



**HAL**  
open science

## Caractérisation de l'effet PLC par des techniques de mesures de champs cinématiques et thermiques

Khaidre Bouabdallah, Hervé Louche, Pierre Vacher, Pascale Balland

► **To cite this version:**

Khaidre Bouabdallah, Hervé Louche, Pierre Vacher, Pascale Balland. Caractérisation de l'effet PLC par des techniques de mesures de champs cinématiques et thermiques. CFM 2009 - 19ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2009, Marseille, France. hal-03391454

**HAL Id: hal-03391454**

**<https://hal.science/hal-03391454v1>**

Submitted on 21 Oct 2021

**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.

# Caractérisation de l'effet PLC par des techniques de mesures de champs cinématiques et thermiques

K. BOUABDALLAH<sup>a</sup>, H. LOUCHE<sup>b</sup>, P. VACHER<sup>b</sup>, P. BALLAND<sup>b</sup>,

*a. Laboratoire de Métallurgie Physique et Propriétés des Matériaux, Université de Annaba, (Algérie)*

*b. Laboratoire SYMME, Polytech'Savoie, Université de Savoie, (France)*

## Résumé :

*La déformation plastique de certains alliages présente des hétérogénéités spatio-temporelles sous certaines conditions d'essai. Dans ce papier, on présente des résultats d'investigation expérimentale issus de l'analyse de champs cinématiques et thermiques révélant la distribution spatio-temporelle de ces hétérogénéités. Ces mesures de champs permettent d'évaluer quantitativement les caractéristiques des bandes (type, forme, vitesse de propagation, déformation et température dans les bandes, etc.).*

## Abstract :

*Plastic flow of metallic alloys may display spatio-temporal heterogeneities for certain ranges of the applied deformation conditions. In this paper, some results of experimental investigation deduced from the analysis of kinematic and thermic fields revealing the spatio-temporal distribution of these heterogeneities are presented.. These measurements of fields show that it is possible to observe the characteristics of bands quantitatively (type, form, propagation velocity, deformation and temperature in the bands, etc).*

**Mots clefs :** Effet PLC, déformation plastique instable, mesures de champs cinématiques et thermiques

## 1 Introduction

Dans certains matériaux métalliques, notamment les alliages Al-Mg, la déformation plastique présente des hétérogénéités qui induisent des effets de localisation et qui, sans être aussi sévères que celle provoquée par la striction, peuvent nuire à la qualité du produit fabriqué par mise en forme. Ces hétérogénéités, désignées par le nom de phénomène de Portevin-Le-Chatelier (ou effet PLC) se caractérisent par des instabilités de l'écoulement plastique donnant lieu à la formation de bandes qui peuvent parfois se propager. À l'échelle macroscopique, les instabilités de type PLC se traduisent, lors d'un essai de traction simple, par des irrégularités, plus ou moins périodiques sur la courbe charge-déplacement, liées à la localisation de la déformation plastique sous forme de bandes sur l'échantillon. Selon que l'on impose une vitesse de déformation ou une vitesse de chargement à l'échantillon, la courbe enregistrée présente, respectivement, des stries ou des paliers qui peuvent se répéter jusqu'à la rupture. En fonction des conditions d'essai (vitesse de déformation, température), les bandes se propagent par mouvement continu (type A) ou par bandes stationnaires corrélées (type B) ou aléatoires (type C) [1]. Ce comportement peu habituel de la déformation plastique a fait l'objet d'études soutenues pour la caractérisation expérimentale, l'interprétation théorique et la modélisation. Dans [2], les auteurs font part d'une bibliographie assez consistante sur le sujet. Malgré la littérature abondante sur le sujet, les capacités prédictives des modèles du phénomène PLC sont encore bien loin d'être satisfaisantes aussi bien du point de vue analytique que numérique. La plupart des modèles disponibles sont basés sur des descriptions phénoménologiques des réponses globales telles qu'observées typiquement sur les courbes contrainte-déformation lors d'un essai de traction simple. Dans le domaine de la caractérisation mécanique des matériaux, on assiste depuis quelque temps à la généralisation des méthodes de mesure de champs, cinématiques et thermiques, à la place des méthodes classiques de mesures globales des paramètres thermomécaniques. Le but de ce papier est de présenter les résultats d'une caractérisation des aspects spatio-temporels des bandes PLC dans un alliage Al-3,2Mg, en utilisant des mesures de champs cinématique et thermique à la surface de l'échantillon soumis à un chargement de traction.

