

SIMULATION NUMERIQUE DU SOUDAGE : LE PROJET MULTIPARTENAIRE MUSICA

NUMERICAL SIMULATION OF WELDING PROCESSES: THE MUSICA PROJECT

O. ASSERIN¹, M. AFZALI², F. BOITOUT³, P. GILLES⁴, D. LAWRJANIEC⁵

¹CEA, DEN, DM2S, SEMT, LTA, F-91191 Gif-sur-Yvette, France. olivier.asserin@cea.fr

²CETIM (Centre Technique des Industries Mécaniques) – 52, Avenue Félix Louat, BP 80067, 60300 Senlis, France

³ESI-group, Le Récamier, 70, rue Robert, 69458 Lyon Cedex 06

⁴AREVA NP Paris, France

⁵Institut de soudure, Espace Cormontaigne, 4, Bld. Henri Becquerel, 59970 Yutz, France

RESUME

Le projet MUSICA a tenu ses promesses en débouchant sur des avancées très significatives.

Ce projet multipartenaire regroupant AREVA, le CEA, le CETIM, ESI Group et l'Institut de Soudure, sous la coordination du CEA, avait un triple objectif : industriel en cherchant à remplacer progressivement en grande partie les essais de soudage par la simulation, scientifique en intégrant des modèles physiques depuis le procédé de soudage à l'arc jusqu'aux transformations métallurgiques, et logiciel avec le besoin d'un outil complet et opérationnel pour la simulation numérique du soudage.

L'idée force du consortium MUSICA aura été de créer un centre de compétences s'appuyant sur des savoir-faire polyvalents. Les principaux résultats sont :

- la chaîne logicielle MUSICA démontre la faisabilité de la réalisation d'outils accessible aux non experts pour la simulation du soudage depuis le procédé jusqu'à ses conséquences (distorsions, contraintes résiduelles, impact sur la durée de vie),
- le gain de productivité grâce à l'amélioration continue des outils (ergonomie, robustesse, calculs distribués, maillage automatique, post traitement dédié, mise en données simplifiées, assistant soudage multipasse...),
- la validation des outils logiciels développés par mise en application sur 3 cas tests industriels,
- deux guides méthodologiques renfermant les bonnes pratiques retenues au cours du projet pour mettre en œuvre les outils logiciels, pour sélectionner les modèles procédés et matériaux adaptés aux applications, pour valider les calculs et réaliser des mesures.

Cette présentation est un focus sur les apports de MUSICA dans la simulation de la réalisation des assemblages, avec une démonstration des fonctionnalités de la chaîne d'outil logiciel MUSICA développé en réponse aux attentes industrielles.

ABSTRACT

Project MUSICA held its promises while leading to very significant advances.

This multipartners project, gathering together AREVA, the CEA, the CETIM, ESI Group and the Institut de Soudure, under the coordination of the CEA, had a triple goal: industrial by trying to replace gradually a large part of welding tests by the simulation, scientific by integrating physical models from the fusion of metal up to its solidification and numerical with the need of a full and operational tool for the numerical simulation of welding.

The force of the consortium MUSICA will have been to create center of excellence based on general-purpose know-how. The main benefits are:

- MUSICA software chain, that demonstrates the feasibility of the realization of tools accessible to the non experts for the numerical welding simulation, starting from the welding process to its consequences (distortions, residual stresses, design life),
- the gain of productivity according to the continuous improvement of tools (ergonomics, robustness, distributed calculations, automatic meshing, automatic geometric tool, automatic post processing, multipass),
- the validation of the developed software tools by the simulation of 3 industrial tests provided by the partners,
- two guides containing the good practices selected during the project to operate software tools, to select the process models and the materials models according to the applications, to validate the simulations and to perform measurements.

This paper focuses on the contributions of MUSICA for the welding simulation of assembly. It includes a demonstration of the features of the chain of software tool MUSICA developed according to industrial expectations.

PRESENTATION GENERALE

L'initiative MUSICA est un partenariat industriel et scientifique français impliquant AREVA, le CEA, le CETIM, ESI Group et l'Institut de Soudure et visant l'intégration de fonctionnalités « métier » dans une solution logicielle industrialisée et dédiée à la modélisation numérique du soudage. L'enjeu majeur de ces développements est d'apporter aux partenaires les moyens d'améliorer la fiabilité des assemblages soudés et la maîtrise des fabrications, depuis la mise en œuvre du procédé jusqu'à ses effets structurels immédiats (contraintes résiduelles, distorsions) ou en service (risque d'endommagement). Les développements répondent en priorité aux besoins exprimés par les partenaires industriels et s'appuient pour cela, sur des cas-tests de fabrication (maquettes instrumentées et maquettes numériques).

Point de départ - Point d'arrivée

En 2005, l'utilisateur de simulation numérique du soudage devait avoir une maîtrise confirmée de la mise en œuvre de la méthode des éléments finis et de la sélection de modèles. Il ne pouvait réaliser que des calculs de contraintes résiduelles et de distorsions, et il devait alors ajuster manuellement la distribution d'énergie associée au procédé de soudage modélisé. En 2009, il est maintenant déchargé de toute expertise et peut se concentrer sur son étude en simulant directement, à partir des paramètres du procédé, la chaîne complète de l'opération de soudage : procédé - contraintes résiduelles et distorsions - durée de vie de l'assemblage soudé. Pour la mise en œuvre de la simulation, l'utilisateur s'appuie désormais sur les méthodologies issues du savoir-faire des partenaires et profite des données issues des cas tests.

