

Modélisation du chauffage de flan circulaire dans un dispositif d'expansion biaxiale à haute température

Nathan DEMAZEL^a, Hervé LAURENT^a, Muriel CARIN^a, Jérémy COER^a,
Philippe LE MASSON^a, Jérôme FAVERO^b, Romain CANIVENC^b,
Stéphane GRAVELEAU^c

^a Université de Bretagne-Sud, EA 4250, LIMATB, F- 56321 LORIENT

nathan.demazel@univ-ubs.fr, herve.laurent@univ-ubs.fr, muriel.carin@univ-ubs.fr,
jeremy.coer@univ-ubs.fr, philippe.le-masson@univ-ubs.fr

^b ArcelorMittal, Global Research and Development Montataire, F-60761 Montataire Cedex
jerome.favero@arcelormittal.com, romain.canivenc@arcelormittal.com

^c SREM Technologies, ZI Ouest, 14 rue des Frères Chappe, 72200 La Flèche

stephane.graveleau@srem.fr

Résumé:

Ce travail porte sur l'intégration d'un moyen de chauffage par conduction électrique (effet Joule) de flan circulaire au sein d'un dispositif d'expansion biaxiale. Ce dispositif permettra la caractérisation thermomécanique de l'Usibor®1500 dans un trajet de déformation équibiaxiale à très haute température (jusqu'à 1000°C). Dans un premier temps, on s'intéresse au chauffage de flan rectangulaire avec une confrontation entre expérience et simulation, qui a permis de valider le modèle thermoélectrique réalisé sous COMSOL Multiphysics®. Dans un second temps, on aborde l'optimisation du champ électrique afin d'obtenir un chauffage rapide et homogène d'un flan circulaire.

Abstract:

This work focuses on the integration of an electrical conduction heating of circular blank in a bulge-test device. This device will allow the thermomechanical characterization of Usibor®1500 under biaxial deformation at very high temperature (to 1000°C). First a thermoelectric model using COMSOL Multiphysics® was developed to study the heating of a rectangular blank. This model is validated by comparing the calculated temperatures with thermocouple measurements. Secondly electrical field optimization is approached to obtain a fast and uniform heating of a circular blank.

Mots clefs : emboutissage à chaud, chauffage par conduction électrique, effet Joule, couplage thermoélectrique, expansion biaxiale, caractérisation thermomécanique

1 Introduction

Afin de diminuer les émissions de CO₂ et la consommation énergétique, les constructeurs automobiles cherchent des solutions pour alléger les véhicules. Les aciers trempants (type Usibor®1500 : nuance d'acier 22MnB5) répondent à ces exigences. Grâce à leurs propriétés mécaniques élevées et leur formabilité à chaud, ils permettent de réduire les épaisseurs des différentes pièces de la structure d'un véhicule. Ces aciers nécessitent, cependant, une mise en forme à chaud (environ 900°C), suivie d'une étape de trempe qui confère des caractéristiques mécaniques exceptionnelles à la pièce emboutie [1]. Le projet ANR PRICECAT (PRocédé Industriel Compact d'Emboutissage à Chaud des Aciers Trempants) porté par ArcelorMittal et réunissant deux PME (SREM Technologie et SMP) ainsi que les laboratoires LIMATB et ICA, a pour ambition de développer un procédé industriel d'emboutissage à chaud multi-step. Il est basé sur une technologie de chauffage rapide du flan par conduction électrique et un détournage à chaud par outils, permettant une augmentation de la cadence de production, un gain d'espace, des économies d'énergie et de réaliser des pièces plus complexes que celles actuellement produites.

Deux axes d'études ont été attribués au LIMATB, le développement d'une solution de chauffage rapide et l'étude du comportement mécanique suivant des cycles thermomécaniques non conventionnels par rapport au procédé classique d'emboutissage à chaud. Ces cycles comportent plusieurs étapes de chauffe par effet Joule afin de reproduire les conditions envisagées lors de l'emboutissage multi-passe à chaud de l'Usibor®1500. Pour mieux appréhender et maîtriser ce chauffage par conduction, un dispositif d'expansion biaxiale original intégrant cette solution de chauffe est également en cours de développement. Cet essai d'expansion biaxiale devrait permettre de caractériser l'Usibor®1500 dans un trajet de déformation très peu étudié dans la littérature [2] à très hautes températures et apporter des données expérimentales indispensables pour apporter des éléments supplémentaires à la modélisation de ce matériau dans les problèmes de mise en forme. Dans cet article, nous nous intéressons principalement à l'optimisation des paramètres numériques nécessaires à la modélisation du chauffage de flan circulaire au sein de ce futur dispositif. Une première étude sur le chauffage de flan rectangulaire a permis de valider la simulation des couplages thermoélectriques présents au cours du chauffage par effet Joule. Une deuxième partie aborde les problèmes d'optimisation du champ électrique assurant un chauffage homogène du flan circulaire.

2 Chauffage par conduction électrique d'un flan rectangulaire

Dans une première étape, nous présentons des essais de chauffage par effet Joule de flans rectangulaires en Usibor®1500-AS (AS : revêtu Alusi®) permettant de vérifier la pertinence de ce moyen de chauffage rapide et homogène. Ces essais ont également fourni une base de données expérimentales pour valider un modèle numérique thermoélectrique réalisé avec le code de calcul COMSOL Multiphysics®.

