

Simulation numérique d'un essai de soudage en rainure circulaire

S. COURTIN^a, T.T.T. LE^a, J. SCHROEDER^b, Ph. GILLES^a

a. AREVA NP, Tour AREVA, 92084 Paris La Défense

b. AREVA NP, Centre Technique, 71380 Saint Marcel

Résumé :

L'essai de soudage en rainure circulaire est utilisé par AREVA dans le cadre de la caractérisation de la fissuration à chaud des matériaux d'apport mis en jeu lors d'une opération de soudage par procédé TIG. Cet article présente la simulation numérique réalisée en support à l'analyse expérimentale d'un essai effectué sur une maquette instrumentée. L'opération de soudage a été modélisée en considérant un état bidimensionnel axisymétrique et les comportements élastoplastiques des matériaux mis en jeu (acier inoxydable austénitique 316L et alliage base Nickel 52) ont été considérés. Les calculs ont été validés grâce aux relevés de températures et de retraits de soudage effectués sur la maquette instrumentée. La simulation numérique permet de décrire les variables thermomécaniques (déformations, contraintes) lors de l'opération de soudage, dans la rainure comme dans le reste de la structure, en cours comme en fin de dépôt des cordons.

Abstract :

The circular groove welding test is used by AREVA in the framework of the hot cracking characterization of the welded metal by Gas Tungsten Arc Welding. This paper presents the numerical simulation performed in support to the experimental analysis of an instrumented test. The welding operation is modeled in a 2D axisymmetric configuration and materials (AISI 316L and Ni base alloy 52) are considered assuming elastic-plastic behaviors. Calculations have been validated thanks to experimental measurements on temperatures and shrinkages. The numerical welding simulation allows describing the thermomechanical parameters (strain, stress) during the welding operation, both in the groove and in the global structure, during the bead deposits and at the final states.

Mots clefs : fissuration à chaud, alliage base Ni, procédé multi-passes, simulation du soudage

1 Introduction

L'essai de soudage en rainure circulaire est utilisé par AREVA dans le cadre de la caractérisation de la fissuration à chaud des matériaux d'apport mis en jeu lors d'une opération de soudage par procédé TIG. Dans cet essai, relativement sévère vis-à-vis du risque de fissuration à chaud, il s'agit de remplir une rainure circulaire de type "chanfrein étroit", en une passe par couche, sur un bloc épais parallélépipédique, par le procédé TIG automatique, avec possibilité de faire varier plusieurs paramètres. Après chaque essai, 4 coupes sont réalisées, et sur chacune, une recherche de fissures est effectuée. Le nombre de fissures comptabilisées permet d'évaluer la sensibilité des matériaux d'apport à la fissuration à chaud. Cet essai permet, en particulier, de classer les fils d'apport de type alliage base Nickel (Inconel). L'intérêt des essais en rainure circulaire est de réaliser des tests sur des soudures représentatives d'assemblages ou de réparations, de façon à représenter au mieux les conditions réelles dans lesquelles les microfissurations à chaud sont susceptibles de se produire. Les conditions de soudage permettent de s'approcher de cas sensibles à la fissuration, et de pouvoir observer l'effet de facteurs tels que le bridage, la dilution et les paramètres de soudage.

Cet article présente la simulation numérique du soudage réalisée en support à l'analyse expérimentale d'un essai effectué sur une maquette instrumentée. Les données expérimentales relatives à cette dernière seront tout d'abord exposées, puis les conditions de la simulation seront détaillées. La validation des calculs par comparaison aux données expérimentales de température et de retrait sera ensuite mise en avant. Enfin,

quelques éléments illustreront une des forces de la simulation qui est de pouvoir décrire l'évolution des variables thermomécaniques (déformations, contraintes) lors de l'opération de soudage, dans la rainure comme dans le reste de la structure, en cours comme en fin de dépôt des cordons.

2 Données expérimentales

La maquette est présentée sur la Figure 1. Les dimensions du bloc sont 200x200x60 mm. La rainure fait 8 mm de large et 15 mm de profondeur. Elle se situe à 54 mm du centre du bloc. Les matériaux mis en jeu sont, pour le métal de base, de l'acier inoxydable austénitique AISI 316L, et pour le métal d'apport, du fil Inconel 52 (I52) ou Alliage base Ni 52 (A52). La rainure est remplie par couches successives de cordons par le procédé TIG automatique, une passe par couche. Le soudage est réalisé à plat à partir de l'azimut 0°, la maquette est fixée sur un plateau tournant. La torche reste donc fixe et la maquette tourne. Les paramètres de soudage, identiques pour toutes les passes, sont confidentiels.

