

Simulation numérique du soudage par point : caractérisation et modélisation des résistances de contact

Numerical simulation of spot welding: modeling and characterization of contact resistances

Edouard GESLAIN^{1*}, Thomas PIERRE¹, Cédric POUVREAU¹

¹ Univ. Bretagne Sud, UMR 6027, IRDL, F-56100, Lorient, France

* (auteur correspondant : edouard.geslain@univ-ubs.fr)

Résumé – Les résistances de contacts électriques d'un assemblage ont été caractérisées par deux méthodes complémentaires : *in situ* et *ex situ*. Ces résistances de contact ont ensuite été implémentées dans un modèle de soudage par point limité aux phénomènes électrothermiques développé à l'aide de Comsol Multiphysics®. Les champs de température obtenus avec le modèle numériques sont confrontés à des observations par caméra infrarouge dans les premiers instants. Le modèle permet de bien reproduire les échauffements initiaux.

Abstract – The electrical contact resistances of an assembly were characterized by two complementary methods: *in situ* and *ex situ*. These contact resistances were then implemented in a spot welding model limited to electrothermal phenomena developed using Comsol Multiphysics®. The temperature fields obtained with the numerical model are compared with observations by infrared camera in the first moments. The model allows to reproduce the initial heating well.

Nomenclature

Lettres latines

A_c	Aire de contact, m^2
c_{p1}	Capacité thermique massique, $J.kg^{-1}.K^{-1}$
F	Force de serrage des électrodes, N
I	Intensité du courant, A
J	Densité de courant, $A.m^{-2}$
p_c	Pression de contact, MPa
r_c	Rayon de contact, m
R_{ce}	Résistances de contact électrique, $\Omega.m^2$
R_{int}	Résistance d'interface, Ω

R_{mat} Résistance de matière, Ω

U : tension, V

Lettres grecques

ρ	Masse volumique, $kg.m^{-3}$
λ	Conductivité thermique, $W.m^{-1}.K^{-1}$
σ	Conductivité électrique, $S.m^{-1}$

Indices et exposants

E/T	Électrode / Tôle
i	Indice de numéro d'interface
T/T	Tôle / Tôle

1. Introduction

Le soudage par résistance par point est le procédé le plus utilisé dans l'industrie automobile pour l'assemblage de la structure en acier des véhicules. C'est un procédé rapide et économique utilisant l'effet Joule pour faire fondre deux ou trois tôles pincées entre des électrodes en cuivre. Si le procédé est bien connu, le développement de nouveaux aciers plus performants visant à alléger les véhicules conduit à de nouvelles configurations de soudage.

Les outils numériques pour ce procédé sont bien développés. Il reste cependant des interrogations sur la modélisation des résistances de contact, responsables de forts échauffements aux interfaces. D'un point de vue électrique, ce sont les constriction de courant au niveau des rugosités des surfaces en contact qui conduisent à un pic de production de chaleur

par effet Joule. D'un point de vue thermique, c'est le flux de chaleur entre les tôles chaudes et les électrodes plus froides qui est perturbé par les aspérités.

Plusieurs travaux [1-4] ont déjà mis en évidence par des approches numériques l'importance des conditions de contact dans le cas d'assemblages hétérogènes. La nature du revêtement des tôles influence principalement les conditions de contact. Avec des tôles d'acier galvanisées, la résistance électrique de contact à l'interface de contact est fortement réduite par rapport au cas des tôles non revêtues [4].

Il existe dans la littérature plusieurs modèles de résistances de contact, pour le soudage par point ou pour d'autres procédés. Le modèle de Cooper-Mikic-Yovanovich [5], directement proposé dans COMSOL Multiphysics®, nécessite de connaître précisément la topographie des surfaces en contact (rugosité, pente moyenne des aspérités, dureté...). Le modèle de Zhang [6], utilisé dans le logiciel SORPAS® introduit une conductivité électrique de polluant.