2.1 Dispositif expérimental

Un schéma du dispositif expérimental développé par la SREM pour ArcelorMittal est présenté sur la Figure 1. Il est constitué d'un générateur de courant alternatif 50 Hz pouvant générer une puissance maximale de 50 kW, et de deux électrodes en cuivre assurant également le serrage du flan par deux vérins pneumatiques. Des thermocouples de type K (TC_K) sont soudés à la surface du flan le long de la ligne centrale. L'enregistrement des températures, de la tension efficace aux bornes des

électrodes et de l'intensité efficace est réalisé par un Spider8 avec une fréquence d'acquisition de 100 Hz.

L'essai consiste à chauffer un flan rectangulaire de longueur utile 405 mm, de largeur 80 mm et d'épaisseur 1,5 mm. Pour ce faire, un courant alternatif de 50 Hz est appliqué via les électrodes. L'évolution de l'intensité efficace relevée est donnée sur la Figure 2.

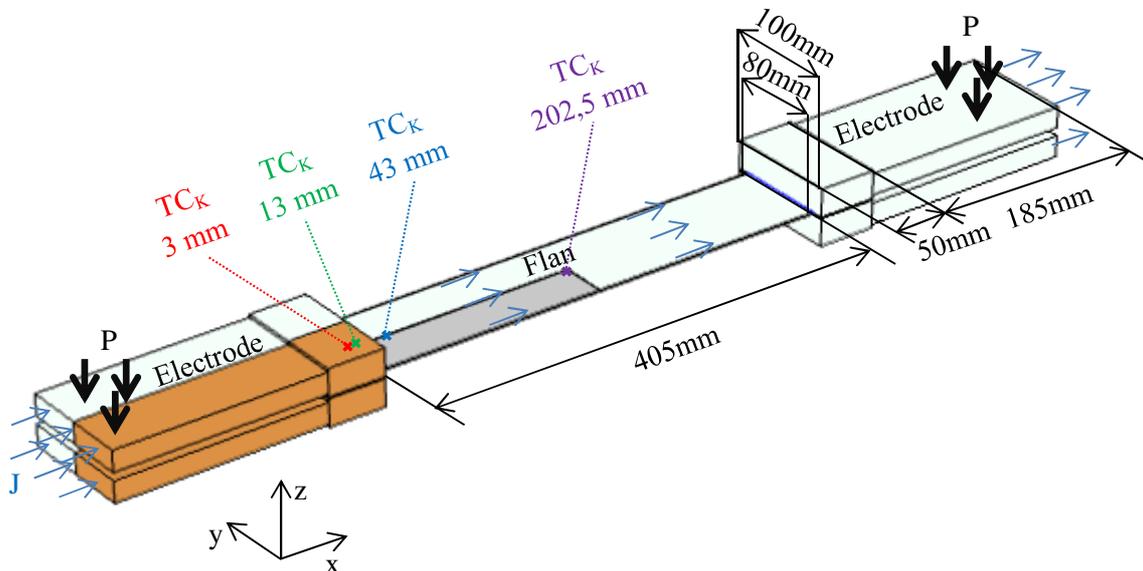


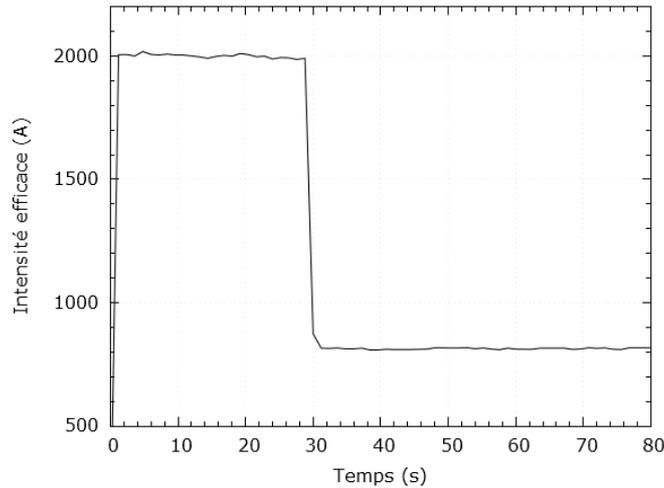
Figure 1: Schéma du dispositif de chauffage de flans rectangulaires (seules les parties en couleur sont modélisées)