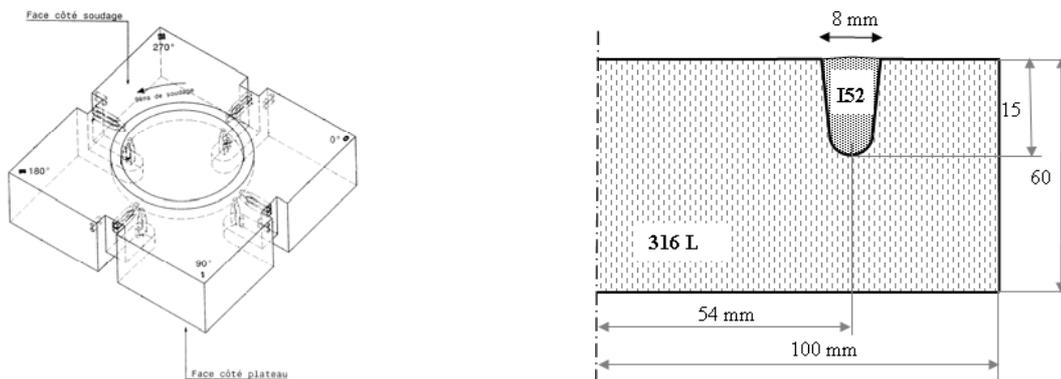


FIG. 1 – Vue isométrique et dimensions de la maquette

Dans le cadre de la modélisation de l'essai en rainure circulaire, la maquette a été instrumentée. Les températures sont mesurées pendant le soudage, au plus proche de la zone fondue, à l'aide de thermocouples implantés aux abords du chanfrein. Ils sont positionnés à différentes hauteurs, ainsi que sous le chanfrein, afin de récupérer des informations pour un maximum de passes. Les thermocouples sont de type K, gainés Inconel, et d'un diamètre de 0,5 mm. Quatre sections sont instrumentées : 45°, 135°, 225° et 315°. Chaque mesure est doublée, c'est-à-dire que les sections 45°/225° et 135°/315° présentent les mêmes positions de thermocouples. La position des thermocouples est indiquée sur la Figure 2. Les thermocouples latéraux se situent à une distance de 1,5 mm du bord du chanfrein, tandis que les thermocouples inférieurs se situent à une distance de 2,5 mm du fond du chanfrein. Ces distances ont été choisies de manière à dépasser légèrement les valeurs mesurées de pénétration de métal fondu.

Les profils du chanfrein sont relevés avant soudage et après chaque passe, pour 8 azimuts, par profilométrie laser. Le laser est mis en position pour chaque relevé et il est ensuite décalé afin d'éviter toute surchauffe due au soudage. Les profils obtenus permettent de déterminer le remplissage du chanfrein et la déviation par rapport à l'horizontal du haut de chanfrein.

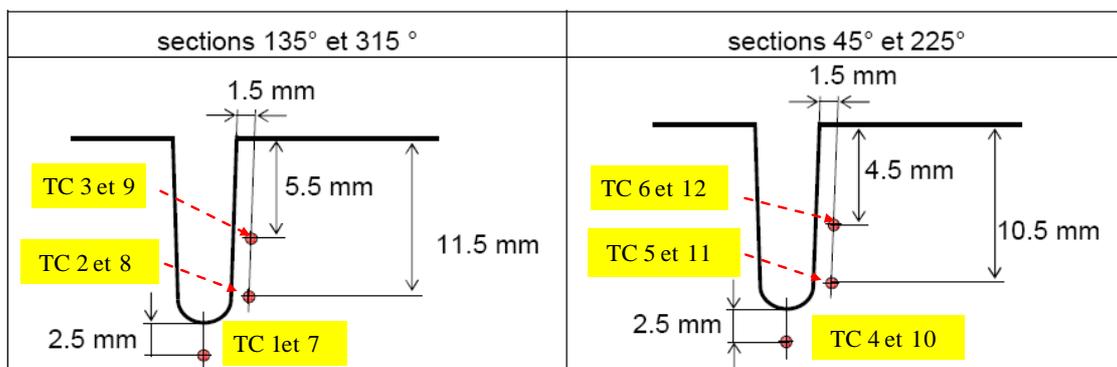


FIG. 2 – Schéma d'implantation des thermocouples

3 Simulation numérique du soudage

Cette étude s'appuie sur l'expérience d'AREVA dans la simulation numérique du soudage [1-5]. L'approche employée consiste à représenter les passes par des groupes d'éléments, et à les activer successivement au cours de calculs par éléments finis thermomécaniques et thermomécaniques élastoplastiques pour simuler le procédé de soudage multi-passes. Les calculs sont réalisés avec le code SYSWELD [6].

