HAL open science

Simulation expérimentale de contraintes résiduelles par contraintes thermiques. Application à la problématique du flambage de tôles induit par contraintes résiduelles lors du laminage

Nicolas Tardif, Dinh-Cuong Tran, Ali Limam

To cite this version:

Nicolas Tardif, Dinh-Cuong Tran, Ali Limam. Simulation expérimentale de contraintes résiduelles par contraintes thermiques. Application à la problématique du flambage de tôles induit par contraintes résiduelles lors du laminage. Congrès français de thermique et contexte incertain, May 2013, Gerardmer, France. hal-01863081

HAL Id: hal-01863081

https://hal.science/hal-01863081

Submitted on 28 Aug 2018

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.

Simulation expérimentale de contraintes résiduelles par contraintes thermiques. Application à la problématique de flambage de tôles induit par contraintes résiduelles lors du laminage.

Nicolas TARDIF[1*], Tran Dinh CUONG[1], Ali LIMAM[1]

[1]Laboratoire de Génie Civil et d'Ingénierie Environnementale - INSA LYON
20, av Albert Einstein - 69621 Villeurbanne Cedex
[*](auteur correspondant : nicolas.tardif@insa-lyon.fr)

Résumé - Une des limitations du procédé de laminage réside dans la maîtrise de la planéité des tôles laminées. Les défauts de planéités sont la conséquence d'un flambage élastique de la tôle. Le flambage est engendré par des contraintes résiduelles propres au procédé. L'étude proposée cherche à analyser finement le lien entre distribution de contraintes résiduelles et amplitude et mode de flambage. Pour ce faire, la distribution de contraintes résiduelles est simulée expérimentalement par des contraintes thermiques. Cette méthode permet de recréer les défauts de planéité usuels de laminage (centre long, bord long, frisette).

Nomenclature

t	temps, s	Y	Coordonnée suivant l'axe transverse, mm
θ	température, °C	Z	Coordonnée suivant l'axe hors plan, mm
X	Coordonnée suivant l'axe de la traction homogène, mm	$\bar{\sigma}$	Contrainte longitudinale moyenne, MPa
		ϵ_{xx}	Déformation longitudinale

1. Introduction

Livrer des tôles aux caractéristiques mécaniques croissantes, avec des qualités géométriques élevées et au meilleur coût est actuellement l'un des enjeux majeurs de l'industrie de l'acier et de l'aluminium. Pour le lamineur, cela se traduit par des efforts de laminage plus élevés et par des difficultés accrues, en particulier à réaliser des tôles géométriquement parfaites. Des efforts plus élevés lors du laminage induisent des déformations plus grandes des cylindres du laminoir. Les réductions hétérogènes qui en résultent se traduisent, au sein de la tôle, par des contraintes résiduelles post-laminage pouvant être localement suffisamment compressives pour induire des défauts de planéité significatifs par flambage (figure 1).
Le flambage est une instabilité géométrique s'appliquant aux structures dont au moins une dimension est petite devant les deux autres. Lorsque l'on comprime une tôle dans son plan, un déplacement hors-plan est généré à partir d'une certaine charge critique conduisant à une perte partielle ou totale de rigidité. Cette charge critique de flambage dépend de la géométrie de la structure ainsi que de ses conditions aux limites.

L'objectif de l'étude est d'analyser finement le lien entre contraintes résiduelles et flambage (mode et amplitude) [2].

Instrumenter in situ un banc de laminage ne permet pas de contrôler de façon satisfaisante les contraintes résiduelles au sein de l'éprouvette . Ainsi, un banc d'essai a été développé avec