L'approche présentée ici consiste à mesurer expérimentalement les résistances de contacts électriques en fonction de la pression et de la température de contact afin de les utiliser dans un modèle multiphysique par éléments finis.

2. Caractérisation des résistances de contact

2.1. Assemblage étudié

L'assemblage étudié est constitué de trois tôles bien différentes (Figure 1). La première (AM54) est un acier doux galvanisé de 0,57 mm d'épaisseur. La seconde (DP600) est un acier ferrito-martensitique galvanisé de 1,47 mm d'épaisseur, couramment utilisé en automobile. La troisième (Usibor® 1500) est un acier martensitique embouti à chaud avec un revêtement aluminium-silicium (Alusi®) de 30 μm pour une épaisseur totale de 1,2 mm. La diffusion de fer dans le revêtement aluminium-silicium lors de l'austénitisation avant emboutissage conduit à la formation d'intermétalliques très résistifs [7]. Les électrodes sont en alliage de CuCrZr dont les propriétés sont connues [8] avec un diamètre de face active de 6 mm et un rayon de courbure de 30 mm.

Les interfaces seront numérotées de 1 à 4 en partant de l'interface E_1/T_1 .

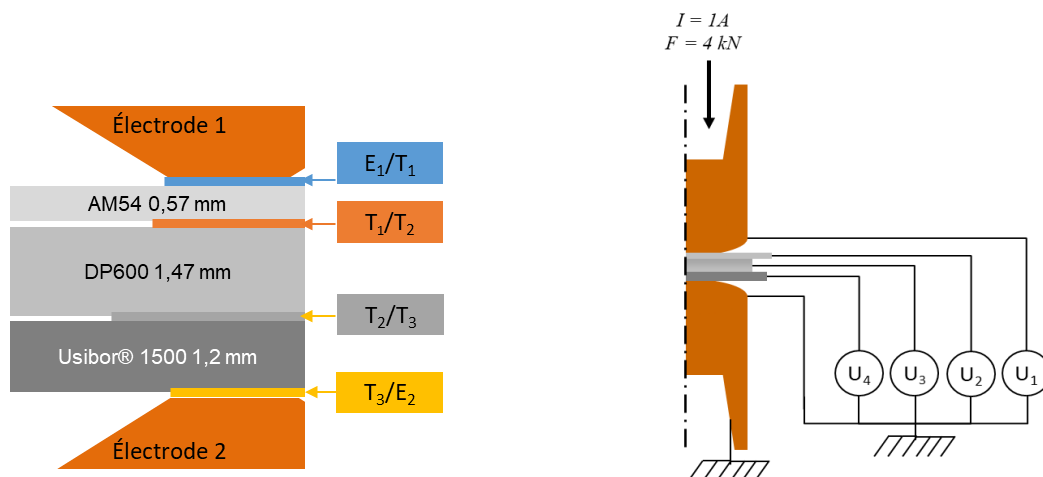


Figure 1 : Schématisation de l'assemblage

Figure 2 : Schéma électrique des mesures de tensions

2.2. Caractérisation *in situ*

Les résistances de contact *in situ* sont mesurées en fonction de la pression de contact pendant la phase d'accostage sur une pince de soudage Gyspot®. Un courant de mesure de

un ampère traverse l'empilement de l'électrode 1 vers l'électrode 2 et des prises de potentiel sont réalisées au milieu de chaque tôle et à 4 mm de l'interface dans les électrodes (Figure 2). Par une simple décomposition des différentes tensions obtenues, nous déterminons une résistance pour chacune des interfaces notée R_{int} .