2.2 Modèle numérique

Le modèle numérique, développé sur COMSOL Multiphysics®, prend en compte les transferts thermiques (équations (1) et (2), Tableau 1) et l'électrocinétique (3). Seul un quart de la géométrie est modélisé compte tenu des deux plans de symétrie, xz et yz (la géométrie modélisée est en couleur sur la Figure 1). Sur toutes les surfaces en contact avec l'air, des pertes par rayonnement et convection sont prises en compte à l'aide de l'équation (4) avec les hypothèses suivantes : les matériaux sont considérés comme des corps gris et les coefficients d'échanges convectifs utilisés sont constants. Pour le problème électrique, ces surfaces sont supposées isolées électriquement (5). Des résistances de contact thermique (6, 7) et électrique (9, 10) (RCT et RCE) sont utilisées pour simuler un contact non parfait au niveau des interfaces entre l'électrode et le flan. La génération de chaleur à ces interfaces due à l'effet Joule (8), est distribuée à l'aide d'un coefficient de partage r , supposé égal à 0,5. Enfin, une densité de courant normale est imposée sur les faces d'arrivée du courant (11), l'évolution de l'intensité efficace correspondante est donnée par la Figure 2. Les propriétés thermiques et électriques de l'Usibor®1500-AS utilisées ont été fournies par ArcelorMittal en fonction de la température mais ne seront pas précisées ici pour des raisons de confidentialité.

Tableau 1: Equations électriques et thermiques et conditions aux limites utilisées.

Equation de conservation de l'énergie	Equation de conservation de la charge
$\rho(T)c_p(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(\lambda(T) \overrightarrow{\text{grad}}(T)) + Q$ <p style="text-align: right;">(1)</p>	$\text{div}(\sigma_e(T) (\overrightarrow{\text{grad}}(V))) = 0$ <p style="text-align: right;">(3)</p>
<p>avec $Q = \sigma_e(T) \cdot \left(\left(\frac{\partial V}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial z} \right)^2 \right)$</p> <p style="text-align: right;">(2)</p>	
Conditions aux limites (surfaces extérieures)	
Convection et rayonnement	Isolation électrique
$\vec{n} \cdot (\lambda(T) \cdot \overrightarrow{\text{grad}}(T)) = h(T_{\text{ext}} - T) + \varepsilon(T) \cdot \sigma_{\text{Blz}}(T_{\text{env}}^4 - T^4)$ <p style="text-align: right;">(4)</p>	$\vec{n} \cdot \vec{j} = 0$ <p style="text-align: right;">(5)</p>
Conditions aux limites (interfaces)	
<i>Contacts flan/électrodes (Résistances de Contact Electrique et Thermique)</i>	
$\vec{n} \cdot (\lambda(T) \cdot \overrightarrow{\text{grad}}(T_{\text{flan}})) = \frac{(T_{\text{flan}} - T_{\text{elec}})}{RCT} + r \cdot Q_s$ <p style="text-align: right;">(6)</p>	$\vec{n} \cdot \vec{j} = \frac{(V_{\text{flan}} - V_{\text{elec}})}{RCE}$ <p style="text-align: right;">(9)</p>
$\vec{n} \cdot (\lambda(T) \cdot \overrightarrow{\text{grad}}(T_{\text{elec}})) = \frac{(T_{\text{elec}} - T_{\text{flan}})}{RCT} + (1 - r) \cdot Q_s$ <p style="text-align: right;">(7)</p>	$\vec{n} \cdot \vec{j} = \frac{(V_{\text{flan}} - V_{\text{elec}})}{RCE}$ <p style="text-align: right;">(10)</p>
avec $Q_s = \frac{(V_{\text{flan}} - V_{\text{elec}})^2}{RCE}$	(8)
Conditions aux limites (faces d'arrivée du courant)	
Faces d'arrivée du courant	
	$\vec{n} \cdot \vec{j} = J_{\text{app}} \quad \text{ou} \quad \vec{n} \cdot \vec{j} = -J_{\text{app}}$ <p style="text-align: right;">(11)</p> <p>avec $J_{\text{app}} = \frac{I_{\text{app}}}{S_{\text{elec}}}$</p>

Figure 2: Intensité imposée (I_{app}) au cours de l'essai et de la simulation

2.3 Résultats expérimentaux et numériques

La Figure 3-a donne les évolutions temporelles de température simulées et expérimentales pour différentes positions sur le flan. La Figure 3-b présente les profils de température calculés et mesuré suivant la longueur de la tôle à 80 secondes. Les mesures expérimentales donnent une vitesse moyenne de montée en température de $26,7 \text{ K.s}^{-1}$ pour atteindre 800°C , avec une puissance électrique maximum de 14 kW . Bien qu'un gradient de température soit présent aux bords des électrodes sur 40 mm , le champ de température dans le flan est homogène.

