

Méthode interspectre pour le suivi des déformations des aciers à chaud

C Pradille^a, C Aime^b, G Ricort^b, M Bellet^a, Y Chastel^a

a. Mines ParisTech, CEMEF, 1Rue Claude Daunesse 06560 Sophia Antipolis, FRANCE

b. Université Nice Sophia Antipoli, Astrophysique, Parc Valrose 06000 NICE

Résumé :

La mesure des champs de déformation par des techniques sans contact est un enjeu majeur pour caractériser le comportement des aciers à très haute température (>1200°C), plus particulièrement en petits déplacements. Nous avons développé une technique basée sur la granularité laser, couplée à une méthode interspectre. Cette méthode se montre plus précise que l'intercorrélation pour de très petits déplacements. L'utilisation de laser de longueur 532nm nous permet de nous affranchir du rayonnement thermique.

Abstract :

Strain fields measurement with non intrusive techniques are needed in order to characterize the behaviour of steels at high temperatures and subjected to small displacements. In this work we present a technique based on laser produced speckles coupled to a cross spectrum method. This method is more accurate than cross correlation for small displacements. The laser wave length used (532 nm) allows the measurements to be performed, even when thermal radiation exists.

Mots clefs : mesure de déplacement, hautes températures, granularité laser, interspectre.

1 Introduction

La compréhension de la fissuration à chaud des aciers représenterait une avancée industrielle car elle permettrait de réduire les temps de production, d'optimiser les procédures et de réduire les rebuts. Mais d'un point de vue scientifique, il y a aussi un vrai défi, car les mécanismes de fissuration à chaud sont loin d'être connus. Les raisons de cette méconnaissance sont surtout dues au fait que l'apparition de fissures se situe à la croisée de plusieurs domaines scientifiques : la thermique, la mécanique, la chimie. Dans la compréhension de ce phénomène, un point de blocage reste une bonne connaissance rhéologique des aciers à haute température. Premièrement la rhéologie pour des essais de traction simple ou complexes, dans la zone solide pour des hautes températures, jusqu'à des températures proches du solidus (un domaine assez pauvre en données). Deuxièmement les connaissances rhéologiques sont importantes aussi dans la zone pâteuse puisque haut la fissuration à chaud s'amorce dans la zone pâteuse. Des essais rhéologiques dans ces gammes de température (de 900°C à 1350°C) et pour des faibles taux de déformation (jusqu'à 5%) présente un autre défi à surmonter. En fait l'ensemble des moyens de mesure de déplacement est inopérant dans ces intervalles de température. Il est donc nécessaire de développer un moyen de mesure sans contact. Nous présenterons dans la suite une méthode d'extensométrie non intrusive connue sous le nom de speckles (ou plus exactement au sens de Labeyrie sous le nom d'interférométrie des tavelures). Cette méthode se base sur la formation de petites taches de lumière (speckles) sur un écran où l'on observe le rayonnement laser réfléchi par une surface métallique ayant des défauts. Les causes de l'apparition des speckles sont les interférences constructives et destructives des réflexions du rayon incident sur les défauts de surface du métal. Mais plutôt que se baser sur la lumière réfléchie, nous avons choisi d'utiliser une méthode de granularité laser, celle-ci permettant de réaliser des mesures de déplacement moins localisées.

2 Dispositif expérimental

Le système utilisé pour réaliser ces mesures est décrit sur la Figure 1. Comme cela a été mentionné précédemment, la technique de mesure est basée sur la granularité laser, celle-ci est causée par la rugosité d'une surface éclairée par une lumière cohérente. Chaque irrégularité de la surface agissant

comme une source secondaire de lumière, ce sont elles qui vont donner à l'image enregistrée l'aspect granulaire formé de zones sombres et de grains lumineux (Goodman 2000)

