

Caractérisation des conditions de contact électro-thermique lors du soudage par résistance par point des tôles revêtues

Patrick CARRE^{1*}, Philippe ROGEON¹, Rija RAOELISON¹,
Stéphane BARBAZANGES²

¹Laboratoire Etude Thermique Energetique Environnement, rue Saint Maude, 56100 Lorient

²PSA Peugeot Citroën, Centre Technique de Vélizy, Route de Gisy, 78943 Vélizy Villacoublay

* (Patrick CARRE: patrick.carre@univ-ubs.fr)

Résumé - La caractérisation des conditions de contact électro-thermique rencontrées lors du soudage par résistance par point des tôles revêtues constitue le sujet de ce travail. Un banc de mesure ex situ permet de déterminer les résistances de contact électrique et thermique en fonction de la pression et de la température. Les conductivités électriques et thermiques constituent des données essentielles à leur détermination. Le rôle fondamental du revêtement est explicité. On compare des résultats obtenus sur des tôles revêtues en acier faiblement allié et à haute limite élastique.

1. Introduction

De nouvelles familles d'aciers à haute et à très haute limite élastique ont été récemment introduites dans l'industrie automobile pour satisfaire aux nouvelles contraintes d'allègement et de renforcement des caisses en blanc. Les nouvelles combinatoires avec des configurations d'assemblages de trois tôles dissymétriques en nuance et en épaisseur complexifient l'établissement des référentiels de soudage par la méthode empirique et justifie le recours à la modélisation et la simulation numérique. Depuis une quinzaine d'année les modèles développés évoluent [1, 2, 3] pour rendre compte de plus en plus complètement des couplages entre les différents phénomènes physiques (électrique, thermique, métallurgique, mécanique) impliqués dans un tel procédé. Les auteurs s'accordent tous sur le rôle essentiel des résistances de contact électrique et thermique sur l'initiation de l'échauffement et le développement du noyau. Le cas des tôles revêtues, majoritairement utilisées, pose toujours beaucoup de problèmes en raison de la fusion du revêtement au niveau des interfaces qui vient modifier radicalement les résistances de contact et les surfaces de contact, durant la phase de soudage. Dans ce travail on se propose de caractériser, dans le cas des tôles revêtues galvanisées, les résistances de contact électrique et thermique au niveau des interfaces électrode-tôle (E/T) et tôle-tôle (T/T) en fonction de la température et de la pression. Cette étude concernant la modélisation du soudage des assemblages géométriquement symétriques, seules les évolutions des résistances de contact thermique électrode-tôle (E/T) sont déterminées. L'hypothèse de symétrie étant étendue à l'ensemble des phénomènes étudiés.

2. Protocole expérimental

2.1 Dispositif expérimental

A l'instar de Feng [4], Vogler [5], et Srikunwong [3] on a choisi de réaliser ces mesures sur un banc d'essai ex situ. Le protocole de préparation des échantillons et la méthodologie de détermination des résistances de contact ont déjà été présentés en détail par ailleurs [6]. On établit d'abord, pour deux types de tôles revêtues, les évolutions des

résistances électriques de contact (T/T) et (E/T) en fonction de la température (jusqu'à 550°C) et à une pression proche de celle rencontrée en conditions de soudage (80 MPa). La figure 1 ci-dessous présente ce dispositif expérimental.

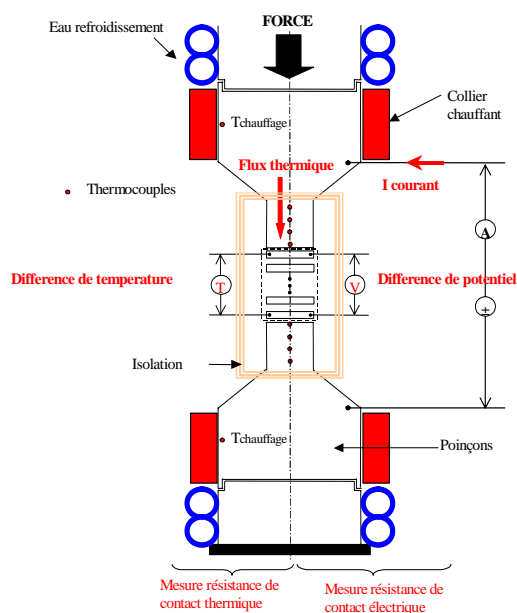


Figure 1: Schématisation du dispositif expérimental

2.2 Les matériaux de l'étude

2.2.1 Propriétés métallurgiques et mécaniques

Le premier acier retenu pour cette étude est un acier extra doux, non allié, laminé à froid, pour emboutissage. On utilise ici la désignation introduite par PSA, (XSG). Le tableau 1 présente la composition chimique de l'acier XSG utilisé pour cette étude.