Afin de montrer l'influence des résistances de contact, une première simulation sans résistance de contact thermique et électrique a été réalisée. Elle donne une bonne estimation de la température mesurée au centre du flan. Cependant, les températures simulées au bord de l'électrode sont largement inférieures à celles mesurées (Figure 3-a et b), montrant bien la nécessité de prendre en compte les phénomènes de constriction des flux thermiques et des lignes de courant au niveau des interfaces électrodes/flan. Les simulations prenant en compte les résistances de contact permettent de retrouver les évolutions de températures expérimentales. Les valeurs de RCT et RCE assurant un bon accord entre expérience et modèle sont respectivement de $1,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ et $1 \cdot 10^{-6} \Omega \cdot \text{m}^2$, ces valeurs sont élevées si on les compare à celles que l'on peut trouver dans la littérature pour le soudage par point [3]. Ces différences peuvent s'expliquer par la différence de pression de contact moyenne plus faible que celles présentes en soudage ($0,59 \text{ MPa}$ contre plusieurs dizaines de MPa en soudage) et aussi par une moins bonne maîtrise de la qualité du contact. Pour identifier ces valeurs de RCT et RCE, nous avons d'abord identifié un coefficient d'échange convectif pour l'ensemble du flan, qui constitue un autre paramètre inconnu de cette simulation. Pour cela, un modèle se limitant au flan et par conséquent sans résistance de contact a été réalisé. Les températures mesurées aux extrémités du flan à 3 mm ont servi de conditions aux limites. La valeur du coefficient d'échange convectif identifié est de $10,5 \text{ W.m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$, valeur cohérente pour une convection naturelle avec de l'air. Cette valeur a ensuite été utilisée pour le modèle complet comprenant les électrodes. Les valeurs de RCT et RCE ont alors été ajustées pour obtenir des températures proches de celles mesurées par les thermocouples.

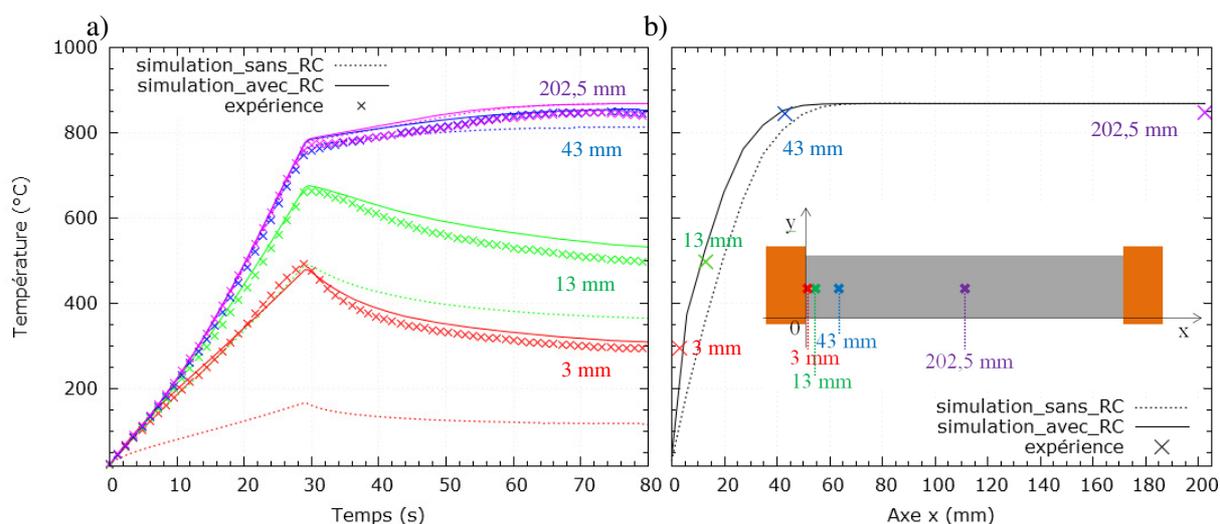


Figure 3: a) Comparaison des évolutions temporelles expérimentales et numériques (avec ou sans prise en compte des RC) de la température pour différentes coordonnées x de la surface de la tôle; b) Profil de température le long de la direction x (pour $t=80\text{s}$), comparaison expérience/modèle

D'après la littérature [4], la méthode de chauffage par conduction électrique permet d'avoir un chauffage rapide et homogène de pièces à section constante, avec une bonne efficacité énergétique,

ceci grâce à la génération de chaleur interne due à l'effet Joule. Mais qu'en est-il pour un flan de forme quelconque et de section non constante ? Pour y répondre, nous avons adapté le modèle thermoélectrique pour étudier le chauffage d'un flan non rectangulaire qui fait l'objet du paragraphe suivant.

3 Application numérique au chauffage d'un flan circulaire au sein d'un dispositif d'expansion biaxiale à haute température

Afin d'avoir une première approche du chauffage par conduction électrique de flans à section variable, la technologie de chauffage rapide a été intégrée à la conception d'un dispositif d'expansion biaxiale. Le principe du futur dispositif de caractérisation mécanique, présenté sur la Figure 4, est le suivant : un flan circulaire est maintenu sur son pourtour entre la matrice et le serre-flan par une pression de serrage, il est ensuite chauffé par conduction électrique par application d'un courant via des électrodes. Puis un gaz inerte (argon) sous pression le met en forme. Cette étape de mise en forme ne sera pas considérée dans le modèle présenté ici.

