

# Etude expérimentale du procédé d'emboutissage à chaud

Alexandre BLAISE<sup>1,2\*</sup>, Bakri ABDULHAY<sup>1</sup>, Brahim BOUROUGA<sup>1</sup>, Christine DESSAIN<sup>2</sup>

<sup>1</sup> LTN, UMR CNRS 6607, BP 50609, La Chantrerie, 44306 Nantes Cedex 3, France

<sup>2</sup> ArcelorMittal R&D Automotive Applications, BP 30109, 60761 Montataire Cedex, France

\*(Auteur correspondant : [alexandre.blaise@univ-nantes.fr](mailto:alexandre.blaise@univ-nantes.fr))

## Résumé

L'obtention de caractéristiques souhaitées par emboutissage à chaud sur la pièce finale en jouant sur la température des outils nécessite d'étudier les phénomènes thermiques à l'interface pièce/outil. Un premier banc d'essai a été conçu avec des outils non chauffés, un second est en cours de développement mettant en œuvre des outils chauffés ou partiellement chauffés, l'objet étant de conférer à la pièce des gradients de propriétés mécaniques. Ce dernier permettra notamment la mesure de l'histoire thermique du flan ainsi que l'estimation de la résistance thermique de contact dans le cas où les outils sont chauffés. Ce banc d'essai doit répondre à un cahier des charges comprenant les hypothèses de l'estimation de la RTC par une méthode inverse, l'instrumentation par fluxmètres ainsi que les contraintes technologiques.

## Nomenclature

$a$	Diffusivité thermique	$[m^2.s^{-1}]$	$T_2$	Température mesurée par le Thermocouple 2	$[K]$
$C_p$	Chaleur spécifique	$[J.kg^{-1}.K^{-1}]$	$T_{flan}$	Température mesurée par le Thermocouple du flan	$[K]$
$e_2$	Position du thermocouple 2	$[m]$	$T_o$	Température dans l'outil	$[K]$
$M_f$	Température début de Transformation martensitique	$[K]$	$T_p$	Température dans la pièce	$[K]$
$P$	Pression	$[MPa]$			
$RTC$	Résistance Thermique Contact	$[m^2.K.W^{-1}]$		<i>Symboles grecs</i>	
$t$	Temps	$[s]$	$\lambda_o$	Conductivité thermique outil	$[W.m^{-1}.K^{-1}]$
$T_1$	Température mesurée par le Thermocouple 1	$[K]$	$\lambda_p$	Conductivité thermique pièce	$[W.m^{-1}.K^{-1}]$
			$\rho$	Masse volumique	$[Kg/m^3]$
			$\varphi$	Densité de flux	$[W.m^{-2}]$

## 1- Introduction

Le procédé d'emboutissage à chaud permet de combiner en une seule étape la mise en forme et la trempe de tôles d'acier. Après avoir austénitisé complètement la tôle en la chauffant jusqu'à 950°C, celle-ci est placée entre poinçon et matrice dans une presse afin de la mettre en forme en vue de l'insérer plus tard dans un ensemble complexe. Après la phase de mise en forme à chaud rapide, survient la phase de trempe par simple contact avec les outils froids au cours de laquelle le champ de vitesse de refroidissement présente des valeurs suffisantes pour transformer complètement l'austénite en martensite et ainsi conférer à la

pièce des caractéristiques mécaniques élevées. Ce transfert thermique à l'interface pièce/outil est gouverné par la Résistance Thermique de Contact locale et instantanée :  $RTC(M,t)$ . Des travaux ont déjà permis la mesure de la RTC pour différentes pressions de contact sur des géométries plane ou en forme d'oméga[1,2,3].