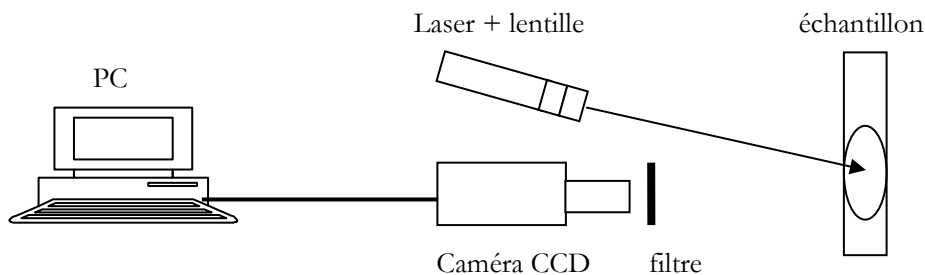


Figure 1: schéma de principe du dispositif Speckles

L'échantillon est donc éclairé par un laser dont on diffracte le rayon lumineux afin d'avoir la zone de mesure la plus grande possible. Ce signal lumineux est quant à lui enregistré par une caméra CCD. Dans les mesures de déplacements à très haute température, comme celles que l'on souhaite réaliser, un problème majeur, outre la température en elle-même, est le rayonnement des éprouvettes qui sature le capteur CCD et empêche toute visualisation du marquage. Pour des températures avoisinant les 1500°C le rayonnement se fait principalement dans le rouge. Donc pour éliminer ce rayonnement nous utilisons un laser de longueur d'onde 532 nm. Un filtre de même longueur d'onde est placé devant l'objectif de la caméra. L'association des deux permet de s'affranchir des rayonnements tout en continuant à suivre le marquage laser.

3 Traitement du signal

En pratique, on veut déterminer le champ de déplacements dans une certaine zone entre les instants t et $t + \Delta t$. Pour cela on cherche à suivre le déplacement d'un motif de base Figure 2

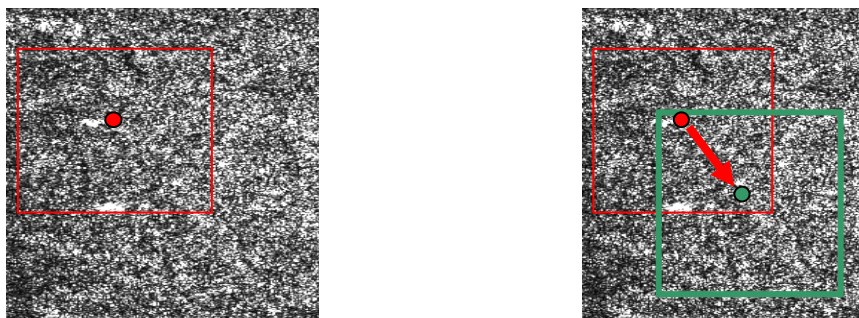


Figure 2: zone d'étude sur l'image initiale et sur une image déformée

Si la surface reste inchangée, les speckles sont animées d'un mouvement de translation (donc l'image observée ne doit pas se modifier). Cette méthode présente certains avantages par rapport à l'utilisation d'extensomètres classiques. Elle permet de mesurer rapidement (à la vitesse de la prise d'images) des petits déplacements (dépendant de la résolution, i.e. la taille du pixel) et offre la possibilité d'obtenir des champs de déplacement (puisque le spot laser est une tâche de 30 mm de diamètre). Pour obtenir des champs de déplacement, l'image initiale peut être découpée en sous images.

3.1 Méthode interspectre (Grec et al 2006) et (Petrov et al 1982)

Considérons une surface plane et infinie couverte de speckles, que l'on suppose représentés en échelle de gris. A chaque point de la surface (x,y) on peut affecter un nombre réel $f(x,y)$. La transformée de

Fourier de $f(x, y)$ peut s'écrire :

$$TF\{f(x, y)\} = F(u, v) = \iint f(x, y)e^{-2i\pi(ux+vy)} dx dy \tag{1}$$

Si on considère une deuxième image $g(x, y)$, qui est une translation d'un vecteur (x_0, y_0) de l'image initiale $f(x, y)$. La transformée de Fourier de $g(x, y) = f(x - x_0, y - y_0)$ devient :

$$TF\{g(x, y)\} = G(u, v) = \iint g(x, y)e^{-2i\pi(ux+vy)} dx dy = \iint f(x - x_0, y - y_0)e^{-2i\pi(ux+vy)} dx dy \tag{2}$$

$$= \iint f(x, y)e^{-2i\pi(u(x+x_0)+v(y+y_0))} dx dy = F(u, v)e^{-2i\pi(ux_0+vy_0)} \tag{3}$$