3.1 Modèle éléments finis

La Figure 3 montre le maillage 2D axisymétrique mis en œuvre pour simuler l'essai en rainure circulaire. La section choisie pour la modélisation correspond à l'azimut 315°, où le remplissage de la rainure est complet. Le maillage est raffiné dans la zone soudée et dans son voisinage. Il comporte environ 6000 éléments 2D linéaires, 200 éléments surfaciques 1D linéaires, introduits pour l'application des conditions aux limites thermiques (convection avec l'air), et 6000 nœuds. La rainure est remplie de 13 passes. Les cordons sont modélisés en respectant la hauteur et la forme de chaque passe mesurée par profilométrie laser.

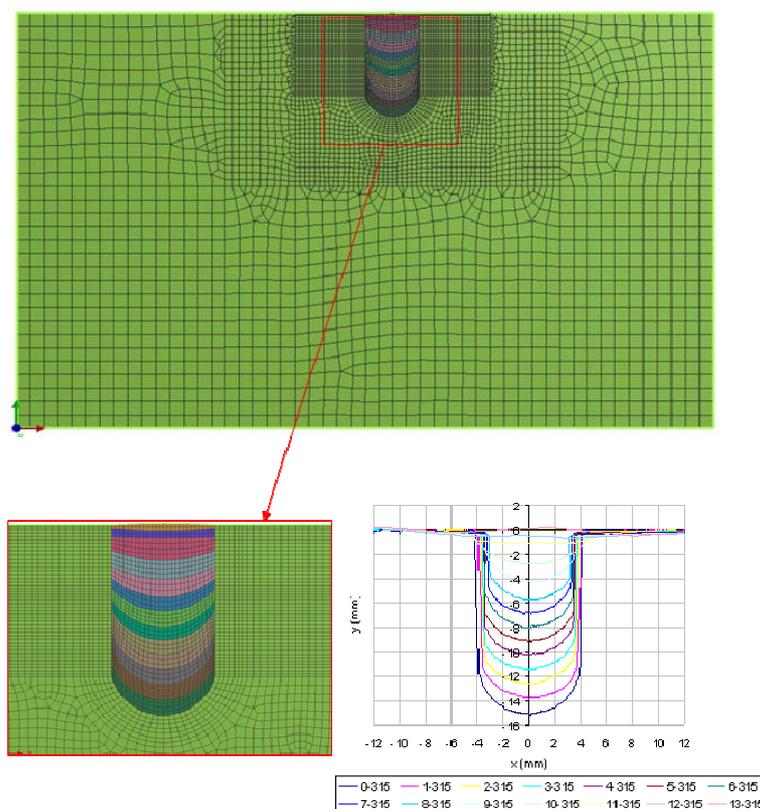


FIG. 3 – Modèle 2D axisymétrique – Cordons modélisés selon les relevés dimensionnels de l'azimut 315°

3.2 Caractéristiques des matériaux

Les propriétés matériaux proviennent d'une base de données confidentielle. Conformément à l'essai, deux matériaux sont considérés dans la modélisation : l'acier 316L pour le métal de base et l'alliage base Ni 52 pour le métal déposé. Les données utilisées sont : conductivité thermique, densité, chaleur spécifique, module d'Young, coefficient de Poisson, déformation thermique, limite d'élasticité, courbes cycliques de traction-compression pour l'obtention des paramètres d'écrouissage. Celles-ci sont considérées pour une large gamme de température (de la température ambiante jusqu'à 2/3 de la température de fusion).

Les matériaux sont considérés comme homogènes et les lois d'écrouissage adoptées sont cinématique non linéaire (type Armstrong-Frederick) pour l'acier austénitique, et un mélange d'isotrope et de cinématique non linéaire (type Armstrong-Frederick) pour l'A52. Enfin, une technique de restauration d'écrouissage est également mise en œuvre pour reproduire les phénomènes physiques à hautes températures.