Pour des applications nécessitant localement une forte absorption d'énergie lors du crash on peut chercher à développer un gradient de microstructure dans la pièce qui ne sera plus 100% martensitique. Dans un certain nombre d'applications industrielles, typiquement les pieds milieux des structures automobiles, il est avantageux d'avoir une microstructure inhomogène le long de la pièce finale. Pour atteindre un tel objectif, nous développons une technique pour imposer un gradient de vitesse de refroidissement le long d'une zone déterminée de la pièce et diminuer ainsi localement la proportion de martensite dans la zone souhaitée. Pour ce faire les outils sont chauffés, permettant la diminution de la vitesse de refroidissement pour atteindre des microstructures présentant une proportion de martensite plus faible, voire nulle. Il est par ailleurs important pour maîtriser les caractéristiques de la pièce finale de bien comprendre les transferts thermiques à l'interface pièce/outil. Ces derniers sont modélisés à l'aide des résistances thermiques d'interface. Dans le présent article nous abordons le principe de mesure, le dispositif expérimental conçu et développé pour estimer la RTC à l'interface pièce/outil, et finalement un résultat d'une expérience type.

## 2- Le principe de mesure

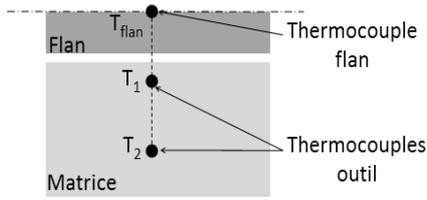
L'expérience doit nous permettre d'accéder à deux variables thermiques : température du flan et RTC. Dans un premier temps, l'essai doit permettre de retracer l'histoire thermique du flan. Cela apportera de précieuses informations concernant la vitesse de refroidissement en fonction de la pression et de la température des outils. Ces informations pourront par la suite être reliées à une analyse des microstructures et des caractéristiques mécaniques obtenues.

De plus, on souhaite mesurer la résistance thermique de contact. Cette dernière grandeur est décisive dans le transfert thermique à travers l'interface et permettra au final d'améliorer la simulation numérique du procédé.

Des thermocouples placés dans la demi épaisseur du flan permettent de mesurer la température depuis le four d'austénitisation jusqu'à la fin de l'essai. Cela permet ainsi d'accéder à la totalité de l'histoire thermique du flan durant l'intégralité du procédé.

Pour estimer la résistance thermique de contact, on a retenu le principe utilisant des couples de thermocouples insérés dans les outils qui permettent par la résolution d'une méthode inverse en vue d'accéder à la fois à la température de surface de l'outil ainsi qu'au flux traversant l'interface de contact [4]. La résolution du problème direct dans le flan, en utilisant la température qu'on y mesure et le flux estimé rentrant dans l'outil, permet d'accéder à la température de surface du flan. La résistance thermique de contact peut ainsi être estimée voir figure 1 et figure 2.

Une hypothèse du problème de conduction inverse est de considérer que le flux est normal à l'interface, le couple de thermocouple étant dans l'alignement de ce flux. De plus, pour permettre la résolution du problème inverse, il est nécessaire de connaître les caractéristiques thermiques de l'outil. Les caractéristiques de l'outil sont fonction de la température. Pour résoudre le problème direct, les caractéristiques du flan sont fonctions de la température est prennent en compte les transformations de phase. L'énergie de transformation de phase est prise en compte au travers d'un  $C_p$  équivalent.



	1. problème inverse dans l'outil	2. problème direct dans le flan
Données d'Entrées	$T_1$ et $T_2$	$\varphi(t)$ et $T_{flan}$
Sorties	$\varphi(t)$ et $T_o(0,t)$	$T_p(0,t)$

Figure 1 : Principe de l'estimation de la RTC : résolution d'un problème inverse puis d'un problème direct.

$$\frac{dT_o(x,t)}{dt} = a \frac{\partial^2 T_o(x,t)}{\partial x^2} \text{ pour } 0 < x < e_2; 0 < t \quad (1a)$$

$$-\lambda_o \frac{\partial T_o(0,t)}{\partial x} = \varphi(t) \text{ pour } 0 < t \quad (1b)$$

$$T_o(e_2,t) = T_2(t) \text{ pour } 0 < t \quad (1c)$$

$$T_o(x,0) = T_2(0) \text{ pour } 0 < x < e_2 \quad (1d)$$

$$RTC(t) = \frac{T_p(0,t) - T_o(0,t)}{\varphi(t)} \quad (2)$$

Figure 2 : formulation du problème de conduction inverse (1). Estimation de la RTC (2).