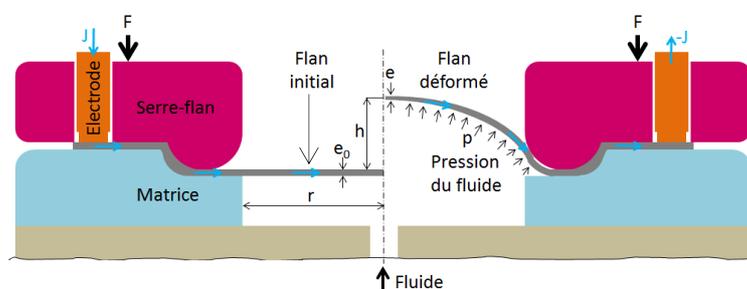


Figure 4: Schéma de principe de l'expansion biaxiale avec procédé de chauffage par conduction électrique

L'intégration de la solution de chauffage rapide à la conception du dispositif d'expansion biaxiale à haute température repose en grande partie sur le modèle numérique développé à partir du code de calcul Comsol Multiphysics®. Afin d'obtenir un champ de température homogène au centre de la tôle, il est possible d'agir sur une multitude de paramètres tels que le nombre d'électrodes, leur forme, position et dimensions, l'intensité et les temps d'application du courant électrique, ainsi que la façon de l'appliquer (par paire d'électrodes, trio...). On s'intéressera ici au nombre d'électrodes et à la façon d'appliquer le courant électrique.

3.1 Simulation de chauffage avec une paire d'électrodes

La géométrie utilisée pour cette simulation thermoélectrique prend en compte la matrice et le serre-flan ainsi que la paire d'électrodes situées aux extrémités diamétrales du flan (coupe schématisée sur la Figure 4). Le flan de diamètre 240 mm et d'épaisseur 0,9 mm est en Usibor®1500-AS. Cette simulation prend en compte les résistances de contact électriques et thermiques (RCE et RCT), elles ont été mesurées à l'aide d'un prototype d'électrode réalisé par la SREM. Les valeurs retenues, pour une pression de contact d'une électrode sur le flan de 0,46 MPa, assurée par un vérin pneumatique, sont de $RCE=4.10^{-8}\Omega.m^2$ et $RCT=6,5.10^{-4}m^2.K.W^{-1}$. L'intensité appliquée pendant 15 s est constante et de 6000 A.

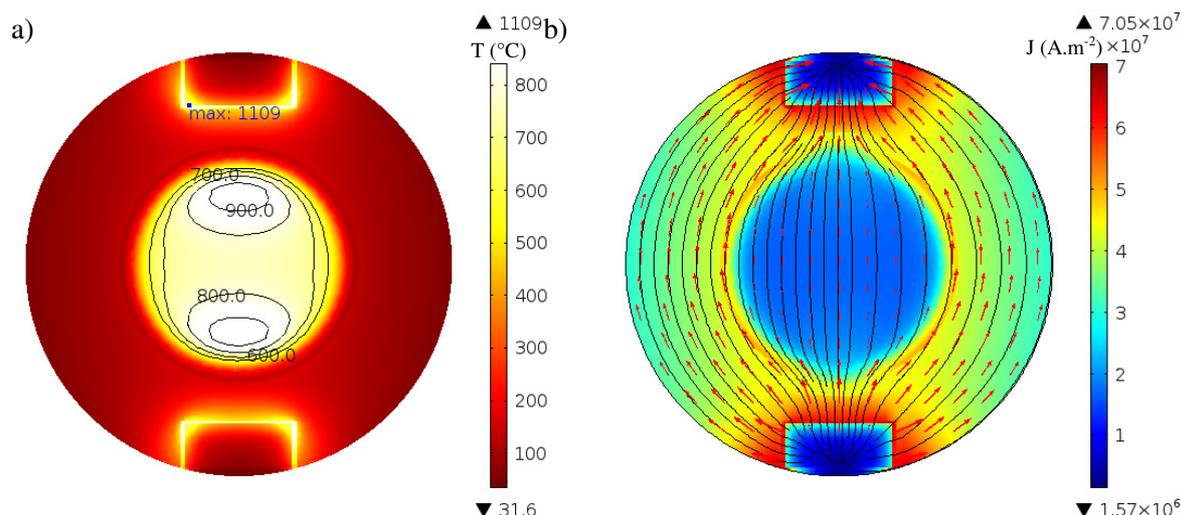


Figure 5: a) Champ de température et isothermes à $t=15s$; b) Champ de densité de courant, ligne de courant et vecteur de courant à $t=15s$

Contrairement au cas du flan rectangulaire, comme on peut le voir sur la Figure 5-a, le champ de température simulé n'est pas homogène dans la zone centrale du flan. Des zones chaudes sont présentes devant les électrodes. Ceci est dû aux constriction des lignes de courant à l'approche des électrodes (Figure 5-b) qui génèrent une source de chaleur (effet Joule) plus importante que dans le reste du flan. Cet effet est amplifié par les RCE. De plus, les températures atteintes aux bords des électrodes sont plus hautes que dans la partie utile du flan. Sachant que le revêtement Alusi® a une température de fusion proche de 600°C, cette surchauffe risque d'entraîner une altération des électrodes par adhésion du revêtement.

Comme on pouvait s'y attendre, le chauffage par conduction électrique d'un flan circulaire avec une seule paire d'électrodes n'est pas satisfaisant. D'après les travaux de l'université de Leibniz à Hanovre, pour le chauffage de flan à section variable, une des solutions réside dans l'utilisation de plus de deux électrodes [5].

