

ESTIMATION DES PARAMETRES DE CONTACT LORS DU SOUDAGE PAR POINT. ETUDE EXPERIMENTALE ET PROBLEME INVERSE ASSOCIE

K. Tahar Chaouch*, P. Carré*, P. Rogeon*, T. Loulou*, Y. Benkhedda[#]

* *Laboratoire d'Ingénierie des Matériaux de Bretagne,
Université de Bretagne Sud, Rue de Saint-Maudé, BP 92116, 56321 Lorient cedex 3, France*
E-mail : tahar.loulou@univ-ubs.fr

[#] *Département de Génie Mécanique, Université de Blida, 09000, Algérie.*

RESUME

Dans la modélisation et la simulation numérique du soudage par résistance par point, les modèles physiques prédictifs utilisés ont besoin d'être alimentés par un ensemble de données thermophysiques importantes caractérisant la nature des matériaux à assembler et surtout les conditions mécanique, thermique et électrique des différentes interfaces de contact : tôle-tôle et électrode-tôle. Parmi ces paramètres d'assemblage, les résistances de contact thermique et électrique jouent un rôle crucial durant tout le processus de formation du point de soudure et la majorité des travaux de recherche publiés jusqu'à présent s'accordent sur ce point précis. C'est dans cette optique que nous avons développé au laboratoire une activité dédiée principalement à la détermination de ces paramètres interfaciaux. Ce papier se focalise sur l'interface tôle-tête de soudeuse et vient compléter les précédentes recherches de notre équipe. Il propose une méthode 'dynamique' d'estimation des paramètres de contact à savoir : le flux q généré à l'interface de contact, la conductance thermique h due à l'imperfection du contact mécanique et finalement le coefficient de partage a de ce flux généré.

NOMENCLATURE (Les variables présentées ci-dessous sont toutes adimensionnelles : sans unités)

a	coefficient de partage du flux à l'interface	c	rapport des chaleurs spécifiques
H	conductance à l'interface	H_1	coefficient de convection
k	rapport des conductivités thermiques	q	flux généré à l'interface
$S_1(t)$	source thermique dans le barreau (1)	$S_2(t)$	source thermique dans le barreau (2)
$T_1(x, t)$	température dans le barreau (1)	$T_2(x, t)$	température dans le barreau (2)
$U_1(x, t)$	déplacement dans le barreau (1)	$U_2(x, t)$	déplacement dans le barreau (2)
δ_1	paramètre de couplage	δ_2	coefficient de couplage
$\sigma_1(x, t)$	contrainte dans le barreau (1)	$\sigma_2(x, t)$	contrainte dans le barreau (2)
ξ_1	coefficient de couplage	ξ_2	coefficient de couplage

1. INTRODUCTION

Cette nouvelle approche repose essentiellement sur l'utilisation d'une nouvelle machine, acquise récemment par notre laboratoire, dédiée à la caractérisation thermomécanique des matériaux. Par l'utilisation de cette machine (GLEEBLE 3500), nous avons pu simuler expérimentalement les conditions extrêmes rencontrées lors du soudage par point en termes de : pression de contact, vitesse de chauffe et de refroidissement, niveau de courant de soudage, ... Ce nouveau banc nous permet aussi de collecter une variété de données expérimentales très utiles par la suite dans l'identification des paramètres et/ou fonctions qui nous motivent dans cette étude. Ainsi, les températures au voisinage du plan de contact, la tension et le courant électrique utilisés, les allongements et les contraintes induites par l'effet Joule peuvent être tous collectés en même temps et sur le même échantillon expérimental. Ce dernier est constitué principalement de deux barreaux identiques, l'un acier l'autre en cuivre pour simuler respectivement la tôle et la tête de soudeuse. Par ce choix nous voulons principalement étudier le contact électrode-tôle dans un premier temps. La figure 1 montre le dispositif expérimental utilisé dans cette étude.