La résistance d'interface est la somme de la résistance ohmique de la matière entre les prises de potentiels et le rapport de la R_{CE} sur l'aire de contact (eq. 1). Le tout évoluant en fonction de la pression de contact calculée par le rapport entre la force appliquée par les électrodes, mesurée en newtons, et l'aire de contact évoluant en fonction de cette même force.

$$R_{int} = R_{mat} + \frac{R_{ce}}{A_c} \quad (1)$$

Les aires de contact (A_c) ont été précédemment mesurées en fonction de la force appliquée à l'aide de papier pressosensible Prescale® placé à chaque interface. Les empreintes obtenues (Figure 3) sont mesurées par un traitement d'image sur ImageJ®.

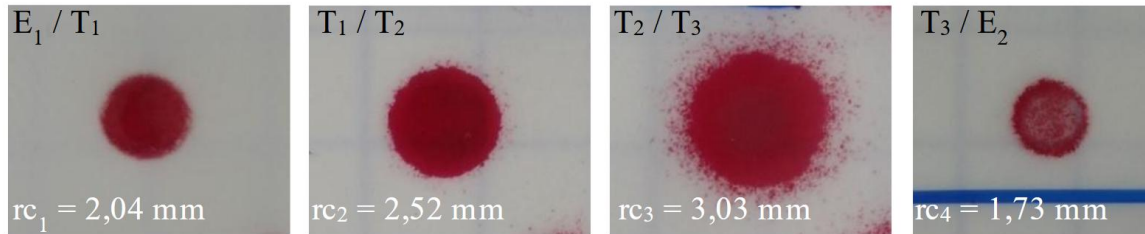


Figure 3 : Empreintes sur papier pressosensible

La résistance de matière (R_{mat}) entre les prises de potentiels correspond à la résistance ohmique de l'acier ou du cuivre en amont et en aval de l'interface. La résistivité de l'Alusi® n'étant pas connue, le revêtement sera considéré comme partie intégrante du contact. Cela simplifiera aussi la modélisation de l'interface. En négligeant la déformation élastique des tôles jouant sur l'épaisseur, et l'augmentation de l'aire de contact jouant sur la section de passage du courant, les valeurs de R_{mat} sont supposées constantes et sont présentées dans le tableau 1.

	E_1/T_1	T_1/T_2	T_2/T_3	T_3/E_2
Matière en amont du contact	4 mm CuCrZr	0,25 mm AM54	0,725 mm DP600	0,57 mm Usibor®
Matière en aval du contact	0,25 mm AM54	0,725 mm DP600	0,57 mm Usibor®	4 mm CuCrZr
R_{mat} (x 10^{-3} mΩ)	1,99	9,88	14,92	7,03

Tableau 1 : Composition et valeurs de résistances de matière entre les points de mesures

La montée de l'effort se fait manuellement jusqu'à 4 000 N ce qui correspond à l'effort appliqué lors du soudage. La mesure des tensions entre chaque élément est faite en continu par une centrale d'acquisition Sefram® DAS1400 à une fréquence de 1 kHz. Les R_{ce} ainsi calculées sont présentées dans la Figure 4 pour les efforts entre 2 et 4 kN. Les efforts hors de cette gamme ne sont pas utilisés en soudage par point.

Les électrodes étant bombées, les aires de contact des interfaces 1 et 4 sont plus petites, conduisant à des pressions plus importantes. Notons aussi la différence de niveau entre les

interfaces 1 et 2 avec uniquement des revêtements de zinc, et les interfaces 3 et 4 en présence de revêtement Alusi®.

