

# Un dispositif d'essai d'expansion biaxiale à très hautes températures

**H. Laurent<sup>a</sup>, A. Boyer<sup>a</sup>, N. Demazel<sup>a</sup>, M. Carin<sup>a</sup>, P. Le Masson<sup>a</sup>, F. Glock<sup>b</sup>,  
R. Canivenc<sup>b</sup>**

a. Univ. Bretagne Sud (UBS), FRE CNRS 3744, IRDL, F-56100 Lorient, France  
herve.laurent@univ-ubs.fr, adrien.boyer@univ-ubs.fr, nathan.demazel@univ-ubs.fr,  
muriel.carin@univ-ubs.fr, philippe.le-masson@univ-ubs.fr

b. ArcelorMittal, Global Research and Development Montataire, F-60761 Montataire Cedex  
francois.glock@arcelormittal.com, romain.canivenc@arcelormittal.com

## Résumé :

*L'objectif de ce travail est de présenter les premiers résultats d'essais d'expansion équilibrée à hautes températures réalisés à l'aide d'un nouveau dispositif expérimental. Dans ce dispositif, la tôle circulaire est chauffée par conduction électrique (principe de l'effet Joule) à l'aide de trois paires d'électrodes mises en contact de façon rotative. Les essais ont été réalisés sur un acier trempant Usibor<sup>®</sup>1500 avec des temps de chauffe de l'ordre de 40 s pour atteindre les 850°C. Ces premiers essais montrent la pertinence de ce dispositif pour la définition des courbes limites de formage dans un mode de déformation biaxiale en fonction de la température.*

## Abstract :

*The aim of this study is to present the first tests performed on a new device of bulge test at high temperature. In this device, the circular blank is heated by electrical conduction (based on Joule effect) with the circular rotation of electrical current in three pairs of electrodes. Tests were carried out on a boron quenchable steel Usibor<sup>®</sup>1500 with heating time of 40 s to reach temperature of 850°C. These first tests show the interest to this device to obtain the forming limit curve in the biaxial state in function of temperature.*

**Mots clefs : Expansion équilibrée - Aciers trempants - Usibor<sup>®</sup>1500 - Emboutissage à hautes températures - Chauffage par conduction électrique - Effet Joule**

## Introduction

L'emboutissage à chaud des aciers trempants type Usibor<sup>®</sup>1500 est un procédé de mise en forme de plus en plus utilisé dans le monde de l'automobile [1]. Ce procédé thermomécanique est basé sur l'austénitisation de l'acier revêtu et d'une trempe de cet acier sous les outils de mise en forme pour obtenir un état

martensitique très résistant. Il nécessite de chauffer les flans à des températures entre 880 et 930°C ce qui est pour l'instant réalisé dans des fours avec des temps de chauffe de l'ordre de plusieurs minutes.

Le projet ANR-PRICECAT a pour objectif de développer un nouveau procédé de chauffe des flans de forme en utilisant le principe de l'effet Joule, permettant d'obtenir des temps de chauffe beaucoup plus rapides, inférieurs à la minute. Jusqu'à présent, cette méthode de chauffe est utilisée dans des cas de flans de forme rectangulaire avec passage du courant entre deux électrodes aux extrémités. Mais chauffer uniformément un flan de forme quelconque à l'aide de cette méthode est beaucoup plus compliqué et n'est pas encore maîtrisé à l'heure actuelle.

Dans un nouveau dispositif d'expansion biaxiale à haute température, une méthode de chauffe par conduction électrique a été développée pour obtenir un champ de température homogène sur la partie centrale d'un flan circulaire. Cette méthode consiste à faire la rotation du champ électrique à l'aide de trois paires d'électrodes situées sur la périphérie du flan. L'objectif de cet article est de présenter les premiers résultats d'expansion équibiaxiale à hautes températures d'un acier Usibor<sup>®</sup>1500 à l'aide de ce dispositif. Peu d'essais existent pour ce type de chargement en température dans la littérature [2, 3] et mieux connaître la limite de formabilité de cet acier dans un état de déformation biaxiale en fonction de la température s'avère très important.