### 3- Le dispositif expérimental

Le dispositif expérimental en cours de réalisation est similaire à celui déjà développé [1]. Il se différencie toutefois de ce dernier par un système de chauffe qui équipe les outils. A terme, les outils pourront être chauffés ou partiellement chauffés. Ce dispositif expérimental doit permettre la mesure de la résistance thermique de contact. De plus, pour contrôler la vitesse de refroidissement les outils doivent pouvoir être chauffé jusqu'à 500°C. Dans un premier temps, le banc d'essai doit utiliser des outils chauffés de manière homogène et parallélépipédiques; c'est-à-dire sans la phase de mise en forme. Les dimensions des outils sont : 160x35x60 mm. Les outils seront réalisés dans un acier de travail à chaud, présentant des duretés élevées à hautes températures ainsi qu'une bonne résistance à l'adoucissement ainsi la chauffe des outils n'affectera pas ses propres caractéristiques. Le chauffage des outils est réalisé par des cartouches chauffantes insérées dans la masse. Des panneaux isolants de 12 mm d'épaisseur sur les bords permettent de diminuer les pertes par convection sur les surfaces latérales et donc une plus grande homogénéité de la température de surface. Ces isolants permettent également d'obtenir des isothermes parallèles à la surface de travail, ce qui permet de diminuer les erreurs de mesure.

De plus, des capteurs piézoélectriques situés sous l'outil doivent permettre la mesure précise de l'effort de presse afin de déterminer la pression de contact entre le flan et les outils, voir figure 3. La conception des outils assistée par la simulation numérique permet le dimensionnement du système de chauffe ainsi que le système de refroidissement nécessaire à la protection des capteurs d'effort. Le système de protection thermique des capteurs se compose d'une plaque de mica de 10 mm d'épaisseur, d'une plaque de cuivre de 3 mm d'épaisseur. Cette dernière est refroidie des deux cotés par un écoulement d'eau régulé en température : température de l'eau en entrée à 12°C.

Les simulations qui ont permis le dimensionnement du système de chauffage prédisent, pour une température de surface de 500°C, un effet de bord sur cette dernière qui peut atteindre 5 à 6 °C. Elles montrent également que l'isolation maintient une température sur les capteurs de pression d'environ 30°C, voir figure 4.

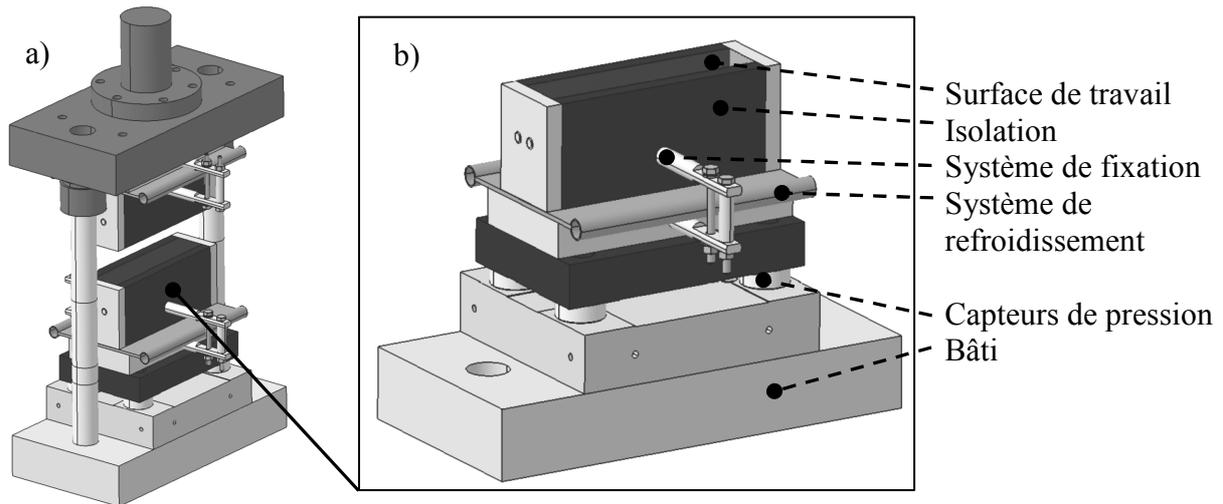


Figure 3 : a) vue globale du dispositif. b) zoom sur la partie basse.