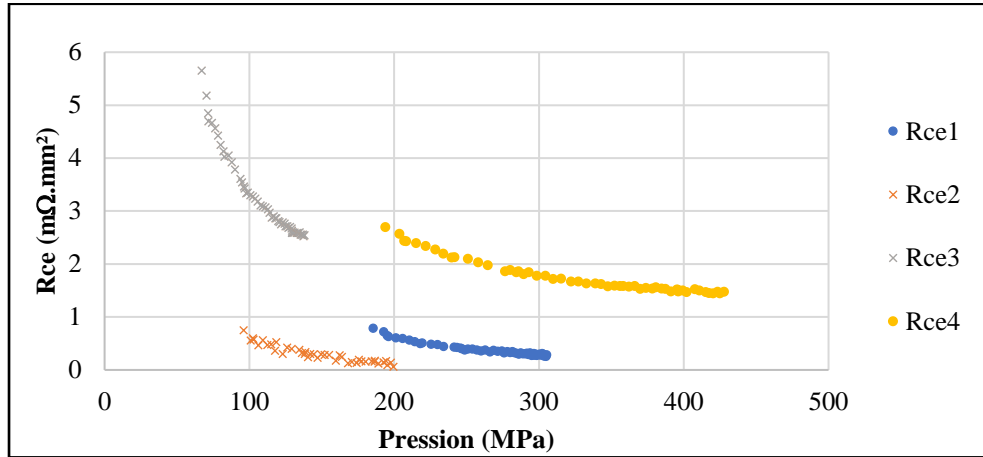


Figure 4 : Mesures des R_{ce} en fonction de la pression sur les 4 interfaces

Les R_{ce} évoluent suivant une loi puissance en fonction de la pression de contact (eq. 2) dont les coefficients sont présentés dans le Tableau 2.

$$R_{ce}(p_c) = R_0 p_c^{-n} \quad (2)$$

	R_{ce1}	R_{ce2}	R_{ce3}	R_{ce4}
R_0	16 959	59 143	379,75	124,72
n	1,929	2,477	1,023	0,741
Moyenne des résidus ($m\Omega \cdot mm^2$)	$2,27 \cdot 10^{-4}$	$2,85 \cdot 10^{-3}$	$1,85 \cdot 10^{-3}$	$3,73 \cdot 10^{-3}$
Ecart-type des résidus ($m\Omega \cdot mm^2$)	0,018 36	0,048 31	0,097 49	0,048 94

Tableau 2 : Coefficients déterminés pour les lois de $R_{ce}(p_c)$

Cette loi permet de calculer les résistances de contact initiales à la fin de la phase d'accostage et au début du soudage. C'est le point de départ pour la génération de chaleur aux interfaces.

2.3. Caractérisation *ex situ*

La caractérisation *ex situ* des résistances de contact électriques a été faite sur un dispositif déjà présenté [9-11]. Il permet d'appliquer une pression et une température contrôlée sur des pastilles de tôle et de cuivre prédécoupées. La même méthode que la mesure *in situ* est appliquée : un courant de mesure traverse l'empilement et une mesure de tension permet de remonter à la résistance de contact *via* l'équation (1). Des disques de 6 mm de diamètre sont découpés et l'aire de contact est constante.

La mesure se déroule en deux temps (Figure 5). Tout d'abord à température ambiante, une mesure de R_{CE} en fonction de l'effort pour obtenir $R_{ce}(p_c)$. Ensuite l'empilement est chauffé par conduction jusqu'à 500 °C pour calculer $R_{ce}(T_c)$.

La R_{ce2} peut être comparée avec des mesures faites antérieurement sur un dispositif expérimental limité à 80 MPa [4] (figure 6). La continuité entre les mesures *ex situ* et *in situ* permet de confirmer la validité des deux méthodes. Les pastilles de 6 mm de diamètre conduisent à une aire de contact bien supérieure à celle obtenue lors des mesures *in situ* et les

limites de la cellule de force utilisée ne permettent pas d'atteindre des pressions équivalentes. Des pastilles plus petites seraient bien plus compliquées à mettre en place et à instrumenter.