## Dispositif

Le principe du dispositif d'expansion à haute température est présenté sur la figure 1. La tôle circulaire de rayon extérieur de 120 mm et d'épaisseur  $e_0 = 0,9$  mm est serrée entre une matrice et un serre-flan, isolés électriquement, et un jonc en céramique, qui assure l'étanchéité du montage. Une pression d'un gaz (ici de l'argon) est appliquée sur la zone chauffée permettant la réalisation de l'essai d'expansion, tout en contrôlant la température du flan par le passage du courant électrique appliqué. Un thermocouple de type *K*, soudé par décharge capacitive sur le flan, permet de réguler le courant électrique. D'autres thermocouples de même type sont également présents pour vérifier l'homogénéité du champ de température.

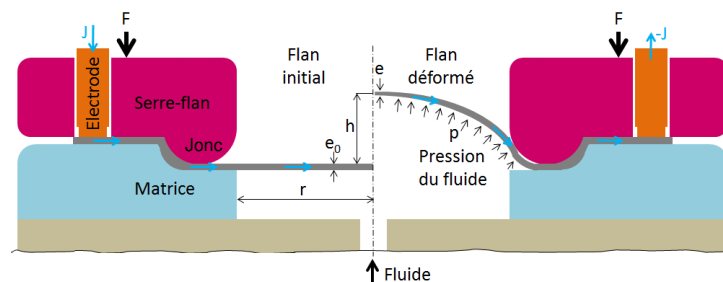


FIGURE 1 – Schéma de principe de l'expansion biaxiale avec procédé de chauffage par conduction électrique.

Le chauffage par effet Joule de la partie centrale circulaire du flan est obtenu par conduction électrique avec l'utilisation de trois paires d'électrodes activés de façon rotative comme montré sur la figure 2. L'optimisation du champ électrique afin d'obtenir un chauffage rapide et homogène du flan circulaire a été obtenue par un modèle thermoélectrique réalisé sous COMSOL Multiphysics<sup>®</sup> et déjà présenté dans [4, 5, 6].

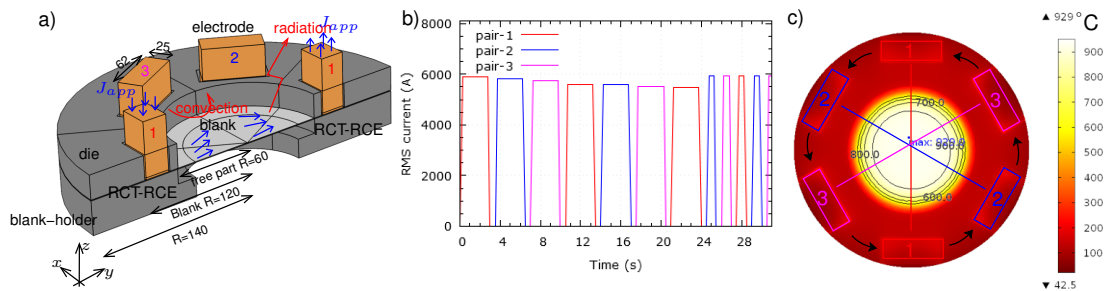


FIGURE 2 – a) Modèle COMSOL Multiphysics® du couplage électro-thermique du chauffage (Dimensions en mm). b) Exemple d'intensité efficace appliquée au cours de la rotation du courant électrique dans les trois paires d'électrodes. c) Champ de température numérique obtenu après un temps de chauffage de 31s montrant le sens de rotation du champ électrique dans les trois paires d'électrodes.

Les détails du dispositif de chauffe sont donnés sur la figure 2.a ainsi que les conditions aux limites utilisées dans la modélisation. Les résistances de contact électrique ( $RCE=4.10^{-8}\Omega.m^2$ ) et thermique ( $RCT=6,5.10^{-4}m^2.K.W^{-1}$ ) ont été approchées à l'aide d'un dispositif semblable à celui développé dans [7]. Un exemple de courant électrique appliqué sur les trois paires d'électrodes est présenté sur la figure 2.b. Le champ de température sur le flan, présenté sur la figure 2.c, est homogène dans la partie centrale du flan où sera ensuite appliquée la pression de gaz.