3.3 Conditions aux limites et chargements

Les conditions aux limites appliquées sur le modèle sont, pour les calculs thermomécaniques, une

condition de convection appliquée sur les éléments 1D représentant le groupe de peau. Pour les calculs thermomécaniques, on distingue une condition d'axisymétrie autour de l'axe Y, un blocage selon l'axe Y d'un nœud de la structure pour éviter les déplacements de corps rigide, et une condition d'auto-bridage, appliquée sur le bord libre opposé à l'axe de révolution de la structure, cette condition empêchant la dilation latérale de la structure au cours du chauffage, la laissant libre au cours de la phase de refroidissement et permettant ainsi de compenser la sous-estimation de l'effet d'auto-bridage par l'hypothèse d'axisymétrie.

Pour la modélisation des chargements lors du procédé de soudage multi-passes, les analyses thermomécaniques et thermomécaniques de chaque passe sont traitées de manière successive de la façon suivante. Le chargement pour les calculs thermomécaniques est un cycle thermique appliqué sur les éléments du cordon en cours de dépôt. Celui-ci est obtenu à partir d'un calcul quasi-stationnaire thermomécanique sur un modèle 3D extrudé par translation du modèle 2D axisymétrique. Cette étape permet alors de récupérer un cycle thermique représentatif de l'opération de soudage par le calage d'une source de chaleur correspondante à l'énergie réelle de soudage. Comme dans notre cas les paramètres de soudage sont identiques pour tous les passes, un seul cycle est appliqué pour les calculs thermomécaniques de tous les cordons. Le chargement pour les calculs thermomécaniques est ensuite le champ de températures obtenu à partir des calculs thermomécaniques précédents.

4 Validation des calculs

4.1 Calculs thermomécaniques

Les températures calculées sont dépouillées au niveau des emplacements des thermocouples (cf. Figure 2) et comparées à celles mesurées. Cette analyse est effectuée, d'une part, pour la température maximale vue par les thermocouples pour toutes les passes et, d'autre part, pour l'évolution de la température au cours du dépôt de la passe qui maximise la température au niveau des différents thermocouples. Les Figures 4 et 5 illustrent quelques-uns des résultats. Une assez bonne corrélation est obtenue entre les calculs et les mesures. Les résultats sont jugés satisfaisants.