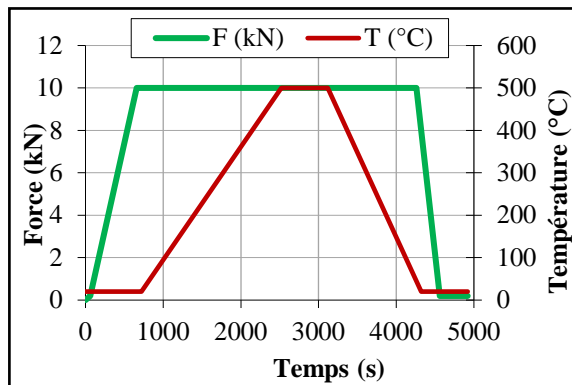


Figure 5 : Profils d'effort et de température pour les mesures ex situ

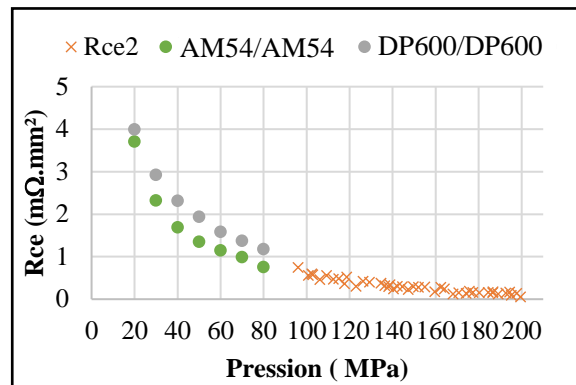


Figure 6 : Mesure in situ de R_{ce2} et mesures équivalentes faites antérieurement sur le dispositif expérimental [4]

L'évolution des R_{ce} en fonction de la température pour une pression de 200 MPa est présentée figure 7. La tendance générale est décroissante avec une chute plus ou moins prononcée à l'approche de la température de fusion du revêtement de zinc (420 °C), le zinc liquide ayant alors tendance à combler les aspérités et à améliorer le contact électrique. Nous pouvons aussi observer une augmentation des R_{ce2} et R_{ce4} pour lesquelles il s'agit de la composante ohmique de l'épaisseur de revêtement qui est prise avec la R_{ce} , cela a déjà été vu par Raelison *et al.* [4].

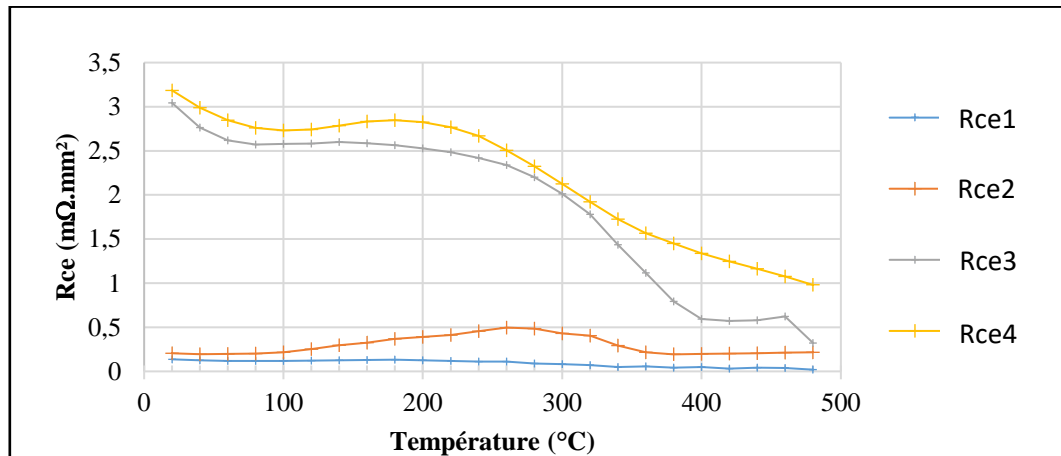


Figure 7 : Mesures de $R_{ce}(T)$ pour les 4 interfaces à 200 MPa

Ces évolutions sont reportées dans le logiciel COMSOL Multiphysics® sous forme de tables à partir d'une moyenne sur 3 mesures dont la reproductibilité donne une dispersion de moins de 10 %.