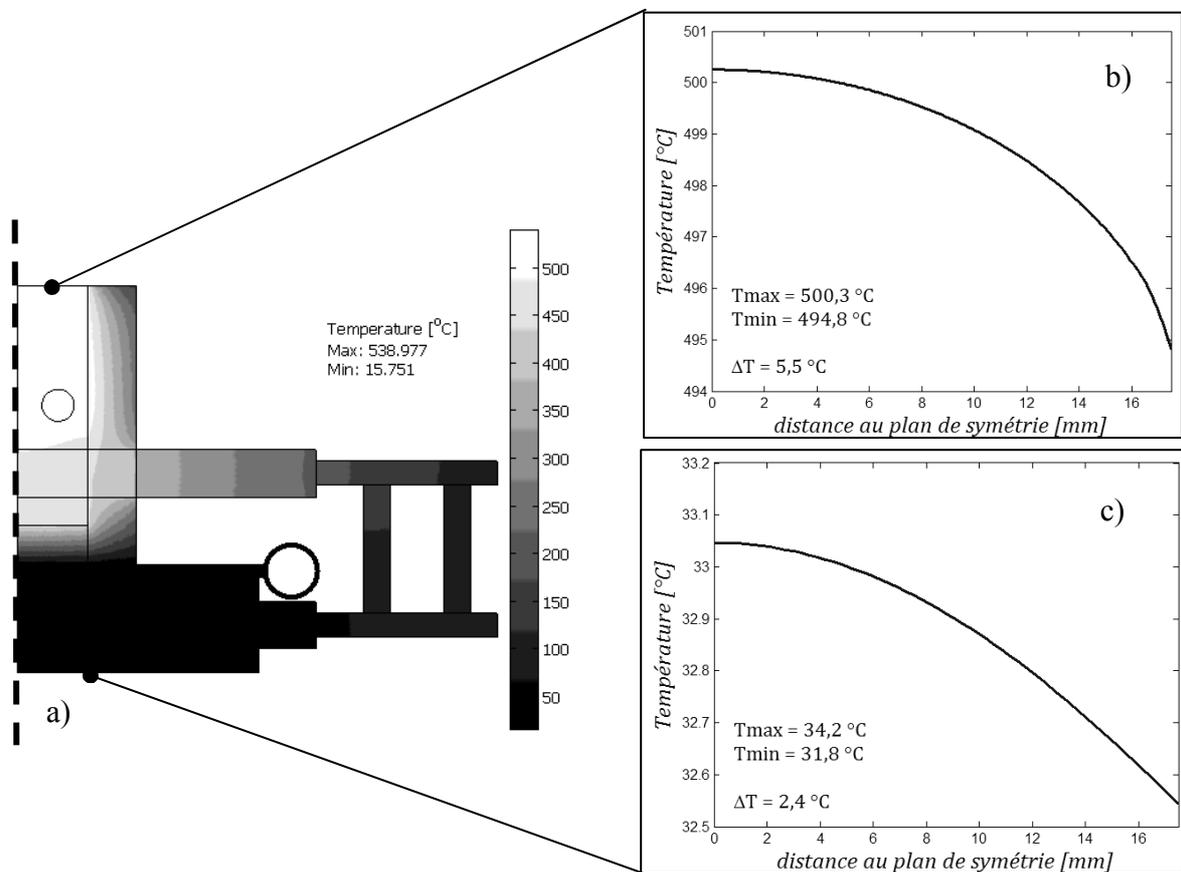


Figure 4 : a) champs de température dans une coupe du dispositif. b) profil de température sur la surface de travail. c) profil de température sur la partie en contact avec le système de mesure de pression.

L'instrumentation par thermocouple doit permettre de mesurer la température du flan et permettre d'estimer la résistance thermique de contact. Pour cela, plusieurs thermocouples seront installés dans la demi-épaisseur du flan en vis-à-vis des fluxmètres instrumentés dans les outils. L'emplacement des thermocouples a été optimisé pour permettre les mesures les plus précises [5].

