



**HAL**  
open science

# Simulation numérique d'essais de susceptibilité à la fissuration à chaud pour évaluer des matériaux d'apport utilisés pour le soudage de l'acier 316L(N) dans les Sodium Fast Reactors

Minh Le, Olivier Asserin, Laurent Forest, Olivier Fandeur, Philippe Pilvin

## ► To cite this version:

Minh Le, Olivier Asserin, Laurent Forest, Olivier Fandeur, Philippe Pilvin. Simulation numérique d'essais de susceptibilité à la fissuration à chaud pour évaluer des matériaux d'apport utilisés pour le soudage de l'acier 316L(N) dans les Sodium Fast Reactors. CFM 2013 - 21ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2013, Bordeaux, France. hal-03441284

**HAL Id: hal-03441284**

**<https://hal.science/hal-03441284v1>**

Submitted on 22 Nov 2021

**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.

# RNR-Na - Evaluation de la susceptibilité à la fissuration à chaud des matériaux d'apport pour le soudage de l'acier 316L(N)

M. LE<sup>a,c</sup>, O. Asserin<sup>a</sup>, L. Forest<sup>a</sup>, O. Fandeur<sup>b</sup>, P. Pilvin<sup>c</sup>

a. CEA, DEN, DM2S, SEMT, LTA, F-91191, Gif-sur-Yvette, France

b. CEA, DEN, DM2S, SEMT, LM2S, F-91191, Gif-sur-Yvette, France

c. Université de Bretagne-Sud, F-56100, Lorient, France

## Résumé :

*L'objet de ce papier concerne l'évaluation de la susceptibilité à la fissuration à chaud des matériaux, la méthodologie appliquée pour définir un critère dit "laboratoire" et son transfert vers un essai structure. La susceptibilité relative à la fissuration à chaud de trois matériaux de l'étude (deux produits d'apport et le matériau de base) est évaluée expérimentalement en utilisant des essais de types autobridé (trapézoïdal et oblique) et par chargement extérieur (Varestraint et Gleeble). Il est présenté le travail d'identification d'une loi de comportement élastoviscoplastique à variables structurales internes dérivée du modèle de Delobelle de la température 775 °C à 1250 °C pour les matériaux étudiés. Les simulations numériques des tous les essais expérimentaux sont mises en œuvre pour chercher un critère thermomécanique de fissuration à chaud intrinsèque aux matériaux.*

**Mots clefs :** fissuration à chaud ; soudage ; simulation numérique ; critère ; acier inoxydable ; 316L(N)

## 1 Introduction

La fissuration à chaud en cours de soudage est un défaut non admis. Des fissures se forment soit dans le métal de base, soit dans la zone fondue. Il est distingué trois types de fissurations à chaud : les fissures de solidification, les fissures de liquation et les fissures par chute de ductilité en phase solide. Les fissures de solidification prennent naissance dans la zone pâteuse, près du bain de fusion. Les codes de construction n'autorisent pas la présence de fissures dans les soudures de fabrication des appareils soumis à pression [8]. Ainsi, il est demandé de s'assurer que les matériaux destinés à être assemblés présentent une aptitude satisfaisante au soudage suivant les modes opératoires prévus.

L'objet de ce travail concerne l'évaluation de la susceptibilité à la fissuration à chaud de trois matériaux de l'étude (deux produits d'apport et le matériau de base), la méthodologie appliquée pour définir un critère dit "laboratoire" et son transfert vers un essai structure.

La susceptibilité relative à la fissuration à chaud des matériaux est évaluée expérimentalement en utilisant des essais de types autobridé (trapézoïdal et oblique) et par chargement extérieur (Varestraint et Gleeble). Les simulations numériques de ces essais sont mises en œuvre pour étudier les lois de comportement des matériaux ainsi que chercher un critère thermomécanique de fissuration à chaud intrinsèque aux matériaux.

## 2 Matériaux et démarche

### 2.1 Les matériaux étudiés

La soudabilité métallurgique de deux types de produits d'apport, utilisés pour le soudage de l'acier inoxydable austénitique 316L(N) est évaluée. Ils se distinguent par leur microstructure de solidifica-

tion : austénoferrique pour la nuance 19Cr-12Ni-2Mo (nuance non commercialisée) et austénitique pour la nuance Thermanit 19-15H (nuance commercialisée par Böhler Welding).