## 2 Montage expérimental

Les essais de traction ont été réalisés à température ambiante sur une machine de traction Instron (50 kN) pilotée à vitesse de traverse constante. Les éprouvettes d'essai de type haltère (zone utile :  $42 \times 6.5 \times 2 \text{ mm}^3$ ) ont été découpées dans une tôle d'alliage Al-3,2%Mg. Pour les besoins de mesure de champs cinématique ou thermique on associe au système de traction un dispositif d'acquisition d'images tel que représenté sur la figure 1.



FIG. 1 : Montage expérimental

Les images dans le spectre du visible sont acquises à lumière ambiante, avec une caméra numérique (HAMAMATSU) de résolution  $1280 \times 1024$  pixels permettant une vitesse d'acquisition maximale de 9 Hz. Les cartographies thermiques sont enregistrées à l'aide d'une caméra à thermographie infrarouge rapide (CEDIP JADE III MW) de résolution  $320 \times 240$  pixels et à une fréquence d'acquisition de 145 Hz. Pour chaque mode d'acquisition, la caméra est placée en face de l'une des facettes principales de l'éprouvette de telle sorte que l'axe optique soit perpendiculaire à la surface observée. Les vitesses de déformation ont été choisies de sorte à mettre en évidence les différentes manifestations de l'effet PLC.

### 2.1 Mesure de champs cinématiques

Les champs de déformation sont obtenus en utilisant un logiciel de corrélation d'images développé au niveau du laboratoire SYMME [3] qui nécessite une distribution aléatoire du niveau de gris sur la surface de l'éprouvette. Ce type de distribution est obtenu par simples jets de peinture noire et blanche. Cet outil permet de visualiser et de quantifier la grandeur de la déformation en tout point de la surface de l'éprouvette. Pour les essais réalisés dans le cadre de cette étude (longueur initiale de l'éprouvette = 42 mm), les déplacements de moins de  $0,5 \mu\text{m}$  sont détectables. Le principe d'appariement, à la base de ce logiciel, consiste à la recherche d'un correspondant entre deux points par comparaison de niveaux de gris. Ces informations en terme de déplacements, soit l'équivalent de milliers de points de mesure, sont analysées par le logiciel, soit pour définir des champs de déformations, soit pour réaliser des numérisations 3D.

### 2.2 Cartographies thermiques

La déformation des alliages s'accompagne de dégagements de chaleur qui, dans le cas des déformations quasi statiques, sont assez faibles et le processus est souvent considéré comme isotherme. Ces sources de chaleur ont pour origine la dissipation d'énergie due à la transformation irréversible d'une partie de l'énergie mécanique nécessaire à la déformation. Les variations de température, bien que faibles, induites par ces dissipations, peuvent être mesurées avec une caméra infrarouge appropriée. L'utilisation de la thermographie infrarouge dans le domaine de la mécanique est bien connue notamment pour l'étude de la localisation [4,5]. Pour nos essais de traction où le matériau présente des instabilités de déformation plastique de type PLC, ces variations sont suffisantes pour mettre en évidence certaines caractéristiques de ces instabilités : type de bande, largeur, orientation, sens de propagation, réorientation, vitesse [6-8].

Nous montrons que les différents types de bandes peuvent être facilement détectés à partir de la

distribution dans l'espace et dans le temps de ces sources de chaleur. L'analyse de l'évolution du champ de température sur l'ensemble de la surface de l'éprouvette en cours de traction permet d'accéder à des grandeurs locales de température notamment à l'endroit et au moment précis de l'apparition de la bande PLC.

