



HAL
open science

**IDENTIFICATION DES CONDITIONS AUX LIMITES
THERMIQUES ET DU COMPORTEMENT
THERMO-METALLURGIQUE DE L'ACIER
X10CrMoVNb9-1 LORS D'UN ESSAI DE SOUDAGE
SIMPLE**

Guilhem Roux, René Billardon

► **To cite this version:**

Guilhem Roux, René Billardon. IDENTIFICATION DES CONDITIONS AUX LIMITES THERMIQUES ET DU COMPORTEMENT THERMO-METALLURGIQUE DE L'ACIER X10CrMoVNb9-1 LORS D'UN ESSAI DE SOUDAGE SIMPLE. Séminaire de la commission Simulation Numérique du Soudage (SNS), Mar 2006, Paris, France. pp.CD rom. hal-00437209

HAL Id: hal-00437209

<https://hal.science/hal-00437209>

Submitted on 30 Nov 2009

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

IDENTIFICATION DES CONDITIONS AUX LIMITES THERMIQUES ET DU COMPORTEMENT THERMO-METALLURGIQUE DE L'ACIER X10CrMoVNb9-1 LORS D'UN ESSAI DE SOUDAGE SIMPLE

Guilhem-Michel ROUX*°, René BILLARDON*

*LMT-Cachan (E.N.S. de Cachan / CNRS (UMR8535) / Université Paris 6)

°CEA (DEN/SAC/DM2S/SEMT/LM2S)

61, Avenue du Président Wilson, 94235 Cachan Cedex.

Téléphone : +33 (0)1 47 40 27 70, Télécopie : +33 (0)1 47 40 22 40

roux@lmt.ens-cachan.fr, Rene.Billardon@lmt.ens-cachan.fr

1. INTRODUCTION

Cette étude s'intègre dans le cadre d'un ensemble de travaux sur la durabilité des joints soudés des réacteurs nucléaires dits du futur -de type VHTR (Very High Temperature Reactor)- et plus particulièrement sur la simulation numérique du soudage multi-passes de tôles très épaisses en acier martensitique X10CrMoVNb9-1 (ASTM A387, également connu sous la dénomination commerciale "T91").

La qualité des résultats de la simulation de ce procédé de fabrication complexe dépend fortement, entre autres, de la précision des approches utilisées pour modéliser, d'une part les conditions aux limites thermiques imposées à la pièce, et d'autre part, les multiples changements de phases que subit le matériau lors des chauffages et refroidissements successifs induits par le soudage multi-passes.

2. CONDITIONS AUX LIMITES THERMIQUES LORS D'UN ESSAI « DISQUE-SPOT »

Afin de valider les modèles numériques en cours de développement, plusieurs essais ont été mis en place. Le plus simple, dit « DISQUE-SPOT », consiste à chauffer en son centre un disque de diamètre 100 mm et d'épaisseur 8 mm avec une torche TIG sans déposer de matière. Cet essai doit permettre de valider lors d'une opération de soudage mono-passe, en particulier dans la Zone Affectée Thermiquement, le modèle de comportement thermo-métallurgico-mécanique du matériau.

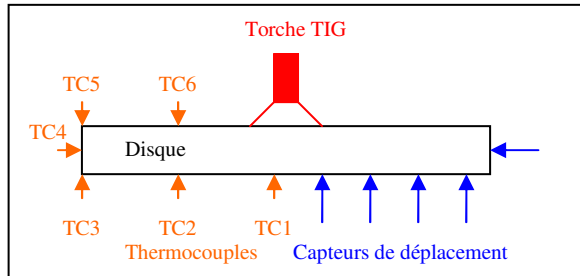


Fig. 1 : Schéma de l'essai DISQUE-SPOT

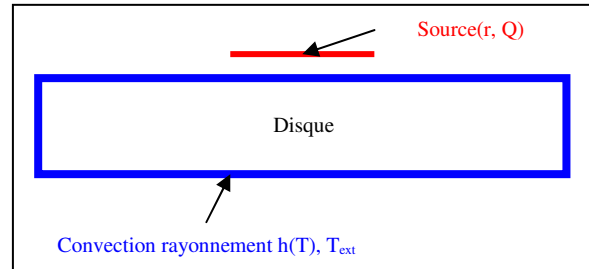


Fig. 2: Identification des CL thermiques

La première exploitation d'un tel essai requiert l'identification correcte des conditions aux limites (CL) thermiques imposées à la pièce. Une étude numérique de sensibilité montre que l'évolution du champ de température dans la pièce dépend tout autant de la modélisation de l'échange par convection-rayonnement à la surface de toute la pièce que de la modélisation de la source de chaleur induite par l'arc de soudage.