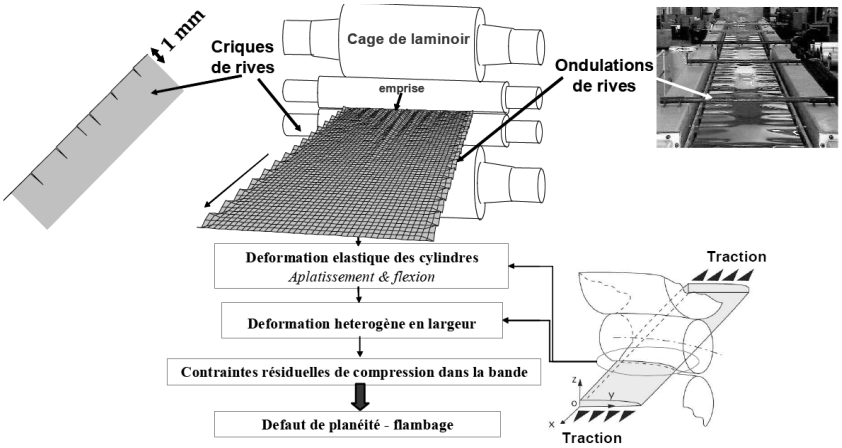

Figure 1 *Défaut de planéité en laminage [1]*

l'objectif de simuler les contraintes résiduelles à partir d'une physique mieux contrôlée : par application de patchs thermiques [3, 4] . Les essais constituent des essais de référence permettant la validation de modèles numériques dédiés au flambage de tôle fabriquée par laminage [5, 1, 6, 7].

Le banc d'essai permet ainsi de simuler des modes de flambages réalistes pour le cas du laminage (flambage centre long, bord long, frisettes) mais aussi plus complexe (état de contrainte comprenant du cisaillement...).

Dans une première partie, le banc d'essai est présenté. Ensuite, un essai de flambage thermique est décrit pour montrer les capacités du banc d'essai développé.

2. Banc d'essai de flambage thermique

La figure 2 montre le banc d'essai de flambage thermique.

Une tôle est encastrée à un bâti par l'intermédiaire de mors rotulés. Elle est soumise à un état de traction homogène par un système de levier. Cette état de traction uniforme représente les tractions (de débobinage, d'intercage ou de bobinage ...) du procédé de laminage (figure 1).

L'effort appliqué à l'éprouvette est mesuré par une cellule d'effort de capacité 33.3kN. L'espacement des mors est mesuré par deux capteurs LVDTs. Enfin l'homogénéité de la contrainte longitudinale suivant la direction transversale de l'éprouvette est déterminée par une mesure de déformation logitudinale. Des jauges de déformation sont collées sur l'éprouvette à cet effet.

En plus de ce chargement "homogène", le champ de contrainte est perturbé localement par un système de patch thermique [8]. En effet, pour engendrer des contraintes thermiques, il est nécessaire d'avoir des écarts de température entre zones voisines, les points chauds voient ainsi leur dilatation gênée ce qui produit au niveau de ces points une contrainte thermique de compression. Le flux de chaleur nécessaire à l'élévation locale de la température est appliqué par rayonnement à l'aide de lampes infrarouges (émetteurs infrarouges ondes courtes en quartz section 23 x 11 avec réflecteur Or). Afin que le flux de chaleur soit absorbé et non réfléchi