Démarche

L'idée force du consortium MUSICA aura été de créer un centre de compétences s'appuyant sur des savoir-faire polyvalents :

- 25 ans d'expériences de ESI-Group dans la simulation numérique du soudage et le développement de logiciels (SYSWELD, PAM Assembly),
- les capacités du CEA dans la modélisation multiphysique du soudage (CAST3M, Salome) et d'AREVA dans la simulation des contraintes résiduelles et des distorsions,
- l'expérience d'AREVA et du CEA dans le développement et la mise en œuvre de procédés de soudage pour le secteur nucléaire,
- la compétence du CETIM sur le comportement mécanique des assemblages soudés,
- l'expertise de l'Institut de Soudure dans le domaine des technologies d'assemblage,
- les meilleurs experts universitaires français (fédérés autour de MUSICA),
- des compétences en métrologie des opérations de soudage et caractérisation des matériaux,

afin d'aboutir en 3 ans à une première version d'outils logiciels industriels et opérationnels permettant de simuler le soudage avec une bonne prédictibilité.

Avancées majeures et apports

- La chaîne logicielle MUSICA démontre la faisabilité de la réalisation d'outils prédictifs pour la simulation du soudage depuis le procédé jusqu'à ses conséquences (distorsions, contraintes, impact sur la durée de vie).
- Le module WPROCESS, utilisable dans l'environnement logiciel d'ESI Group ou dans la plateforme SALOME, fournit une source de chaleur en vue de réaliser une simulation de soudage. De plus, il offre aussi une version utilisable de la fonctionnalité multiphysique (pour la simulation directe et prédictive des procédés de soudage) qui permet dès à présent des premières applications de simulations de soudage 2D et 3D avec des formes de bain plus réalistes et donne accès au rendement du procédé.
- Le gain de productivité pour la simulation des contraintes et des distorsions grâce à l'amélioration continue des outils d'ESI Group (ergonomie robuste, calculs distribués, mailleur automatique, post traitement dédié, mise en données simplifiées, assistant soudage multipasse...), l'intégration du module WPROCESS, et la possibilité d'exporter les résultats pour un calcul de durée de vie (ICE-flow® DesignLife™).
- La validation et la confrontation des outils logiciels développés par une mise en application sur 3 cas tests industriels (soudage MAG en Té, soudage TIG multipasse en chanfrein étroit et soudage TIG cylindre incliné sur plaque).
- Deux guides méthodologiques renfermant les bonnes pratiques retenues au cours du projet pour mettre en œuvre les outils logiciels, pour sélectionner les modèles procédés et matériaux adaptés aux applications, et pour valider les calculs et réaliser des mesures.
- L'utilisateur est maintenant déchargé de toute expertise en calcul par éléments finis.

CHAÎNE LOGICIELLE MUSICA

La chaîne logicielle MUSICA illustrée en *Figure 1* permet, au sein d'un environnement unique, de simuler efficacement la mise en œuvre du soudage et ses effets sur une structure. Suivant la taille de l'assemblage et le type de résultats attendus, l'utilisateur a la possibilité de réaliser le calcul via une méthode transitoire classique (étape 1 et 2 sur la *Figure 1*), ou bien en utilisant une méthode dite « local / global » (étapes 1 à 6 sur la *Figure 1*).