Le dispositif d'expansion est monté dans une machine de traction Instron 8803 (figure 3). Un trépied permet d'imposer le serrage du flan entre les outils. Un système pneumatique par vérin assure le déplacement et le serrage des électrodes sur la tôle. Un générateur électrique, développé par la société SREM technologies, contrôle et régule l'application de courant d'intensité jusqu'à 6000A avec des tensions maximales de 4V conformément à un type de cycle électrique présenté sur la figure 2.b. Un système de régulation de la mise en pression permet d'imposer sur la partie centrale du flan une pression maximale de 100 bars d'argon. Le champ de déformation du flan est mesuré à l'aide de deux caméras vidéos et du dispositif de corrélation d'images Aramis.

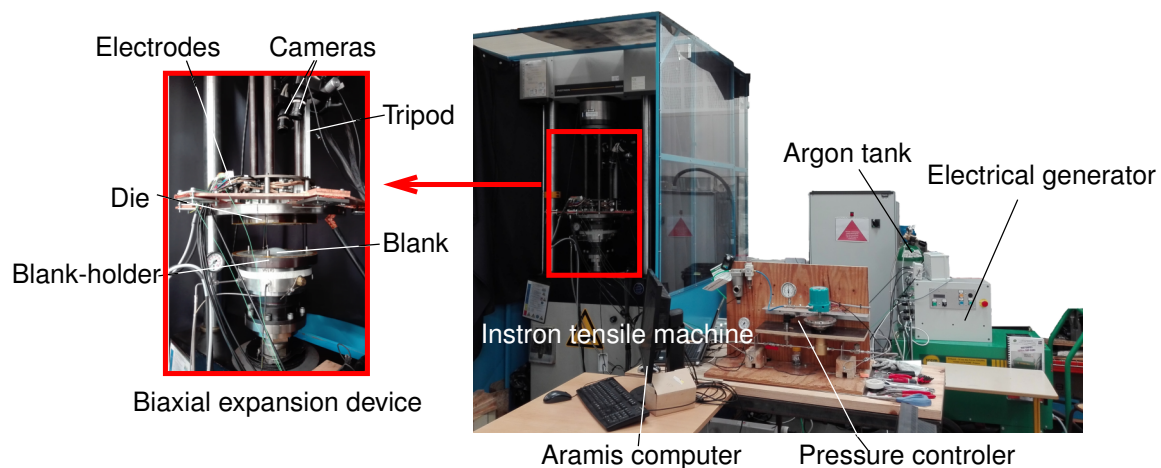


FIGURE 3 – Dispositif d'expansion dans la machine de traction avec le système de contrôle de la mise en pression et le générateur électrique.

## Résultats

Une première série d'essai a été réalisée sur ce dispositif avec un cycle de chauffe et d'expansion comme décrit sur la figure 4. Après avoir formé le jonc, la tôle est chauffée en 40 s jusqu'à 850°C conformément à la consigne imposée en noire, cette température est maintenue pendant 30 s durant la phase d'expansion, ce qui permet une complète austénisation de la pièce. La courbe bleue donne la température mesurée par un thermocouple situé à 30 mm du centre de la tôle.