Lors d'une analyse thermique par éléments finis, il est classique de modéliser, en première approximation, les conditions d'échange par convection-rayonnement par un flux de chaleur

$$q_v = -h(T).(T - T_{ext}) \quad (1)$$

où h représente un coefficient d'échange fonction de l'état local à la surface, T la température locale à la surface et T_{ext} la température environnante "à l'infini".

La torche TIG peut être modélisée par une source de chaleur surfacique ou volumique. La modélisation surfacique choisie correspond à la fonction gaussienne infinie tronquée telle que :

$$P_s = \alpha Q e^{-\frac{3r^2}{ro^2}} \quad \text{avec} \quad 0 \leq r \leq r_{max} \quad (2)$$

où Q représente la puissance de la source, r le rayon courant à partir du centre de la source, r_0 et r_{max} des rayons caractéristiques de la source. Il est classique de fixer a priori la valeur de r_{max} .

Dans le cas d'une maquette simple telle que DISQUE-SPOT, l'identification, à partir des mesures de température en un nombre limité de points à la surface de la pièce, de la source de chaleur donnée sous une telle forme analytique, fonction des deux paramètres Q et r_0 , ne pose pas de problème particulier si l'échange par convection-rayonnement est supposé connu. En revanche, l'identification simultanée de cette source et des coefficients d'échange h en tout point à la surface de la pièce est un problème mal posé.

Afin de limiter le nombre de paramètres à identifier, pour un matériau et un "environnement" donné, le coefficient d'échange est supposé ne dépendre que de la température T . Par ailleurs, la conductivité thermique du matériau est supposée connue quelle que soit la température.

Les valeurs du coefficient d'échange ont été identifiées pour le matériau T91, de 700°C jusqu'à la température ambiante, à partir d'un essai de refroidissement libre d'un disque initialement chauffé au four à la température homogène de 800°C. Cette identification inverse a été réalisée en utilisant l'algorithme d'optimisation de Levenberg-Marquardt, les mesures de température aux points TC2, TC3, TC5 et TC6 (cf Fig. 1) et des analyses thermiques réalisées avec le code de calcul par éléments finis Cast3M.

La modélisation des échanges à haute température, i.e. au voisinage de la source, et la modélisation de la source elle-même sont fortement couplées. L'identification des paramètres caractérisant la source et du coefficient d'échange à haute température a donc été faite de manière simultanée à partir d'essais DISQUE-SPOT en utilisant l'algorithme d'optimisation de Levenberg-Marquardt, les mesures de température aux points TC1 à TC6 (cf Fig. 1) et des analyses thermiques réalisées avec le code de calcul par éléments finis Cast3M. En pratique, la valeur du coefficient d'échange identifiée par cette procédure est sa valeur à 1400°C, i.e. au voisinage du bain liquide, les valeurs pour les températures comprises entre 700 et 1400°C étant obtenues par interpolation. Par ailleurs, l'identification inverse simultanée du coefficient d'échange à 1400°C et des deux paramètres caractérisant la source à partir d'un seul essai DISQUE-SPOT étant un problème mal posé, la valeur du coefficient d'échange à 1400°C a été identifiée avec les valeurs des couples de paramètres caractérisant chacune des sources équivalentes à deux buses TIG différentes à partir des deux essais DISQUE-SPOT correspondants. L'ensemble de la procédure d'identification est résumé en Fig. 3 et les résultats obtenus sont donnés en Fig. 4.

