

# Caractérisation thermo-mécanique et modélisation des bandes de transformation dans un Alliage à Mémoire de Forme

K. LAVERNHE-TAILLARD<sup>a</sup>, A. MAYNADIER<sup>a</sup>, M. PONCELET<sup>a,b</sup>, A. BENALLAL<sup>a</sup>

*a. Laboratoire de Mécanique et Technologie, 61 avenue du Président Wilson, 94235 CACHAN Cedex, France*

*b. CEA Saclay, DEN-DANS/DMN/SRMA/LC2M, 91191 GIF SUR YVETTE Cedex, France*

## Résumé :

*Les propriétés des Alliages à Mémoire de Forme (AMF) sont dues à une transformation de phase solide-solide appelée transformation martensitique. Cette transformation qui a lieu sans changement de volume est réversible et peut être activée soit par la température soit par la contrainte. La partition entre l'austénite (phase haute température) et la martensite (phase basse température) est à l'origine notamment de la pseudoélasticité. C'est cette transformation martensitique, phénomène accompagné de dégagement ou d'absorption de chaleur et qui se localise sous forme de « bandes de transformation », que l'on se propose d'observer et de modéliser ici. Dans ce travail, nous observons et caractérisons les bandes de transformation dans un AMF de type Ni-Ti au cours d'essais de traction. Pour cela, nous disposons de deux géométries d'éprouvettes (section carrée et section rectangulaire). Les observations sont réalisées par corrélation d'images sur une face de l'éprouvette, et par thermographie infrarouge sur l'autre face.*

## Abstract :

*The specific properties of Shape Memory Alloys (SMA) are due to a solid-solid phase transformation called martensitic transformation. This transformation occurs without volume change and is fully recoverable and may be activated either by mechanical stress or temperature variations. This partition between two phases - austenite at high temperature, martensite at low temperature - causes the superelastic behavior. This transformation, accompanied with heat transfers, localises in "transformation bands". Our paper deals with the observation and modelization of these transformations bands in a NiTi SMA during tension tests. The tests were performed on two sample geometries : squared section and rectangular section. The observations are performed by Digital Image Correlation on one face and infrared thermography on the other face of the sample.*

## Mots clés : Alliage à Mémoire de Forme, localisation, bandes de transformation, corrélation d'images, thermographie infrarouge

Habituellement, quand un métal ou alliage est soumis à une contrainte mécanique supérieure à sa limite d'élasticité, il subit une déformation irréversible après décharge. À l'inverse, un Alliage à Mémoire de Forme (AMF), déformé de façon apparemment plastique (jusqu'à 6 % en traction), récupère intégralement sa forme initiale à la décharge. Ce phénomène est appelé "pseudoélasticité" et est associé à une transformation de phase solide-solide réversible, appelée transformation martensitique. C'est cette transformation martensitique, phénomène accompagné de dégagement ou d'absorption de chaleur et qui se localise sous forme de "bandes de transformation", que l'on se propose d'observer ici. Ce phénomène a déjà été observé par de nombreux auteurs ces dernières années, citons notamment entre autres les travaux de Favier *et al.* [1], Sittner *et al.* [2], Daly *et al.* [3] et Feng and Sun [4].

Durant ce travail, nous observons et caractérisons les bandes de transformation dans un AMF de type Ni-Ti au cours d'essais de traction. Les observations sont réalisées, à l'aide d'une caméra CCD sur une face de l'éprouvette, et d'une caméra infrarouge sur l'autre face. Un dépouillement fin des images infrarouges et des champs de déformation par corrélation d'images permet de mettre en évidence que la géométrie et la cinétique des bandes de transformation est liée d'une part à la géométrie de l'éprouvette et d'autre part à la vitesse de déformation.

