

# Développement d'une méthode de mesure de champs cinématiques pour étudier la coupe à chaud

**R. MOULART<sup>a</sup>, L. FOUILLAND-PAILLÉ<sup>b</sup>, M. EL MANSORI<sup>c</sup>**

a. Laboratoire « MSMP » (Mechanics Surfaces and Materials Processing) – Arts et Métiers ParisTech  
– Rue Saint Dominique BP 508 – 51006 Châlons-en-Champagne – FRANCE -

Raphael.Moulart@ensam.eu

b. Laboratoire « MSMP » (Mechanics Surfaces and Materials Processing) Arts et Métiers ParisTech –  
Rue Saint Dominique BP 508 – 51006 Châlons-en-Champagne – FRANCE -

Laurence.Fouilland@ensam.eu

c. Laboratoire « MSMP » (Mechanics Surfaces and Materials Processing) Arts et Métiers ParisTech –  
Rue Saint Dominique BP 508 – 51006 Châlons-en-Champagne – FRANCE -

Mohamed.Elmansori@ensam.eu

## Résumé : (16 gras)

*Ce travail se concentre sur le développement d'une technique de mesure de champs cinématiques pour l'étude des phénomènes se déroulant lors de la découpe à chaud d'alliages métalliques. Le développement d'une méthode de mesure permettant d'observer le comportement mécanique à ces températures élevées (environ 1000°C) reste un challenge. Ce travail se propose de relever ce défi. Des cartes de déformations et de vitesses de déformation ont été obtenues grâce à l'élaboration d'un mouchetis résistant à la température couplé avec un système d'observation ad hoc pour permettre une étude cinématique locale lors de la découpe à chaud de la pièce à l'aide de la corrélation d'images numériques.*

## Abstract : (16 gras)

*The present study is focused on the development of a kinematic full-field measurement technique for the study of phenomena taking place during hot cutting of metallic alloys. Developing an instrumentation to observe the mechanical behavior at such high temperatures (about 1000°C) remains a challenging task. The present work proposes to rise to this challenge. Strain and strain rate maps have been obtained by developing a thermo-proof speckle pattern coupled with an ad hoc observing system to allow a local kinematic study of the part during the hot cutting thanks to digital image correlation (DIC).*

**Mots clefs : Découpe à chaud ; corrélation d'images numériques ; vitesses de déformations locales**

## 1 Introduction

Les analyses mécaniques à haute température sont d'une grande importance pour comprendre le comportement d'un matériau lors d'une opération de transformation à chaud. Elles sont par exemple utiles

pour caractériser l'intégrité d'une surface après une opération de découpe à chaud [1]. Toutefois, malgré leur importance, de telles mesures sont rares car elles sont très difficiles à mettre en œuvre expérimentalement dans de telles conditions sévères (température élevée, essais dynamiques).

Ce papier traite d'une étude de faisabilité de mesures de champs cinématiques locaux au cours d'une opération de découpe à chaud par corrélation d'images numériques. Les mesures sont effectuées sous sollicitation dynamique et à température élevée (environ 1000°C). Pour effectuer ces mesures locales à des températures élevées, trois challenges principaux doivent être relevés :

- être capable de réaliser un mouchetis sur la surface de la pièce à étudier capable de survivre aux hautes températures appliquées ;
- observer la zone d'intérêt à une échelle locale (mésoscopique) ;
- enregistrer des images à haute fréquence pour capturer la physique de la coupe.

Chacune de ces conditions reste en elle même difficile à satisfaire expérimentalement. Le défi devient d'autant plus complexe lorsque les trois conditions doivent être remplies.