### 3 Résultats et discussion

Le tableau 1 donne les paramètres d'acquisition d'images dans le spectre du visible et dans l'infrarouge pour deux essais dont le premier a été réalisé à haute vitesse ( $\dot{\epsilon}=1,98. 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) et le deuxième à basse vitesse ( $\dot{\epsilon}=1,19. 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ ). Les courbes de traction sont représentées sur la figure 2. Sur la courbe 1, essai à vitesse élevée, les irrégularités sont caractéristiques des bandes PLC de type A. Sur la courbe 2, essai à basse vitesse, les instabilités se présentent sous forme de décrochements quasi périodiques dont l'amplitude moyenne ne cesse de croître au cours du chargement (bandes PLC de type B et C).

Essai N°	Vitesse de la traverse (mm/min)	Vitesse de déformation ( $\text{s}^{-1}$ )	Séquences d'images dans le visible				Séquences d'images dans l'infrarouge			
			Nombre d'images par séquence		Fréquence acquisition (Hz)		Nombre d'images par séquence		Fréquence acquisition (Hz)	
1	50	$1,98. 10^{-2}$	71		9		1651		145	
2	0,3	$1,19. 10^{-4}$	Seq.1	150	Seq.1	1,28	Seq.1	2600	Seq.1	25
			Seq.2	150	Seq.2	9	Seq.2	2600	Seq.2	145

Tableau 1 – Paramètres d'essais et d'enregistrement d'images.

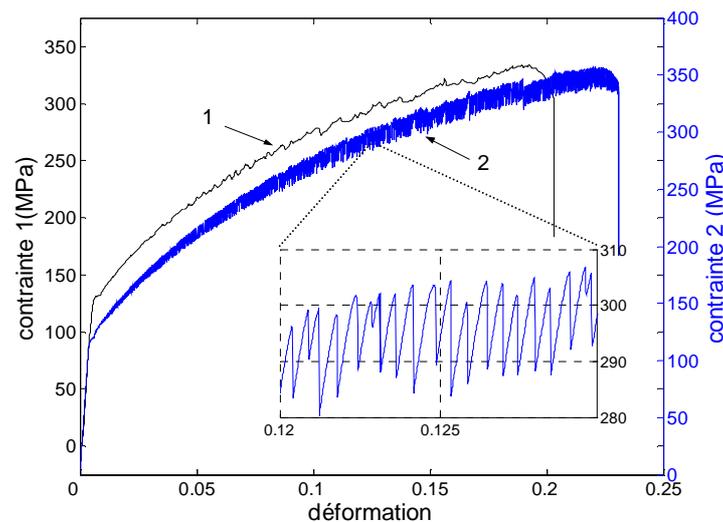


FIG. 2: Courbes de traction pour les essais à haute vitesse (courbe 1) et basse vitesse (courbe 2). La courbe 1 a été décalée de 25 MPa vers le haut afin d'éviter la superposition des deux courbes.

La localisation de la déformation (bande PLC) est révélée par les cartographies des composantes du champ cinématique et thermique (figure 3). La morphologie des bandes PLC et les caractéristiques géométriques de la bande (angle d'inclinaison, largeur) sont mises en évidence. Dans le cas de l'essai 1, l'évolution des paramètres cinématiques et thermiques, montre que le front de bande (type A) se propage le long de l'éprouvette d'une extrémité à l'autre à plusieurs reprises. L'angle d'inclinaison du front de bande change parfois d'orientation tout en restant symétrique par rapport à l'axe de l'éprouvette. La figure 4 montre, par ailleurs, qu'en plus du réchauffement global de l'ensemble de l'éprouvette, celle-ci subit une augmentation locale brusque de température à chaque amorçage de bande. Ce comportement rend compte d'une activité thermique intense à l'échelle microstructurale.