Vu la complexité des phénomènes physiques qui prennent place au cours de ce procédé d'assemblage et surtout l'inaccessibilité de l'interface, la connaissance des paramètres de contact passe obligatoirement par la résolution d'un problème inverse qui sera alimenté par la variété de mesures

collectées au cours d'un ou plusieurs essais aux alentours de l'interface de contact. Ainsi et à cette date, un problème couplé de mécanique et thermique est construit pour simuler cette expérience. L'idée principale de cette partie théorique de l'étude est d'utiliser les mesures thermiques et mécaniques, comme informations complémentaires dans la résolution du problème inverse couplé, afin de remonter aux grandeurs inconnues q , h , a : flux généré à l'interface, conductance thermique et coefficient de partage.

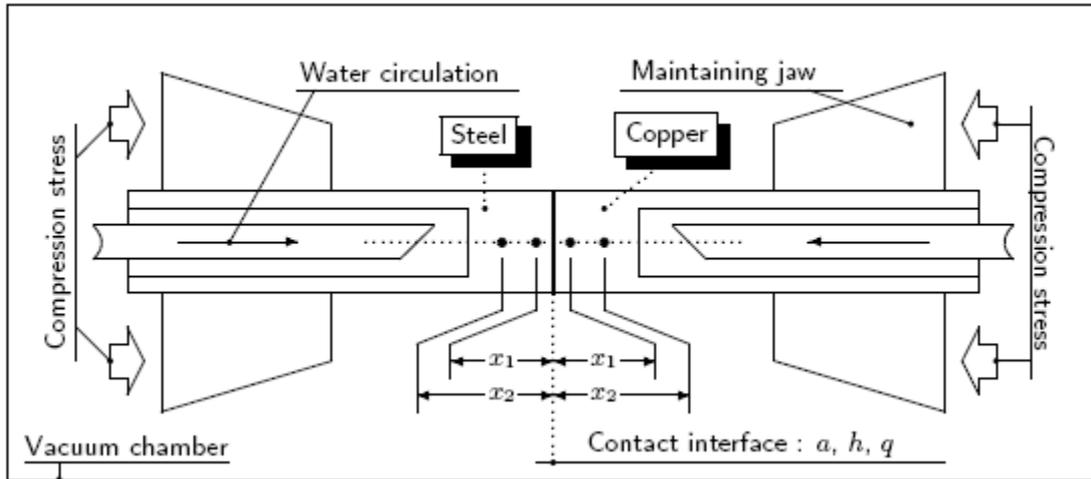


Figure 1 : Dispositif expérimental (GLEEBLE3500) utilisé dans la caractérisation de l'interface cuivre-acier.

Dans cet article, nous présentons : 1) le modèle théorique couplé utilisé, 2) la formulation et la résolution du problème inverse associé à cette expérience, et 3) une étude détaillée de sensibilité qui montre plusieurs points importants.

2. FORMULATION DU PROBLEME

Des hypothèses simplificatrices de travail s'imposent afin d'aborder ce problème difficile. L'échauffement des deux barreaux est considéré faible pour utiliser une modèle linéaire. Les transferts de chaleur et les déplacements mécaniques sont supposés unidimensionnels. Sous forme adimensionnelle le modèle couplé thermomécanique est décrit par les deux systèmes d'équations suivants. Le transfert thermique dans les deux tiges en contact imparfait est donné par :

$$\frac{\partial T_1(x,t)}{\partial t} + \eta_1 \frac{\partial^2 U_1}{\partial x \partial t} = \frac{\partial^2 T_1(x,t)}{\partial x^2} + S_1(t)$$

$$T_1(x,0) = 0$$

$$\frac{\partial T_1(0,t)}{\partial x} = H_1 [T_1(0,t) - T_\infty]$$

$$\frac{\partial T_1(1,t)}{\partial x} = (1-a)q(t) + H [T_2(1,t) - T_1(1,t)]$$

$$c \frac{\partial T_2(x,t)}{\partial t} + \eta_2 \frac{\partial^2 U_2}{\partial x \partial t} = k \frac{\partial^2 T_2(x,t)}{\partial x^2} + S_2(t)$$