## 2 Méthodologie

### 2.1 Configuration expérimentale

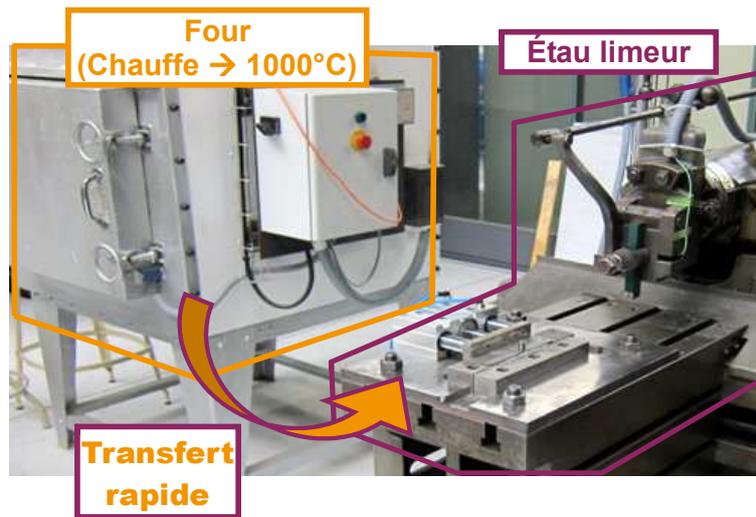
Le dispositif expérimental est similaire à celui utilisé par Fouilland et El Mansori [1]. Il est constitué d'un étau limeur à l'aide duquel les échantillons sont découpés après avoir été au préalable portés à une température de 1000°C dans un four situé à proximité (Fig. 1(a)).

Les échantillons sont des pièces parallélépipédiques en fonte GS usinées de manière à présenter un bossage de forme également parallélépipédique (la partie à découper). Cette forme a été choisie afin d'obtenir une surface plane sur laquelle la détermination des champs de déformations planes est possible à l'aide d'un algorithme de corrélation d'images numériques 2D. Un schéma des ces échantillons peut être vu figure 2.

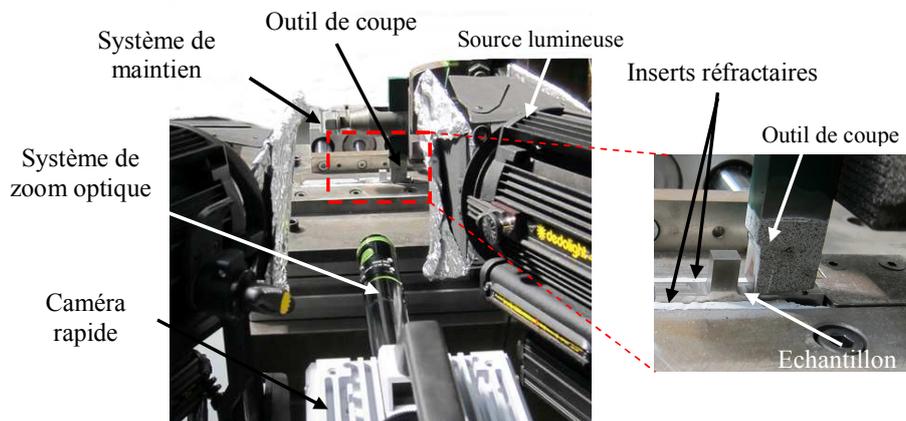
Comme indiqué précédemment, les échantillons sont chauffés avant la découpe dans un four jusqu'à environ 1000°C, c'est à dire au-delà de la température d'austénitisation. Pour éviter de redescendre en dessous de cette température, des inserts réfractaires sont inclus au système de bridage rapide mis en place (Fig. 1(b)). En outre, il a été montré que le temps entre la sortie du four et le déroulement de l'essai ne devait pas excéder 7 s [1].

Plusieurs paramètres peuvent influencer la qualité de la découpe comme la température, la vitesse de coupe, l'angle de coupe. Pour des raisons pratiques, cette étude s'est limitée à l'étude de l'influence de l'angle de coupe : trois différentes configurations ont été testées : angle positif (+10°), nul et négatif (-10°) (Fig. 3).

Pour enregistrer les images qui seront ensuite traitées par l'algorithme de corrélation d'images, une caméra rapide a été utilisée (Photron FastCAM SA5). Celle-ci est montée sur un système de guidage conçu pour permettre un positionnement fin de la caméra par rapport à l'échantillon. Pour observer les phénomènes se déroulant au niveau local lors de la découpe, un système de zoom optique est monté sur cette caméra (QIOPTIQ Optem FUSION 7 :1). L'ensemble du dispositif expérimental instrumenté peut être vu figure 1(b).



