraire, en machine dure, la déformation hétérogène est influencée par les caractéristiques de cette dernière et l'énergie élastique stockée dans le bâti, dans le dynamomètre de l'installation et dans l'éprouvette pendant l'arrêt de la déformation se libère instantanément au moment où l'instabilité se produit. Ainsi, l'aspect de la courbe de traction ne représente pas le comportement propre de l'éprouvette.

#### REFERENCES

- [1]- Penning P., *Acta Metall.*, 20, (1972), p. 1169.
- [2]- Kubin L.P. and Estrin Y., *Acta Metall.*, 33, (1985), p. 397.
- [3]- Chihab K., Estrin Y., Kubin L.P. and Vergnol J., *Scripta Met.*, 21, (1987), p. 203.
- [4]- Chihab K. et Bouabdallah K., *Ann. Chim. Sc. Mat.*, vol. 24 (1), (1999), p. 47.
- [5]- Chihab K. et Bouabdallah K., *Ann. Chim. Sc. Mat.*, vol. 25 (3), (2000), p. 171.
- [6]- Caisso J., Thèse de Doctorat, Université de Poitiers - France, (1958).
- [7]- Karimi A., Thèse de Doctorat, Ecole des mines de Paris - France, (1982).
- [8]- Blanc D., Thèse de Doctorat, Ecole des mines de Paris - France, (1985).
- [9]- Chihab K., Thèse de Doctorat, Université de Poitiers - France, (1986).
- [10]- Kubin L.P., Chihab K. and Estrin Y., NATO séries E, *App. Sci.*, 121, (1987), p. 220.
- [11]- Strudel J., Ed. P. Groh et al., Ecole d'été d'Yrivals 1, (1979), p. 199.
- [12]- Blanc D. and Strudel J., ICSMA 7, Pergamon Press, 1, (1985), p. 349.
- [13]- Estrin Y. and Kubin L.P., *J. Mech. Behav. of Metals*, 2, (1990), p.255.
- [14]- Kubin L. P., Chihab K. and Estrin Y., *Acta Metall.*, 36, (1988), p. 2707.
- [15]- Chihab K. and Kubin L.P., CIMASI, ENSEM-Casablanca, 14-16 Nov. 1996, p.139.
- [16]- Chihab K. and Kubin L.P., CIMASI, EST- Casablanca, 27 - 29 Oct. 1998, p. 909. □