L'objectif final est d'étudier les conditions de localisation en bande dans les AMF. Il s'agit en effet de vérifier que la condition de localisation en bande suivant une direction donnée  $\vec{n}$  dépend du module tangent  $H$  selon  $\det(\vec{n}H\vec{n})$ . Le module tangent d'un AMF dépendant fortement de la température  $\theta$  de celui-ci [5], et cette température étant fortement hétérogène lors d'un essai, il faut réaliser une mesure donnant accès à la température locale  $\theta(M)$  et à l'orientation des bandes. Connaissant  $H = f(\theta)$  et  $\theta(M)$  il sera alors possible de conclure quant à la vérification de la condition de localisation [6].

## 1 Description du dispositif expérimental

### 1.1 Eprouvettes et préparation

Le matériau utilisé ici est un AMF de type nickel-titane, nuance SE508, de composition massique Ti-Ni 55, 4% fourni par la société Nitinol Devices and Components (Fremont, Californie, USA). Les éprouvettes ont été réalisées par Nitifrance (Lury sur Arnon, France) et ont subi une déformation à froid suivie d'un recuit de 2 minutes à  $480^{\circ}\text{C}$  en bain de sel. Certaines températures de transformation pour cette nuance de matériau ont pu être estimées pour une autre géométrie d'éprouvette par analyse calorimétrique différentielle et valent :  $R_s = 26^{\circ}\text{C}$ ,  $R_f = 11^{\circ}\text{C}$  et  $A_f = 25^{\circ}\text{C}$ . [7]

Nous disposons de deux géométries d'éprouvettes de traction : la première à section rectangulaire  $12 \times 2,5 \text{ mm}^2$  la seconde à section carrée  $5 \times 5 \text{ mm}^2$ . Les deux types d'éprouvettes ont une longueur utile de  $120 \text{ mm}$  environ.

Pour la corrélation d'images, la surface de l'échantillon est préalablement recouverte d'un mouchetis de peinture blanc et noir. Pour la thermographie infrarouge la surface de l'éprouvette est recouverte de noir de carbone afin d'obtenir une émissivité la plus grande possible [8].

### 1.2 Instrumentation

Les essais sont réalisés sur une machine de traction hydraulique MTS de capacité 10 kN avec mesure du déplacement du vérin et de l'effort appliqué. La face mouchetée de l'éprouvette est photographiée toutes les 5 secondes par un appareil photo numérique Canon 400D. Par ailleurs pour certains essais, l'autre face de l'éprouvette est filmée à la caméra infrarouge Cedip avec une fréquence d'acquisition de 50 Hz ou également photographiée avec un autre appareil photo numérique Canon 400D, avec prise de vues simultanées.

Le dépouillement par corrélations d'images des photos dans le domaine visible est réalisé à l'aide du logiciel CorreliQ4 [9]. La zone observée (Region Of Interest ou ROI) a une largeur de 200 pixels (ou 12 millimètres ce qui correspond à la largeur de l'éprouvette rectangulaire) et une longueur de 1700 pixels (ce qui correspond à 100 millimètres). On choisit des tailles d'images (ZOI ou Zone Of Interest) de 8 pixels.

### 1.3 Pilotage des essais

Les essais sont pilotés pour la charge en déplacement à différentes vitesses et pour la décharge en effort ( $40 \text{ N/min}$ ) pour revenir à effort nul. Le déclenchement des photos, piloté par le logiciel MTS-Testar permet d'être synchronisé avec les mesures d'effort et de déplacement de la machine.

## 2 Résultats avec caméra infrarouge

### 2.1 Observations sur section rectangulaire

#### 2.1.1 Champs de température

Un premier essai avec charge à une vitesse de  $4 \text{ mm/min}$  jusqu'à  $4 \text{ mm}$  puis maintien en position permet d'obtenir les images infrarouge de la figure 1. La présence de bandes avec un échauffement local plus important est bien mise en évidence.