(a) Vue globale



(b) Détail

FIGURE 1 – Dispositif expérimental.

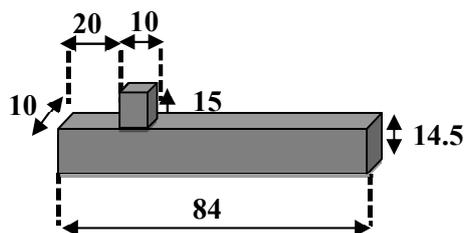


FIGURE 2 – Schéma de la pièce à découper.

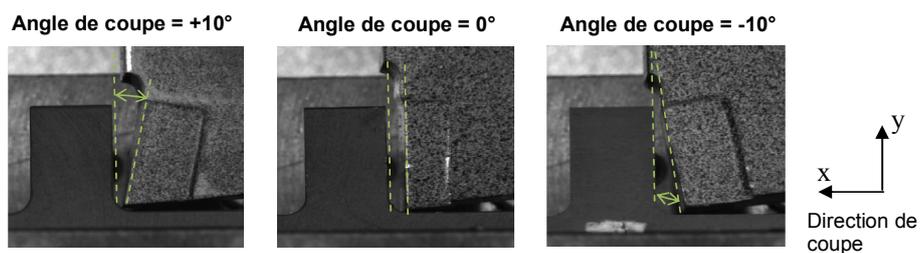


FIGURE 3 – Différents angles de coupe testés.

## 2.2 Développement d'un mouchetis résistant aux températures élevées

Comme il a été souligné précédemment, les mesures de champs cinématiques locaux au cours d'une opération de découpe à chaud par corrélation d'images numériques cumulent trois difficultés : la température élevée, la nécessité de grossissement et la fréquence d'acquisition.

Le recours à la corrélation d'images numériques suppose une surface optiquement contrastée à la température de la découpe (1000°C). C'est pourquoi un mouchetis résistant aux hautes températures a été développé. Pour ce faire, les échantillons sont tout d'abord polis mécaniquement jusqu'à un polissage de finition 1  $\mu\text{m}$  puis attaqués à l'aide d'une solution de Nital. De la poudre de dioxyde de titane (pigment blanc) est ensuite diluée dans de l'éthanol puis pulvérisée sur la surface de l'échantillon à l'aide d'un aérographe. Un tel mouchetis peut subir l'élévation de température jusqu'à 1000°C sans perdre sa couleur blanche qui est importante pour assurer un bon contraste des images enregistrées (le matériau de base apparaissant en noir). Un exemple de mouchetis ainsi réalisé est montré figure 4(a).

Après pulvérisation, un recuit de l'échantillon a été systématiquement effectué pour augmenter l'adhérence de ce mouchetis. Il s'inspire de la technique développée par Chen *et al.* [2] pour de l'oxyde de cobalt et consiste en trois paliers successifs de 30 min à différentes températures (120°C, 200°C et 340°C) entrecoupés de retours à température ambiante. La surface des échantillons est ainsi marquée par un motif aléatoire capable de résister à de grandes déformations (Fig. 5).

Dans la configuration utilisée, le grossissement obtenu avec le zoom optique est tel que la zone observée est d'environ  $5 \times 5 \text{ mm}^2$  sur la totalité du capteur CMOS de la caméra ( $1000 \times 1000$  pixels). La zone étudiée est représentée sur la Fig. 4(a). La taille des particules de la poudre de dioxyde de titane conduit à une taille de mouchetis compatible à un tel grossissement avec l'application de la corrélation d'images numériques (on peut voir une imagerie typique figure 4(b)).