#### 4- Résultats d'une expérience type.

Pour illustrer notre propos, nous présentons des mesures de température dans le flan, pour des outils non chauffés [1]. Ils permettent de visualiser le refroidissement du flan au cours du temps, voir figure 5. On peut remarquer un refroidissement très rapide dès que le contact entre le flan et l'outil est établi, le flan passant de 700°C à 400°C en moins d'une seconde. Dans ce cas, nous obtenons une transformation complète de l'austénite en martensite. On peut remarquer sur les courbes un ralentissement de la vitesse de refroidissement aux alentours de 400°C, température de début de transformation martensitique, expliqué par le caractère exothermique de la transformation de l'austénite vers la martensite. Ce phénomène est d'autant plus visible que la pression de contact est faible.

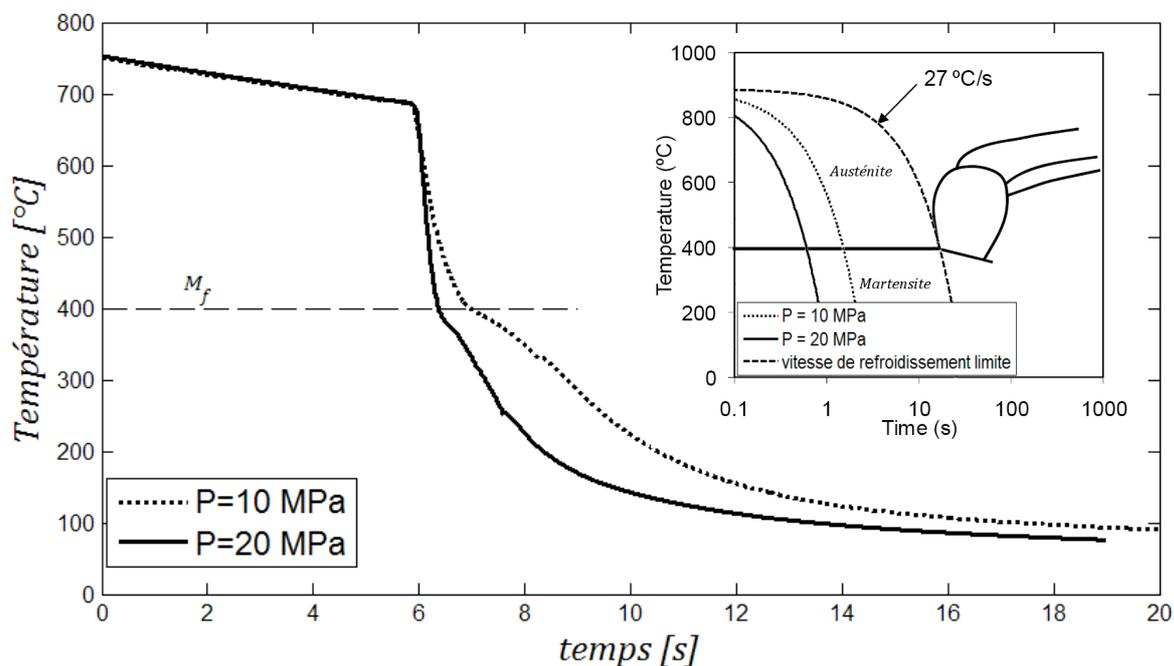


Figure 5: évolution temporelle de la température du flan sur outil froid avec différentes pressions de contact. Et Diagramme TRC pour différentes vitesses de refroidissement moyennes correspondant à différentes pression de contact. La vitesse de refroidissement limite au dessus de laquelle la transformation martensitique est complète est précisée à  $27K.s^{-1}$ .

Le diagramme TRC de l'Usibor 1500P<sup>®</sup> permet d'avoir une idée sur la vitesse de refroidissement minimale à atteindre pour avoir une transformation martensitique complète sur le flan. On peut comparer les vitesses de refroidissement moyennes correspondant aux pressions de 10 et 20 MPa avec la limite des 27°C/s au dessus de laquelle la transformation martensitique sera complète dans le cas d'un spécimen plat.