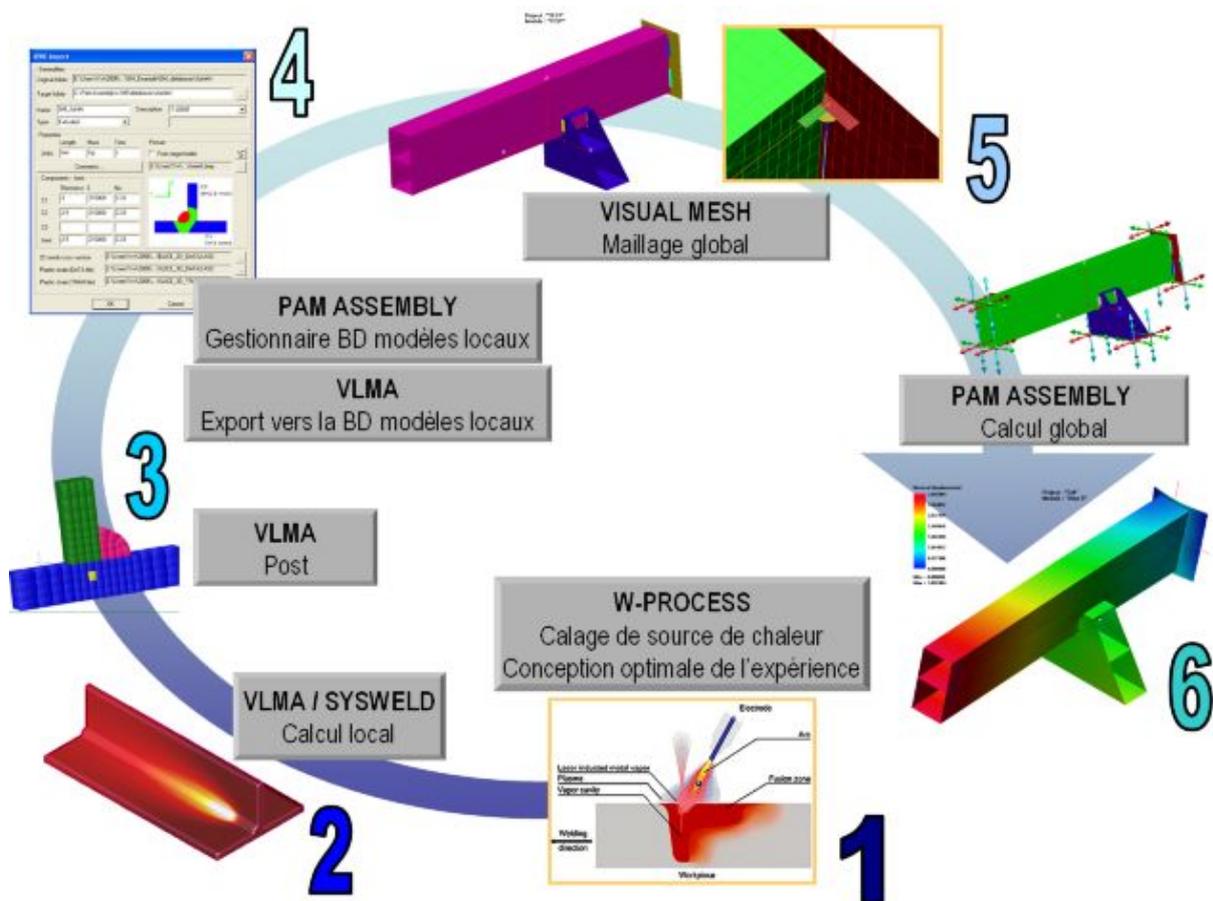


Figure 1 : Schéma de principe de la chaîne logicielle MUSICA [1].

La chaîne logicielle MUSICA comporte principalement trois étapes, et trois logiciels associés.

Calibration de l'apport de chaleur : l'outil WPROCESS®

L'un des intérêts majeurs de la simulation numérique du soudage est la prédiction des contraintes résiduelles et des déformations résultants de l'opération de soudage. Ces effets thermomécaniques sont pilotés par les évolutions de températures. Pour pouvoir réaliser une bonne prédiction des effets thermomécaniques il est nécessaire de correctement simuler les évolutions thermiques dans la pièce soudée. Il est considéré deux approches pour modéliser l'apport de chaleur l'une : dite « multiphysique » (modélisation *in extenso* du procédé) et l'autre qualifiée de « source de chaleur équivalente » (en fait : une fonction mathématique spatio-temporelle dont la forme est postulée et les paramètres sont identifiés *a posteriori* sur une expérience dédiée).

Par exemple, dans le cas du soudage à l'arc, l'approche « multiphysique » consiste à résoudre un problème magnétohydrodynamique couplant l'électrode, le plasma d'arc, son interaction avec le bain de soudage, le gaz de protection, le transfert de l'énergie dans ce bain, la thermohydraulique du bain de soudage et la diffusion d'énergie dans le solide. Cette approche reste très complexe car elle nécessite de décrire l'apport de matière, l'interaction arc / matériau, les mouvements de bain,...etc. Néanmoins, un modèle 2D multiphysique et un modèle 3D thermohydraulique sont déjà disponibles dans le logiciel WPROCESS® développé par le CEA sur la base du logiciel Cast3M [2].

WPROCESS est un logiciel métier destiné à la simulation du procédé de soudage, il est basé sur le code éléments finis Cast3M, utilise des routines python et est intégré dans la plateforme open source SALOME. WPROCESS a pour objet le traitement et l'analyse d'une expérience de soudage, la détermination du chargement thermique (avec pour objectif d'utiliser ce chargement en vue de mener des calculs thermomécaniques), la simulation thermique du procédé de soudage.

Le traitement et l'analyse d'une expérience de soudage consiste en des outils permettant de réaliser une conception optimale de l'expérience, l'analyse de sensibilité du modèle de soudage, et de simplifier et limiter les actions utilisateurs. Le logiciel WPROCESS[®] est capable de sélectionner les résultats des thermocouples les plus pertinents pour l'analyse. De plus, cet outil offre à l'utilisateur la possibilité d'effectuer une « conception optimale d'expérience ». A partir d'une configuration donnée, le logiciel est capable de calculer la position optimale de thermocouples qui seront à même de permettre une identification des paramètres de la « source de chaleur équivalente ».

La détermination du chargement thermique est réalisée de deux manières :

1. indirecte et empirique, le chargement thermique est représenté par une source de chaleur (c.a.d distribution spatiale de la densité volumique d'énergie apportée par le procédé de soudage) dont les paramètres sont identifiés par méthode inverse en cherchant à minimiser l'écart entre mesures et simulations, et l'utilisateur dispose de données expérimentales (par exemple une macrographie donnant une idée des dimensions du bain fondu et/ou des thermogrammes donnant les évolutions temporelles et les gradients de températures).
2. directe et *a priori*, l'utilisateur ne dispose pas de données expérimentales et dans ce cas la source de chaleur est déterminée de deux façons :
 - a. par un module en fonction du type de procédé, de ses paramètres et de la largeur estimée de la zone fondue,
 - b. par une simulation multiphysique du procédé qui calcule le flux de chaleur.

La simulation multiphysique des procédés de soudage est réalisée par une modélisation magnétohydrodynamique du procédé et de son interaction avec la pièce en vue de mener un calcul prédictif (soudabilité, forme précise de cordon, risque d'apparition de défauts, champ thermique).