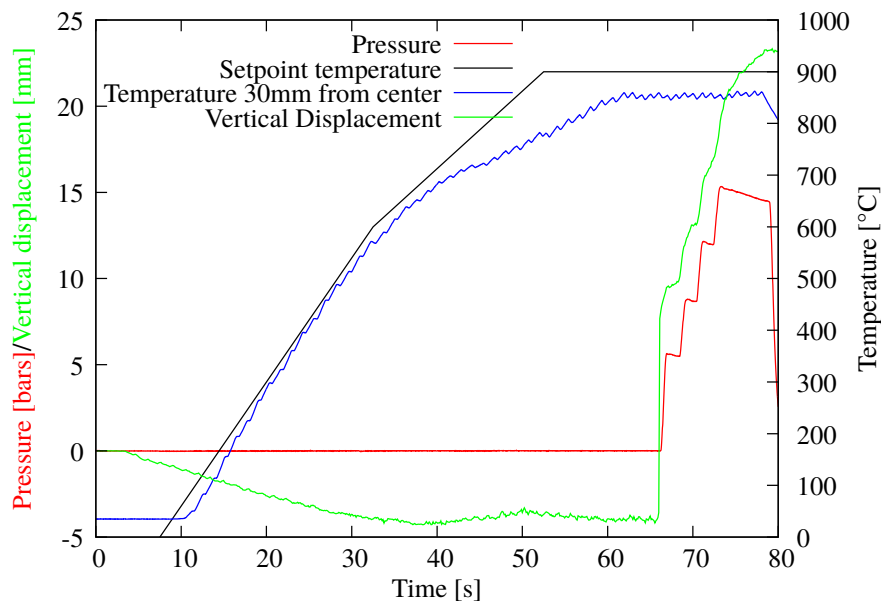


FIGURE 4 – Evolution du déplacement vertical en fonction de la pression appliquée pour une température d'essai de 850°C.

L'évolution de la pression appliquée est donnée en rouge et le déplacement du centre de la tôle mesurée au cours de l'essai par Aramis est décrite par la courbe verte. Pour cela, un mouchetis noir et blanc, résistant aux températures élevées est déposée sur la tôle. Le déplacement vertical négatif au début de l'essai provient de la dilatation thermique de la tôle. Pour une pression de 15 bars, la hauteur du dôme est d'environ 23 mm. Le flan obtenu à la fin de l'essai d'expansion est présenté à la figure 5. Une bonne homogénéité de la température peut être observée sur la partie centrale circulaire de la tôle correspondant à la zone chauffée à 850°C.



FIGURE 5 – Flan après l'essai d'expansion de la figure 4.

## Conclusion

Dans cet article, un nouveau dispositif d'expansion équibiaxiale à haute température a été présenté. Par l'intermédiaire d'un chauffage par conduction électrique, ce montage permet de réaliser des essais où la température peut être contrôlée tout au long de la phase d'expansion ce qui n'est pas possible avec les dispositifs classiques où la tôle est souvent chauffée avant la phase d'expansion [3]. Les premiers tests présentés montrent la possibilité de ce montage. Une étude plus approfondie est en cours pour déterminer les courbes limites de formage dans un trajet d'expansion équibiaxiale de plusieurs matériaux métalliques à hautes températures.

## Remerciements

Ces travaux ont été réalisés dans le cadre du projet ANR PRICECAT, soutenu par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) et référencé ANR-13-RMNP-0009-03.

## Références

- [1] H. Karbasian and A.E. Tekkaya. A review on hot stamping. *Journal of Materials Processing Technology*, August 2010.
- [2] A. Braun, J. Storz, M. Bambach, and G. Hirt. Development of a Pneumatic Bulge Test for High Temperatures and Controlled Strain Rates. *Advanced Materials Research*, 1018 :245–252, September 2014.
- [3] A. Braun, M. Waerder, and G. Hirt. Forming limit and flow curve determination of hot stamping steels using a hot-gas-bulge test. *Forming Technology Forum 2016, Technische Universität München, Allemagne*, September 2016.
- [4] N. Demazel, H. Laurent, M. Carin, J. Coër, P. Le Masson, J. Favero, R. Canivenc, and S. Graveleau. Modélisation du chauffage de flan circulaire dans un dispositif d'expansion biaxiale à haute température. In *22ème Congrès Français de Mécanique*, Lyon, 24 au 28 août 2015 2015.
- [5] N. Demazel, M. Carin, H. Laurent, P. Le Masson, J. Coer, J. Favero, R. Canivenc, F. Glock, and S. Graveleau. Numerical optimization of joule heating process of usibor<sup>®</sup>1500 automotive blanks. In *Numiform2016*, Troyes, July 2016.
- [6] N. Demazel, H. Laurent, M. Carin, J. Coër, P. Masson, J. Favero, R. Canivenc, and S. Graveleau. Simulations of joule effect heating in a bulge test. *AIP Conference Proceedings*, 1769 :060014, October 2016.
- [7] T. Loulou, P. Le Masson, and P. Rogeon. Thermal characterization of resistance spot welding. *Numerical Heat Transfer, Part B : Fundamentals*, 49(6) :559–584, 2006.