L'interspectre I de ces deux fonctions peut s'écrire :

$$I = F(u, v)G^*(u, v) = F(u, v)F^*(u, v)e^{2i\pi(ux_0+vy_0)} = |F(u, v)|^2 e^{2i\pi(ux_0+vy_0)} \tag{4}$$

Le déplacement est introduit par un terme de phase linéaire, proportionnel à la fréquence spatiale u_0 selon x et v_0 selon y . Un pixel produit un déphasage de π à la fréquence de coupure qui est de $\frac{1}{2}$, soit : $\exp(2i\pi \times 1 \times \frac{1}{2})$.

Considérations unidimensionnelles :

Le déplacement 2D d'une image peut être décomposé suivant x et y , donc les expressions (1,2 et 4) peuvent dans le cas 1D s'écrire :

$$f(x) = g(x - \epsilon) \text{ donc la transformée de fourrier s'écrit } G(u) = F(u)e^{2i\pi u \epsilon} \text{ d'où } I = |F(u)|^2 e^{2i\pi u \epsilon} \tag{5}$$

Pour illustration, nous donnons la figure 1 comme exemple d'interspectre (module et phase). A haute fréquence spatiales, on observe un retour à zéro de la phase au lieu d'observer une variation entre $-\pi$ et π . Différentes explications de ce phénomène seront avancées au paragraphe 4.2.

Sachant que l'argument de I est égal $2\pi u \epsilon$, la pente de la phase (en noir sur la figure 3) permet de retrouver le déplacement ϵ entre les deux images.

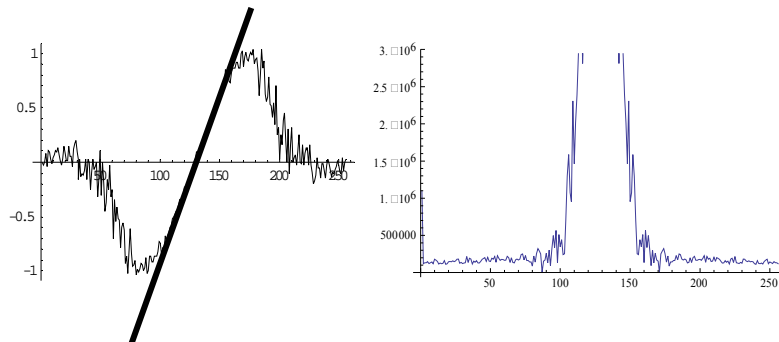


Figure 3: module (droite) et phase (gauche).

3.2 Méthode d'intercorrélation

L'intercorrélation est la technique de corrélation d'images couramment utilisée pour la mesure de champs de déformations (Chu et al 85). En fait, à partir du théorème de Wiener Kinchine, on trouve que l'intercorrélation n'est autre que la transformée de Fourier de l'interspectre (eq 5), et donc ces deux fonctions contiennent les mêmes informations. Mais en pratique il est plus facile d'utiliser la méthode interspectre pour quantifier des déplacements inférieurs au pixel, le sub pixel ne pouvant pas être obtenu simplement avec une méthode d'intercorrélation. Malgré les développements de l'intercorrélation, qui permettent de réaliser du sub pixel grâce à une interpolation de la fonction d'intercorrélation (Hild et al 99), l'interspectre reste avantageux ne serait ce que par le temps nécessaire pour traiter une image.

4 Résultats expérimentaux

4.1 Validation de la technique expérimentale pour des déplacements à haute température

Avant toute chose, il est nécessaire de valider la faisabilité de suivi des speckles lors d'un essai de traction à haute température (>1250 °C). Il est nécessaire de vérifier que l'utilisation d'un laser à 532 nm et un filtre de même longueur d'onde soit suffisant pour filtrer le rayonnement et ne pas saturer le CCD, tout en permettant un suivi de la granularité laser.