3.2 Simulation de chauffage avec trois paires d'électrodes

Afin d'obtenir un champ de température homogène dans la partie utile du flan, trois paires d'électrodes ont donc été placées sur le pourtour du flan, elles sont activées et mises en contact de façon rotative au cours du temps (Figure 6-a). Ce mode d'application du courant permet de réduire les surchauffes autour des électrodes grâce à leurs temps d'inactivité. Trois types d'application du courant technologiquement réalistes ont été simulés pour déterminer l'effet du temps d'application sur la répartition de la température dans le flan au cours du chauffage, pour une durée totale des cycles de 29s. Des temps d'application du courant de $t_a=1s$, 3s et 5s lors de la montée en température ont été choisis, suivis d'un temps identique pour les trois cas de $t_a=1s$ lors du maintien en température (Figure 6-b, c, et d).

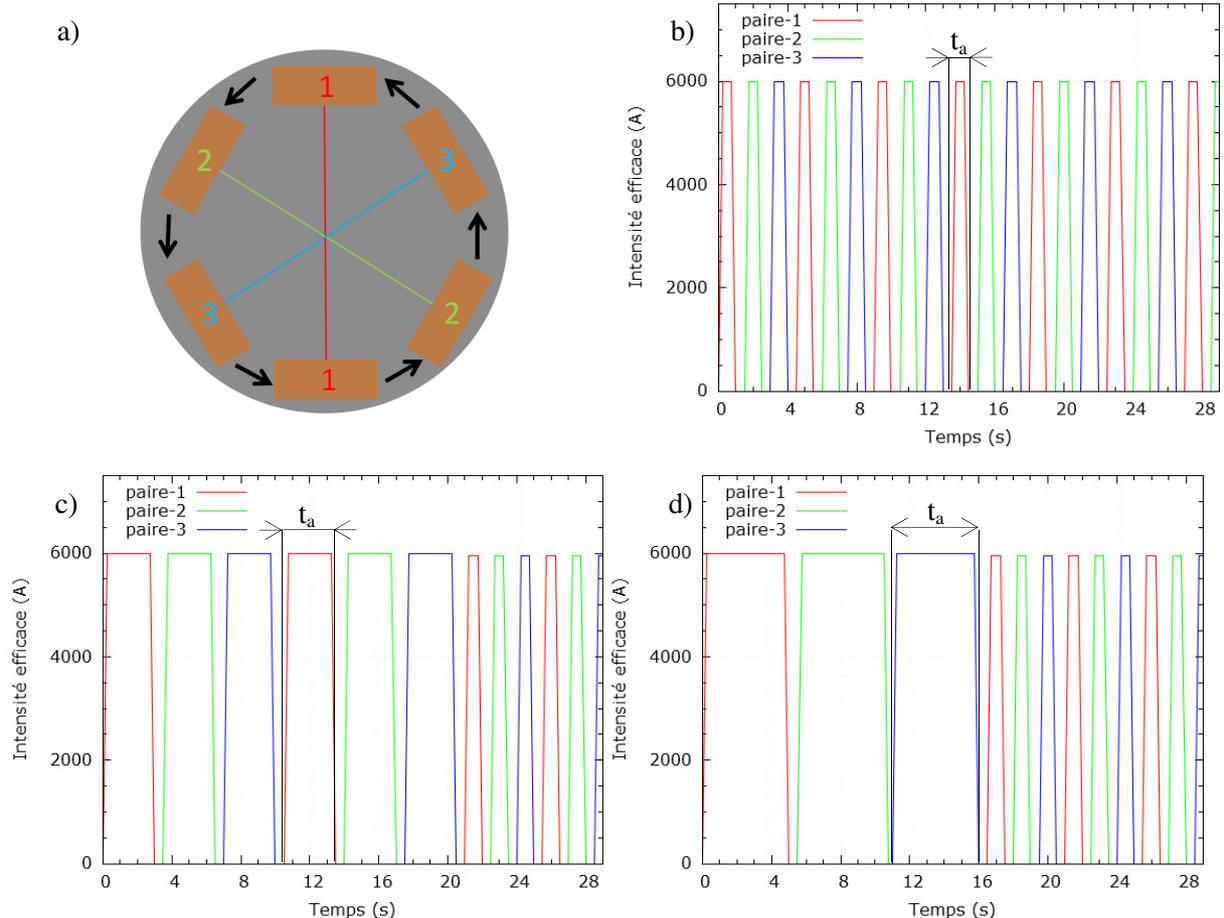


Figure 6: a) Schéma des permutations rotatives des paires d'électrodes au cours du temps ; b), c), et d) Intensités appliquées en simulation pour des temps d'application du courant t_a de 1s, 3s et 5s respectivement lors de la montée en température

La Figure 7-a donne les évolutions temporelles de la température au centre du flan pour les trois temps d'application t_a 1s, 3s et 5s. Plus le temps d'application du courant t_a est petit, plus le temps nécessaire pour chauffer le flan est long, car entre chaque activation de paires d'électrodes, il n'y a pas de source de chaleur, et des pertes par conduction, convection et rayonnement font chuter la température. Par contre, lorsque le temps t_a est trop long, des surchauffes apparaissent autour des électrodes (Figure 7-b). Avec un temps $t_a=5s$, la température maximum atteinte dès la première application du courant est supérieure à la température de fusion de l'Alusi®. Pour un temps $t_a=3s$, la température de fusion est dépassée au quatrième créneau, pour un temps $t_a=1s$, la température ne dépasse pas 400°C, il n'y a donc pas de risque de dépôt du revêtement sur les électrodes.