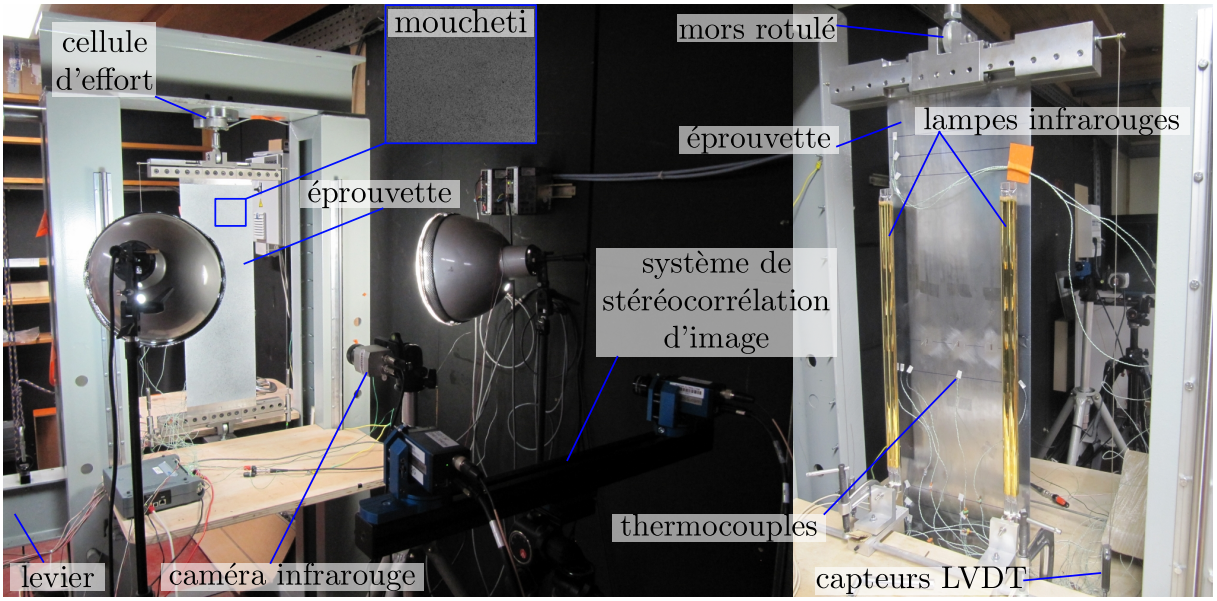

Figure 2 *Banc d'essai de flambage thermique*

par la tôle, les points chauds sont peints à l'aide d'un spray noir mat. Les points froids ont quant à eux une surface polie miroir pour minimiser l'absorption de flux de chaleur mal dirigé. La principale source de dissipation d'énergie se fait par convection naturelle, la tôle étant par définition fine, elle a donc une grande surface participant à cette dissipation par convection. Les essais ne sont pas quasistatiques dans le sens où l'on ne cherche pas à se placer à chaque instant sur un équilibre stationnaire du champ thermique. L'objectif est de réaliser d'importants gradients thermiques et donc la cinétique de chauffage est plus importante que la cinétique de diffusion de la chaleur dans les zones froides.

La température est mesurée localement par des thermocouples de type K. Le champ de température est mesuré par une caméra infrarouge MICROEPSILON thermoIMAGER TIM 400 avec objectif 30° de résolution optique 382x288 Pixel et de fréquence d'acquisition maximum 80Hz.

Enfin, le champ de déplacement hors plan induit par le flambage de la tôle est acquis par un système de stéréocorrélation d'images. Ce système nécessite la projection d'un motif aléatoire en niveau de gris (moucheti) réalisé à l'aide de deux sprays de peinture haute température noir et blanc.

Toutes les mesures à part les mesures des jauges de déformation sont synchronisées à 3Hz à l'aide d'un générateur de fonction.

3. Présentation d'un essai

3.1. Éprouvette

L'éprouvette d'essai est présentée sur la figure 3. Elle est constituée d'un acier M615 (acier moyen carbone) d'épaisseur 0.3mm. La position des jauges de déformation J_i ainsi que des

Thermocouples TC_i est indiquée sur la figure 3. Certains thermocouples sont thermosoudés dans le champ de vision de la caméra IR et permettent un réglage et un contrôle de son emissivité. D'autres sont disposés hors-champ et permettent une extrapolation du champ de température. Les points chauds, peints en noir mat, sont disposés sur les bords de l'éprouvette et recouvrent une zone de $25 \times 400\text{mm}^2$ (voir figures 2 et 3) dans le but de générer un défaut de planéité de type frisette.