Les fonctionnalités de WPROCESS actuellement disponibles sont :

1. la détermination de chargement thermique pour les procédés de soudage à l'arc TIG et MIG/MAG, les procédés laser et faisceaux d'électrons sur une géométrie de plaque et de Té en assemblage bord à bord.
2. simulation thermohydraulique du bain fondu sur une géométrie de plaque en assemblage bord à bord et un Té pour les procédés de soudage à l'arc TIG et MIG/MAG, les procédés laser et faisceaux d'électrons –une source de chaleur est utilisée pour modéliser l'apport d'énergie (figure 2).
3. simulation multiphysique couplée 2D axisymétrique, de l'électrode, du plasma d'arc, et du bain fondu pour l'application TIG spot sur une géométrie disque (figure 3).
4. La conception optimale d'expérience de soudage
5. L'analyse de sensibilités des modèles thermiques de simulation de soudage

A terme, le module multiphysique permettra à l'industriel de mener des calculs prédictifs directement à partir des paramètres opératoires. Ce qui permettra de réduire les coûts et les délais en substituant progressivement la simulation aux essais de soudage. Ce module permettra aussi d'évaluer rapidement les niveaux optimisés des paramètres de fabrication et de définir une stratégie de soudage multiobjectif : limiter et/ou déporter les contraintes résiduelles et/ou limiter les distorsions et/ou augmenter la pénétration et/ou améliorer la forme du raccordement... ; ceci par exemple dans le cas de la définition de modes opératoires de

soudage ou la qualification de procédés sur des maquettes ou la définition de nouveaux procédés.

Pour cela, l'utilisateur doit simplement sélectionner une géométrie de structure et ses dimensions, un procédé, un matériau, les paramètres de soudage et renseigner un fichier contenant des cycles de températures obtenus par thermocouples et/ou la forme de la zone fondue tirée d'une macrographie. Le modèle aux éléments finis et la mise en données sont automatiquement générés par WPROCESS®. En sortie, on obtient les paramètres de la « source thermique équivalente », une cartographie des températures ainsi qu'une comparaison visuelle des cycles thermiques et des zones fondues expérimentaux et numériques.

La source thermique identifiée avec WPROCESS peut servir ensuite d'entrée à une simulation de soudage classique d'une structure complète à l'aide du logiciel SYSWELD (contraintes résiduelles et déformations) ou enrichir une base de données interne au logiciel SYSWELD®. Deux IHM ont été développés pour WPROCESS : l'une par ESI Group intégrée dans visual environnement pour un chaînage avec SYSWELD sous une même interface et l'autre par le CEA (sous SALOME) pour exploiter le logiciel en "stand alone" et le chaîner avec n'importe quel code thermomécanique (Cast3M, Abaqus Sysweld, Aster,...).

Dans la suite WPROCESS sera incrémenté par un modèle 3D pour le soudage à l'arc avec apport de matière (Thermohydraulique + MHD simplifiée pour l'arc) et par de nouvelles configurations (chanfrein, multipasses,...).

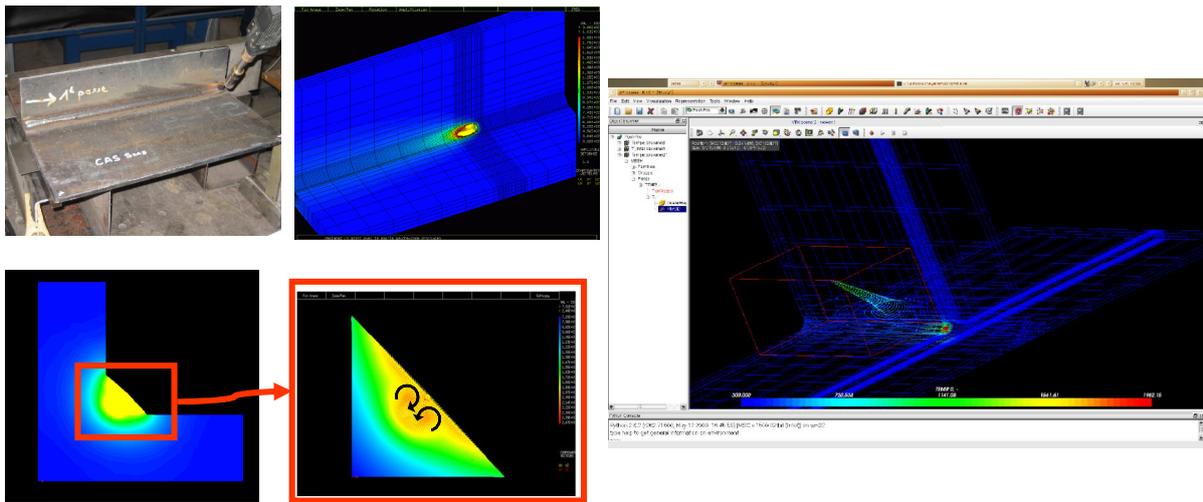


Figure 2- Simulation thermohydraulique du bain de fusion MIG/MAG dans WPROCESS.