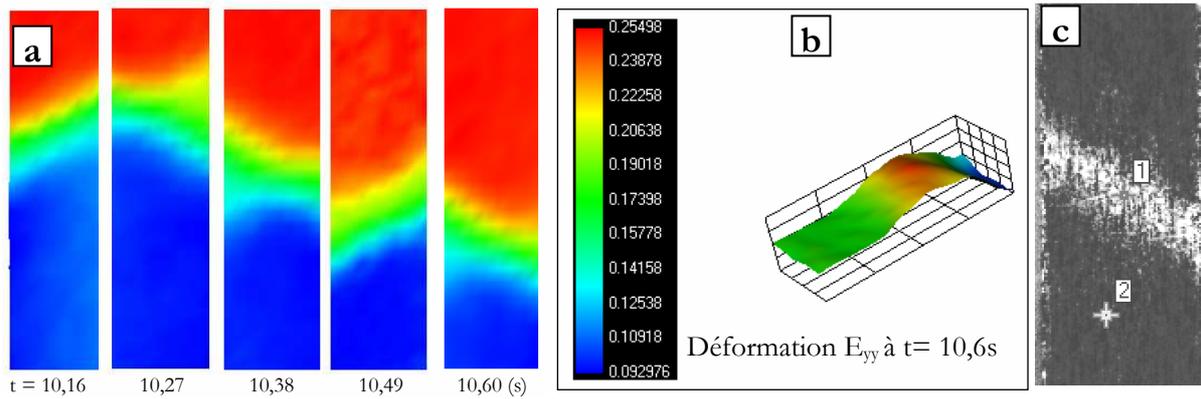


FIG. 3 : Essai 1. Mise en évidence des bandes PLC : **a**- Evolution du champ de déplacement longitudinal  $U_y$  montrant les positions successives et orientation du front de bande PLC de type A. **b**- Champ de déformation longitudinale  $E_{yy}$ . **c**- Cartographie du champ thermique à la surface de l'éprouvette

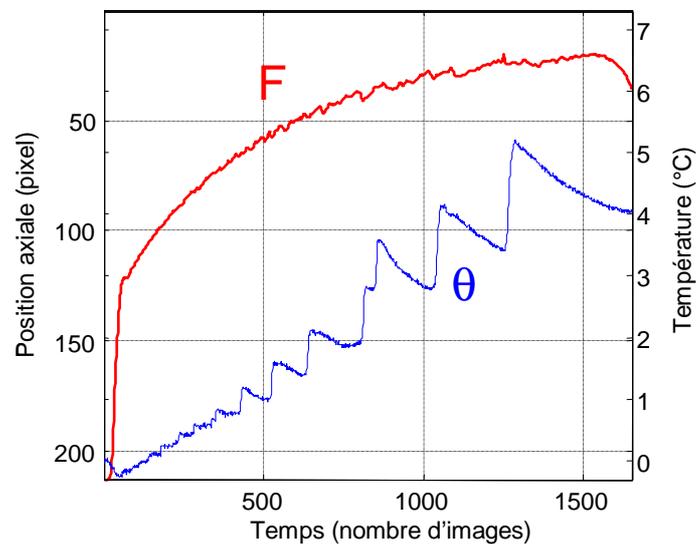


FIG. 4 : Essai 1 ( $\dot{\epsilon} = 1,98 \cdot 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ ). **F** représente la réponse mécanique et **θ**, l'évolution dans le temps de la variation de température d'un point fixe de l'image thermique (pixel 160 x 12)

De même, l'amplitude de la déformation à l'intérieur de la bande se visualise nettement sur les cartographies des composantes du champ cinématique. L'analyse montre, par ailleurs, que la déformation à l'intérieur de la bande augmente avec l'amplitude du décrochement sur la courbe de traction (figure 5). Ce comportement est en relation avec l'évolution du taux d'écoulement du matériau qui dans ce cas diminue de façon monotone au cours de l'essai [8].