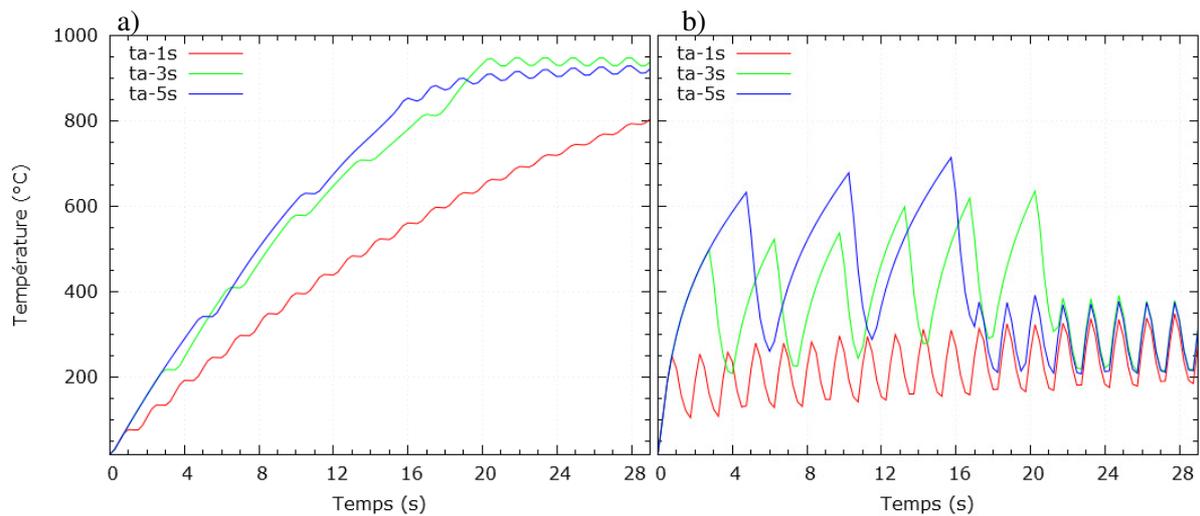


Figure 7: a) Evolutions temporelles de la température au centre pour des temps d'application du courant t_a de 1s, 3s et 5s ; b) Evolutions temporelles de la température maximum aux bords des électrodes pour des temps d'application du courant t_a de 1s, 3s et 5s

Afin d'obtenir un champ de température homogène le plus rapidement possible, sans risque d'altération des électrodes, on peut modifier les temps d'application t_a au cours de la montée en température et/ou diminuer l'intensité appliquée. A partir d'un temps d'application $t_a=3s$ et une diminution de l'intensité (Figure 8-a), on obtient un champ de température homogène (Figure 8-b) avec un écart de température inférieur à 30°C sur 40mm. On observe aussi des isothermes circulaires dans la partie utile du flan, elles sont favorisées par la matrice et le serre-flan qui refroidissent le flan par conduction. Il faut 23 s pour atteindre la température de 900°C au centre du flan, soit une vitesse moyenne de montée en température de 38 K.s⁻¹ (Figure 8-c), avec une puissance maximum de 23 kW. Il faut aussi remarquer que la température maximale autour des électrodes est de 500°C, soit environ 100°C en dessous de la température de fusion du revêtement Alusi®.