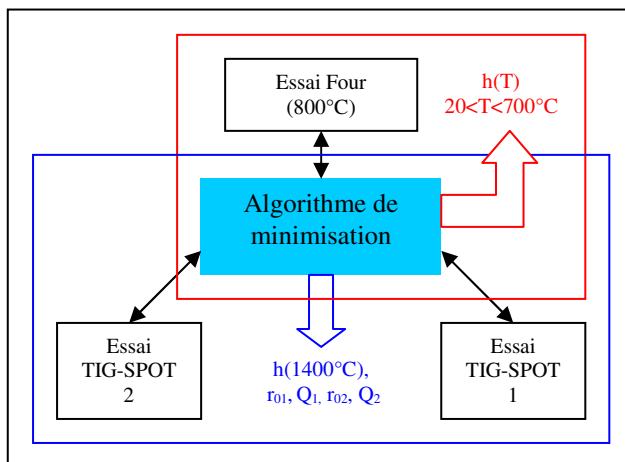


fig.3 : Procédure d'identification

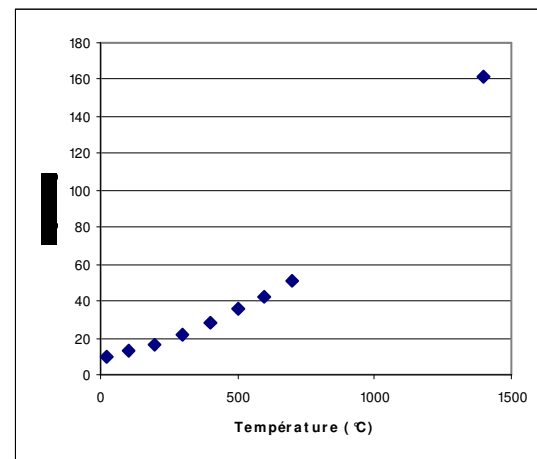


fig.4 : Paramètre $h(T)$ identifié

3. IDENTIFICATION DU COMPORTEMENT THERMO-METALLURGIQUE DU MATERIAU

L'état de livraison du matériau est de type martensite revenue. Lors du chauffage induit par une opération de soudage monopasse, le matériau initial, selon le niveau de température atteint, garde la même microstructure, se transforme en austénite puis en ferrite δ ou en liquide. Lors du refroidissement, même à des vitesses assez faibles ($\dot{T} \geq 0.2K/s$), le matériau austénitisé se transforme naturellement en martensite brute de trempe. Lors du chauffage induit par des passes de soudage ultérieures, le matériau transformé au chauffage peut être soit le matériau initial (martensite revenue), soit la martensite brute de trempe résultat de la (des) passe(s) précédente(s). Par ailleurs, la martensite brute de trempe, selon le niveau de température atteint, peut ne pas être austénitisée et être seulement revenue.

Pour les simulations présentées ci-dessous, la transformation austénite $\gamma \Leftrightarrow$ ferrite δ et le revenu de la martensite brute de trempe ne sont pas modélisés.

Si on considère que la variation de volume importante induite par la transformation austénitique au chauffage ou martensitique (au refroidissement) est directement associée à l'évolution de la proportion de phase formée, cette dernière peut être identifiée à partir des résultats d'essais de dilatométrie, e.g. à vitesses de chauffage constantes.

Brachet *et al.* (1998) ont proposé de déduire la cinétique de transformation austénitique à l'équilibre des résultats expérimentaux à vitesses de chauffage constantes en utilisant une relation proposée par Zhu et Devletian (1991). Les résultats obtenus sont donnés en Fig. 5.

Une première approche de modélisation de la transformation austénitique au chauffage a été d'utiliser un modèle d'incubation et (germination-)croissance découplé. La cinétique de transformation à l'équilibre est alors modélisée par une loi proposée par Duthilleul et Brachet (2005). Le temps d'incubation lors d'un chargement anisotherme $T(t)$ quelconque discrétisé en un ensemble de paliers isothermes Δt_i aux températures T_i , est relié aux temps d'incubation $t_i(T_i)$ lors de chargements isothermes aux températures T_i , en utilisant le principe d'additivité de Scheil. Les temps d'incubation $t_i(T_i)$ sont modélisés par une loi phénoménologique proposée par G.-M. Roux *et al.* (2006). La cinétique de transformation hors équilibre est modélisée par une loi initialement proposée par Holt *et al.* (1980) et modifiée par Brachet *et al.* (1998). Cette démarche requiert l'identification successive de trois ensembles de trois paramètres matériau qui permettent de simuler les cinétiques de transformation lors de chargements (an)isothermes quelconques, e.g. à vitesses de chauffage constantes (Fig (5)).