La scène de découpe est éclairée par deux lampes à décharge de 400 W ainsi qu'une lampe halogène de 500 W. Malgré cela, la scène reste assez sombre ce qui ne permet pas une fréquence d'acquisition supérieure à 7000 images par seconde. Pour cette même raison, l'ensemble de l'étude a été limitée à la vitesse nominale la plus lente que puisse imposer l'étau limeur, c'est à dire  $0,6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

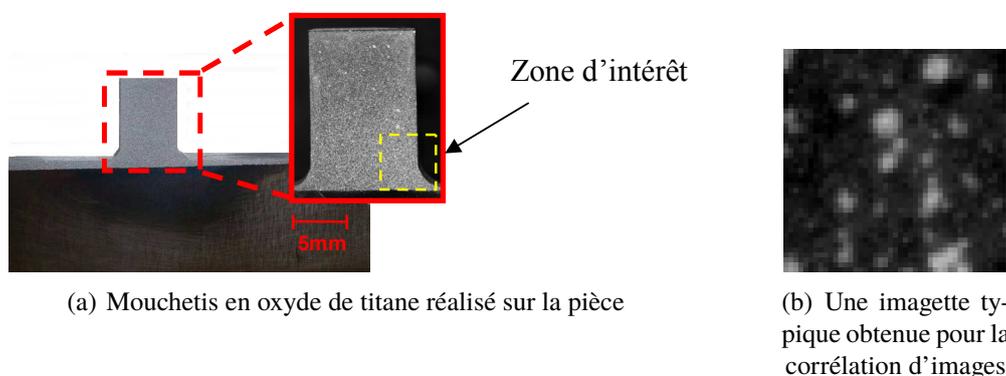


FIGURE 4 – Mouchetis réalisé pour essais en température.

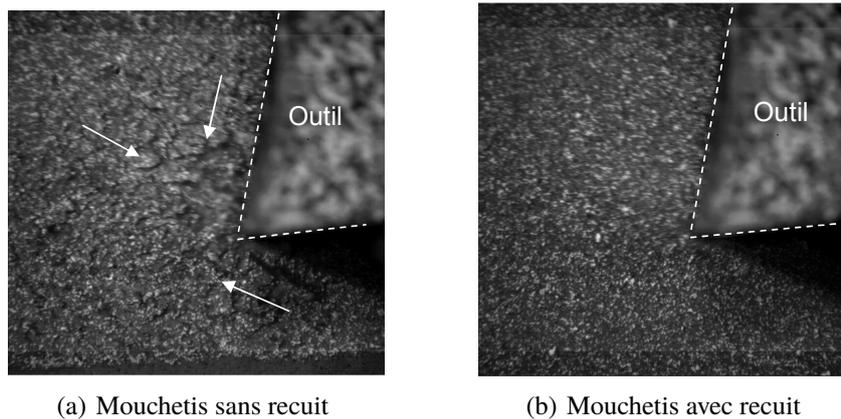


FIGURE 5 – Influence du recuit sur la tenue du mouchetis lors de l'essai.

### 3 Résultats

L'étude cinématique locale a donc consisté en l'observation de la partie coupée à sa base pour trois angles de coupe différents ( $+10^\circ$ ,  $0^\circ$  et  $-10^\circ$ ) et une unique vitesse nominale d'outil ( $0,6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ).

La corrélation d'images a été réalisée à l'aide du logiciel VIC-2D. Les paramètres utilisés étaient les suivants :

- taille d'imagette de  $45 \times 45$  pixels ce qui mène à un motif suffisamment texturé à l'intérieur d'une imagette pour assurer une mesure de déplacement correcte compte tenu des mauvaises conditions d'éclairage (Fig. 4(b)) ;
- pas entre deux imagettes de 2 pixels conduisant à un chevauchement de celles-ci et par conséquent à un effet de lissage sur les données ;
- interpolation bicubique sur les niveaux de gris pour la reconstruction sub-pixel du déplacement [3].

Dans ces conditions, la résolution en déplacement est de 0,011 pixel (soit environ  $0,05 \mu\text{m}$ ) pour une résolution spatiale de  $200 \mu\text{m}$ .