#### 2.1.2 Evolution de la température le long d'une ligne

Afin de quantifier les élévations de température globale et locale, nous choisissons de réaliser un autre essai, avec une charge de  $3 \text{ mm}$  en 25 secondes, immédiatement suivie d'une décharge. L'évolution de la température est mesurée le long d'une ligne de l'éprouvette comme indiqué à la figure 2. On peut alors tracer l'évolution de la température le long de cette ligne au cours du temps à la figure 2. Cela permet d'observer que la température moyenne de l'éprouvette augmente d'une vingtaine de degrés tandis que les élévations locales de température peuvent atteindre les  $8^{\circ}\text{C}$ .

### 2.2 Observations sur section carrée

#### 2.2.1 Comparaison sections carrée et rectangulaire

On peut comparer au cours d'essais présentant les mêmes caractéristiques l'évolution de la température le long d'une ligne de l'éprouvette pour les deux géométries d'éprouvettes dont nous disposons. Cette évolution comparative est donnée en figure 3 pour une vitesse de charge de  $4 \text{ mm}$  en 1 minute. On peut noter que si l'évolution de la température globale est assez similaire pour les deux géométries, l'éprouvette à section carrée ne présente pas un phénomène de localisation aussi marqué que l'éprouvette à section rectangulaire.

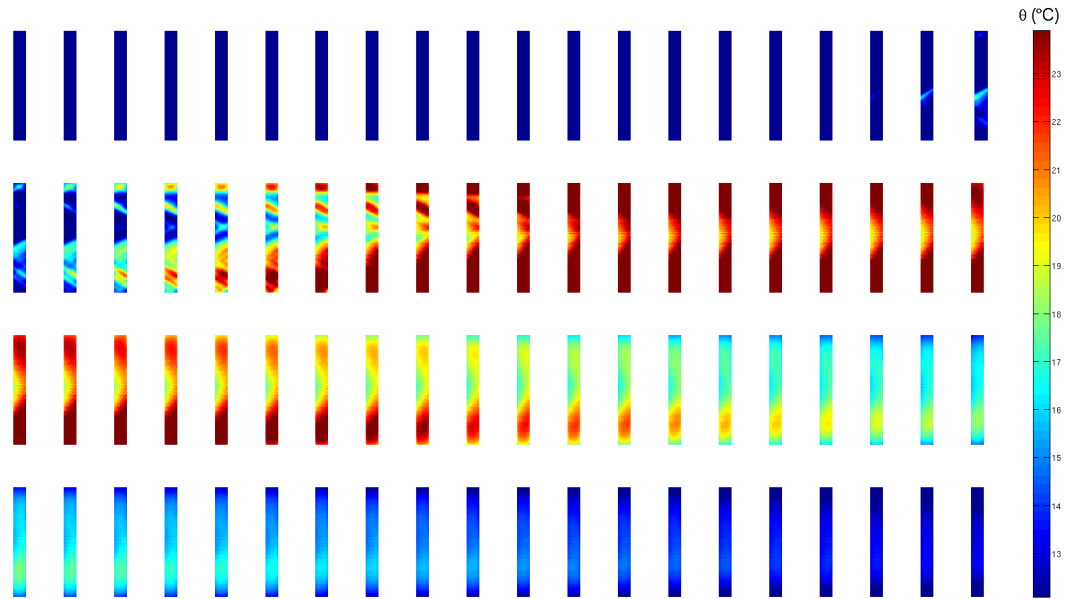


FIG. 1 – Images infrarouges successives (de gauche à droite et de haut en bas) lors d’une charge en déplacement à  $4\text{ mm/min}$  jusqu’à  $4\text{ mm}$  puis maintien (une image toutes les 10 secondes).