$$T_2(x,0) = 0$$

$$-k \frac{\partial T_2(1, t)}{\partial x} = aq(t) + H[T_1(1, t) - T_2(1, t)]$$

$$-k \frac{\partial T_2(1 + L, t)}{\partial x} = H_2[T_2(1 + L, t) - T_\infty]$$

Les déplacements mécaniques dans les deux barreaux sont décrits par les équations suivantes :

$$\xi_1 \frac{\partial^2 U_1(x, t)}{\partial t^2} + \frac{\partial T_1(x, t)}{\partial x} = \frac{\partial^2 U_1(x, t)}{\partial x^2}$$

$$U_1(x, 0) = 0$$

$$U_1(0, t) = 0$$

A l'interface, il y a continuité des déplacements et des contraintes : $\begin{cases} U_1(1, t) = U_2(1, t) \\ \text{et} \\ \sigma_1(1, t) = \sigma_2(1, t) \end{cases}$

$$\xi_2 \frac{\partial^2 U_2(x, t)}{\partial t^2} + \delta_2 \frac{\partial T_2(x, t)}{\partial x} = \frac{\partial^2 U_2(x, t)}{\partial x^2}$$

$$U_2(x, 0) = 0$$

$$U_2(1 + L, t) = 0$$

Les deux sources, $S_1(t)$ et $S_2(t)$, représentent l'échauffement par effet Joule dans les deux barreaux lors du passage du courant (période de soudage). Pour des raisons de simplicité, la présente étude ne prend pas en compte le couplage électrique. Les contraintes mécaniques dans les deux barreaux sont données par :

$$\sigma_1(x, t) = \frac{\partial U_1(x, t)}{\partial x} + [T_1(x, t) + A]$$

$$\sigma_2(x, t) = \delta_0 \frac{\partial U_2(x, t)}{\partial x} + \delta_1 [T_2(x, t) + A]$$

Les constantes $\eta_1, \eta_2, \xi_1, \xi_2, \delta_0, \delta_1, \delta_2, \text{et } A$ représentent les paramètres de couplages définissant le comportement thermomécanique des deux barreaux. Pour des raisons de manque de place, ils ne sont reportés dans cette communication. Pour plus de détails sur la définition de ces paramètres le lecteur est encouragé à consulter la référence [1]. La résolution de ce système d'équations couplées est obtenue par la méthode des différences finies en utilisant un schéma implicite pur en temps. La thermo dépendance exige l'utilisation d'un processus itératif à chaque pas de temps.

Problème inverse : L'estimation des paramètres inconnus a, h et q est obtenue par la minimisation du critère aux moindres carrés suivant :

$$J(a, h, q) = \sum_{j=1}^{N_t} \left[\sum_{i=1}^{K_t} [T(x_i, t_j) - Y(x_i, t_j)]^2 + \sum_{i=1}^{K_u} [U(x_i, t_j) - Z(x_i, t_j)]^2 \right]$$

Les grandeurs $T(x, t)$ et $U(x, t)$ représentent les températures et les déplacements obtenus par résolution du problème direct défini précédemment. Les variables $Y(x, t)$ et $Z(x, t)$ désignent les températures et les déplacements obtenus expérimentalement en plusieurs points de mesures installés de par et d'autre de l'interface de contact. Etant donné que nous travaillons sous forme

adimensionnelle, on peut sommer les températures et les déplacements sans passer par aucune pondération entre ces deux variables d'état.

Grandeur physique	Unité	Milieu 1 : Acier	Milieu 2 : Cuivre
Module de Young	(Pa)	$210 \cdot 10^9$	$89.6 \cdot 10^9$
Coefficient de Poisson	(#)	0.28	0.34
Coefficient de dilatation	(1/K)	$12 \cdot 10^{-6}$	$18.5 \cdot 10^{-6}$
Résistivité électrique	($\Omega \cdot m$)	$1.3 \cdot 10^{-7}$	$1.7 \cdot 10^{-8}$
Conductivité thermique	(W/m.K)	40	380
Chaleur spécifique	(J/kg.K)	450	380
Masse volumique	(kg/m ³)	7800	8900
Longueur échantillon	(m)	0.03	0.03
Diamètre échantillon	(m)	0.01	0.01
Température initiale	(°C)	20	20

Tableau 1 : Caractéristiques physiques et mécaniques des matériaux utilisés.