4.2 Déplacement uniforme

Afin de valider méthode interspectre, on réalise des mesures de déplacements sur une éprouvette reliée à une vis micrométrique. Le tableau ci-dessous résume les erreurs trouvées entre la consigne et la mesure.

| déplacement théorique en pixels | déplacement théorique en microns | déplacement mesuré en pixels | déplacement mesuré en microns | erreur en % |
|---------------------------------|----------------------------------|------------------------------|-------------------------------|-------------|
| 0,254 | 2,000 | 0,265 | 2,087 | 4,355 |
| 0,507 | 4,000 | 0,523 | 4,124 | 3,099 |
| 0,761 | 6,000 | 0,739 | 5,834 | 2,773 |
| 1,014 | 8,000 | 1,021 | 8,054 | 0,673 |
| 1,268 | 10,000 | 1,260 | 9,942 | 0,581 |
| 2,535 | 20,000 | 2,533 | 19,981 | 0,095 |
| 7,605 | 60,000 | 7,674 | 60,546 | 0,909 |
| 12,675 | 100,000 | 12,884 | 101,649 | 1,649 |

Tableau 1: résumé des mesures de validation en déplacement connus

On remarque que l'erreur relative, bien que restant faible, est plus élevée pour des déplacements faibles. Ce résultat nous amène à proposer quelques pistes pouvant expliquer ces erreurs.

4.2.1 Etude de l'effet du décalage non circulaire dans le calcul de déformation par autocorrelation d'image selon la technique de Speckles.

Il est bien connu que l'effet d'un décalage circulaire d'un signal discret dans sa DFT (Discrete Fourier Transform) est d'introduire un facteur de phase linéaire. Le produit de la DFT d'un signal et de la DFT du même signal décalé circulairement produit une phase linéaire dont la pente nous donne exactement à un facteur près le décalage. Le problème se présente lorsque l'on ne connaît pas le décalage (comme dans le cas d'une image qui bouge) et que l'on veut le déterminer en réalisant cette opération d'interspectre en deux dimensions. Dans ce paragraphe on va chercher à estimer les perturbations sur la linéarité de la phase lorsque l'opération d'interspectre est faite avec la DFT d'un signal décalé non circulairement, ce qui est le cas du dépouillement de la technique Speckles. On se propose alors de faire une simulation dans le cas unidimensionnel. Pour ce faire on génère un vecteur unidimensionnel de nombres générés aléatoirement suivant la loi normale $N(0,1)$ (pour la taille du vecteur on choisit 128 pour augmenter l'efficacité de l'algorithme FFT). Ce signal est la réalisation de longueur finie d'un processus stochastique à densité spectrale de puissance plane. Il s'agit du signal le plus riche en fréquences qu'on puisse avoir. On effectue alors l'interspectre d'abord avec un signal décalé circulairement et puis avec un signal où l'espace laissé par les échantillons décalés est rempli avec des nombres aléatoires. Dans ce deuxième cas on simule ce qui se

produit lors d'un essai mécanique, puisqu'une partie de l'image (c'est-à-dire un ensemble de speckles) sort du carré de mesure tandis qu'une nouvelle image rentre de l'autre côté.

Comme illustré par figure 4 partir d'un certain seuil de décalage (ici 5 échantillons), on remarque de fortes perturbations dans la linéarité de la phase de l'interspectre. Et l'on observe que ces perturbations influent sur le dépliage de la phase (et par conséquent sur la mesure de la pente), ce qui n'était pas le cas pour un déplacement de 4 échantillons. Ce phénomène tend à expliquer l'erreur observée dans le **Tableau 1** pour un déplacement de 100 microns.