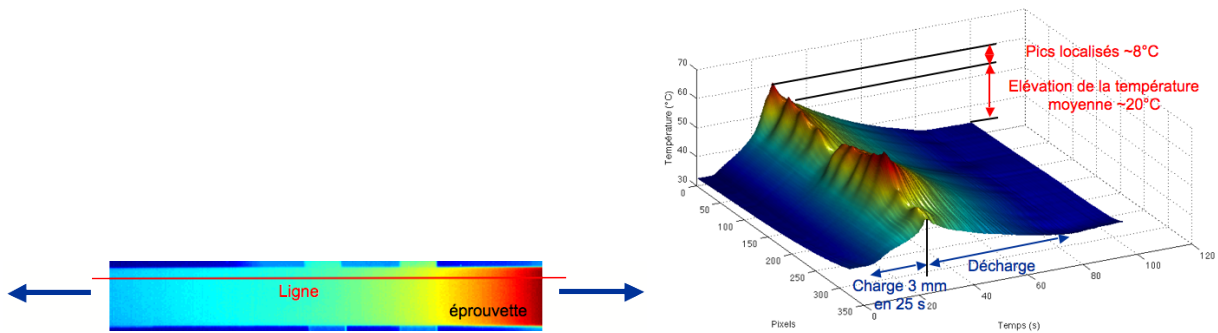


FIG. 2 – Principe de la mesure de température sur une ligne de l’éprouvette (à gauche) et évolution de la température le long d’une ligne et au cours du temps (à droite).

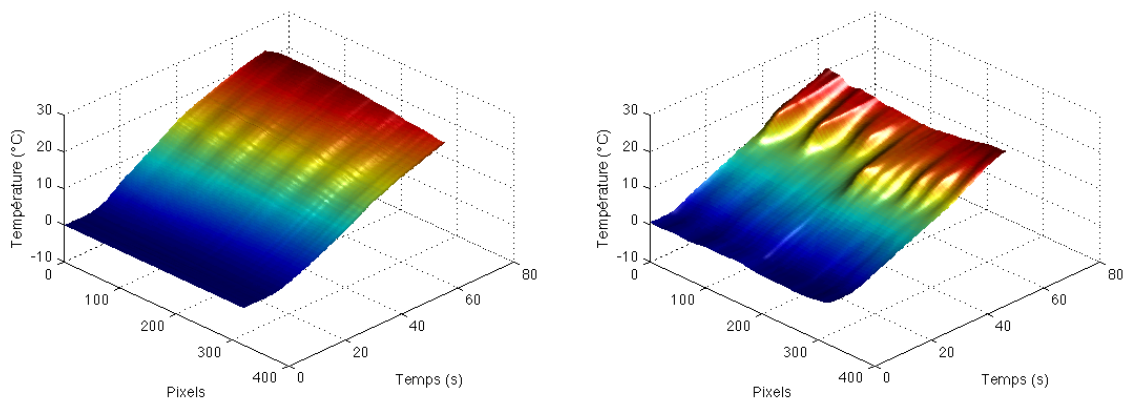


FIG. 3 – Evolution de la température le long d’une ligne et au cours du temps pour une éprouvette de section carrée (à gauche) et rectangulaire (à droite) durant une charge de  $4\text{ mm}$  en 1 minute.

## 2.2.2 Evolution de la température par rapport à la température moyenne le long d'une ligne

De manière à mieux voir qu'il existe tout de même une localisation moins intense sur les éprouvettes à section carrée nous pouvons représenter la variation locale de température  $\Delta\theta$  par rapport à la température moyenne sur la ligne à l'instant considéré  $\theta_{moyenne}$ .

$$\Delta\theta(x, t) = \theta(x, t) - \theta_{moyenne}(t) \quad (1)$$

La représentation de cette évolution de  $\Delta\theta$  est visible à la figure 4.

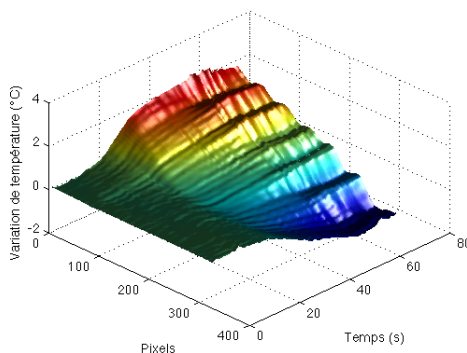


FIG. 4 – Evolution de la température le long d'une ligne ramenée à la température moyenne de la ligne pour une éprouvette à section carrée durant une charge de 4 mm en 1 minute.