C	Si	Mn	S	P	Ni	Cu	Cr	Mo	Al	Ti	Nb	V	Fe
0,003	0,004	0,11	0,007	0,014	0,017	0,013	0,015	0,004	0,014	0,067	0,002	0,003	balance

Tableau 1 : Composition chimique des tôles d'acier XSG IF (% masse).

Le second type d'acier de l'étude est un acier HLE, laminé à froid, noté DP600, dont la composition chimique est donnée dans le tableau 2. Cet acier à haute résistance présente une structure biphasée de conception plus innovante. La microstructure répond à la répartition 80 % de ferrite et 20 % de martensite.

C	Si	Mn	S	P	Ni	Cu	Cr	Mo	Al	Ti	Nb	V	Fe
0,13	0,37	1,5	0,004	0,017	0,023	0,02	0,19	0,064	0,029	0,01	0,002	0,005	balance

Tableau 2 : Composition chimique des tôles d'acier DP600 (% masse).

Les tôles XSG et DP600 sont revêtues de part et d'autre d'une couche de zinc d'épaisseur moyenne mesurée comprise entre 10,6 et 12,9 μm par galvanisation à chaud en continu. Le tableau 3 présente l'analyse chimique des revêtements des tôles XSG et DP600.

Al	Pb	Sn	Cd	Sb	Cu	Fe	Zn
0,38	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,28	balance

Tableau 3 : Composition chimique moyenne du revêtement des tôles XSG et DP600 (% masse).

Les électrodes de soudage sont constituées d'un alliage de cuivre, à durcissement structural. Il contient entre 0,4 et 1 % de chrome et entre 0,02 et 0,15 % de zirconium. On donne dans le tableau 4, les propriétés mécaniques principales (module d'Young E, limite d'élasticité σ_y et micro-dureté HV), à température ambiante, de ces différents métaux.

	E (GPa)	σ_y (MPa)	HV
Acier XSG	211	160	98 HV _{0,1}
Acier DP600	211	400	202 HV _{0,5}
Cuivre	122	470-570	170 HV _{0,1}
Zinc	50-57	50-70	38 HV

Tableau 4 : Propriétés mécaniques à température ambiante des différents métaux.

2.2.2 Propriétés électriques et thermiques

Les évolutions des résistivités électriques en fonction de la température des aciers XSG et DP600 ont été mesurées chez PSA [1] ; celle du zinc provient de la référence [2] (figure 2a). Des mesures de conductivité thermique ont été réalisées sur les deux aciers dans le sens longitudinal. La comparaison de ces résultats avec les données de la littérature pour l'acier XSG fait apparaître des différences assez importantes et pose la question de l'anisotropie thermique de ces tôles laminées (figure 2b). Concernant l'alliage de cuivre la résistivité est 10 fois plus faible que celle des aciers et la conductivité thermique vaut 320 W.m⁻¹.K⁻¹ à température ambiante.