3. Modélisation des résistances de contact

3.1. Le modèle numérique

Le modèle numérique développé sur COMSOL Multiphysics® est réduit au couplage électrothermique en 2D axisymétrique. La géométrie du modèle est décrite dans la Figure 2.

Les interfaces sont définies par des rayons de contact imposés suivant les mesures réalisées *in situ* avec le papier Prescale®. L'évolution de ces rayons en cours de soudage n'étant pas prise en compte, le modèle n'est valable que sur les premiers instants du soudage, jusqu'à 30 ms.

Nous y retrouvons les équations de la chaleur (eq. 3) et de la conservation du courant (eq. 4) avec J la densité de courant (eq. 5) et Q_J la source de chaleur par effet Joule (eq. 6).

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + Q_J \quad (3)$$

$$\text{div } \vec{J} = 0 \quad (4)$$

$$\vec{J} = -\sigma \cdot \nabla V \quad (5)$$

$$Q_J = \sigma \cdot (\nabla V)^2 \quad (6)$$

Les propriétés des matériaux (ρ , c_p , λ et σ) sont prises en fonction de la température et le maillage triangulaire est affiné sur les interfaces avec des éléments de 50 μm . Nous négligeons la convection autour de la géométrie et dans les électrodes. Les paramètres de soudage appliqués sont 8,5 kA de courant, atteint en 10 ms, pendant 50 ms avec un effort de 4 kN.

Les résistances de contact sont appliquées à partir de tables en fonction de la température en utilisant la méthode de séparation des variables à l'instar de Srikunwong [11] ou Piott [12], où la R_{ce} est le produit d'une fonction de la pression de contact et d'une fonction de la température de contact (eq. 7).

$$R_{ce}(p_c, T_c) = f(p_c)g(T_c) \quad (7)$$

La fonction de pression est celle de l'équation 2. La fonction de la température ayant été mesurée à une pression de référence, nous appliquons un facteur de correction, rapport de la pression de mesure sur la pression de contact à l'accostage (eq. 8).

$$R_{ce}(p_c, T_c) = R_{ce}(p_{ref}, T_c) \cdot \frac{p_{ref}}{p_c} \quad (8)$$

L'extrapolation des résistances de contact tend vers $1 \times 10^{-4} \text{ m}\Omega \cdot \text{mm}^2$. Le logiciel travaillant avec une conductance de contact, la résistance ne peut pas être nulle. Cette valeur est atteinte à 420 °C pour les interfaces 1 et 2, ou à 1 000 °C pour les interfaces 3 et 4 comportant une épaisseur de revêtement Alusi®.

Les résistances de contacts thermiques ont été mesurées sur le dispositif *ex situ* de manière similaire et sont implémentées dans le logiciel à l'aide d'une équation de droite et un facteur correctif pour la pression.

3.2. Résultats

La modélisation des premiers instants du soudage ne peut pas être comparée avec des points soudés interrompus, car les performances de la soudeuse utilisée ne permettent pas de faire des points de moins de 80 ms. Nous avons donc utilisé la méthode des demi-points [8, 13] pour voir les échauffements initiaux, comme le montre la figure 8. Les échauffements initiaux sont bien localisés sur les interfaces et plus particulièrement au niveau des contacts 3 et 4, en accord avec les mesures de R_{ce} présentées figure 7. La présence du revêtement Alusi® très résistif [7] est en cause. Au niveau de l'interface 4, le rayon de contact plus faible implique d'une part une

densité de courant plus importante, et d'autre part moins de diffusion de la chaleur vers l'électrode inférieure, notamment en périphérie du contact. Une surchauffe est alors visible (figure 8).