## 3 Résultats par corrélation d'images sur section rectangulaire

### 3.1 Evolution des déformations le long d'une ligne

Comme pour la température, on peut tracer l'évolution de la déformation le long d'une ligne de l'éprouvette au cours du temps. La figure 5 représente par exemple l'évolution de la déformation axiale  $\epsilon_{11}$  au cours du temps sur une ligne prise dans la longueur de l'éprouvette, l'axe 1 étant la direction de traction durant une charge de 5 mm en 10 minutes. On peut remarquer que la déformation évolue dans un premier temps de façon homogène dans la longueur de l'éprouvette puis qu'elle se localise dans certaines zones. Les bandes apparaissent en des endroits et des instants différents puis s'élargissent dans la longueur de l'éprouvette vers le haut et vers le bas avec des vitesses similaires. Par ailleurs, elles ne se déplacent pas une fois apparues. Enfin, la valeur maximale de déformation atteinte semble être la même dans toutes les bandes.

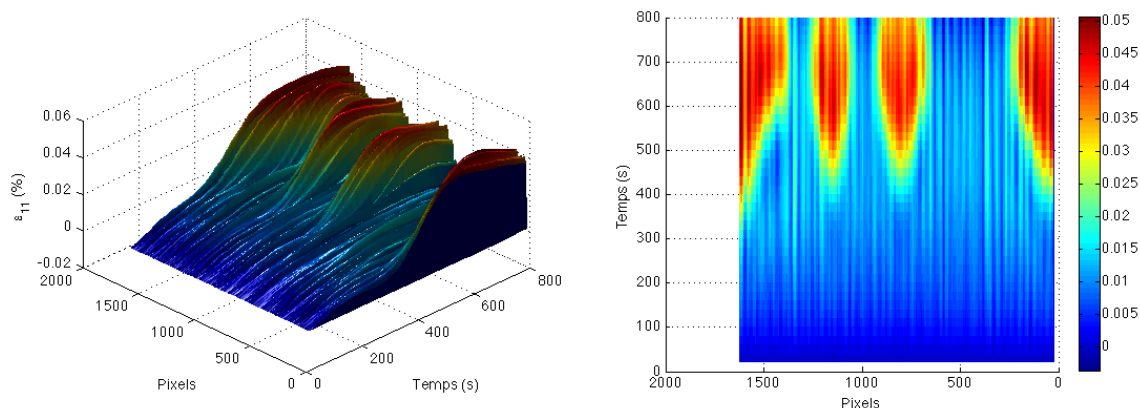


FIG. 5 – Evolution de la déformation axiale  $\epsilon_{11}$  le long d'une ligne pour une éprouvette à section rectangulaire durant une charge de 5 mm en 10 minutes : vue 3D à gauche et vue spatio-temporelle à droite.

### 3.2 Mesure de l'inclinaison des bandes de transformation

Cette déformation uniforme dans les bandes peut-être utilisée pour détecter l'inclinaison des bandes dans l'éprouvette. En effet, il existe un saut de déformation à la limite de la bande que l'on peut détecter. La figure 6 explique le principe de cette détection. Pour qu'une ZOI de coordonnées  $(i, j)$  soit sur un front supérieur, il faut que :

$$\begin{aligned} \epsilon_{11}(i, j) &> \epsilon_c \\ \epsilon_{11}(i, j + 1) &> \epsilon_c \\ \epsilon_{11}(i, j - 1) &< \epsilon_c \\ \epsilon_{11}(i + 1, j) &> \epsilon_c \\ \epsilon_{11}(i - 1, j) &< \epsilon_c \end{aligned} \quad (2)$$

Par régression linéaire sur les coordonnées des ZOI ainsi obtenues pour une déformation seuil  $\epsilon_c$  de 1% on peut alors estimer l'inclinaison de bandes que l'on trouve ici égale à 55,7 degrés par rapport à la direction de traction avec un écart type de 2,1 degrés sur 3 bandes.