Pour obtenir des cartes de déformations planes, les déplacements doivent être dérivés spatialement. En raison des grands déplacements et des grandes déformations impliqués dans l'opération de coupe, l'expression du tenseur des déformations linéarisées n'est plus valide. Par conséquent, Le tenseur des déformations de Green-Lagrange a été utilisé. Ces composantes planes ont pour expression [4] :

$$\begin{cases} \varepsilon_{xx} &= \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{\partial u_x}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial u_y}{\partial x} \right)^2 \right] \\ \varepsilon_{yy} &= \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{\partial u_x}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial u_y}{\partial y} \right)^2 \right] \\ \varepsilon_{xy} &= \frac{1}{2} \left[ \frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial x} \cdot \frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \cdot \frac{\partial u_y}{\partial y} \right] \end{cases} \quad (1)$$

Cette dérivation spatiale est nécessairement une dérivation numérique, les données étant un ensemble de valeurs numériques disposées sur une grille 2D régulière. Or, il est bien connu qu'une différentiation point-à-point sur des valeurs expérimentales augmente l'influence du bruit de mesure. Par conséquent,

pour obtenir des cartes de déformations ayant une signification, il est impératif de mettre en place une procédure de lissage/dérivation [5]. Ici, il a été choisi d'utiliser les moindres carrés pénalisés [6].

L'application de cette procédure de lissage suivie d'une dérivation point-à-point conduit à une résolution en déformation d'environ  $4,5 \cdot 10^{-4}$ .

Les cartes de déformations planes ainsi obtenues sont montrées figure 6 pour l'étape à 1,86 ms après le début de l'opération de coupe.

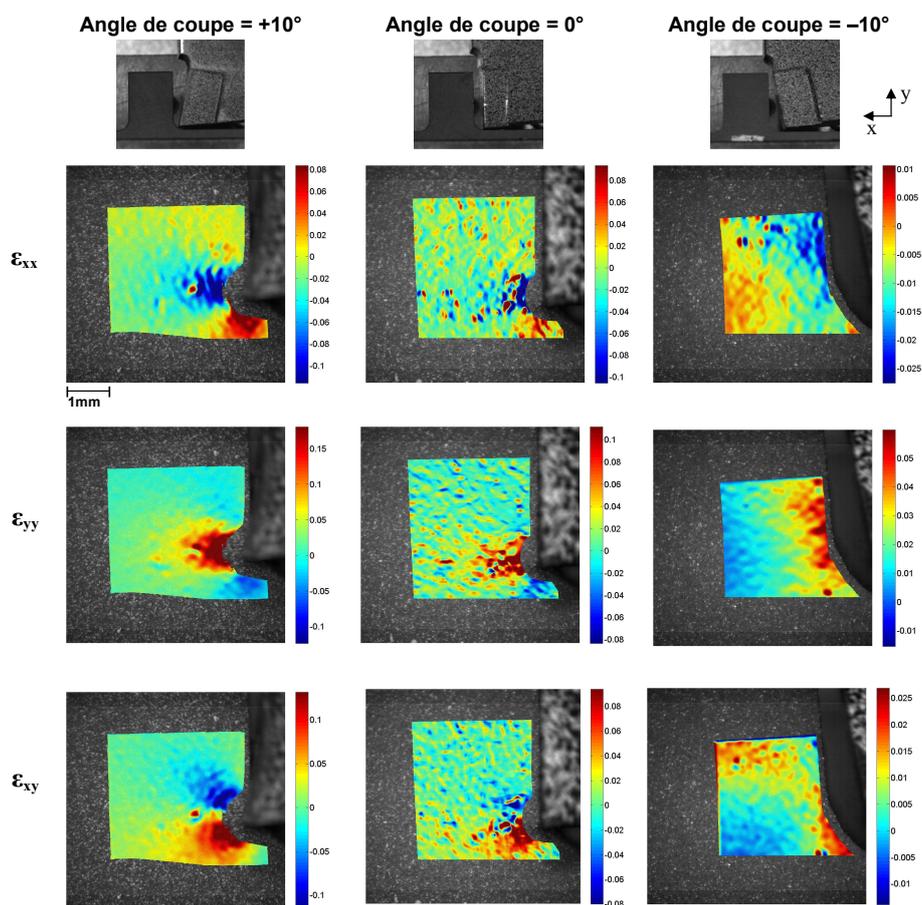


FIGURE 6 – Cartes de déformations planes pour les différentes configurations à  $t = 1,86$  ms.