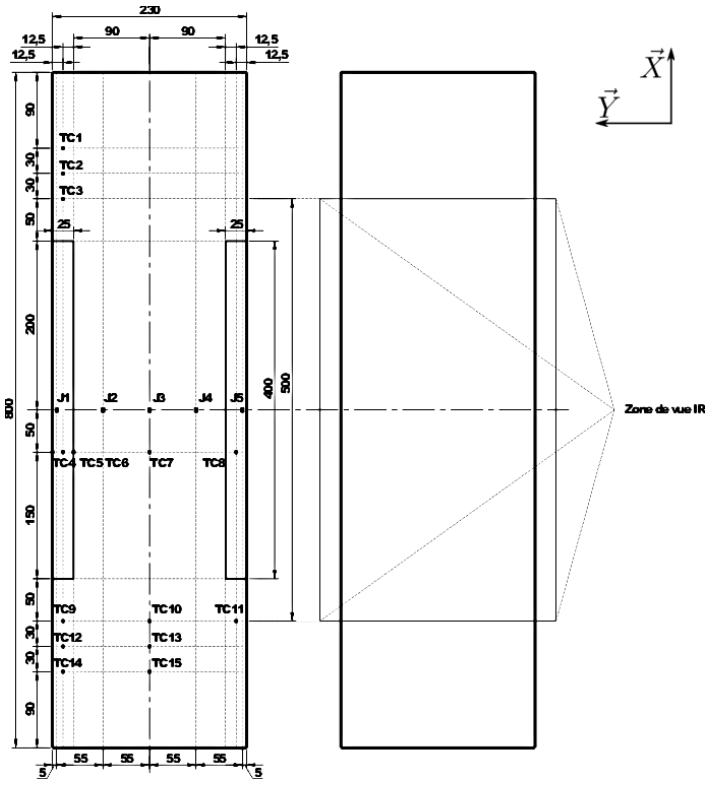

Figure 3 *Schéma de l'éprouvette d'essai et de la position des capteurs.*

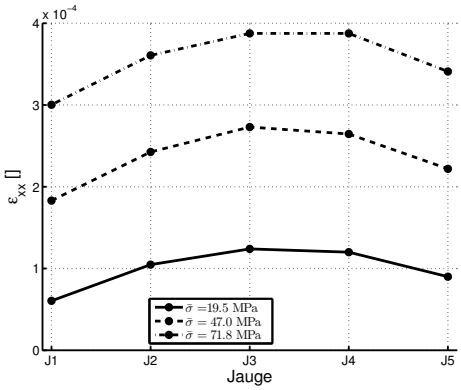

Figure 4 *Évolution de la déformation élastique longitudinale dans le sens transverse*

3.2. Simulation expérimentale d'un défaut de planéité de type frisette

Le phénomène de flambage est très sensible aux imperfections de surface moyenne si ces imperfections suivent le même mode que le mode de flambage. Ainsi, la première étape consiste en la mesure des imperfections de surface moyenne par stéréocorrélation d'images pour différentes amplitudes de traction uniforme. Dans le même temps, l'évolution de la déformation axiale suivant la direction transverse est mesurée par les jauges de déformation (figure 4). La figure 6 représente les imperfections de surface moyenne pour une contrainte $\bar{\sigma}$ de 1.5 Mpa. La figure 8 représente les imperfections de surface moyenne pour une contrainte $\bar{\sigma}$ de 47 MPa, traction appliquée durant la montée en température.

Ensuite, le chargement thermique est appliqué. L'évolution de la température mesurée par les thermocouples TC5, TC6 et TC7 est présentée sur la figure 5. Les repères allant de 1 à 7 correspondent aux figures 7 à 20 qui représentent le champ de température ainsi que la coordonnée hors plan de la surface de la tôle à différents instants de l'essai.

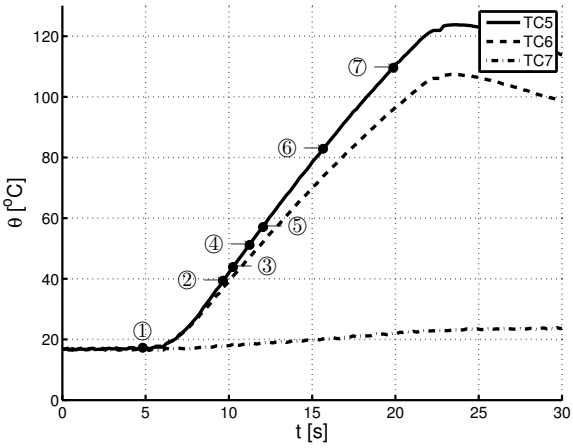

Figure 5 *Évolution de la température mesurée par les thermocouples 5, 6 et 7 en fonction du temps*