Les séquences d'images thermiques de l'essai 2 citées dans le tableau 1 ont été enregistrées de sorte que la première (2600 images à 25Hz) couvre le tout début du chargement, la deuxième séquence (2600 images à 145Hz) correspond à un taux de déformation assez élevé. Les présentations simultanées de l'évolution de la réponse mécanique et celle de la température d'un point fixe de la surface de l'éprouvette montrent une similitude remarquable entre les deux paramètres (figure 6a et 6b). La baisse de température ( $-0,2^\circ\text{C}$ ) au début du chargement correspond à la déformation élastique de l'éprouvette. La remontée en température, qui s'amorce juste après, est due à la propagation d'une bande de Lüders dont la réponse mécanique se présente sous forme de plateau de contrainte (figure 6a). La phase qui suit immédiatement donne lieu à des émissions thermiques de très faible intensité. Le suivi dans le temps de la variation de température du même point fixe de l'éprouvette montre un signal thermique peu intense, fortement bruité, avec des variations brusques lorsqu'une instabilité apparaît (figure 6b). La faiblesse du signal thermique peut être expliquée à la fois par la forte diffusivité thermique du matériau et par l'apparition discrète des bandes.

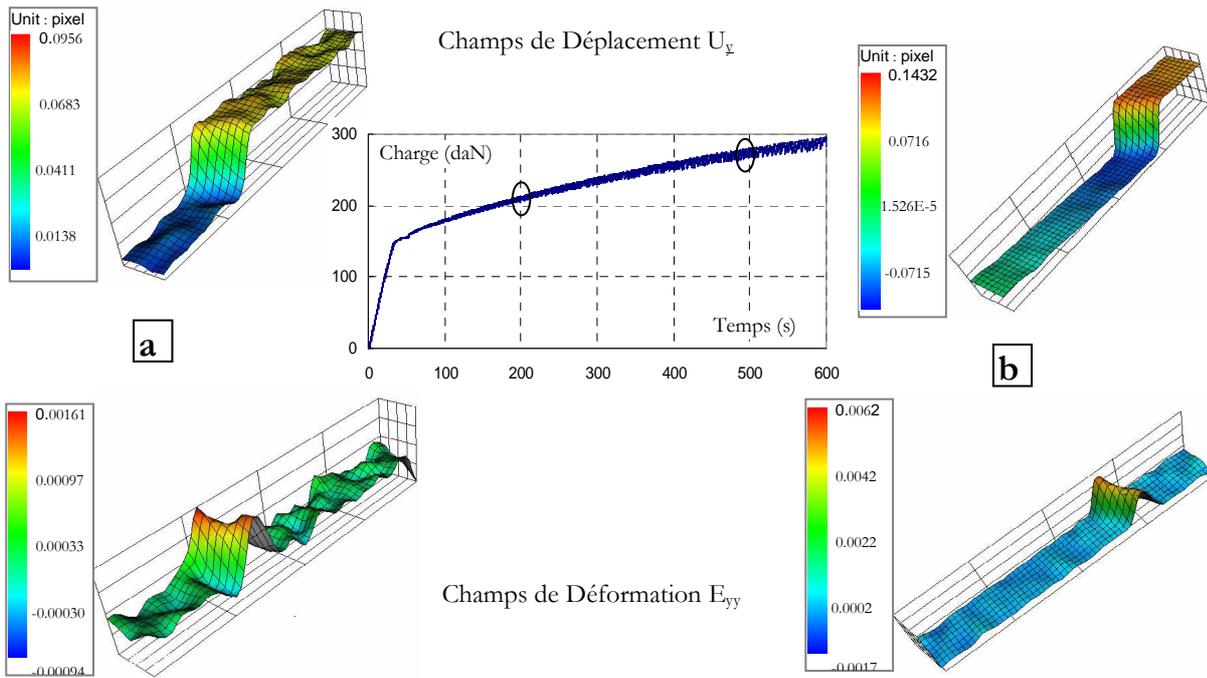


FIG. 5: - Essai 2 ( $\dot{\epsilon}=1,19.10^{-4} \text{ s}^{-1}$ ). Amplitudes des déplacements ( $U_y$ ) et des déformations longitudinaux ( $E_{yy}$ ) engendrés par l’instabilité PLC à deux étapes de la déformation ( $t_a=202\text{s}$  et  $t_b=487\text{s}$ ).

