

Analyse des erreurs de mesure lors d'une opération de soudage ; Définition d'une instrumentation optimale.

Morgan DAL¹, Philippe LE MASSON¹, Michel DUMONS¹, Didier LAWRJANIEC²

¹ LIMATB, Université de Bretagne Sud, Lorient

² Institut de Soudure, Yutz

Résumé - Le travail présenté dans cet article est lié à un projet sur la modélisation du soudage (le projet MUSICA). Dans le cadre de ce projet, des instrumentations fines en thermocouples de petites dimensions ont été réalisées. Des thermocouples de type K (fils de 50 μ m de diamètre) ont été implantés à proximité de la zone fondue à environ 2 mm de celle-ci. La difficulté d'implantation associée à l'aspect intrusif de ce type d'instrumentation implique obligatoirement des erreurs de mesures que nous avons cherché à quantifier.

Nomenclature

T	Température, °C	I	Courant de soudage, A
cp	Chaleur massique, $J.kg^{-1}.K^{-1}$	Rc	Résistance thermique de contact, $K.m^2.W^{-1}$
x, y, z	Système de coordonnées, m	$u()$	Fonction Heavyside
S	Source de chaleur, $W.m^{-3}$	<i>Symboles grec</i>	
vit	Vitesse de soudage, $m.s^{-1}$	λ	Conductivité thermique, $W.m^{-1}.K^{-1}$
k	Facteur de concentration	σ	Constante de Stefan
K_z	Facteur d'involution	ε	Emissivité thermique
h	Coefficient d'échange par convection, $W.m^{-2}.K^{-1}$	η	Rendement d'une source
e	Prondeur de pénétration de la source, m	<i>Indices et exposants</i>	
P	Puissance de la source, W	inf	A l'infini
U	Tension de soudage, V	TC	Thermocouple

1. Introduction

Le soudage par fusion représente une part importante des méthodes d'assemblage de métaux dans le cadre industriel. Pour cette raison la simulation numérique apparaît comme une solution particulièrement intéressante permettant d'éviter des campagnes d'essais coûteuses en matière première, en énergie et en temps.

L'objectif principal étant l'obtention des effets mécaniques induits par les variations de température, la première étape consiste en la détermination du champ thermique. Pour ce faire, il existe deux types d'analyses. La première est dite « multiphysique » pour laquelle l'objectif est de représenter l'ensemble des phénomènes physiques en action. La seconde est basée sur l'hypothèse d'avoir un apport d'énergie assimilable à un terme source équivalent qui conduit à une forme de zone fondue proche de la réalité.

Cependant, cette dernière étant dépendante de phénomènes thermohydrauliques plus complexes, comme l'effet Marangoni ou les forces de Lorentz, la difficulté va donc être de définir une loi qui caractérise cette source. Par conséquent, ne correspondant pas à la physique, l'expression doit être paramétrée afin de permettre la meilleure représentation possible de la réalité. Dans l'optique d'identifier ces paramètres les méthodes inverses sont des outils particulièrement puissants mais nécessitent la connaissance de données expérimentales.

Plusieurs types d'instrumentations sont alors possibles. La première utilise des thermocouples placés dans la masse de la pièce à souder. Elle est donc intrusive et va, dans une certaine mesure, perturber le champ thermique. La deuxième nécessite l'utilisation d'une caméra rapide, utile pour mesurer les dimensions de la zone fondue. Cependant, elle ne donne aucune information en température. Les deux dernières sont basées sur l'observation du rayonnement infrarouge soit par pyrométrie, soit par thermographie. Elles sont toutes deux soumises à la même limite sur la connaissance de l'émissivité du matériau et ne donnent d'informations que sur la surface du matériau.

Dans le cadre de cet article, nous avons travaillé sur la simulation thermique d'un procédé de soudage de type M.A.G. (Metal Active Gas). La modélisation est réalisée selon le principe de la source équivalente, couplée à un algorithme d'identification paramétrique nous permettant de retrouver l'allure de la distribution énergétique. Les données expérimentales sont obtenues grâce à la mise en place d'une série de thermocouples.

Nous présentons dans cet écrit, premièrement, le modèle thermique utilisé. Deuxièmement, une description complète de l'instrumentation sera réalisée. Troisièmement, les résultats théoriques et expérimentaux seront analysés et critiqués. Nous concluons sur ce que pourrait être une instrumentation optimale.

2. Modélisation et Simulation Numérique

L'étude porte sur une configuration en angle soumise à un procédé MAG avec un apport de matière. La *Figure 1* présente la configuration expérimentale. Elle se compose d'une partie « Semelle » représentant la base de la pièce et une partie « Ame » placée verticalement. Dans les deux cas le matériau utilisé est de l'acier S355 [1].