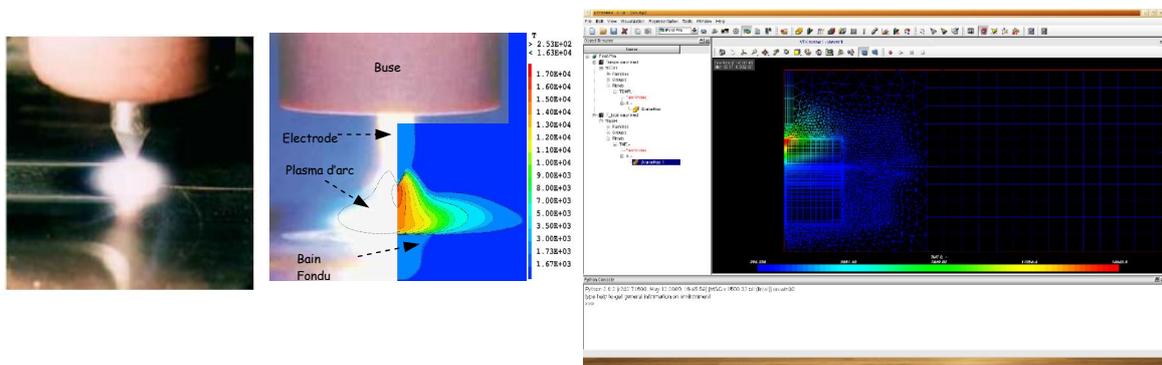


Figure 3 Simulation magnétohydrodynamique couplée électrode-arc-bain de fusion (TIG).

Calcul des contraintes et déformations résiduelles : les outils SYSWELD® et VLMA®

La « source thermique équivalente » calibrée via WPROCESS® est importée directement par l'IHM dans le logiciel SYSWELD® pour servir à la simulation de soudage transitoire classique d'une structure complète à l'aide dans l'outil VLMA® (Visual Local Model Advisor) afin de réaliser une simulation entièrement automatisée d'une portion de soudure avec en vue d'effectuer un calcul via une approche dite « local / global ». Ces deux logiciels sont développés par la société ESI-Group.

Simulation de soudage classique : l'outil SYSWELD®

Les principes d'une simulation de soudage transitoire classique avec SYSWELD® ont déjà été largement présentés dans la littérature, notamment par Bergheau [3]. Ce logiciel aux éléments finis, totalement dédié au domaine du soudage, permet de prédire les contraintes et déformations résiduelles, tout en prenant en compte les phénomènes thermiques, métallurgiques et mécaniques. SYSWELD® dispose d'une large gamme de méthodes de simulation dont certaines ont été améliorées dans le cadre du projet MUSICA. Ces techniques plus ou moins automatisées, permettent de minimiser les temps de mise en données et de calcul, comme par exemple les techniques de « macro-dépôt » pour le soudage multi-passe de fortes épaisseurs, ou les méthodes « coque-solide » [4]. Malgré tout, ce type de calcul est surtout utilisé pour simuler le soudage de pièces de taille relativement modeste. En effet, malgré les progrès significatifs apparus ces dix dernières années que ce soit du côté des développeurs de logiciels comme ESI-Group ou des fabricants de matériel informatique, il n'est pas encore possible de réaliser une simulation de soudage d'une très grande structure en utilisant une approche classique dans des temps industriellement compatibles. Par contre, la méthode « local / global » qui a été automatisée et intégrée à la chaîne logicielle MUSICA, permet de prédire les distorsions résiduelles dues au soudage d'assemblages imposants comportant un grand nombre de cordons de soudures.

Simulation de soudage entièrement automatisée : l'outil VLMA®

Dans le cadre d'une approche « local / global », l'outil VLMA® est dédié à la création du modèle « local ». L'idée est de ne pas simuler l'ensemble de la structure soudée, mais seulement une portion de celle-ci. Les calculs sont basés sur une approche transitoire classique. Le calcul sur une partie réduite de la zone soudée se justifie par le fait que les déformations plastiques se situent aux abords du joint, et ne dépendent que des conditions thermiques, métallurgiques et mécaniques locales. Ces déformations plastiques seront ensuite réinjectées dans un modèle global représentatif de l'ensemble de la structure via l'outil Pam-Assembly®.

L'un des avantages de l'outil VLMA® provient de sa simplicité d'utilisation, ne nécessitant pas de connaissances approfondies en calculs aux éléments finis. Comme pour l'outil WPROCESS®, l'utilisateur peut se contenter de choisir la géométrie qu'il souhaite traiter, sélectionner un matériau, etc... La discrétisation de la pièce, l'ensemble de la mise en données ainsi que les calculs sont automatiquement gérés par l'outil VLMA®. Les calculs sont rapides, puisque l'on ne simule qu'une portion de structure.

L'autre avantage de cet outil réside dans sa complémentarité avec le logiciel Pam-Assembly®. En effet, il existe un lien direct entre ces deux logiciels, permettant de mettre en œuvre une simulation de type « local / global » de façon simple et automatisée. Ceci permet un gain de

temps considérable, car l'étape qui consiste à réinjecter les déformations plastiques calculées sur le modèle « local » (à base d'éléments finis volumiques) dans le modèle « global » (à base d'éléments finis de type coques) peut être fastidieuse à réaliser manuellement. De plus, tous les modèles locaux réalisés via l'outil VLMA[®] peuvent être insérés automatiquement dans une base de données 'modèles locaux' interne à Pam-Assembly[®].