La résolution de la méthode inverse permet d'accéder au flux traversant l'interface, voir figure 6. On remarque que la RTC décroît fortement dès le contact pour obtenir une valeur stabilisée proche de  $1,2.10^{-5} m^2.K.W^{-1}$ . On retrouve également sur l'estimation de la RTC une irrégularité correspondant à la transformation de phase qui débute à 400°C dans le cas de l'Usibor 1500P<sup>®</sup>.

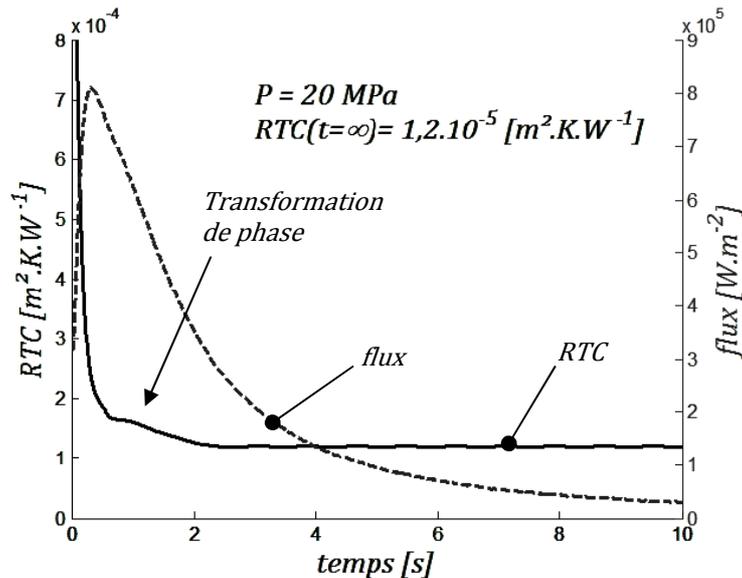


Figure 6 : évolution temporelle de la RTC et du flux.

## 5. Conclusion

Nous avons présenté un banc d'essai permettant l'étude du procédé d'emboutissage à chaud. La procédure expérimentale associée est fondée sur une instrumentation par thermocouples fine et robuste. Les mesures de température et leurs dépouillements par méthode inverse donnent lieu à des enregistrements de température et de flux cohérents. Le dépouillement considère la chaleur de transformation austénite-martensite par le recours à un  $C_p$  équivalent. Les conditions thermiques superficielles côté outils sont obtenues par technique inverse. Les résultats d'une expérience type sur des outils non chauffés montrent que la vitesse de refroidissement au sein de la pièce dépasse la limite de  $27 \text{ K.s}^{-1}$ , ce qui permet la transformation martensitique complète de la pièce. La perspective de chauffer l'outil permettra de diminuer de façon contrôlée cette vitesse de refroidissement.

## Références

- [1] B. Abdulhay : 'Etude théorique et expérimentale des aspects thermiques du procédé l'emboutissage à chaud' thèse soutenue au Laboratoire de Thermocinétique de l'Université de Nantes, décembre 2009.
- [2] B. Abdulhay, B. Bourouga, C. Dessain, G. Brun, J.Wilsius : 'Development of estimation procedure of Contact Heat Transfer Coefficient at the Part-Tool Interface in Hot Stamping Process'. *International Journal of Heat Transfer Engineering*, Volume 32, Issue 6, August/September 2010.
- [3] B. Abdulhay, B. Bourouga, C. Dessain, G. Brun, J.Wilsius: 'Experimental Study of heat Transfer in Hot Stamping Process'. *Proc. 12th International ESAFORM Conference on Material Forming*. April 27-29 2009, University of Twente, Netherland.
- [4] J.V. Beck, B. Blackwell, C.R. St. Clair, Inverse heat conduction. Ill posed problems, *Wiley Interscience*, New York, 1985.
- [5] B.Bourouga, V. Goizet et J.P. Bardon J.-P., Les aspects théoriques régissant l'instrumentation d'un capteur thermique pariétal à faible inertie", *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 39, pp 96-109, 2000.