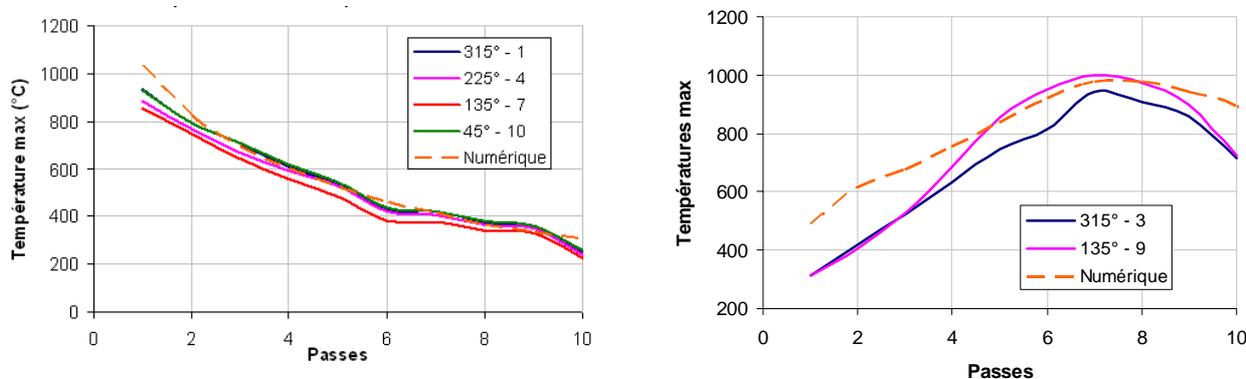


FIG. 4 – Températures maximales des thermocouples au cours du soudage

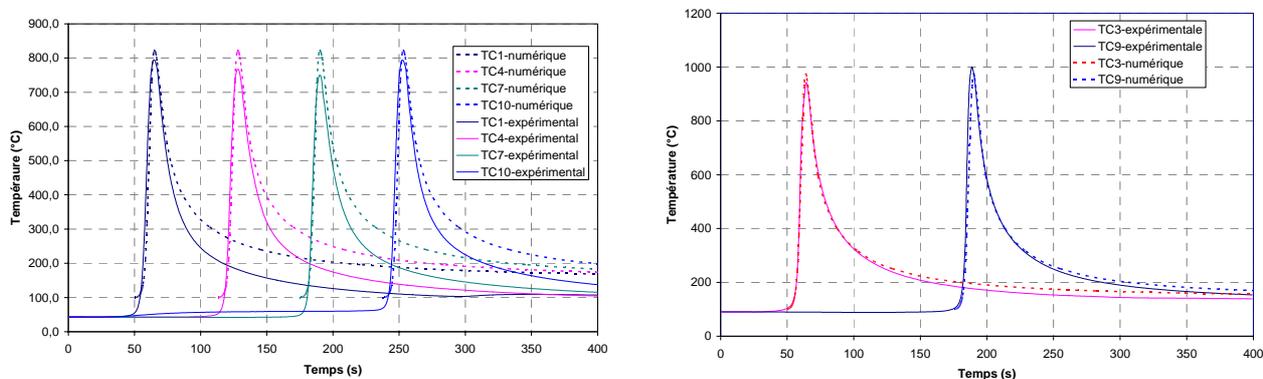


FIG. 5 – Évolution de la température au cours du dépôt de la passe maximisant ce paramètre

4.2 Calculs thermomécaniques

Le retrait de soudage est défini comme la réduction de distance entre les deux points de l'extrémité en haut de la rainure. Les retraits de soudage calculés sont relevés et comparés au retrait mesuré par profilométrie. Une bonne corrélation est mise en évidence (cf. Figure 6).

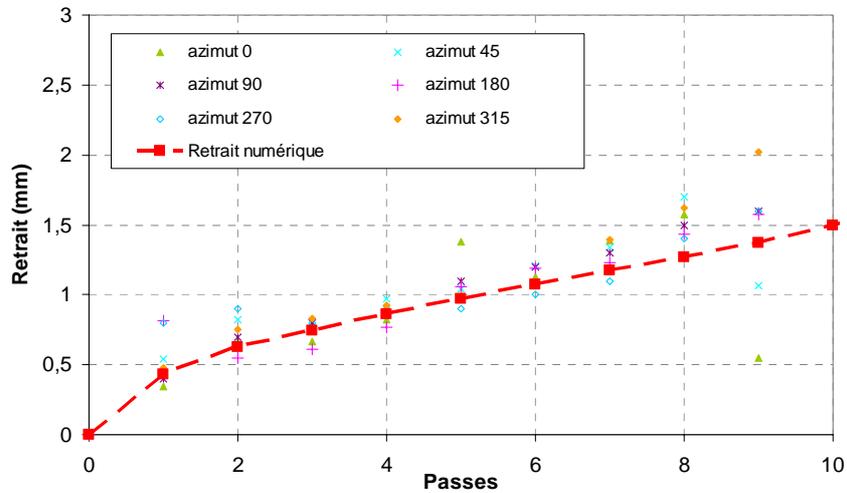


FIG. 6 – Comparaison des retraits calculés et mesurés au cours du soudage

5 Nouvelles données fournies par la simulation

A présent validés, les résultats numériques offrent un contenu d'informations extrêmement riche pour analyser l'essai de soudage en rainure circulaire. La Figure 7 illustre en effet une des forces de la simulation qui est de pouvoir décrire l'évolution des variables thermomécaniques (déformations, contraintes) lors de l'opération de soudage, dans la rainure comme dans le reste de la structure, en cours comme en fin de dépôt des cordons.