Mises à part les perturbations dues au bruit du signal, la périodicité des fluctuations majeures de la température coïncide avec l’apparition de chutes de contrainte relevées sur la courbe de la réponse mécanique (figure 6b). Le saut de température associé à chaque instabilité semble être un indicateur du degré d’hétérogénéité de la déformation plastique induite par l’effet PLC au même titre que l’amplitude de chute de contrainte. En plus des fluctuations locales de température provoquées par l’effet PLC, nous remarquons un échauffement progressif global au fur et à mesure que la déformation augmente.

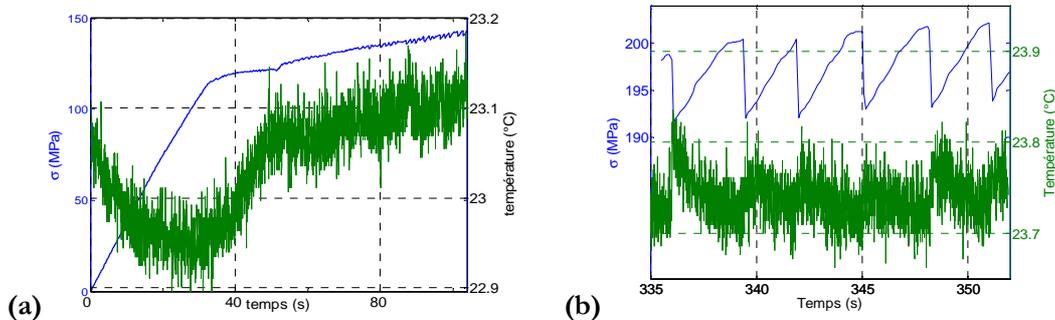


FIG. 6 : – Essai 2 ( $\dot{\epsilon}=1,19.10^{-4} \text{ s}^{-1}$ ). Evolution de la température d’un point fixe de l’éprouvette à différents stades de la déformation en relation avec la réponse mécanique correspondante.

Les mesures de température à l’intérieur de la bande au moment de son apparition (point 1 sur la figure 7) ainsi qu’à d’autres endroits plus ou moins éloignés (points 3 et 4 sur la figure 7) montrent que le saut de température est décalé dans l’espace mais pas dans le temps. La température instantanée est maximale à l’intérieur de la bande et diminue avec l’éloignement du point de mesure. Cette diminution n’affecte pas la concordance de l’apparition des sauts de température à l’intérieur de la bande et dans le reste du corps de l’éprouvette. Ainsi, l’apparition d’une instabilité dans un endroit quelconque est ‘ressenti’ par l’ensemble du reste de l’éprouvette. L’instabilité intervient après un rechargement élastique de l’éprouvette, visible à la fois par la montée en contrainte et la baisse de température. Le pic de température à l’intérieur de la bande (qui atteint, par exemple,  $24,4^\circ\text{C}$  selon la figure 7) est dû à l’intensité de la source de chaleur au moment de l’apparition de l’instabilité tandis que le reste de l’éprouvette subit un réchauffement à cause du retour élastique qui génère aussi des sources de chaleur positives.