Des concentrations de déformations sont évidentes à proximité de la zone d'impact de l'outil de coupe. On peut observer une similitude de la distribution des déformations pour des angles de coupe de +10° et 0°. Cette concentration locale est moins évidente pour la configuration de 0° à cause de la nature de l'interaction. En effet, avec l'angle 0°, l'outil entre en contact avec toute la surface du bossage à découper ce qui conduit à un état de compression plus ou moins homogène dans la direction horizontale  $x$ . Pour l'angle +10° en revanche, l'interaction est plus locale car c'est principalement l'arête de l'outil qui interagit avec la base du bossage ce qui conduit à un état de cisaillement local.

Pour un angle de coupe de -10°, la répartition de déformations est typique d'un état de flexion (avec des déformations de traction dans la direction verticale  $y$  pour l'extrados du bossage) jusqu'à une certaine valeur de déformation conduisant à une fissure locale.

Les cartes de taux de déformation sont obtenues à partir des cartes de déformations. Il a été choisi de considérer la 1<sup>ère</sup> déformation principale calculée comme suit (en supposant que la direction perpendiculaire au plan du bossage est une direction principale) :

$$\varepsilon_I = \frac{1}{2} \left[ \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \sqrt{(\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy})^2 + 4\varepsilon_{xy}^2} \right]. \quad (2)$$

De cette valeur, des taux de déformation sont calculés par une simple dérivation point-à-point :

$$\dot{\varepsilon}_I(t_i) = \frac{\varepsilon_I(t_i) - \varepsilon_I(t_{i-1})}{t_i - t_{i-1}}. \quad (3)$$

De cette manière, des cartes de taux de déformation ont été obtenues pour les trois différents configurations de coupe. La résolution en taux de déformation est d'environ  $5 \text{ s}^{-1}$ . Quelques cartes caractéristiques sont présentées figures 7 et 8.