2.1. Géométrie

La *Figure 2* est une image de la configuration simulée. L'apport est ici considéré dès la construction de la géométrie et n'est pas modifié au cours du temps. La source équivalente aura donc pour objectif de représenter la chaleur générée par l'arc électrique mais aussi l'énergie apportée par la goutte de métal d'apport et par conséquent les effets de la mécanique des fluides.

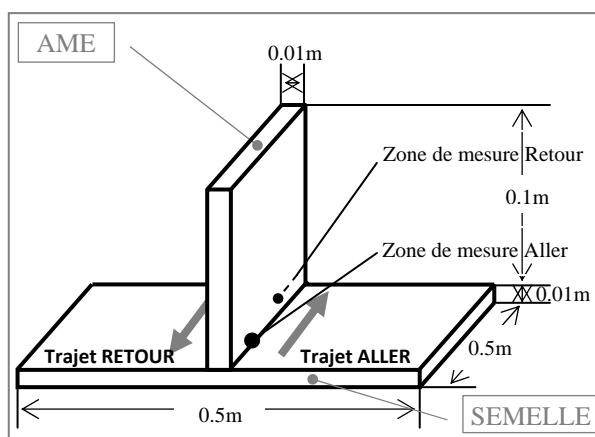


Figure 1 : Configuration réelle.

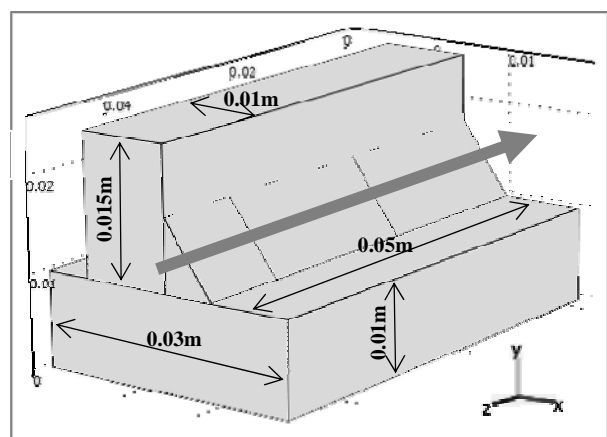


Figure 2 : Configuration simulée.

Les dimensions de la pièce simulée sont définies en supposant que la zone fondue n'est pas influencée par les conditions aux limites. Ceci permettant de limiter les dimensions de la pièce simulée et donc les temps de calculs.

2.2. Mise en équations

La simulation ne prend ici en compte qu'un modèle de conduction de la chaleur. Le système d'équations à résoudre est basé sur l'équation de la chaleur qui, en régime quasistationnaire, se présente sous la forme :

$$-vit \times \rho(T)C_p(T) \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right) + S(x, y, z) \quad (1)$$

Les équations régissant les phénomènes aux limites en quasistationnaire sont classique et décrites *Figure 3* [2] :

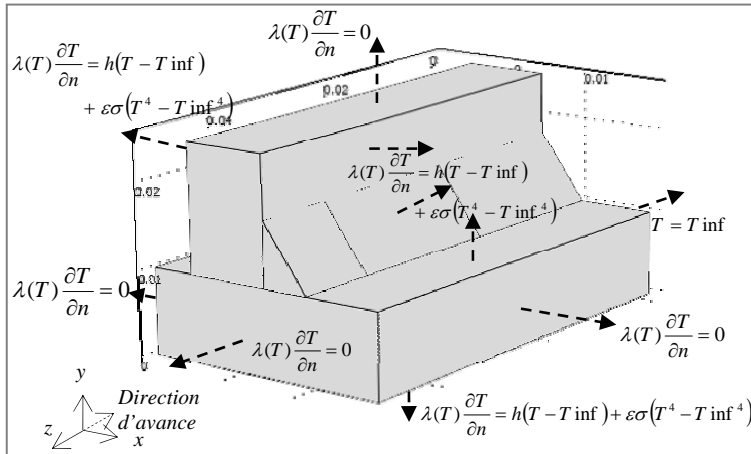


Figure 3 : Expressions des conditions aux limites.