A noter que la nuance 19-12-2 est issue des travaux de R & D réalisés pour les fabrications soudées fonctionnant à haute température (Rapsodie, PX et SPX) et pour lesquelles, le procédé de soudage à l'électrode enrobée est le procédé de référence pour le soudage en position. La nuance Thermanit 19-15H est une nuance commerciale recommandée par la société Böhler Welding pour le soudage de l'acier 316L(N).

## 2.2 Démarche

Un critère thermomécanique intrinsèque au matériau et pouvant dépendre des grandeurs locales que sont le déplacement, la déformation et la vitesse de déformation, est déterminé à partir d'un essai laboratoire. Il est listé ci-dessous les essais de laboratoire mis en œuvre :

- trapézoïdal et oblique (essais auto-bridés) ;
- Varestreint et Gleeble (essais à chargement extérieur).

Ces essais servent non seulement à la recherche du critère, mais aussi au classement des matériaux étudiés vis-à-vis de leur sensibilité à la fissuration à chaud. Des essais mécaniques à différentes températures sont également effectués sur la machine Gleeble de l'UBS (Université Bretagne Sud) pour caractériser le matériau.

A partir des modèles numériques, des résultats expérimentaux et des caractérisations métallurgiques, thermiques et mécaniques, un critère est défini pour chacun des deux essais auto-bridés. La comparaison de ces deux critères oriente sur la transposabilité du critère. A l'aide des modèles numériques, les paramètres opératoires de l'essai structure seront déterminés en prenant en compte le critère ci-dessus. La transférabilité du critère est vérifiée et validée sur un essai de soudage.

Cette démarche globale est schématisée Figure 1.

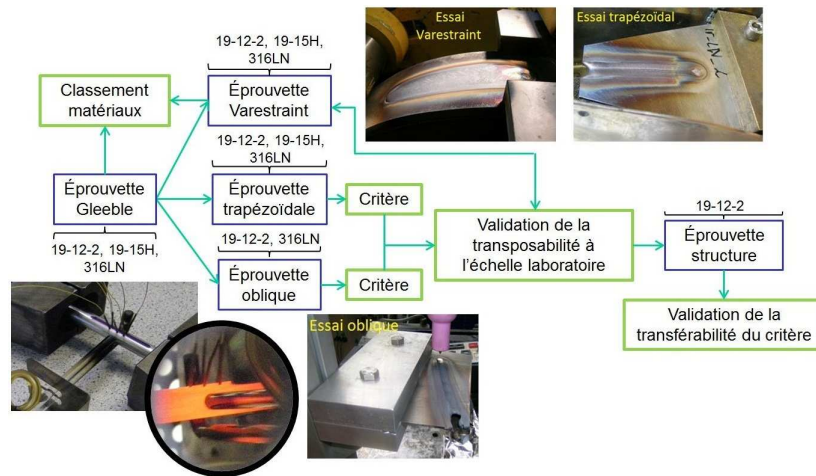


FIGURE 1 – Logigramme de la démarche d'étude de transposition de critère

## 2.3 Définitions des critères et de la transférabilité

La pièce  $\hat{\mathcal{P}} \{ \hat{\mathcal{H}}, \hat{\mathcal{F}}, \hat{\mathcal{N}} \}$  est caractérisée par trois éléments : son Histoire ( $\hat{\mathcal{H}}$ ), sa Nuance ( $\hat{\mathcal{N}}$ ) et sa Forme ( $\hat{\mathcal{F}}$ ). Le chargement ( $\hat{\mathcal{Q}}$ ) qui comprend les conditions aux limites, l'apport de chaleur du procédé et les sollicitations mécaniques externes.

Soit  $\mathcal{L}$  une application surjective permettant la localisation des grandeurs,  $\hat{\mathcal{P}} \in \mathbb{P}$  et  $\hat{\mathcal{Q}} \in \mathbb{Q}$  :

$$\begin{aligned} \mathcal{L} : \mathbb{P} \times \mathbb{Q} &\longrightarrow \mathbb{R}^3 \\ (\mathcal{P}, \mathcal{Q}) &\longmapsto \xi = \mathcal{L}(\mathcal{P}, \mathcal{Q}) \end{aligned} \quad (1)$$