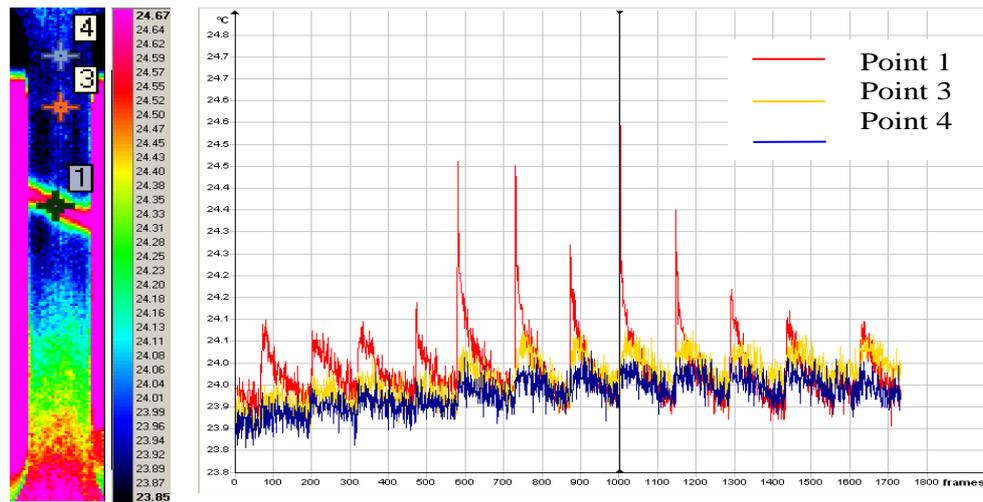


FIG. 7 : Essai 2, séquence 2. Evolution de la température en différents points de l'éprouvette au moment de l'apparition de l'instabilité. A cet instant, le saut est maximal à l'intérieur de la bande.

A ce stade il paraît important de souligner la rapidité d'apparition de ces bandes de type B. Les sources de chaleur montrent, pour chacun des essais réalisés, que les bandes ne sont détectées que sur une seule image. Leur apparition est donc plus rapide que la période d'acquisition des images, soit 1/145<sup>ème</sup> secondes.

Ces valeurs, à cause du phénomène de conduction et des caractéristiques d'acquisition (fréquence, résolution spatiale) sont estimées par excès. Pour affiner ces valeurs, il faut augmenter les fréquences d'acquisition des outils d'observation. Les mesures complémentaires d'émission acoustique (jusqu'à 5120 Hz dans [9]) ou l'utilisation de caméras visibles plus rapides (par exemple [10]) sont des techniques à exploiter pour de futures études.

## 4 Conclusion

A partir d'essais de traction uni axiale réalisés à température ambiante avec des vitesses de déformation comprises dans le domaine d'existence de l'effet PLC, on montre que les techniques de mesure de champs cinématiques et thermiques fournissent des informations pertinentes sur le processus de déformation plastique instable. Afin de caractériser le comportement plastique instable dans l'alliage Al-3,2Mg, nous avons présélectionné des vitesses de déformation qui correspondent aux différents modes de propagation des bandes PLC (type A, B et C). Le couplage des acquisitions des données du système de traction (force, déplacement, temps) et d'enregistrement d'images sur l'évolution du champ cinématique ou thermique nous a permis de déterminer, pour chaque type de bandes, les caractéristiques géométriques et dynamiques ainsi que leur évolution spatio-temporelle.

## References

- [1] Kubin P., Chihab K. and Estrin Y., NATO ASI Series E, App. Sci. 121, 220 (1987).
- [2] Rizzi E., Hähner P., Int. J. Of Plast., 20, 121-145 (2004).
- [3] Vacher P., Dumoulin S., Morestin F., Mguil-Touchal S., Proc. Inst. Mech. Eng. 213 (1999) 811–817
- [4] Chrysochoos A., Belmahjoub F., Archives of Mechanics 44 (1) (1992) 55-68.
- [5] Louche H., Thèse de Doctorat, Univ. de Montpellier II (1999).
- [6] Ranc, N. & Wagner, D., Sci Eng A, 394, 87-95 (2005)
- [7] Louche H.; Vacher P. & Arrieux R. Mater. Sci. Eng., A, 404, 188-196 (2005)
- [8] Bouabdallah K., Thèse de Doctorat, Univ. de Savoie (2006).
- [9] Louche H.; Bouabdallah K.; Vacher P.; Coudert T., Baland, P. Exp. Mechanics, 48, 741-751 (2008)
- [10] Tong W., Tao H., Zhang N., Hector L. Scripta Mater., 53, 87-92 (2005)