La minimisation de ce critère est réalisé par la méthode de Levenberg-Marquardt [2, 3]. La faisabilité de l'estimation simultanée de ces trois paramètres exige une analyse détaillée de la sensibilité de ces paramètres. Afin de rendre les différents coefficients de sensibilités comparables entre eux, nous utilisons des coefficients de sensibilité réduits [2, 3]. Les caractéristiques thermophysiques des matériaux utilisés, dans cette analyse, sont regroupées dans le tableau 1. L'effet Joule est simulé par le passage d'un courant de 10000 A pendant une durée de 200 ms. La résistance électrique d'interface acier/cuivre est prise égale à $4 \cdot 10^{-9} \Omega m^2$ et la durée totale de l'expérience est d'une seconde.

Analyse de sensibilité : La figure 2 regroupe toutes les sensibilités de température et de déplacement par rapport aux trois grandeurs recherchées. Pour ne pas trop alourdir les graphiques, nous présentons seulement les sensibilités de deux capteurs de température (un capteur dans chaque barreau) et de deux capteurs de déplacement supposés implantés tout près de l'interface (un capteur dans chaque barreau). Pour les deux types de mesures, les capteurs sont installés à 1 mm du plan de contact et dans les deux matériaux respectivement. Il est évident que plus les capteurs sont proches de l'interface meilleure sera leur sensibilité et plus facile sera l'estimation des grandeurs.

D'une manière générale, on remarque que les sensibilités des déplacements sont plus grandes que celles des températures. Ce résultat déjà cité dans la littérature spécialisée est confirmé dans notre cas. On observe une nette différence d'amplitude entre les coefficients de sensibilité déduites de la température et celles déduites des déplacements. Cette différence d'amplitude est de l'ordre de quatre à cinq fois plus grande en fonction du paramètre recherché. Par ailleurs, on constate que l'amplitude d'une sensibilité de température dépend du milieu dans lequel où elle a été calculée (voir colonne gauche de la figure 2.). Cependant la sensibilité déplacement est la même dans les deux barreaux en contact. Cette observation peut être expliquée par le fait que thermiquement (propriétés thermique) il y a une différence appréciable entre l'acier et le cuivre par contre mécaniquement (propriétés mécaniques) cette différence est moins importante et s'estompe. Finalement, pour les deux types de mesures considérées, nous observons que la plus grande sensibilité concerne le coefficient de partage et le flux généré à l'interface.

3. RESULTATS

Dans cette section nous présentons les résultats d'estimation obtenus à partir de mesures simulées. Nous utilisons la même configuration de matériaux en contact montrée sur le tableau 1. Les grandeurs adimensionnelles issues de cet exemple sont regroupé dans le tableau 2.

Tableau 2. Données numériques de calcul sous forme adimensionnelle.

Temps d'expérience :	0.012662	η_1	$6.96 \cdot 10^{-4}$
Temps de chauffage :	0.002532	η_2	$6.30 \cdot 10^{-4}$

Rapport des conductivités $k=k_1/k_2$:	9.50	ξ_1	0.4192×10^{-14}
Rapport des chaleurs vol. $c=c_1/c_2$:	0.9762	ξ_2	0.93122×10^{-14}
Coefficient de convection H_1 :	187.5	δ_0	0.513698
Coefficient de partage a :	0.50	δ_1	0.904444
Conductance à l'interface H :	0.75	δ_2	1.760653
Flux généré à l'interface q :	1.00	Fo	0.20

L'estimation des paramètres d'interface avec des températures et des déplacements simulés mais sans bruit a bien fonctionné. Partant d'un état initial éloigné, les paramètres sont estimés au bout de 8 à 9 itérations en fonction du critère d'arrêt choisi. Le temps de calcul est inférieur à 10 s malgré le couplage thermomécanique. En effet dans notre cas et en examinant les paramètres ξ_1 et ξ_2 le couple thermique-mécanique reste faible (voir négligeable).