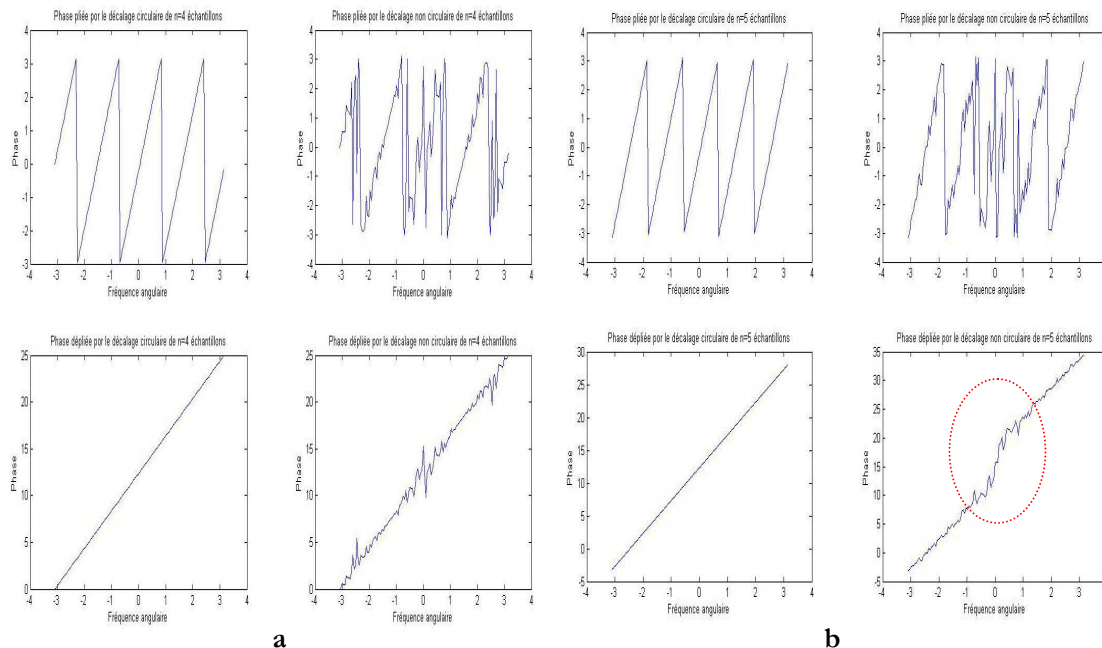


Figure 4: influence du décalage circulaire sur la phase pliée et dépliée pour des déplacements de 4 échantillons (a) et 5 échantillons (b). On remarque que pour un décalage de 5 échantillons la phase dépliée devient discontinue, ce qui provoque une erreur dans la mesure du déplacement.

Étude de l'effet du sous-échantillonnage.

Il est bien connu que le sous-échantillonnage provoque le chevauchement des hautes fréquences du spectre du signal continu, rendant la reconstruction du signal à partir des échantillons impossible. Les signaux limités dans le temps donnent lieu à des spectres non-nuls presque partout, mais on peut fréquemment déterminer une largeur de bande hors de laquelle le spectre du signal continu a un module négligeable. Si la fréquence de Nyquist de l'échantillonnage est hors de cette bande, on peut considérer que le vecteur d'échantillons (toujours dans le cas d'un signal fonction d'une seule variable spatiale ou temporelle) représente fidèlement le signal. Un traitement plus détaillé des effets spectraux de la décimation peut être trouvé dans (Oppenheim et al. 1999). On y démontre qu'une décimation de M échantillons d'un signal discret produit le même résultat que la réalisation un échantillonnage sur le signal continu avec un nombre d'échantillons M fois inférieur. C'est-à-dire, que si :

$$TF\{x[n]\} = X(e^{i\omega}) \quad (6)$$

alors pour $y[n] = x[nM]$

$$TF\{y[n]\} = Y(e^{i\omega}) = \frac{1}{M} \sum_{s=0}^{M-1} X\left(e^{i\left(\frac{\omega - 2\pi s}{M}\right)}\right) \quad (7)$$

Donc on peut modéliser un sous-échantillonnage avec la décimation d'un vecteur dont la transformée de Fourier est clairement limitée en fréquence. Si la décimation est assez grande pour provoquer un effet de repli spectral important, on peut s'attendre à des effets importants sur la phase de l'interspectre. On montre Figure 5 une fonction qui représente graphiquement les résultats d'une telle démarche. Comme signal on utilise du bruit blanc filtré passe bas (appelé aussi bruit coloré) (on utilisera toujours un filtrage Butterworth d'ordre trois).