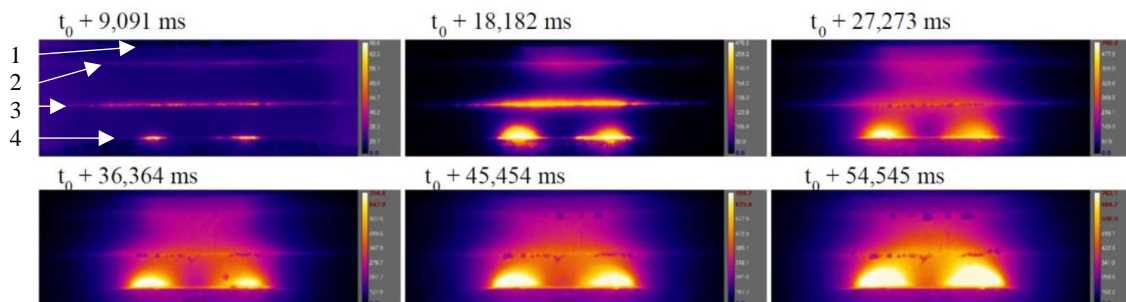


Figure 8 : Thermogramme d'un demi-point soudé [13] (température corps noir)

Le modèle numérique arrive à bien reproduire ces échauffements, comme le montre la figure 9 après la simulation de 18 ms de soudage, en accord avec la 2e image de la figure 8 ci-dessus. La surchauffe en périphérie de l'interface 4 en demi-point (figure 8) est elle aussi bien représentée par la simulation (figure 9). La non-prise en compte de l'évolution des rayons de contacts accentue ce phénomène et limite le modèle à 30 ms de soudage.

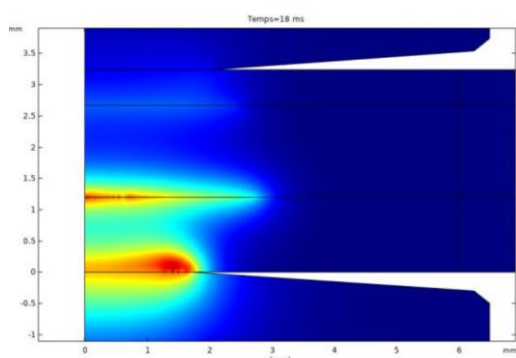


Figure 9 : Thermogramme numérique après 18 ms de soudage

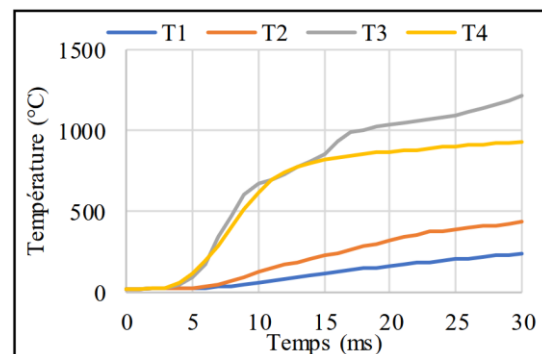


Figure 10 : Evolution des températures de contact sur l'axe

L'évolution des températures de contact sur l'axe de symétrie (figure 10) est très différente suivant les contacts avec des pentes douces à 8,6 et 16,4 °C/ms respectivement pour les interfaces 1 et 2, et de pentes plus raides autour de 141 et 108 °C/ms pour les contacts 3 et 4 respectivement, entre 6 et 8 ms.

La mesure expérimentale précise de ces températures de contacts fait l'objet de travaux en cours, présentés en Work in Progress il y a deux ans, mais n'ayant à ce jour pas abouti.

4. Conclusion

Cette étude présente deux méthodes pour caractériser les résistances de contact électriques en vue de modéliser le procédé de soudage par résistance par point.

La mesure in situ, directement sur une pince de soudage, est plutôt simple à mettre en œuvre. Elle permet d'obtenir une loi en fonction de la pression de contact pendant la phase d'accostage.

Cela donne la résistance de contact initiale avant la phase de soudage. Cette méthode inclut la résistance du revêtement ou d'éventuels polluants et permet de s'affranchir de paramètres difficiles à déterminer.