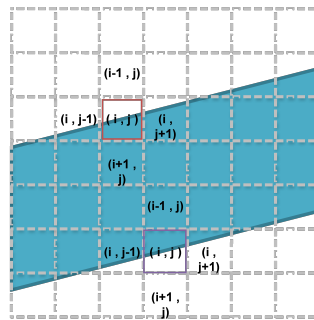


FIG. 6 – Méthode de détection des fronts de déformation sur les bandes.

### 3.3 Courbes contrainte/déformation locale

Toujours sur le même essai, et afin de quantifier les déformations locales par rapport à la contrainte, nous choisissons de placer 5 "jauges virtuelles" sur notre éprouvette. La déformation de ces jauges est mesurée par corrélation d'images. Leur taille est choisie égale à 5 ZOI (soit  $1,5 \times 1,5 \text{ mm}^2$ ) et leur position est décrite à la figure 7.

Les cinq courbes obtenues sont données en figure 8. On peut noter que les comportements mécaniques locaux sont très différents. De plus on retrouve bien le fait que la localisation a lieu préférentiellement dans des zones où le module tangent  $H = \frac{\partial \sigma}{\partial \epsilon}$  devient nul comme sur la jauge 4.

## Conclusion

Cette étude a permis de mettre en évidence certains aspects de la localisation en bandes de transformation dans les AMF :

- Influence de la géométrie des éprouvettes sur l'intensité de la localisation et l'inclinaison des bandes ;
- Importance des dégagements de chaleur locaux ;
- Apparition de bandes, où la déformation est plus importante, non mobiles qui s'élargissent avec la même vitesse jusqu'à envahir la totalité de l'éprouvette ;
- Intensité de la déformation de transformation constante dans une bande ;
- Inclinaisons des bandes identiques dans toute l'éprouvette pour une vitesse et une géométrie fixées ;
- Comportement locaux en termes de contrainte-déformation très différents.

Par la suite, d'autres essais, à vitesse plus lente, seront réalisés de façon à pouvoir quantifier l'effet de la vitesse de charge et de la géométrie sur l'inclinaison des bandes, la vitesse d'élargissement des bandes et la déformation maximale atteinte. Enfin, des mesures couplées thermiques et cinématiques seront réalisées pour vérifier les conditions de localisation sur ce type de matériau.

## Références

- [1] Favier D., Louche H., Schlosser P., Orgéas L., Vacher P., and Debove L. Homogeneous and heterogeneous deformation mechanisms in an austenitic polycrystalline ti 50.8 at.% ni thin tube under tension. investigation via temperature and strain fields measurements. Acta Materialia, 55, 2007.