Comme le montre la Figure 5, le sous échantillonnage a pour effet de produire une pente dans la phase qui est différente de celle attendue, ce qui dans ce cas donnerait une mesure de déplacements erronée. En effet sur la Figure 5, malgré que l'on décale le signal de 1, la phase ne varie pas entre $-\pi$ et π . Cette erreur sur le déplacement d'une fraction de pixel est à rapprocher des erreurs rencontrées dans le tableau 1. Donc le meilleur moyen pour améliorer nos résultats serait d'augmenter la résolution de nos mesures.

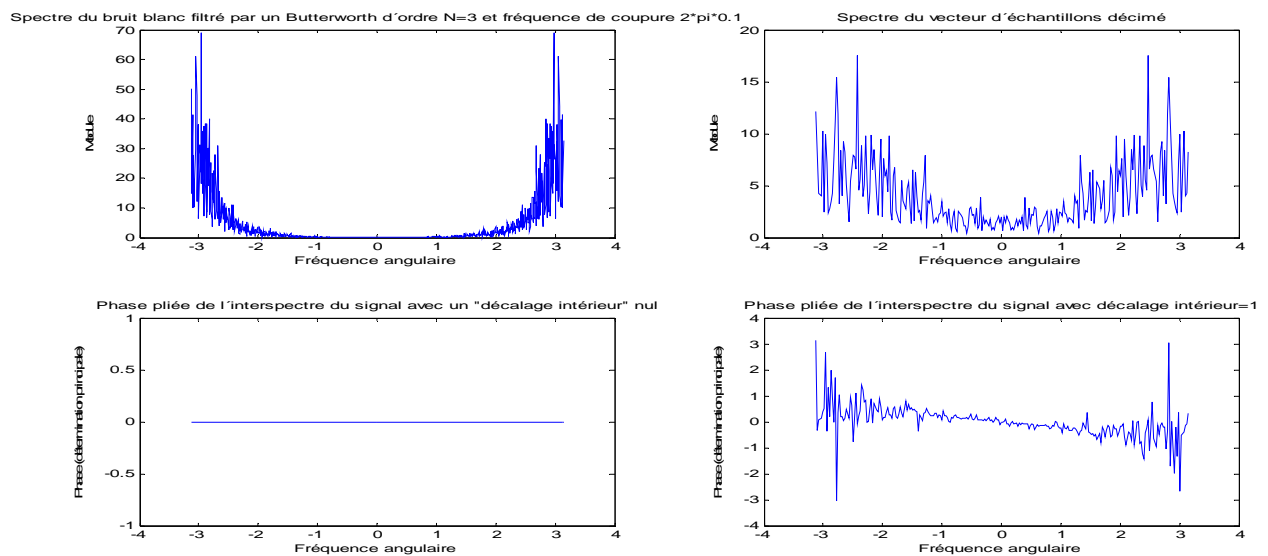


Figure 5: effet du sous échantillonnage signal initial à gauche signal décimé à droite

5 Conclusions

L'application de la technique de l'analyse interspectrale à l'étude des déplacements lors d'essais de traction à haute température montre des avantages déterminants par rapport à la classique analyse par intercorrélation. Néanmoins comme on a pu le voir cette méthode nécessite encore quelques adaptations du point de vue technique (amélioration de l'échantillonnage) que du point de vue traitement des images. L'analyse interspectrale permettra dans un avenir proche d'obtenir des cartes de déformations plus précises et plus rapidement que par analyse de corrélation. Ces cartes de déformations couplées à des simulations numériques thermo-mécaniques (Bay et al 2003) représentatives de l'essai mécanique permettront d'identifier le comportement mécanique des aciers à très hautes températures.

References

- [1] Goodman., Statistical optics, Wiley classics library, 2000.
- [2] C Grec et al., Differential speckle interferometry: in depth analysis of the solar photosphere, A&A 463, 1125-1136, 2006
- [3] R Petrov et al., application de l'analyse interspectrale à la speckle interférométrie, J Opticsl, 13, 331-337, 1982.
- [4] F Hild et al, mesure de champs de déplacement 2D par intercorrélation d'images : Correli, internal report 230, LMT Cachan
- [5] Oppenheim A.V., *Discrete-Time Signal Processing*. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, 1999, pp. 450-454.
- [6] F Bay, A numerical model for induction heating processes coupling electromagnetism and thermomechanics, Int Journal for numerical method in Engineering 2003