Calcul des distorsions résiduelles sur grandes structures : l'outil Pam-Assembly[®]

L'outil Pam-Assembly[®], développé par la société ESI-Group, est dédié à la prédiction des distorsions sur des structures soudées de grande taille. Les calculs sont basés sur la méthode « local / global » dont il a déjà été fait mention au chapitre précédent. Les étapes relatives au modèle « local » peuvent être réalisées de façon intuitive à l'aide du logiciel VLMA[®] (voir chapitre précédent). Pam-Assembly[®] gère automatiquement l'insertion des déformations plastiques calculées sur le modèle « local » volumique dans le modèle « global » coque représentant la structure complète. Le modèle « global » peut être discrétisé de façon relativement grossière. Les déformations plastiques provenant du modèle « local » sont considérées comme des déformations initiales dans le modèle « global », et la déformation de la structure complète est obtenue par calcul élastique, donc rapide. L'utilisateur se charge uniquement de la réalisation du maillage coque de la structure globale, et indique les chemins de soudure le long desquels les modèles locaux doivent être insérés. Ainsi, il est possible de connaître rapidement les déformations induites par un grand nombre de soudures sur une structure imposante. L'utilisateur peut faire appel à la base de données « modèle locaux » qu'il s'est construite. Les résultats sont exploitables après dépôt de chaque cordon. L'utilisateur peut ainsi étudier l'influence de la séquence de soudage par exemple. L'utilisateur de l'approche « local / global » doit toutefois rester vigilant lors de la mise au point du modèle « local ». En effet, ses dimensions et les conditions aux limites qui lui sont associées doivent représenter au mieux les conditions de soudage de la structure réelle. Ce point a largement été abordé par DUAN [5].

CAS TESTS

Les outils logiciels ont été développés autour de trois cas tests industriels proposés par les partenaires.

Cas-test « AREVA »

La participation d'AREVA à MUSICA était certes motivée par la volonté de consolider sa capacité à prédire les contraintes résiduelles, mais surtout par le souci de renforcer la chaîne d'outils de simulation et consolider sa pérennité et disposer d'une guide méthodologique. Le choix du cas test du soudage d'un piquage incliné sur plaque était audacieux : la configuration est tridimensionnelle et la simulation de distorsions est plus délicate que celle des contraintes résiduelles. L'intérêt pour AREVA n'était pas seulement celui de la simulation, mais il posait les bases de méthodes d'amélioration de procédés automatiques du soudage de piquages sur cuve (figure 4). En effet la maîtrise des effets de flexion et d'ovalisation des tubes de piquages inclinés par rapport à la coque sur laquelle ils sont soudés est un problème rencontré par de nombreux constructeurs nucléaire.

Le calcul a demandé d'importants développements pour le maillage du joint soudé et a nécessité le cofinancement par ESI et AREVA d'une version spéciale parallélisée de SYSWELD. Néanmoins la modélisation n'a pas pu être réalisée en continu : c'est une

technique de dépôts « en bloc » de 4 cordons le long de la circonférence qui a été retenue (figure 5). Ceci a sans doute pour effet de réduire les déformations cumulées.

La réalisation de la maquette a fait appel à des techniques performantes pour la mesure des températures et les distorsions. Les températures ont été mesurées finement par la mise en place de nombreux thermocouples à proximité du chanfrein par le LIMATB de l'Université de Bretagne Sud. Ceci a permis de comprendre la répartition des flux de chaleur dans le chanfrein étroit. Les mesures de déplacement de la maquette ont été réalisées par photogrammétrie, technique utilisée par AREVA pour le montage de gros composants (figure 6).

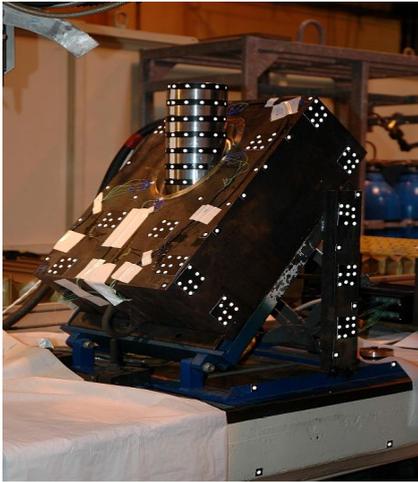
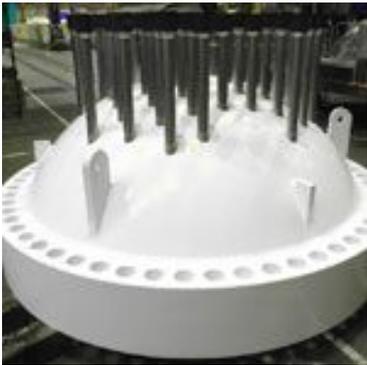


Figure 4 Couvrete de cuve et maquette de piquage incliné sur plaque.

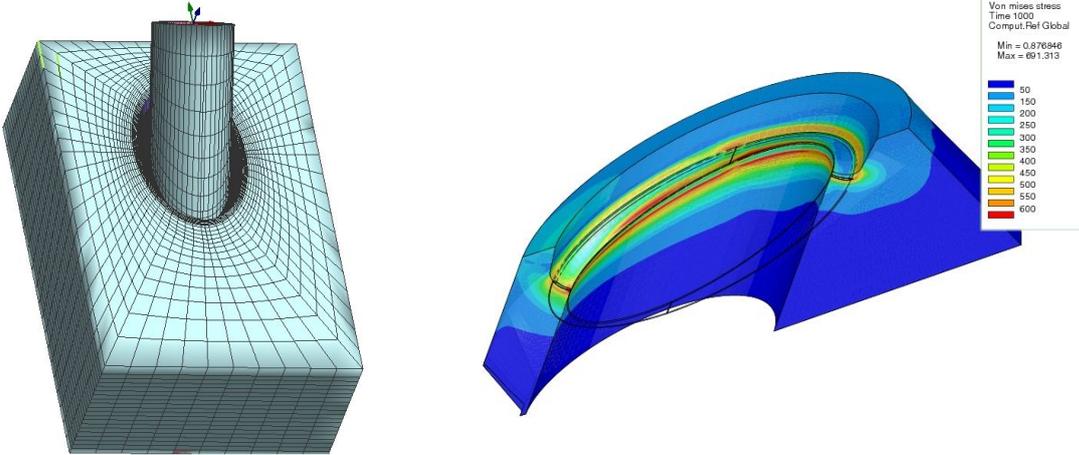


Figure 5 Maillage de la maquette et résultats de simulation.