Soit  $\mathbb{C}_{glob} \in \mathbb{P} \times \mathbb{Q}$  l'ensemble de conditions fissurantes et  $\mathbb{C}_{loc} \in \mathbb{R}^3$  l'ensemble de conditions locales d'amorçage. Le critère global est défini comme suit :

$$\begin{aligned} \exists! \hat{\mathcal{C}}(\mathcal{P}, \mathcal{Q}) : \mathbb{P} \times \mathbb{Q} \rightarrow \mathbb{R}, & \quad \text{si } \hat{\mathcal{C}}(\mathcal{P}, \mathcal{Q}) \mathcal{R} 0, \text{ alors } (\mathcal{P}, \mathcal{Q}) \in \mathbb{C}_{glob} \\ & \quad \text{si } \neg(\hat{\mathcal{C}}(\mathcal{P}, \mathcal{Q}) \mathcal{R} 0), \text{ alors } (\mathcal{P}, \mathcal{Q}) \notin \mathbb{C}_{glob} \end{aligned}$$

On définit également le critère local suivant :

$$\begin{aligned} \exists! F(\xi) : \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}, & \quad \text{si } F(\xi) \mathcal{R} 0, \text{ alors } \xi \in \mathbb{C}_{loc} \\ & \quad \text{si } \neg(F(\xi) \mathcal{R} 0), \text{ alors } \xi \notin \mathbb{C}_{loc} \end{aligned}$$

La transférabilité du critère s'exprime par :

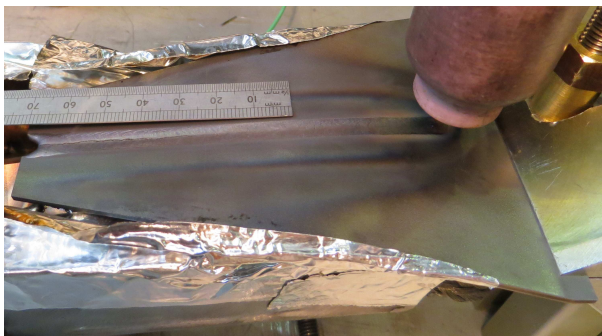
$$\begin{aligned} \exists! \hat{\mathcal{C}}(\mathcal{P}, \mathcal{Q}) : \mathbb{P} \times \mathbb{Q} \rightarrow \mathbb{R}, & \quad \text{si } \epsilon \in \mathbb{C}_{loc}, \text{ alors } \hat{\mathcal{C}}(\mathcal{L}^{-1}(\epsilon)) \mathcal{R} 0 \\ & \quad \text{si } \epsilon \notin \mathbb{C}_{loc}, \text{ alors } \neg(\hat{\mathcal{C}}(\mathcal{L}^{-1}(\epsilon)) \mathcal{R} 0) \end{aligned}$$

### 3 Etude expérimentale

Dans cette partie sont présentés les essais de fissuration à chaud mentionnés dans la démarche, c'est-à-dire les essais trapézoïdaux, obliques et Vrestrained, et les essais thermomécaniques spécifiques de caractérisation réalisés avec la machine Gleeble.

Dans les essais trapézoïdaux [5, 9], une ligne de fusion est réalisée sur une éprouvette de forme trapézoïdale et de faible épaisseur. L'éprouvette est soudée de la largeur la plus faible vers la largeur la plus importante, le défaut de fissuration à chaud apparaît dès l'amorçage du cordon (Figure 2a). La fissure s'arrête lorsque la largeur de l'éprouvette atteint une largeur critique.

Dans les essais de soudage oblique mis en œuvre par Ploshikhin et al. [7], une plaque rectangulaire de faible épaisseur est encastrée suivant un de ses bords. Une ligne de fusion rectiligne est réalisée le long de l'éprouvette suivant un angle d'inclinaison  $\alpha$  par rapport au bord libre (Figure 2b). Cette orientation particulière de la ligne de fusion permet de générer une fissure de solidification dès le début du processus de soudage. La fissure s'arrête après une certaine distance, caractéristique d'un état de contrainte favorable à la non fissuration.



(a) Montage et éprouvette trapézoïdale



(b) Montage et éprouvette oblique

FIGURE 2 – Essais autobridés

L'essai Vrestrained consiste à appliquer un pliage dans la direction longitudinale au cordon de soudure : au passage de la torche de soudage TIG et au point de tangence entre les parties courbe et plane d'un sabot qui supporte l'éprouvette testée, un vérin pneumatique plie l'éprouvette sur le sabot (Figure 3). Ce type d'essai produit des fissures à chaud dans la zone fondue mais également dans la zone affectée thermiquement (ZAT). La sensibilité à la fissuration à chaud se traduit après examens métallurgiques de la zone fissurée en termes de nombre, de longueur (maximale et cumulée) et de répartition des fissures en fonction du niveau de déformation.