La transformation martensitique est modélisée par la loi classique de Koistinen-Marburger.

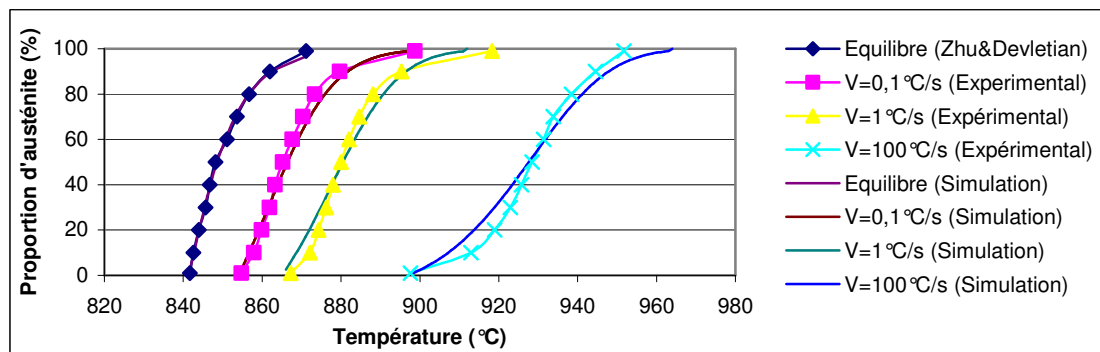


Fig.5 : Cinétique de transformation austénitique de l'acier T91 –microstructure initiale martensite revenue-.

4. CONCLUSION

Une première simulation thermo-métallurgique de l'essai DISQUE-SPOT a été réalisée avec les codes de calcul par éléments finis Abaqus© et Cast3M. Les chaleurs latentes de transformation associées aux transformations sont prises en compte. Comme visualisé en Fig. 6, la Zone Affectée Thermiquement est assez bien prévue par la simulation. En revanche, certaines approximations doivent être modifiées afin de mieux prédire la taille du bain fondu –expérimentalement délimité par un liseré important de ferrite δ -.

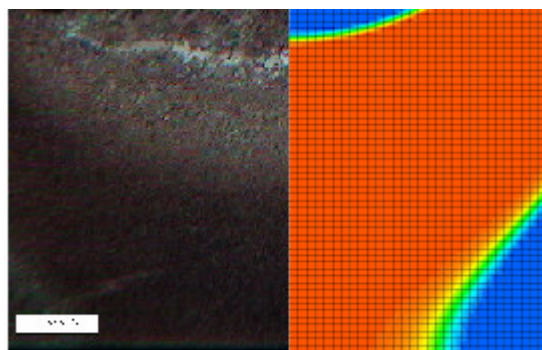


Fig.6 : Comparaison de la microstructure lors d'un essai DISQUE-SPOT (expérimentale/simulée)

5. BIBLIOGRAPHIE

- G.M. Roux, F. Hild, R. Billardon, "Modélisation de la transformation austénitique au chauffage d'un acier martensitique", Colloque national MECAMAT, Aussois, 2006.
- Brachet J.-C., Gavard L., Boussidan C., Lepoittevin C., Denis S. Et Servant C., "Modelling of phase transformations occurring in low activation martensitic steels", *J. of Nuclear Materials*, 258-263 (1998) pp. 1307-1311.
- Duthilleul R. et Brachet J.-C., "Etude des évolutions microstructurales lors d'un traitement thermique rapide à haute température d'un acier de type T91", *Document technique CEA/DMN* (2005).
- Holt R.A. et al, IAEA Specialists meeting, IWGFPT/7, Blackpool (UK), (1980)
- Zhu Y.T. and Devletian J.H., "Determination of equilibrium solid phase transition temperature using DTA", *Met. Trans.*, 22A (1991) pp. 1993-1998.