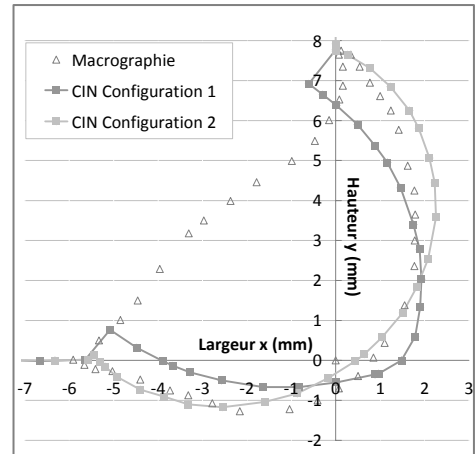


Figure 4 : Comparaison des zones fondues mesurées et simulées.

Dans l'équation (1), le terme $S(x,y,z)$ est la source équivalente décrite suivant une C.I.N. [3] :

$$S(x, y, z) = \frac{kK_z \eta UI}{\pi (1 - \exp(-K_z e))} \exp(-k(v^2 + z^2) - K_z w) \times [1 - u(w - e)] \quad (2)$$

avec v et w , un nouveau système d'axes défini respectivement tangent et normal à la surface de l'apport de matière.

L'intérêt d'un tel type de source tient dans le fait d'avoir une distribution énergétique dépendante de quatre paramètres : k , K_z , η et e .

2.3. Résultats préliminaires de la simulation.

Dans l'analyse de la simulation réalisée sous Comsol, l'élément de comparaison est la limite maximale de zone fondue observée sur les macrographies.

Les formes présentées sur la *Figure 4* valident le fait qu'une source de type CIN peut convenir à cette simulation. Toutefois, une macrographie ne représente qu'une empreinte maximale et ne peut pas valider l'aspect temporel de la forme du bain fondu. De plus, le choix des paramètres est un exercice long et fastidieux dont la précision est dépendante du problème étudié.

Compte tenu de ces observations, nous avons choisi d'appliquer la méthode d'indentification paramétrique de Levenberg-Marquardt. Sans entrer dans le détail, rappelons qu'elle permet de minimiser un écart quadratique construit sur la somme des écarts entre des températures mesurées et simulées. Par conséquent, il est nécessaire de mettre en œuvre un essai expérimental.

3. Instrumentation

Dans le cadre de ce travail nous avons placé 32 TC (type K de 50 μ m de diamètre) répartis en deux zones (*Figure 1 : zone de mesure Aller et zone de mesure Retour*). Dans chacune d'elles, les 16 TC sont répartis sur six tranches espacées de quatre millimètres dans la direction de soudage.

3.1. Mise en place des thermocouples

Dans un premier temps, un essai préliminaire a été réalisé afin d'avoir une idée de l'allure de la zone fondue. La répartition des TC est définie selon quatre principes :

1. La forme de la zone fondue est une image de l'apport d'énergie. Donc il est nécessaire d'avoir des informations sur tout son contour.
2. Le gradient thermique est plus important à proximité de la zone fondue, donc plus les mesures en sont proches, plus l'information, pour l'identification, sera pertinente.
3. Afin de stabiliser la résolution du problème inverse, il est intéressant d'avoir une image du gradient thermique transverse. Ceci implique une instrumentation selon deux isothermes proches de la zone fondue.
4. Les informations observées en fonction du temps, donnent une image du gradient dans la direction longitudinale.

Dans un second temps il faut prévoir l'installation et la fixation des TC. Ils sont soudés au fond de perçages réalisés dans l'épaisseur de la pièce.

La théorie de la mesure de température par contact [4] nous dit que les fils d'un thermocouple doivent être évacués le long d'une isotherme. Or, dans notre cas, le positionnement des pièces à assembler ne nous permet pas cette configuration. Une autre méthode aurait été de couper la pièce dans un plan transverse et de réaliser les perçages dans la direction opposée à l'avance de la torche [3]. Cependant le « cahier des charges » relatif à cette expérimentation, ne nous a pas permis une telle mise en œuvre.

Dans un troisième temps, l'essai a été réalisé dans les locaux de l'Institut de Soudure, à Yutz, le 11 Avril 2008. Les paramètres d'acquisition définis par une fréquence de 10 Hz pour une durée totale de 240s. Les paramètres opératoires ne sont pas présentés pour des raisons de confidentialité. Notons simplement que la vitesse de soudage est de 5mm.s⁻¹ et que le soudage de la passe « Retour » a été réalisé après le refroidissement complet de la passe « Aller ».

3.2. Analyse des résultats

Les mesures obtenues (*Figure 5 et Figure 6*) laissent apparaître des niveaux de température intéressants. Les valeurs maximales observées sont de l'ordre de 1200°C. Cependant, nous avons pu noter qu'un thermocouple n'avait pas fonctionné.

Aussi, d'une part, deux TC dont les coordonnées théoriques étaient identiques ont donné des thermogrammes différents (*Figure 5*). D'autre part, deux thermocouples théoriquement équidistants de la zone fondue ont donné des températures maximales différentes (*Figure 6*).