Les simulations numériques du soudage nécessitent des données fiables thermiques et mécaniques des matériaux dans le plus large domaine de température possible. Des caractérisations expérimentales complémentaires ont été réalisées jusqu'à très haute température (1250 °C) sur une machine Gleeble 3500 de l'UBS. La machine est un simulateur thermomécanique qui permet de reproduire sur une éprouvette les cycles thermiques et mécaniques imposés entre autre lors d'un cycle de soudage. Dans un premier temps, l'éprouvette testée est chauffée par effet Joule pour atteindre la température visée puis un maintien à cette température pour atteindre un régime établi. Pour toutes les nuances étudiées, les essais effectués balayent une plage de température comprise entre 700 °C et 1250 °C. Ensuite, l'éprouvette est soumise en traction, compression ou cyclique à diverses vitesses de déformation, chaque phase d'érouissage à vitesse de déformation contrôlée est suivie d'une relaxation, *i.e.* un maintien à déformation constante.



FIGURE 3 – Essai Varestraint

## 4 La loi de comportement des matériaux de l'étude

Entre 775 °C et 1250 °C, nous avons identifié deux lois de comportement, l'une élasto-visco-plastique sans seuil développée par Delobelle [2], l'autre de élasto-visco-plasticité à érouissages cinématique et isotrope développée par Chaboche [10]. L'identification des paramètres "matériau" s'effectue, en utilisant une formulation inverse qui conduit à la résolution d'un problème d'optimisation non-linéaire, à l'aide du logiciel SiDoLo [6].

Les graphiques des Figures 4a, 4b et 4c montrent la bonne capacité de modèle à reproduire les essais sur les nuances 316L(N), 19-15H et 19-12-2 à différentes températures.

## 5 Simulation numérique des essais de soudabilité

### 5.1 Simulation de l'essai Gleeble

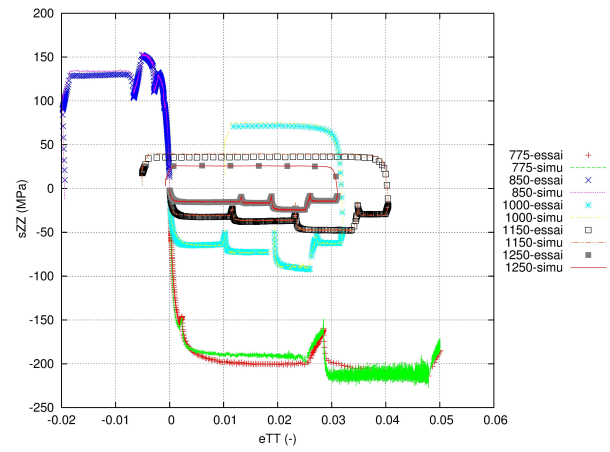
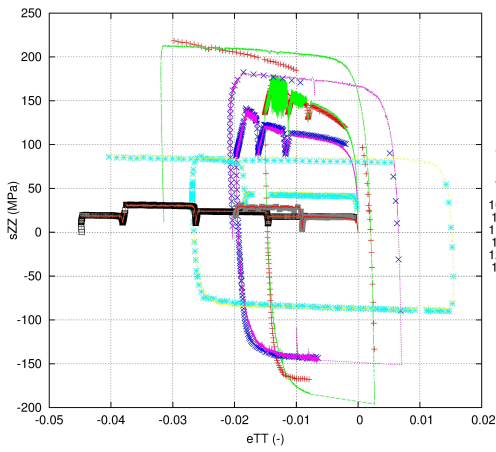
La simulation thermomécanique de l'essai Gleeble a plusieurs objectifs. Tout d'abord, le calcul électrothermique fournit le champ entier de température sur l'échantillon, élément indispensable pour les études métallurgiques des matériaux de l'étude. Deuxièmement, le calcul thermomécanique permet de consolider et de valider le modèle de comportement identifié. Ce modèle thermomécanique nous permettra ultérieurement d'identifier les critères de fissuration à chaud issus des différents types d'essais réalisés avec la machine Gleeble [4].

Le modèle électrothermique a été recalé sur un essai instrumenté par quatre thermocouples espacés de 10 mm (Figure 5a). Cette figure révèle que les résultats simulés sont très proches des mesures relevées à l'aide des thermocouples.