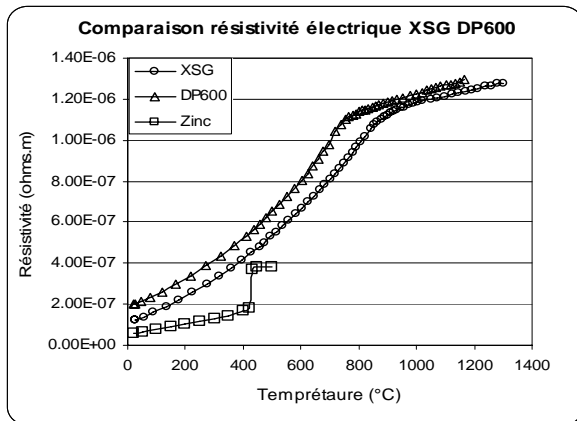


Figure 2a

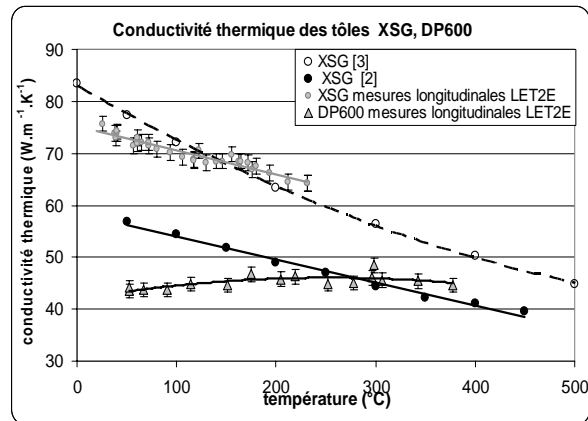


Figure 2b

Figure 2 : Evolution des résistivités électriques (2a) et des conductivités thermiques.

3. Evolutions des résistances de contact électriques

3.1 Interface tôle-tôle

Pour les deux types d'acier, les évolutions de RCE à la pression de 80 MPa avec la température, se traduisent d'abord par une augmentation pour atteindre un maximum vers 350°C, puis une décroissance brutale à l'approche de la température de fusion du revêtement de zinc (380-420°C) (figure 3).

Ce comportement très spécifique au contact entre tôles revêtues ne se retrouve pas dans la littérature. Il est le reflet d'une contribution antagoniste des propriétés électriques et des propriétés mécaniques et a été prédit par le modèle de Babu, mais pour des tôles nues [4].

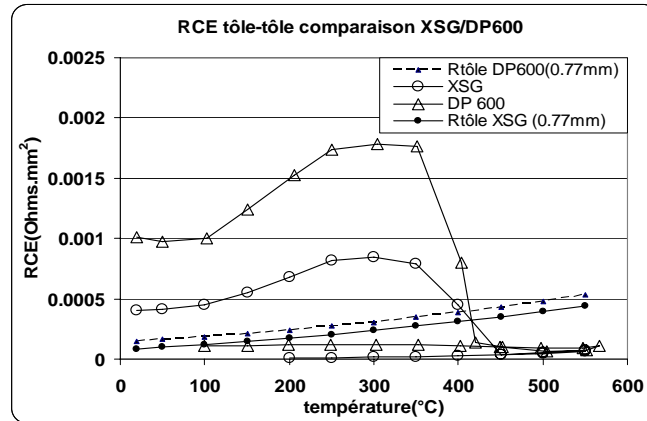


Figure 3 : Evolution des résistances de contact T/T en fonction de la température pour les aciers revêtus DP600 et XSG, à la pression de 80 Mpa, comparées aux résistances des tôles.

En effet la résistance de contact électrique peut s'exprimer comme le produit de la résistivité et d'un facteur géométrique qui varie en sens inverse du taux de contact. Le taux de contact et la résistivité augmentent avec la température. On peut constater que la résistance de contact est multipliée par 2 entre 30°C et 350°C, intervalle dans lequel la résistivité des métaux est multipliée par 2,5. Ainsi dans cette configuration particulière des deux surfaces galvanisées en contact, c'est l'augmentation de résistivité des métaux constitutifs de la zone perturbée et non celle du taux de contact qui est l'effet dominant. Puis, lorsqu'on atteint la température de fusion du zinc (380-420°C), la transition à l'état liquide du revêtement entraîne une diminution brutale de la résistance de contact électrique jusqu'à 420°C. Les valeurs des résistances de contact T/T sont supérieures aux résistances des tôles (figure 3), sauf après la fusion du zinc où elles deviennent inférieures et se stabilisent aux environs de $10^{-4} \Omega \cdot \text{mm}^2$, valeurs faibles mais non négligeables puisque équivalentes, à ce niveau de température, à la résistance électrique d'une couche de DP600 ou d' XSG de 0,2 mm d'épaisseur.

Nous constatons que les profils des évolutions avec les tôles en acier HLE DP600 et en acier très faiblement allié XSG sont similaires. Pour le contact T/T, on trouve cependant une différence de niveau importante (facteur 2 à 3) qui s'estompe après la fusion du revêtement. Malgré cette différence significative, l'allure générale des courbes RCE(T/T) conforte le rôle particulier que nous attribuons au zinc dans le comportement des interfaces : quelque soit le matériau substrat, les couches de zinc conditionnent le profil de l'évolution en température.