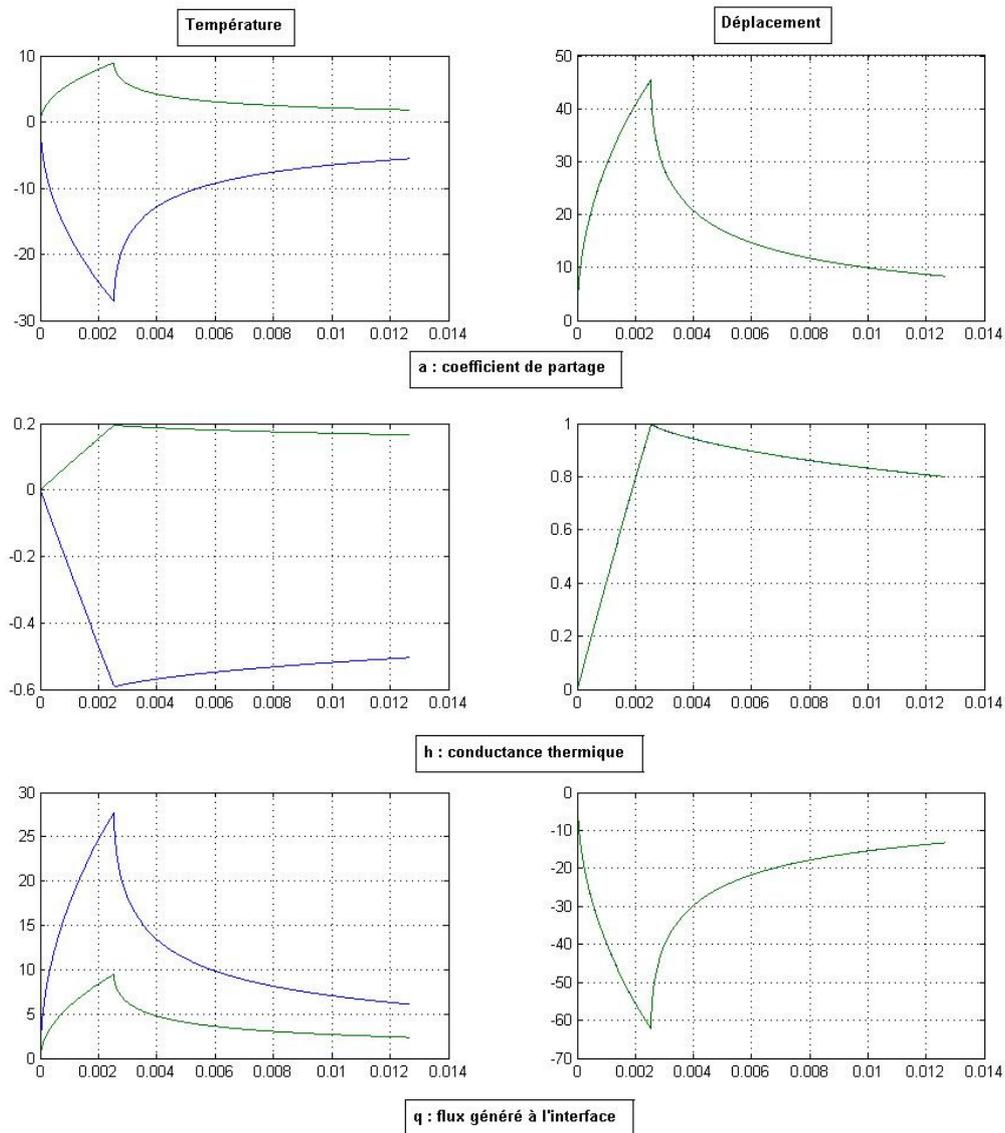


Figure 2. Evolution des coefficients de sensibilités réduites des trois paramètres a , h et q recherchés et pour les deux grandeurs mesurées : $T(x, t)$ et $U(x, t)$. Les valeurs affichées sont adimensionnelles. Pour ne pas surcharger les graphes, seules les sensibilités des premiers capteurs, installés de part et d'autres de l'interface sont présentées.