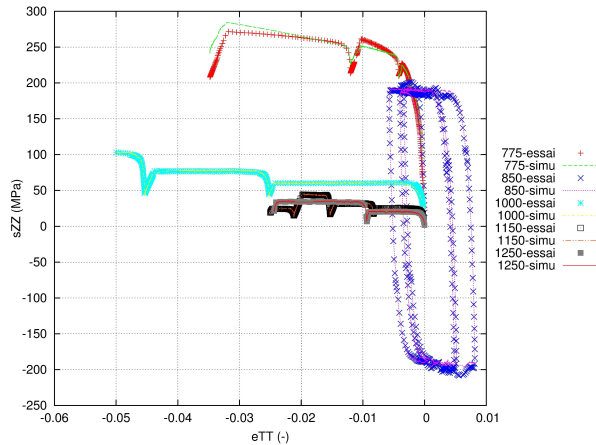
Le champ thermique simulé est utilisé comme chargement dans le calcul thermomécanique de l'essai. Les graphiques de la Figure 5b présentent le résultat de calculs mécaniques pour les essais sur la nuance 316L(N) à différentes températures d'essai avec la loi de comportement de type Chaboche identifiée.

### 5.2 Simulation des essais de fissuration à chaud

Des simulations numériques des essais de fissuration à chaud envisagés ont été effectuées. Les modèles développés des essais de soudabilité permettent d'effectuer des calculs thermomécaniques avec un comportement élastoplastique ou élasto-visco-plastique du matériau. Une loi de comportement plus

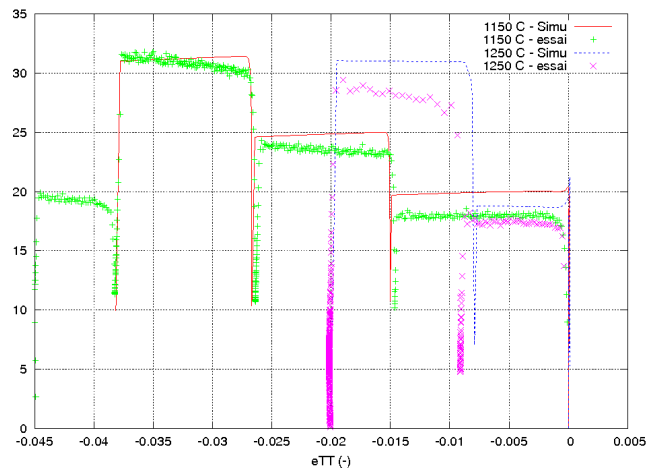
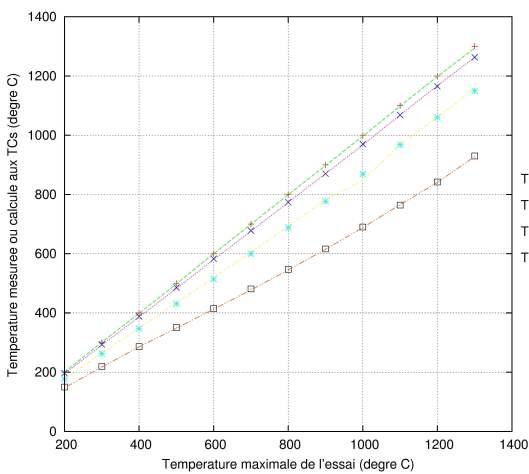


(a) Courbes expérimentales et identifiées pour le métal de base 316L(N) (b) Courbes expérimentales et identifiées pour le métal d'apport 19-12-2



(c) Courbes expérimentales et identifiées pour le métal d'apport 19-15H

FIGURE 4 – Essais autobridés



(a) Résultats des calculs thermiques de l'essai Gleeble (b) Résultats des calculs thermomécaniques de l'essai Gleeble

FIGURE 5 – Simulation thermomécanique de l'essai Gleeble

représentative des phénomènes physiques propres au matériau d'étude et intervenant dans la fissuration à chaud sera implémentée ultérieurement.

Le déroulement des opérations est expliqué sur le schéma suivant (Figure 6). Pour modéliser l'apport de chaleur associé au procédé de soudage à l'arc avec apport de matière, il est utilisé une source équivalente qui se distribue dans deux quarts de demi-ellipsoïde, avant et après la torche de soudage [3].

Dans le modèle numérique pour les calculs thermomécanique de l'essai Varestreint sont pris en compte le contact entre l'éprouvette et la partie plane du sabot et celui entre l'éprouvette et la partie courbe du sabot. La déformée après soudage et pliage est présentée Figure 7a.

La déformée après soudage issu des calculs thermomécaniques pour les essais trapézoïdal et oblique est présentée Figure 7b et Figure 7c.