3.2 Interface électrode-tôle

Dans le cas du contact hétérogène cuivre-acier revêtu, les évolutions des RCE(E/T) sont monotones faiblement décroissantes avec la température (figure 4) et donc bien différentes des évolutions relatives au contact T/T (figure 3).

Le cuivre très faiblement résistif est à l'origine des valeurs de RCE(E/T) très basses mesurées à température ambiante pour ce contact hétérogène. Le contact se fait dans ce cas entre une couche de zinc malléable et la surface polie très dure de l'alliage de cuivre renforcé par précipitations d'éléments durcissants. Lorsque la température s'élève les propriétés mécaniques des métaux chutent, induisant une diminution des RCE(E/T). L'effet dominant semble ici être l'augmentation du taux de contact. (figure 4).

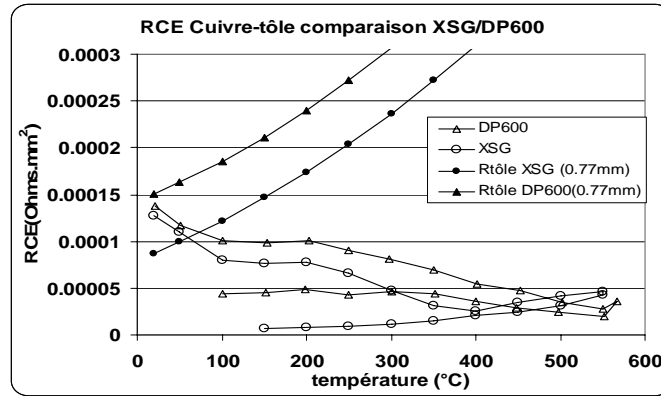


Figure 4 : Evolution des résistances de contact E/T en fonction de la température pour les aciers revêtus DP600 et XSG, à la pression de 80 Mpa, comparées aux résistances des tôles.

On constate à nouveau une grande similitude entre les évolutions des RCE(E/T) pour les aciers DP600 et XSG, mais cette fois avec des valeurs très proches pour les deux aciers contrairement au cas du contact (T/T) pour lequel le niveau semble lié aux propriétés mécaniques. Le DP600 à plus haute limite élastique conduit à des valeurs de RCE(T/T) plus élevées. Une étude complémentaire sur d'autres aciers revêtus aux propriétés mécaniques différentes [7] paraît confirmer cette hypothèse qui devra être étayée par une approche théorique microscopique en cours.

4. Evolutions des résistances de contact thermiques

Pour les assemblages symétriques, nous effectuons l'hypothèse que l'interface T/T est un plan de symétrie adiabatique et seules les résistances de contact thermique E/T s'opposent aux flux de chaleur qui transitent des tôles vers les électrodes thermostatées. Ici seule l'évolution de la résistance de contact thermique E/T est donc caractérisée. La figure 5 ci-dessous présente l'évolution des résistances thermiques de contact cuivre-tôle pour les deux aciers faisant l'objet de cette étude.

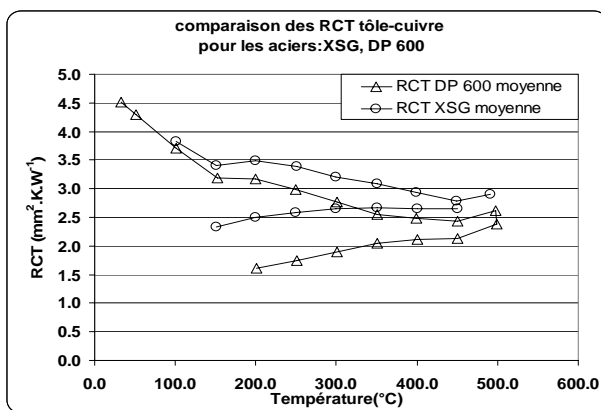


Figure 5 : Evolutions des RCT tôle/cuivre pour les différents aciers, en fonction de la température à la pression de 80 MPa

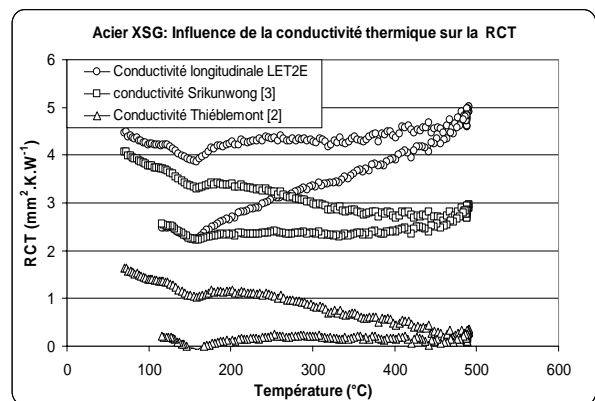


Figure 6 : Influence de la conductivité thermique sur les valeurs de RCT tôle/cuivre calculées pour l'acier XSG