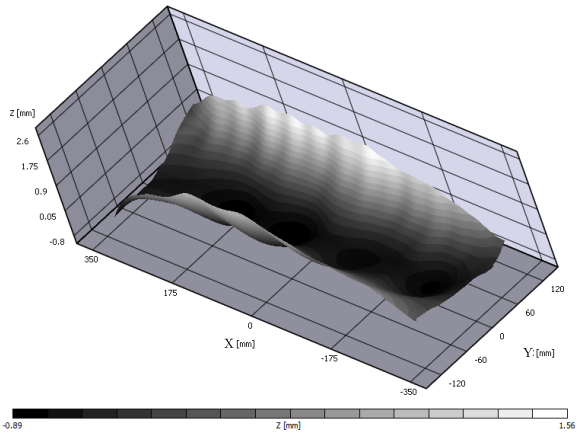

Figure 6 *DIC : état initial*

Le premier mode de flambage apparaît à l'instant 2, l'initiation de deux ondes peut être distinguée sur la figure 10 sur le bord gauche de la tôle. A partir de cet instant, la montée en température provoque deux phénomènes : une augmentation de l'amplitude des modes de flambage existants ainsi que des changements de modes. Les changements de modes sont caractérisés par l'apparition de nouvelles ondes qui est éventuellement accompagnée d'une modification de la période spatiale des ondes existantes (figures 18 et 20).

Les essais, de par les mesures champs qui ont été mises en places, sont simulables par des codes de mécanique standards gérant les problèmes de thermoélasticité et de flambage.

4. Conclusion

La maîtrise de la planéité des tôles issues du procédé de laminage est un enjeu industriel majeur. Les défauts de planéité sont générés par des contraintes résiduelles induites par le procédé. Des outils numériques existent pour simuler ce type de défauts mais n'ont été que très peu comparés au réel du fait de la complexité de la physique et des couplages mis en jeu lors du laminage (Grande déformation, (visco)plasticité, thermique, tribologie...).

Le but de cette étude est de réaliser des essais de référence permettant une analyse fine liant distribution de contrainte résiduelle et mode de flambage généré. Pour cela, un banc d'essai a été mis au point permettant de simuler des contraintes résiduelles par des contraintes thermiques.

Le banc d'essai est capable de reproduire des modes de flambage courants en laminage (bord long, centre long, frisettes) et peut être adapté à des chargements plus complexes (cisaillement,...). Il permet aussi de tester le relâchement de la contrainte de traction uniforme. Cette traction inhibe le flambage. Son relâchement peut laisser apparaître des défauts de planéité (planéité dite latente).