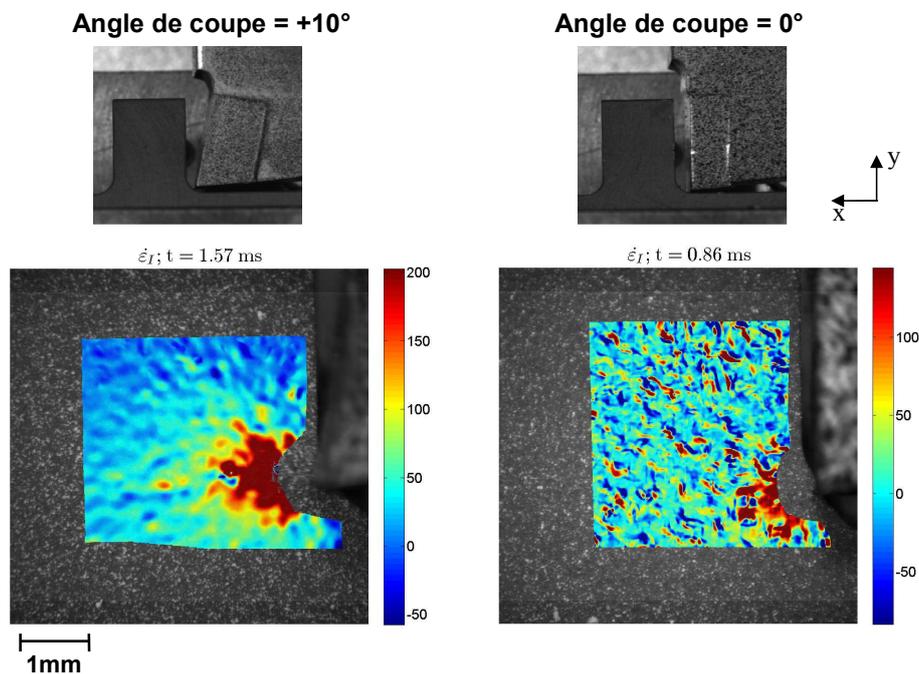
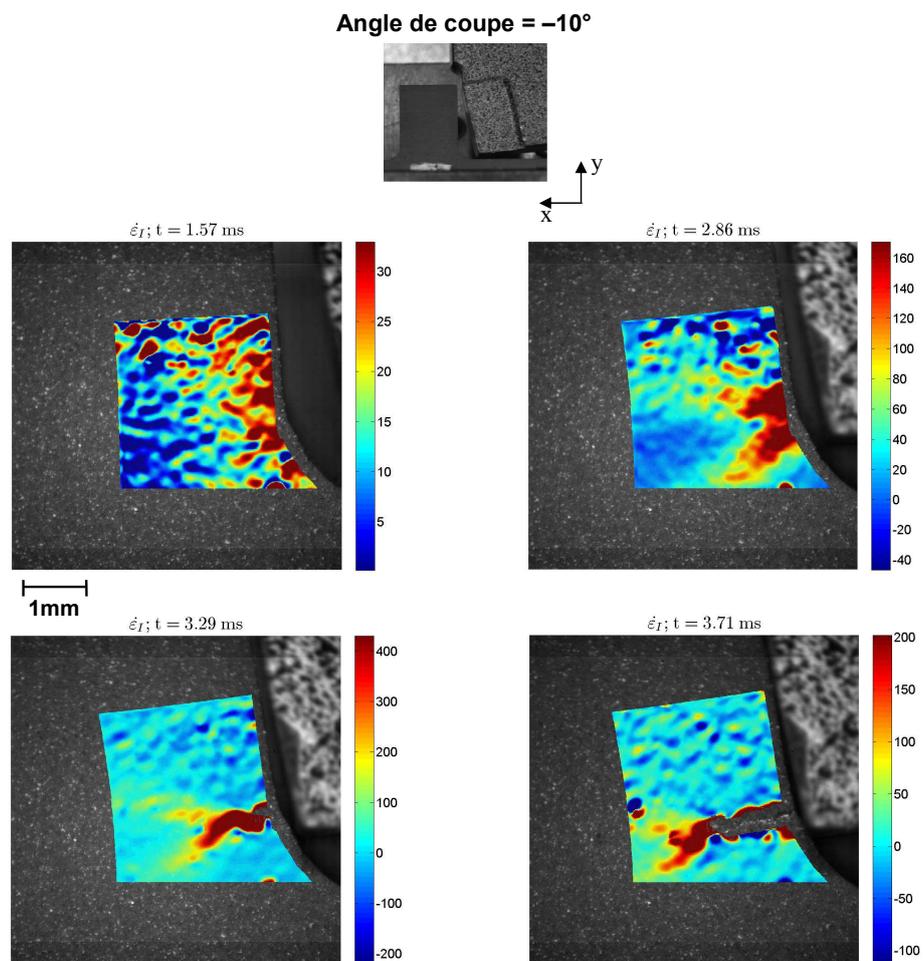


FIGURE 7 – Cartes de taux de déformations pour deux angles de coupe respectivement à  $t = 1,57 \text{ ms}$  et à  $t = 0,86 \text{ ms}$ .

La figure 7 montre deux cartes obtenues pour des angles de coupe de  $+10^\circ$  et  $0^\circ$ . La première carte montre  $\dot{\varepsilon}_I$  1,57 ms après le début de l'interaction entre l'outil et le bossage pour un angle de coupe de  $+10^\circ$ . Celle-ci fait clairement voir une concentration de taux de déformation dans la région située en pointe d'outil avec des valeurs d'environ  $200 \text{ s}^{-1}$ .

La deuxième carte montre  $\dot{\varepsilon}_I$  0,86 ms après le début de l'interaction entre l'outil et le bossage pour un angle de coupe de  $0^\circ$ . Celle-ci est plus homogène et présente une valeur moyenne de taux de déformation d'environ  $25 \text{ s}^{-1}$  ce qui confirme les conclusions faites précédemment aux vues des cartes de déformations quant à l'homogénéité de la sollicitation avec un angle de coupe nul. Toutefois, une légère concentration du taux de déformation peut être observée en pointe d'outil avec des valeurs d'environ  $100$  à  $150 \text{ s}^{-1}$ . Ceci peut s'expliquer du fait que l'outil commence par heurter le congé de raccordement du bossage (ce qui est visible sur l'image).