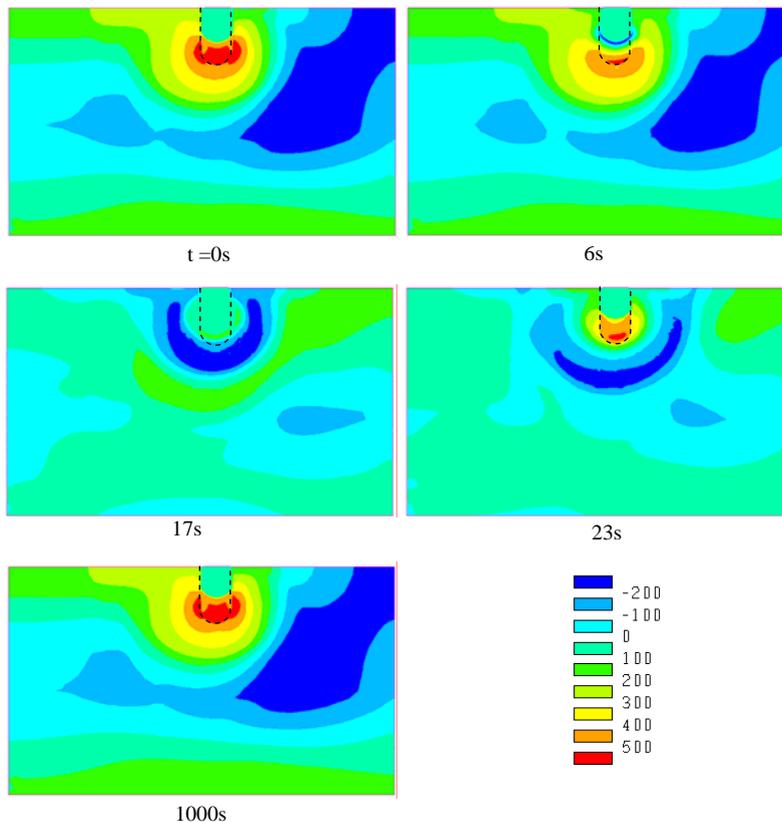


FIG. 7 – Cartographies de contraintes circonférentielles au cours du soudage de la 6^{ème} passe

Ces calculs ne constituent cependant qu'une première étape dans la compréhension des phénomènes de fissuration à chaud. En effet, la plage de températures à étudier se trouve, au refroidissement, entre la température de fusion et $\frac{3}{4}$ de celle-ci, ce qui nécessite une loi de comportement élasto-viscoplastique, ce qui n'est pas encore le cas actuellement. Des critères plutôt en déformation ou en vitesse de déformation seront alors à imaginer sur la base des dépouillements de ces futures simulations numériques.

6 Conclusions

Cet article a présenté la simulation numérique réalisée en support à l'analyse expérimentale d'un essai de soudage en rainure circulaire effectué sur une maquette instrumentée. La modélisation s'est placée dans un cadre bidimensionnel axisymétrique et les comportements élastoplastiques des matériaux mis en jeu (acier inoxydable austénitique 316L et alliage base Nickel 52) ont été considérés. Les calculs ont été validés grâce aux relevés de températures par thermocouples et de retraits de soudage par profilométrie laser effectués sur la maquette instrumentée. Les comparaisons ont donné en effet une bonne corrélation entre les résultats numériques et expérimentaux. La simulation ainsi mise en œuvre permet, à présent, de disposer d'un contenu d'informations extrêmement riche pour analyser l'essai de soudage en rainure circulaire réalisé. Une des forces de la simulation est en effet de pouvoir décrire l'évolution des variables thermomécaniques (déformations, contraintes) lors de l'opération de soudage, dans la rainure comme dans le reste de la structure, en cours comme en fin de dépôt des cordons. Ces calculs ne constituent cependant qu'une première étape dans la compréhension des phénomènes de fissuration à chaud puisque de futures simulations élasto-viscoplastiques sont à l'étude.

References

- [1] Courtin S., Gilles Ph., Multipass Welding simulation on a dissimilar metal weld and overlay design, *Mathematical Modelling of Weld Phenomena 8*, ISBN: 978-3-902465-69-6, pp. 603-626, 2007.
- [2] Robin V., Devaux J., Gilles Ph., Bergheau J.M., A multipass welding modelling methodology for residual stress computation and evaluation of the integrity of bimetallic welds, *Mathematical Modelling of Weld Phenomena 8*, ISBN 978-3-902465-69-6, pp. 941-964, 2007.
- [3] Robin V., Courtin S., Gilles P., Zemmouri M., Numerical modelling of welding processes applied to thick components: Residual stress and distortion prediction, 9th International Seminar on Numerical Analysis of Weldability, Austria, 2009.
- [4] Courtin S., Gilles Ph., Joly P.; Ohms C., Ficquet X., Numerical welding simulation on a 14" narrow gap dissimilar metal weld, 20th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, Finland, 2009.
- [5] Robin V., Gommez F., Courtin S., Schroeder J., Gilles Ph., L'apport de la simulation numérique du soudage dans la construction nucléaire, *Matériaux 2010*, France, 2010.
- [6] SYSTUS/SYSWELD User's Manuals, ESI-Group, Version 2010.