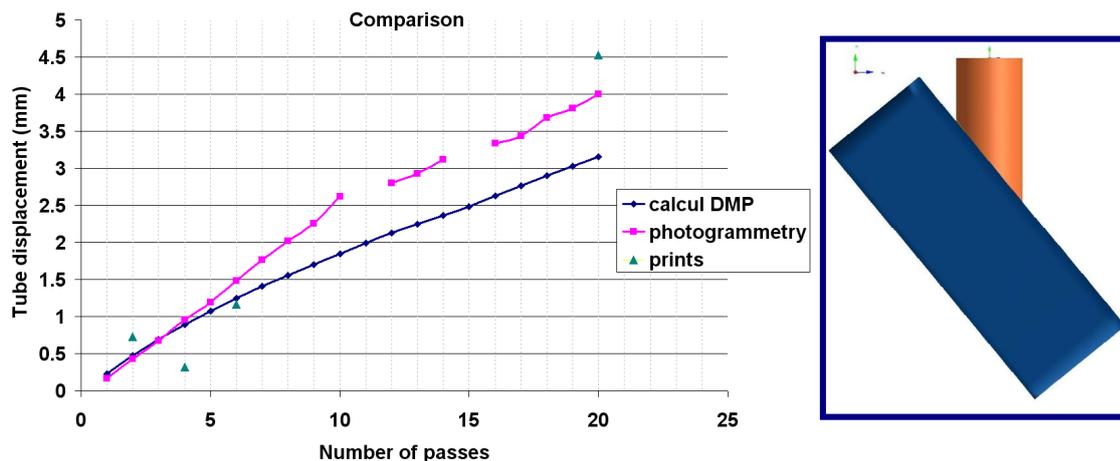


Figure 6 Comparaison de la flèche mesurée et calculée en extrémité de tube.

Cas-test « CEA »

Le cas-test proposée par le CEA consiste en une maquette instrumentée (capteurs thermiques et mécaniques) constituée d'une pièce (matériau martensitique dans la nuance X10CrMoVNb9-1) rainurée en chanfrein étroit et qui sera remplie par le procédé automatique de soudage à l'arc, TIG.

En effet dans la perspective des réacteurs de nouvelle génération le CEA travaille notamment sur le concept des RNRNa. Pour ces réacteurs de conception proche de celle de Phénix et Superphénix mais avec une température de fonctionnement plus élevée il est envisagé d'utiliser de nouveaux matériaux à 9%-12% Cr pour les parties en températures telles que les circuits primaires et secondaires. Néanmoins la composition de ces matériaux et surtout les procédés de soudage restent à optimiser pour atteindre une tenue mécanique suffisante des assemblages qui seront réalisés. Les premiers essais effectués sur soudures (TIG chanfrein en V) montrent un écoulement de fluage très important de la jonction soudée (rapport trois sur la vitesse de fluage par rapport au métal de base). L'examen de l'éprouvette semble montrer que le fluage est localisé dans la zone affectée thermiquement (ZAT) par l'opération de soudage. Si ce résultat est confirmé par la suite, cela peut conduire à des interrogations sur la possible utilisation de ces matériaux pour les structures. Si la composition est améliorée et la soudabilité acquise il semble donc que la clé de l'utilisation de ces matériaux soit dans la maîtrise du comportement de la ZAT. L'idée consiste à réaliser un chainage expérimental et numérique du soudage et des essais de fluage. Ceci permettra d'apporter des éléments de compréhension et de remonter aux paramètres opératoires de soudage qui sont pertinents vis-à-vis de la tenue au fluage.

L'essai réalisé a été instrumenté thermiquement et mécaniquement afin de calibrer la source de chaleur et de suivre les déformations du chanfrein et les déplacements de la pièce en cours de soudage.

La modélisation du soudage sur cette maquette instrumentée a été réalisée par quatre méthodes (toutes thermo métallurgique et thermomécanique avec prise en compte des transformations de phases) :

1. · une modélisation en 2D en température imposée
2. · une modélisation 3D en température imposée avec 1 macro dépôt en température (MDT) par cordon
3. · une modélisation 3D en température imposée avec 3 MDT par cordons (figure 7)
4. · une méthode pas à pas (PàP) (figure 7)

Les résultats en termes de contraintes résiduelles pour ces quatre méthodes montrent que la simulation en 2D donne des résultats satisfaisants en termes de contraintes transverses mais a tendance à surestimer les contraintes longitudinales. Cependant le temps de calcul très court permet de lancer plusieurs cas de calculs pour caler des paramètres par exemple.

La méthode en température imposée avec 1 MDT est la plus rapide des méthodes 3D mais les contraintes longitudinales et de Von Mises sont surestimées par rapport à la méthode PàP, plus précise. Les résultats sont de plus très proches des résultats obtenus par une modélisation 2D ; le surcoût en termes de temps CPU n'est pas justifié.

La méthode avec 3MDT provoque des pics de contraintes à l'interface entre deux macros dépôts ce qui n'est pas physique. L'évolution des contraintes le long des axes de coupe est similaire à la méthode PàP mais la méthode est moins précise que la méthode PàP.

La méthode PàP reste la plus précise des 3 méthodes en 3D mais nécessite un temps de simulation plus important.