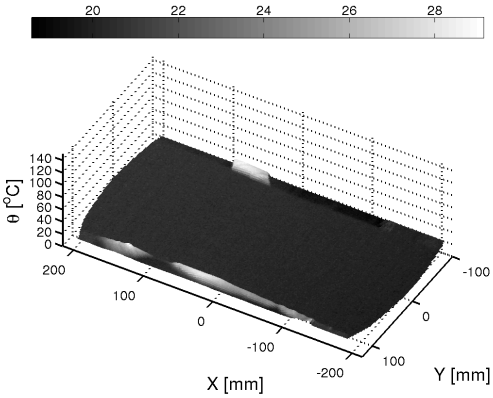

Figure 7 *IR : instant 1*

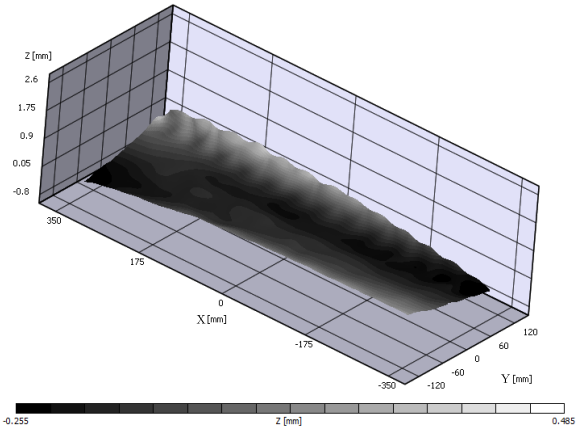

Figure 8 *DIC : instant 1*

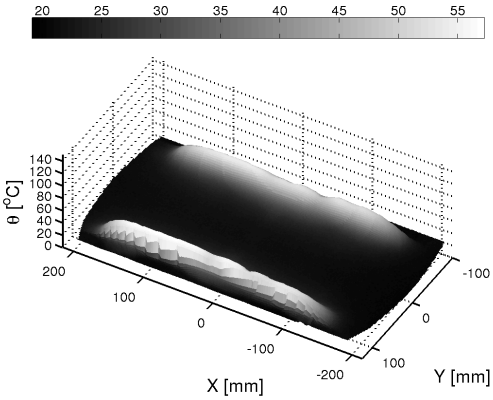

Figure 9 *IR : instant 2*

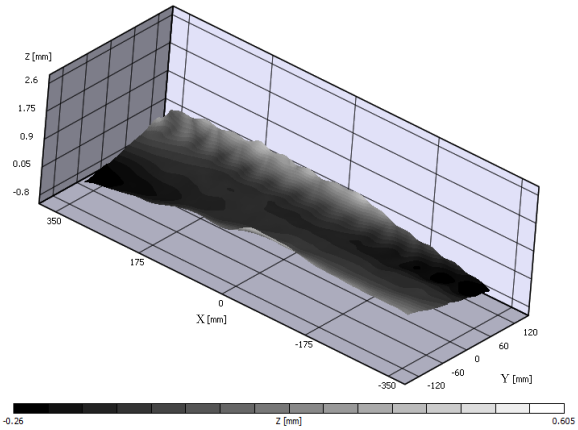

Figure 10 *DIC : instant 2*

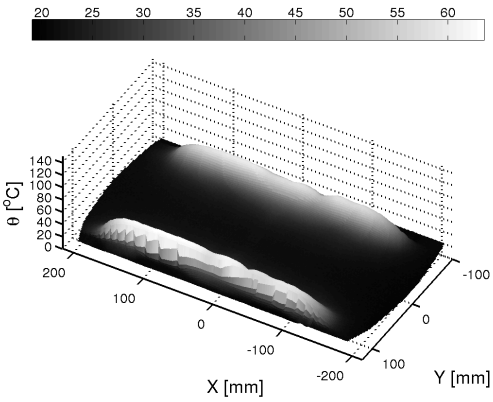

Figure 11 *IR : instant 3*

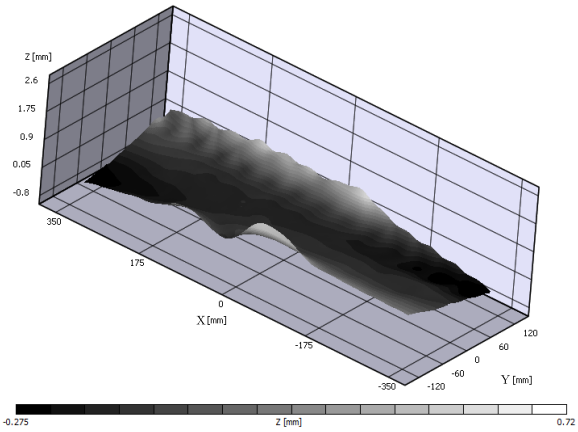

Figure 12 *DIC : instant 3*

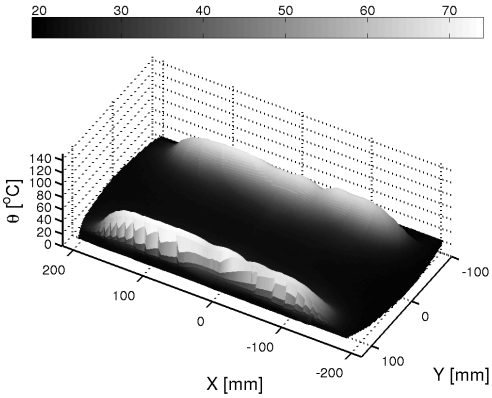

Figure 13 *IR : instant 4*

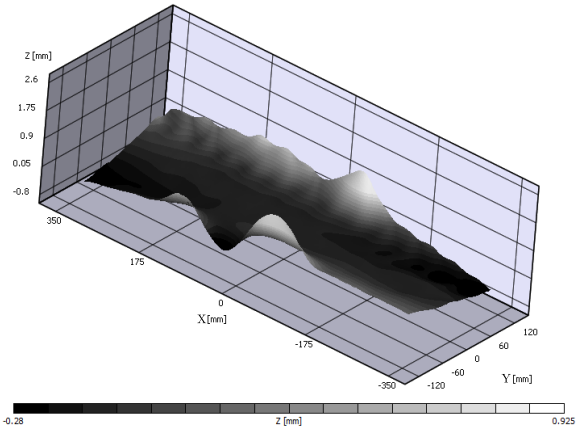

Figure 14 *DIC : instant 4*

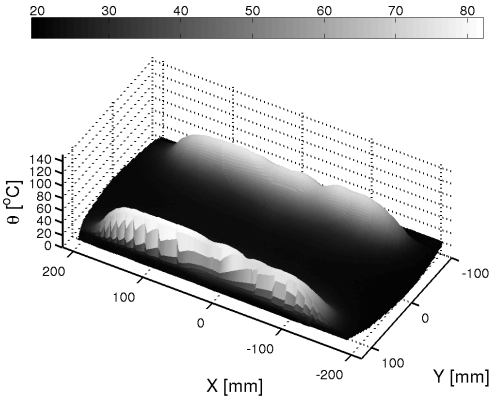

Figure 15 *IR : instant 5*

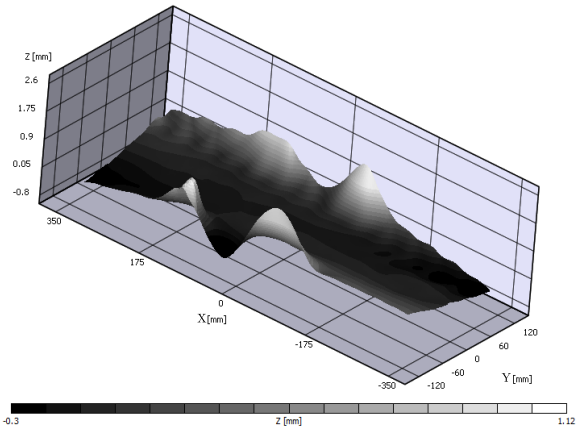

Figure 16 *DIC : instant 5*

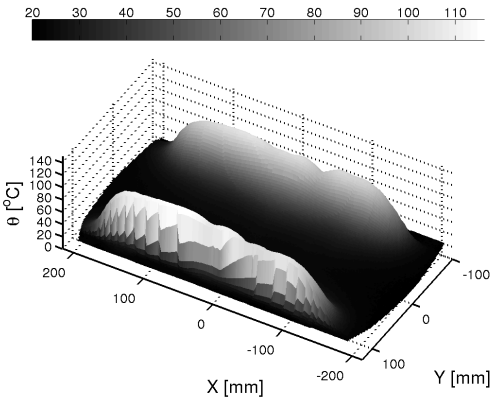

Figure 17 *IR : instant 6*

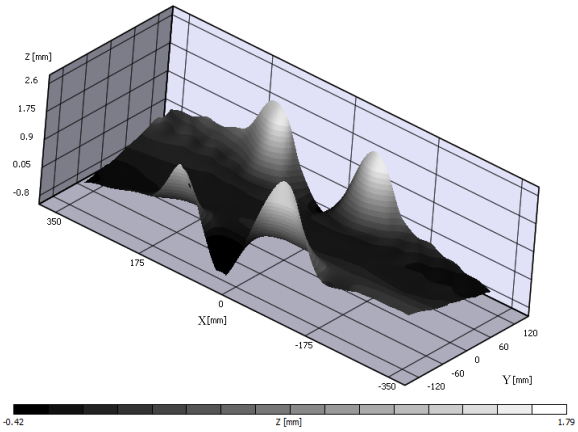

Figure 18 *DIC : instant 6*

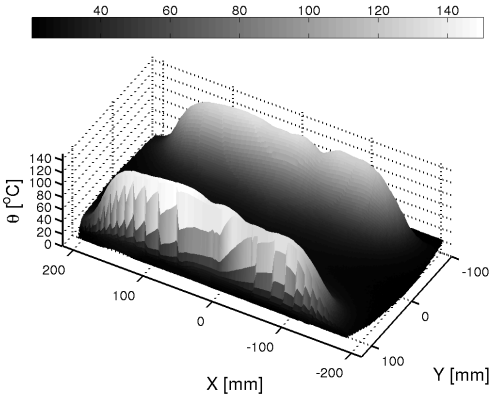

Figure 19 *IR : instant 7*