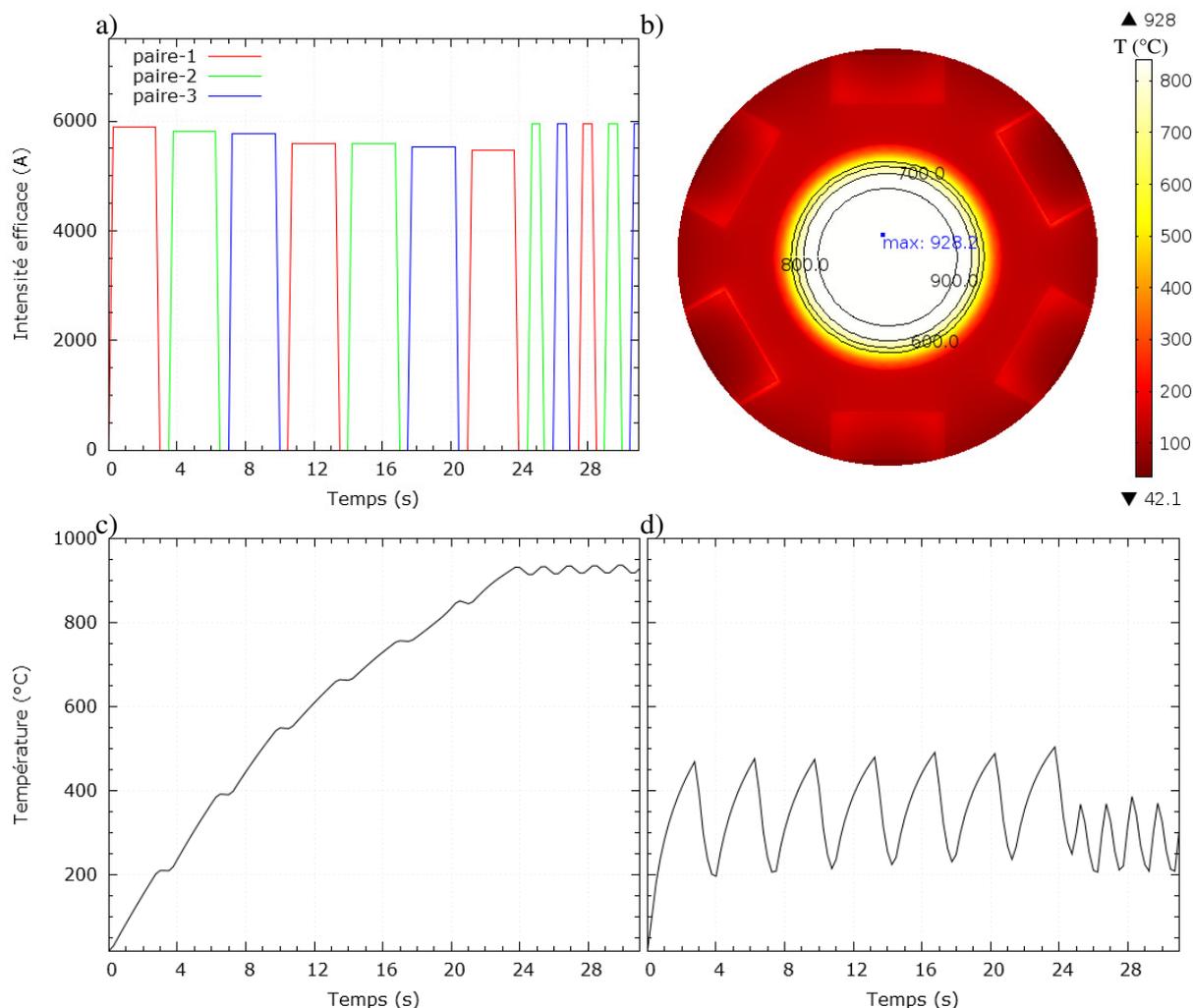


Figure 8: a) Intensités appliquées en simulation; b) Champ de température et isothermes à $t=31s$; c) Evolutions temporelles de la température au centre; d) Evolutions temporelles de la température maximum aux bords des électrodes

4 Conclusions et perspectives

Un prototype de chauffage par conduction électrique de flan rectangulaire a permis d'obtenir un chauffage homogène et rapide du flan à l'aide d'une paire d'électrodes. Ce dispositif a aussi permis de valider un modèle numérique thermoélectrique de chauffage de flan rectangulaire et d'identifier des valeurs de RCE et RCT nécessaires pour maîtriser numériquement la répartition de la température sur toute la longueur de la tôle. A partir de ce modèle, un second calcul a été réalisé pour le chauffage de flan circulaire au sein d'un dispositif d'expansion biaxiale. Le mode de chauffage avec une seule paire d'électrodes n'est, au premier abord, pas convenable pour des flans à sections variables. Mais en utilisant plus de deux électrodes, il est possible de répartir spatialement la source de chaleur dans le temps et d'obtenir un flan circulaire avec un champ de température homogène. Cependant, le modèle a mis en évidence des surchauffes autour des électrodes lorsque les créneaux d'application du courant sont trop longs, et le temps de chauffage augmente lorsque les créneaux sont trop courts. Un bon compromis entre temps de chauffage et diminution des surchauffes autour des électrodes a été obtenu.

Ce dispositif d'expansion biaxiale à haute température est en cours de réalisation. Il devrait permettre d'en déduire un nouveau point d'expansion dans les courbes limites de formage de l'Usibor®1500 en fonction de la température. L'actuel modèle thermoélectrique créé sous le code de calcul Comsol Multiphysics® a été comparé et validé sur un modèle thermo-mécano-électrique sous Abaqus®. Ce modèle permet de reproduire en plus les effets de mise en forme d'expansion par la pression du fluide appliquée. Il assurera l'identification d'un modèle de comportement pour la représentation de l'état de déformation biaxiale en fonction de la température de l'Usibor®1500.

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, A.E. Tekkaya, A review on hot stamping, *Journal of Materials Processing Technology* 210 (2010) 2103-2118.
- [2] L.G. Aranda, Etude thermo-mécanique et modélisation numérique de l'emboutissage à chaud de l'Usibor 1500, Thèse de doctorat, Ecole des Mines de Paris, 2004.
- [3] C. Srikunwong, Modélisation du procédé de soudage par points, Thèse de doctorat, Ecole des Mines de Paris, 2005.
- [4] J-L. Mazoyer, J. Heurtin, Chauffage par effet Joule, *Techniques de l'Ingénieur*, D824, 1984.
- [5] B.A. Behrens, S. Hubner, Neue Entwicklungen beim Formhärten, *New Press Hardening Developments*, 13. Werkstoff-Forum, Hannover Messe 2013, 09-04-2013.