Pour ces deux aciers revêtus on constate une grande similitude dans les courbes. Les valeurs sont déjà faibles à température ambiante, le cuivre contribuant fortement à de telles

valeurs. Les évolutions de $RCT(E/T)$ avec la température sont monotones faiblement décroissantes, pour atteindre à 500°C des valeurs très faibles de l'ordre de 2 à 3 $K \cdot mm^2/W$. A ce stade il convient de rappeler que ces résultats sont obtenus à partir de la mesure de la résistance d'un empilement duquel on déduit les résistances thermiques des échantillons. Une erreur sur la conductivité thermique de l'acier aura pour conséquence principale une variation du niveau moyen d'une courbe mais influencera beaucoup moins l'allure celle-ci. En particulier le phénomène d'hystérésis ne sera pas affecté car à un niveau de température donné, on soustrait la même résistance thermique d'échantillon. La figure 6 illustre cette sensibilité des valeurs de RCT à la conductivité thermique utilisée pour l'exploitation des mesures. On constate ici la nécessité de réduire les incertitudes sur la conductivité thermique des aciers. Les mesures déjà réalisées ont permis de mettre en évidence des différences importantes de conductivités thermiques dans le sens longitudinal des tôles. La possible anisotropie induite par le laminage rend nécessaire une mesure de la conductivité thermique dans le sens transversal. Ces valeurs sont généralement obtenues de manière indirecte par mesure de la diffusivité thermique par méthode flash. Le revêtement de zinc accentue la difficulté en réduisant l'absorptivité des échantillons. Enfin la similitude d'allure entre les évolutions des $RCE(E/T)$ et $RCT(E/T)$ au niveau du contact tôle-cuivre est remarquable.

5. Conclusion

Dans le cadre de la mise au point de modèle numérique du soudage par point d'assemblages symétriques de tôles revêtues galvanisées, on a présenté ici les évolutions des résistances de contact thermiques et électriques au niveau des interfaces tôle-tôle (T/T) et électrode-tôle (E/T). Un acier bas carbone et un acier à haute limite élastique ont été considérés.

Dans le cas du contact T/T, la résistance de contact électrique augmente tout d'abord avec la température sous l'effet dominant de la résistivité des métaux de la zone perturbée, pour chuter radicalement à la fusion du revêtement.

Dans le cas du contact hétérogène E/T (cuivre-tôle revêtue), les valeurs des résistances de contact électrique et thermique à température ambiante sont déjà très faibles et ont tendance à décroître avec la température.

Dans les deux cas des évolutions similaires sont obtenues pour les deux aciers, confirmant l'effet du revêtement.

Références

- [1] G. Sibilìa, "Modélisation du soudage par point - Influence des conditions interfaciales sur le procédé", Thèse de Doctorat, Ecole Polytechnique de Nantes, 2003.
- [2] E. Thiéblemont, "Modélisation du soudage par résistance par points", Thèse INPL, 1992.
- [3] C. Srikunwong, "Modélisation du procédé de soudage par point", Thèse de Doctorat Ecole des Mines de Paris, Octobre 2005.
- [4] S.S. Babu, M.L. Santella, Z. Feng, B.W. Riemer, 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 (2001), n°3, 126-132.
- [5] M. Vogler, S. Sheppard, "Electrical contact resistance under high loads and elevated temperatures", Welding Journal, Vol. 72 (1993), n°6, 231-298.
- [6] E. Feulvarch, P. Rogeon, P. Carre, V. Robin, G. Sibilìa and J.M. Bergheau, "Resistance spot welding process: experimental and numerical modelling of the weld growth mechanisms with care to contact conditions", Numerical Heat Transfer - Part A: Applications, volume 49: PP 345-367, September 2006.
- [7] P.Carré, J. Costa, Ph. Rogeon: "Fourniture d'échantillons et mesure des résistances électriques de contact sur aciers P260 et HR60" Rapport de contrat CEDAO-PSA décembre 2006