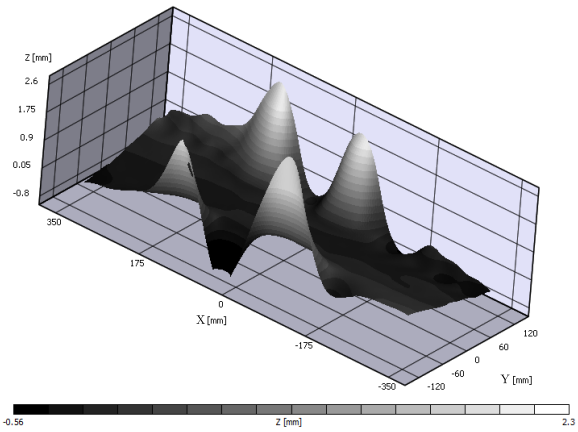

Figure 20 *DIC : instant 7*

Références

[1] S. Abdelkhalek, P. Montmitonnet, N. Legrand, P. Buessler, Manifested flatness predictions in thin strip cold rolling, International Journal of Material Forming 1 (2008) 339–342.

[2] F. Fischer, F. Rammerstorfer, N. Friedl, W. Wieser, Buckling phenomena related to rolling and levelling of sheet metal, International journal of mechanical sciences 42 (10) (2000) 1887–1910.

[3] T. Tauchert, Thermally induced flexure, buckling, and vibration of plates, Applied Mechanics Reviews 44 (1991) 347.

[4] E. Thornton, Thermal buckling of plates and shells, Applied Mechanics Reviews 46 (1993) 485.

[5] A. Hacquin, P. Montmitonnet, J. Guillerault, A steady state thermo-elastoviscoplastic finite element model of rolling with coupled thermo-elastic roll deformation, Journal of materials processing technology 60 (1) (1996) 109–116.

[6] S. Abdelkhalek, P. Montmitonnet, M. Potier-Ferry, H. Zahrouni, N. Legrand, P. Buessler, Strip flatness modelling including buckling phenomena during thin strip cold rolling, Ironmaking & Steelmaking 37 (4) (2010) 290–297.

[7] S. Abdelkhalek, P. Montmitonnet, N. Legrand, P. Buessler, Coupled approach for flatness prediction in cold rolling of thin strip, International Journal of Mechanical Sciences 53 (9) (2011) 661–675.

[8] E. Thornton, M. Coyle, R. McLeod, Experimental study of plate buckling induced by spatial temperature gradients, Journal of thermal stresses 17 (2) (1994) 191–212.

Remerciements

L'étude a été réalisée dans le cadre de l'ANR PLATFORM 2010-RNMP-019. Les auteurs souhaitent remercier tous les acteurs de ce projet. Les auteurs souhaitent remercier plus particulièrement ArcelorMittal et Constellium pour l'approvisionnement en tôles laminées.