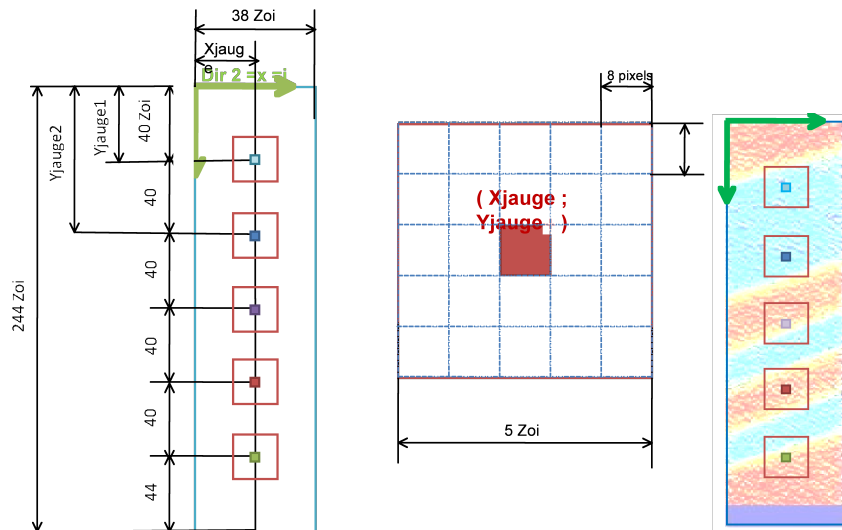


FIG. 7 – Position des "jauge virtuelle" sur l'éprouvette (à gauche) et aperçu en transparence de leur position par rapport aux bandes (à droite).

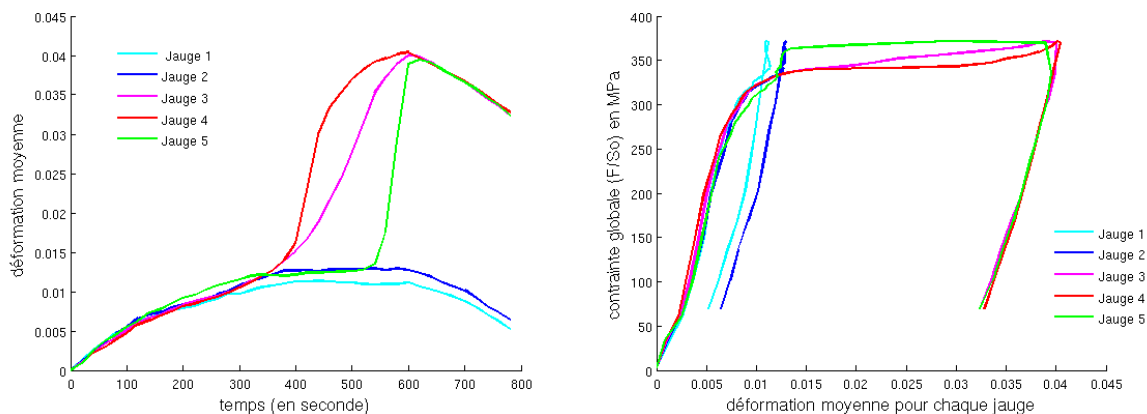


FIG. 8 – Déformation moyenne dans chacune des jauges au cours du temps (à gauche) et courbes contrainte globale - déformation jauge correspondantes (à droite).

- [2] Sittner P., Liu Y., and Novak V. On the origin of lüders-like deformation of niti shape memory alloys. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 53, 2005.
- [3] Daly S., Ravichandran G., and Bhattacharya K. Stress-induced martensitic phase transformation in thin sheets of nitinol. *Acta Materialia*, 55, 2007.
- [4] Feng P. and Sun Q. Experimental investigation on macroscopic domain formation and evolution in polycrystalline niti microtubing under mechanical force. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 54, 2006.
- [5] Bouvet C., Calloch S., and Lexcellent C. A phenomenological model for pseudoelasticity of shape memory alloys under multiaxial proportional and nonproportional loadings. *European Journal of Mechanics A/Solids*, 23, 2004.
- [6] Benallal A. and Bigoni D. Effects of temperature and thermo-mechanical couplings on material instabilities and strain localization of inelastic materials. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 52, 2004.
- [7] Taillard K. Etude du comportement thermomécanique des Alliages à Mémoire de Forme sous sollicitations multiaxiales complexes. PhD thesis, ENS Cachan, 2006.
- [8] Poncelet M. Multiaxialité, hétérogénéités intrinsèques et structurales des essais d'auto-échauffement et de fatigue à grand nombre de cycles. PhD thesis, ENS Cachan, 2007.
- [9] Besnard G., Hild F., and Roux S. "finite-element" displacement fields analysis from digital images : Application to portevin-le châtelier bands. *Experimental Mechanics*, 46, 2006.