Les résultats obtenus par l'inversion sont regroupés dans le tableau 3 pour trois différents cas : 1) sans bruit, 2) avec un bruit d'amplitude de 1% de la température maximale et 3) avec 2.5 % de la température maximale comme amplitude de bruit. Les colonnes 4 et 5 présentent la valeur du paramètre estimé, son erreur absolue ainsi que l'erreur relative par rapport à la valeur exacte de départ. Pour tous cas l'état initial des paramètres a été choisi comme [0.001, 0.001, 0.001].

Ces résultats témoignent de la faisabilité de l'estimation simultanée de ces paramètres. Comme nous y attendions, et comme le montre l'analyse de sensibilité, l'estimation de la conductance thermique est la plus délicat et la plus sensible au bruit de mesure. Avec les mesures bruitées la plus grande erreur d'estimation est observée avec la conductance thermique.

Tableau 3. Résultats d'estimation des paramètres d'interface avec et sans bruit de mesure.

Paramètre	Valeur exacte	Sans bruit	Bruit (1%)	Erreur à 1%	Bruit (2.5%)	Erreur à 2.5 %
a	0.50	0.50	0.5015	0.0015 (0.30 %)	0.5038	0.0038 (0.76 %)
h	0.75	0.75	0.7261	0.0238 (3.17 %)	0.6904	0.0595 (7.94 %)
q	1.00	1.00	1.0013	0.0013 (0.13 %)	1.0033	0.0033 (0.33 %)

L'utilisation de la mesure mécanique semble renforcer l'estimation des paramètres et apporte plus d'information que la température. Une étude sur l'apport de chacune des mesures est en cours de développement.

Le tableau 4 montre les deux matrices de corrélation des deux cas traités avec bruit ci-dessus. L'examen de tableau montre que les paramètres *a* et *h* tendent à être corrélés car les valeurs affichées sont proches de 0.9. Ceci est synonyme d'une dépendance linéaire entre ces deux grandeurs.

Tableau 4. Matrice de corrélation entre les 3 paramètres d'interface pour les cas traités avec bruit.

	<i>a</i>	<i>h</i>	<i>q</i>	<i>a</i>	<i>h</i>	<i>q</i>
<i>a</i>	1.0000		sym.	1.0000	-0.2544	0.8890
<i>h</i>	-0.2499	1.000			1.0000	0.1426
<i>q</i>	0.8890	0.1473	1.0000	sym.		1.0000

La conduite de cette simulation numérique nous a montré la faisabilité de l'estimation simultanée des trois paramètres d'interface. Une conception optimale d'expérience s'avère très utile afin de réduire la corrélation entre la conductance thermique et le coefficient de partage.

4. CONCLUSION

L'approche expérimentale et théorique développée est en cours de développement. Nous n'avons pas encore procédé à la comparaison de ces résultats à ceux obtenus localement par la méthode 'statique' utilisée jusqu'à présent par notre équipe. Notons enfin que le modèle décrivant la physique du contact sera complété prochainement par le couplage électrique afin de se rapprocher le plus des conditions réelles de contact et ainsi permettre la prise en compte de toute la panoplie des grandeurs mesurées grâce à ce nouveau dispositif, c'est-à-dire les mesures électriques non utilisées jusqu'à présent. Finalement une formulation mathématique du problème avec un modèle non linéaire (thermique) permettra de se rapprocher plus des conditions réels.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. B.A. Boley and J.H. Weiner, Theory of thermal stresses, 1964, *John Wiley*, N.Y.
2. J.V. Beck and K.J. Arnold, Parameter Estimation in Engineering and Science, 1977, *John Wiley*, N.Y.
3. M.N. Özisik and H.R.B. Orlande, Inverse Heat Transfer, 2000, Taylor & Francis, N.Y.
4. K. GRYSA, M. Cialkowski and H. Kaminski, 1981, An inverse temperature field problem of the theory of thermal stresses, *Nuclear Engineering and Design*, vol. 64, pp. 169-184.