La méthode *ex situ* sur un dispositif expérimental dédié est plus complexe. Elle nécessite la découpe d'échantillons et une instrumentation minutieuse. Elle permet d'avoir l'évolution des résistances de contact en fonction de la température, mais les cinétiques thermiques ne sont pas représentatives de celles trouvées lors du soudage (jusqu'à 141 °C/ms simulé). Un système de chauffage rapide est nécessaire, soit par rayonnement, soit par induction.

Les résistances de contact mesurées permettent au modèle numérique électrothermique de bien prendre en compte les échauffements initiaux.

Une autre approche plus généraliste est envisagée pour la modélisation de la résistance de contact en fonction de la température avec une forme en quart d'ellipse. La valeur de départ à température ambiante serait à déterminer avec une mesure in situ et la valeur finale serait à la température de fusion du revêtement.

Références

- [1] S. S. Babu, M. L. Santella, Z. Feng, B. W. Riemer, and J. W. Cohron: 'Empirical model of effects of pressure and temperature on electrical contact resistance of metals', *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 6, no. 3, pp.126-132, 2001.
- [2] E. Feulvarch, V. Robin, and J. M. Bergheau: 'Resistance spot welding simulation: A general finite element formulation of electrothermal contact conditions', *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 153–154, no. 1–3, pp. 436–441, 2004.
- [3] P. S. Wei and T. H. Wu: 'Electrical contact resistance effect on resistance spot welding', *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 55, no. 11–12, pp. 3316–3324, 2012.
- [4] R. N. Raoelison, A. Fuentes, P. Rogeon, P. Carré, T. Loulou, D. Carron, and F. Dechalotte: 'Contact conditions on nugget development during resistance spot welding of Zn coated steel sheets using rounded tip electrodes', *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 212, no. 8, pp. 1663–1669, 2012.
- [5] M.G. Cooper, B.B. Mikic and M.M. Yovanovich, Thermal contact conductance, *Int. J. Heat Mass Transfer*. Vol. 12, pp. 279400, 1969.
- [6] W. Zhang, Design and Implementation of Software for Resistance Welding Process Simulations, *Welding & Joining SP-1766*, 2003.
- [7] E. Geslain, P. Rogeon, L. Cretteur, Y. Merdji, Effect of heat treatment on weldability of Al–Si coated hot-stamped Usibor® 1500P, *Surface & Coatings Technology* 445 (2022) 128750
- [8] E. Geslain, *Soudage par résistance des tôles fines revêtues : formation du noyau dans un assemblage de trois tôles*, Thèse de doctorat, Université Bretagne Sud, 2018.
- [9] E. Geslain, P. Rogeon, T. Pierre, C. Pouvreau, and L. Cretteur, "Coating effects on contact conditions in resistance spot weldability," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 253, pp. 160–167, 2018.
- [10] E. Geslain, P. Rogeon, T. Pierre, C. Pouvreau, and L. Cretteur, Caractérisation des résistances de contact électrique entre tôles d'acier revêtues : application au soudage par résistance par point d'un assemblage dissymétrique de 3 tôles. 25^e Congrès Français de Thermique, Marseille, 2017
- [11] C. Srikunwong : *Modélisation du procédé de soudage par points*, Thèse de doctor, Ecole des Mines de Paris, 2005.
- [12] M. Piott, A. Werber, L. Schleuss, N. Doynov, R. Ossenbrink and V.G. Michailov, Electrical contact resistance model for aluminum resistance spot welding, *Mathematical Modelling of Weld Phenomena* 12, 2018.
- [13] E. Geslain, P. Rogeon, T. Pierre, C. Pouvreau, and L. Cretteur, Overheating induced by Al-Si coating during spot welding of a dissymmetrical three sheets assembly, *Mathematical Modelling of Weld Phenomena* 12, 2018.