Enfin, la définition du positionnement des TC a été réalisée en considérant une température maximale de 1100°C.

Cette première analyse fait apparaître un certain nombre de causes d'erreurs. Tout d'abord, il se peut que les thermocouples ne soient pas exactement aux coordonnées prévues. En effet, lors du soudage, il existe des phénomènes de retrait impliquant un déplacement de l'âme sur la semelle. Aussi afin de lever cette incertitude nous avons découpé la pièce afin de relever les positions exactes des TC par rapport à la zone fondue.

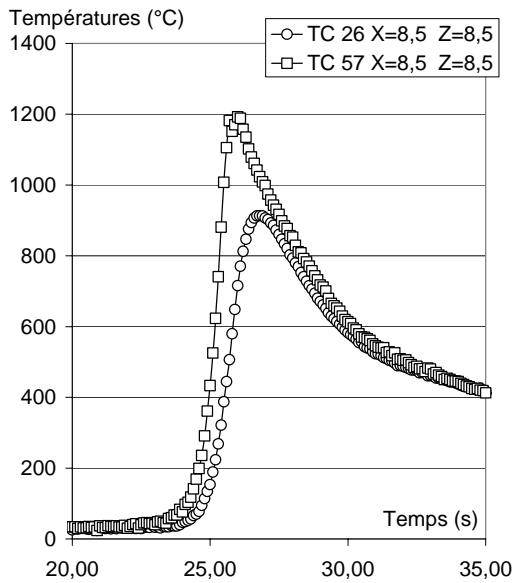


Figure 5 : Erreur de position.

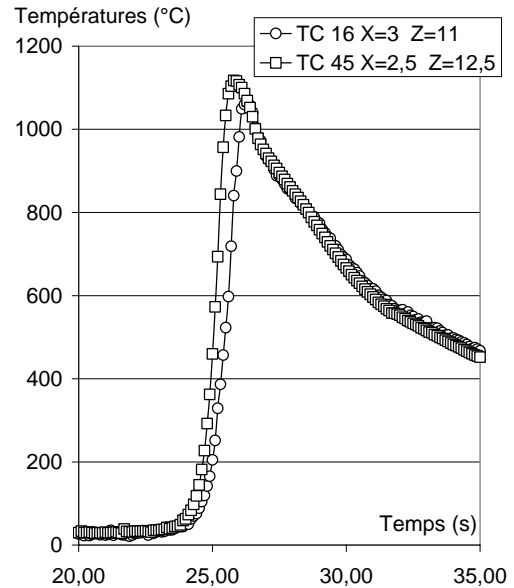


Figure 6 : Erreur de mise en place.

Ensuite, l'aspect intrusif du capteur à travers le perçage de la matière provoque une seconde incertitude. Dans notre étude, les perçages sont majoritairement perpendiculaires aux isothermes, et donc, l'air se trouvant à l'intérieur limite la diffusion de la chaleur. Cela implique une accumulation de chaleur au niveau de la boule du thermocouple provoquant une surévaluation de la mesure. C'est cette seconde incertitude que nous allons analyser dans le paragraphe suivant

4. Quantification de l'erreur.

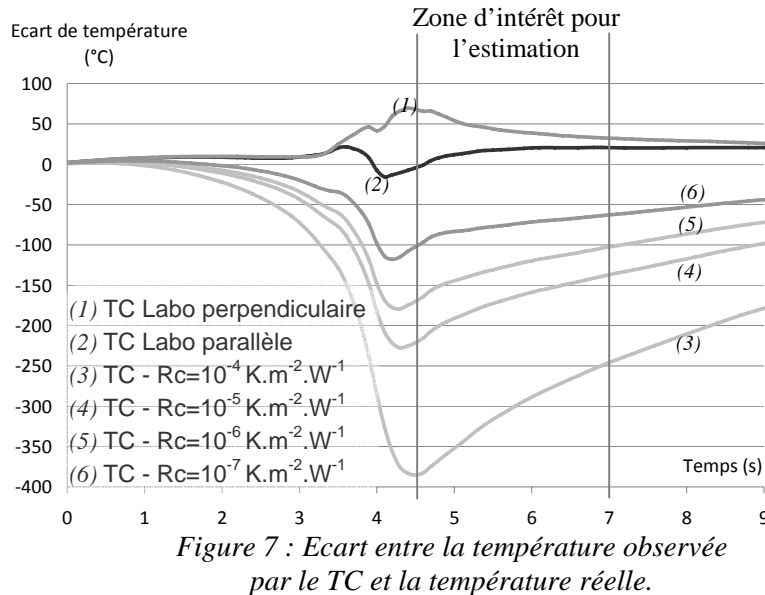
Afin de vérifier la supposition concernant l'accumulation de chaleur sur la pointe des TC, nous avons réalisé des simulations qui font intervenir la mise en place des thermocouples. La base des modèles reste la même que celle présentée au paragraphe 2 (géométrie, conditions aux limites, équation de la chaleur). Cependant, nous avons résolu le problème de façon temporelle plutôt que quasistationnaire du fait de la prise en compte des perçages. En effet, plusieurs configurations de mise en place sont envisagées : pas de TC, un TC de type laboratoire (boule et fils) soudé et disposé, soit parallèlement, soit perpendiculairement aux isothermes ou encore un TC de type industriel non soudé au fond du perçage. Bien qu'imposé de façon arbitraire, l'apport d'énergie est prédéfini suite aux comparaisons (*paragraphe 2.3, Figure 4*) entre les macrographies et la limite maximale de zone fondue.