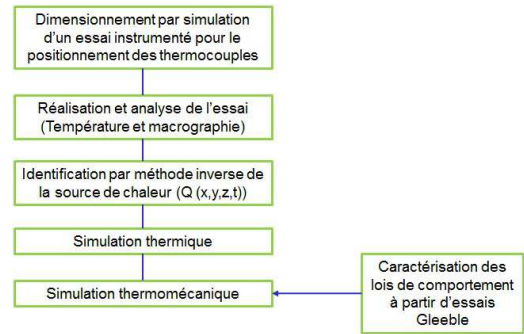


FIGURE 6 – Schéma du processus de simulation

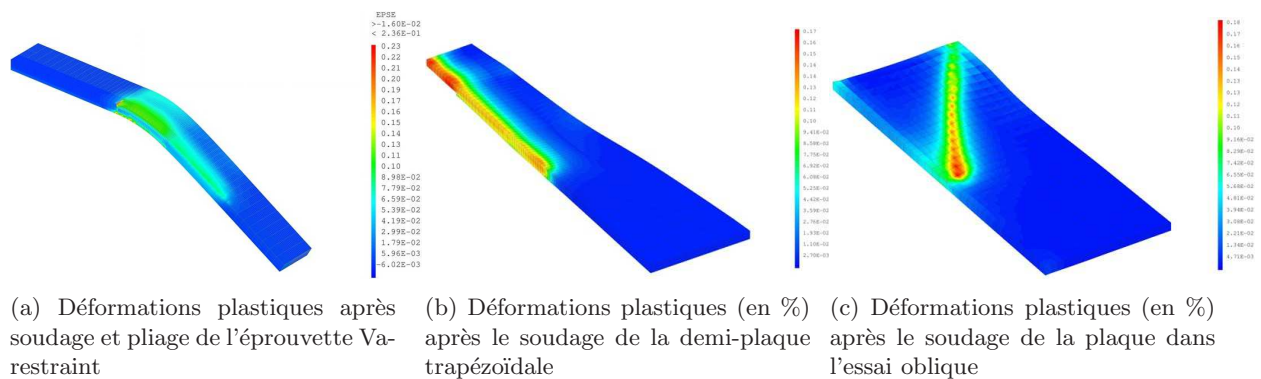


FIGURE 7 – Simulation thermomécanique des essais de fissuration à chaud

## Références

- [1] Cast3M code, <http://www-cast3m.cea.fr/>
- [2] Delobelle, P., Bouchou, A. 1995 Behavior and modeling of a 17-12 SPH stainless steel under cyclic, uni and bidirectional, anisothermal loadings. Part II : Modeling. *Int. J. Plast.* **11** 295-330
- [3] Goldak, J., Chakravarti, A., Bibby, M. June 1984 A new finite element model for welding heat flow in welds. *Metallurgical Transaction B* **15B** 299-305
- [4] Mandziej, S.T 2005 Testing for Susceptibility to Hot Cracking on Gleeble Physical Simulator. In Hot cracking phenomena in welds. *In Hot cracking phenomena in welds (ed. T. Böllinghaus et H. Herold)* pp. 347-376, Springer.
- [5] Matsuda, F., Nakata, K. 1982 A new test specimen for self-restraint solidification crack susceptibility test of electron-beam welding bead. *Transactions of JWRI* **11** 87-94
- [6] Pilvin, P. 2010 Notice d'utilisation de SiDoLo. Version 2.5298 Laboratoire Génie Mécanique et Matériaux Université de Bretagne-Sud
- [7] Ploshikhin, V., Prikhodovsky, A., Ilin, A., Heimerdinger, C., Palm, F. 2007 Mechanical metallurgical approach for prediction of solidification cracking in welds. In Mathematical Modelling of Weld Phenomena 8. *In Mathematical Modelling of Weld Phenomena 8 (ed. H. Cerjak)*. pp. 87-104.
- [8] 2007 RCC-MR, "Règles de Conception et de Construction des matériels Mécaniques des îlots nucléaires RNR". *édité par l'AFCEN*
- [9] Wisniewski, J. 2009 Modélisation thermomécanique de la fissuration à chaud en soudage par faisceau d'électrons d'un alliage de CuCrZr. Thèse Mécanique et Matériaux, Université de Bretagne-Sud
- [10] Lemaitre, J., Chaboche, J. -L. 2004 Mécanique des matériaux solides. DUNOD.