Enfin, la figure 8 montre quatre cartes de taux de déformation obtenues pour un angle de coupe de  $-10^\circ$  à différentes étapes de l'opération de coupe (respectivement 1,57, 2,86, 3,29 et 3,71 ms après le début

FIGURE 8 – Cartes de taux de déformations à différents instants pour un angle de coupe de  $-10^\circ$ .

de l'interaction entre l'outil et le bossage). Ceci permet de comprendre l'évolution des évènements pour cette configuration particulière.

Dans une première phase, le taux de déformation suit une distribution typique de flexion (comme ce qui a été observé pour les cartes de déformations). Dans un deuxième temps, les taux de déformations se concentrent dans la partie supérieure du congé de raccordement du bossage alors que la pointe de l'outil n'est pas encore en contact avec ce dernier (en raison de la sollicitation de traction induite par l'effet de flexion). Cette étape montre une concentration en forme de V (avec des valeurs d'environ  $150$  à  $200 \text{ s}^{-1}$ ) suivi rapidement par l'ouverture d'une fissure (avec des valeurs d'environ  $400 \text{ s}^{-1}$ ). La propagation de la fissure se produit ensuite pour des valeurs réduites de taux de déformation (environ  $200 \text{ s}^{-1}$ , visible sur la quatrième carte).

## 4 Conclusion

Dans cet article, une procédure pour mesurer les déformations et taux de déformation sur des pièces métalliques pendant une opération de coupe à chaud à l'aide de mesures de champs cinématiques a été proposée. La configuration expérimentale induit des conditions sévères qui combinent trois défis expérimentaux :

- mesure à haute température (environ  $1000^\circ\text{C}$ ) ;
- mesure à grande vitesse (ici, 7000 images par seconde) pour être en mesure d'étudier la dynamique de l'opération de découpe ;
- observation à l'échelle locale avec un grossissement relativement important (environ 5 mm pour 1000 pixels du capteur CMOS).

Pour satisfaire à ces trois exigences, un mouchetis capable de supporter les hautes températures a été développé et validé expérimentalement. Ce mouchetis a été observé et enregistré durant l'opération de découpe à l'aide d'une caméra rapide couplée à un système de zoom optique adapté.

Trois configurations expérimentales ont été étudiées : angle de coupe positif, nul et négatif ( $+10^\circ$ ,  $0^\circ$  et  $-10^\circ$ ) à une vitesse de coupe nominale de  $0,6 \text{ ms}^{-1}$ .

La méthodologie proposée se révèle efficace pour mesurer les cartes de déformations et de taux de déformation avec des résolutions satisfaisantes. Cette étude de faisabilité devrait conduire prochainement à l'étude de différentes configurations de coupe (matériau, température, vitesse de coupe, angles de coupe, etc.).

## Remerciements

Tout d'abord, les auteurs tiennent à remercier la direction de la recherche d'Arts et Métiers ParisTech pour leur soutien financier à ce projet.

Ils aimeraient également remercier Wafa El May et Kévin Le Mercier pour leur travail sur le sujet à différentes étapes du projet.

Enfin, ils aimeraient remercier Julien Voisin, Cédric Person et Joël Diévaque pour leur aide technique.

## Références

- [1] L. Fouilland and M. El Mansori. Experimental study of the brittle-ductile transition in hot cutting of SG iron specimens. *Journal of Materials Processing Technology*, 213(2) :201–213, 2013.
- [2] X. Chen, N. Xu, L. Yang, and D. Xiang. High temperature displacement and strain measurement using a monochromatic light illuminated stereo digital image correlation system. *Measurement Science And Technology*, 23 :125603, 2012.
- [3] M.A. Sutton, J.-J. Orteu, and H. W. Schreir. *Image Correlation for Shape, Motion, and Deformation Measurements : Basic Concepts, Theory and Applications*. Springer, 2009.
- [4] C.L. Dym and I.H. Shames. *Solid Mechanics, A Variational Approach*. Springer, 2013.
- [5] P. Feissel. From displacement to strain (Chap. 7). In *Full-field measurements and identification in solid mechanics*, pages 191–221. John Wiley & Sons, 2013.
- [6] R. Moulart and R. Rotinat. On the use of a penalized least squares method to process kinematic full-field measurements. *Measurement Science And Technology*, 25(7) :070201, 2014.