L'analyse de l'erreur est construite sur l'écart de température caractérisé par la différence entre les températures calculées dans les boules de thermocouples de chaque configuration et la température du matériau aux mêmes coordonnées mais sans TC. La *Figure 7* présente ces écarts. De plus, nous localisons notre analyse sur la plage temporelle où nous allons réaliser l'estimation ($4,5s < t < 7s$). Cette période correspond au temps où le TC a atteint sa température maximale et au temps du début du refroidissement.

Le cas (1) correspondant au TC placé perpendiculairement à une isotherme présente une erreur plus importante que dans le cas parallèle (2) (*Tableau 1*). Cette différence d'erreur associée à un phénomène de retard est responsable de l'écart observé sur la *Figure 6*.

Les cas (3), (4), (5) et (6) représentent des TC de type industriel dont le contact au fond du perçage est imparfait et représenté par des résistances de contacts. Elles sont comprises entre $10^{-4} K.m^{-2}.W^{-1}$ (mauvais contact) et $10^{-7} K.m^{-2}.W^{-1}$ (bon contact) et entraînent des perturbations plus importantes que dans les cas (1) et (2). La *Figure 7* permet de vérifier que l'épaisseur

d'air créée par un mauvais contact (ex : cas (3)) entraîne une erreur importante en valeur maximale mesurée. Le problème de diffusion de la chaleur à travers cette résistance de contact va provoquer un retard de la mesure. Ce retard est aussi la cause, du fait de la diffusion de la chaleur à travers un contact imparfait, d'un refroidissement moins rapide du capteur de température par rapport à la matière.



Cas N°	Erreur de mesure maximale (°C)
(1)	70
(2)	20
(3)	390
(4)	225
(5)	170
(6)	100

Tableau 1: Ecart maximal dans la zone d'intérêt.

Figure 7 : Ecart entre la température observée par le TC et la température réelle.

5. Conclusion

Cette étude dont le but était la définition d'un terme source à travers une méthode d'identification paramétrique, nous a conduites à réaliser une analyse sur la mesure de température par thermocouple. Plusieurs configurations ont été étudiées et analysées. Les bases de cette analyse sont construites autour de la propagation de la chaleur par rapport à l'aspect intrusif du capteur et autour de la qualité du contact entre le capteur et la matière. Ces simulations nous permettent de définir quelques remarques relatives à une instrumentation optimale. Pour une mesure la moins perturbée, il conviendra d'utiliser des capteurs les plus fins possible, de les souder sur la pièce afin d'avoir un contact parfait et de les mettre en place parallèlement aux isothermes. Cependant, ce type d'instrumentation n'est pas forcément possible en raison du cahier des charges. Aussi, il faut envisager de développer un modèle d'erreur permettant de corriger la mesure.

Références

- [1] http://www.otua.org/Prop_Physiques/FicheOTUA/OTUA2.html
- [2] Duc Dung DOAN. *Modèle de source de chaleur pour la simulation du soudage avec et sans apport de matière*, Thèse de l'Université de Nantes, France 2006.
- [3] Jialin Guo. *Estimation de la distribution énergétique induite par un faisceau d'électron dans un matériau métallique – Application au cas du soudage d'un acier*, Thèse de l'Université de Bretagne du Sud, France 2005.
- [4] JP. Bardon et B Casagne, *Température de surface – Mesure par contact*, Techniques de l'Ingénieur, R2730, 2008.

Remerciements

Ce travail est issu du projet MUSICA et nous tenons à remercier l'ensemble de nos collaborateurs dans le cadre de ce projet et tout particulièrement l'Institut de Soudure.