On remarque en revanche que malgré les écarts sur les contraintes, les déformations et les déplacements sont similaires pour les trois méthodes en 3D.

La comparaison de l'évolution de la largeur et de la hauteur du chanfrein montre que la méthode avec 3MDT est comparable à la méthode PàP alors que les deux autres méthodes sont identiques entre elles mais différent de la méthode PàP (figure 8).

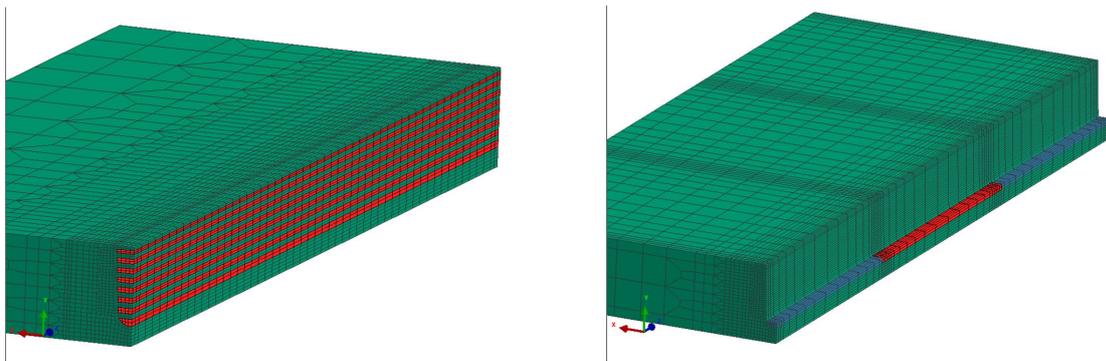


Figure 7 maillages avec et sans la méthode des macros dépôts.

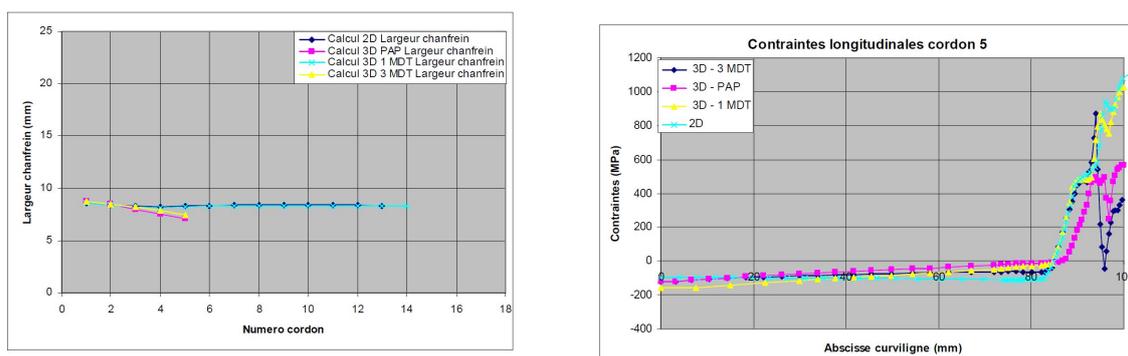


Figure 8 Comparaison des résultats de simulations en fonction des choix de modélisation.

Cas-test « CETIM »

Le cas-test CETIM est un assemblage en Té, constitué d'une semelle et d'une âme soudées avec 2 soudures d'angle. L'âme et la semelle sont en acier de nuance S355NL2, soudées par procédé MAG robotisé avec produit d'apport G3Si1. Les deux passes de soudage ont été réalisées en sens opposé. Des cas dérivés de celui-ci ont également été traités, avec

une modification du sens de soudage de la deuxième passe, des conditions de bridage plus importantes ou une vitesse de soudage modifiée. Pour les besoins du projet MUSICA, plus d'une dizaine de maquettes ont été réalisées au sein du site Assemblage et Matériaux de l'Institut de Soudure à Yutz. L'intérêt des cas-tests est de pouvoir confronter résultats de calculs et de mesures, afin de valider les outils développés dans le cadre du projet MUSICA. Sur ce cas-test ont été effectuées des mesures de températures, de contraintes résiduelles ainsi que des mesures de déplacements. La chaîne logicielle MUSICA a été appliquée sur cet assemblage en Té, afin de prédire numériquement les déformations et contraintes résiduelles engendrées.

Différentes « sources thermiques numériques équivalentes » ont été testées. Certaines ont été calibrées manuellement à l'aide du logiciel SYSWELD®, d'autres ont été calibrées en utilisant l'outil WPROCESS®. Pour calibrer ces sources, l'utilisateur pouvait avoir accès à différents niveaux d'informations, plus ou moins précises. Suivant le nombre et la pertinence des informations ayant servi à la calibration, les cycles thermiques engendrés par les « sources thermiques numériques équivalentes » sont très différents. Les résultats numériques les plus proches des mesures expérimentales sont bien sûr obtenus avec les sources issues de l'ensemble des informations disponibles.

Le cas-test en Té a été simulé par calculs « classiques » transitoires thermo-métallo-mécaniques (figure 9) et en utilisant la méthode « local / global » (figure 10). Des comparaisons entre les déformations mesurées, calculées par méthode « classique » transitoire ou par méthode « local / global » ont montré des écarts inférieurs à 10% sur la flèche maximale. Quant aux contraintes résiduelles obtenues par calculs « classiques » transitoires, l'écart mesures / calculs varie entre 25 à 100 MPa, avec des profils similaires.

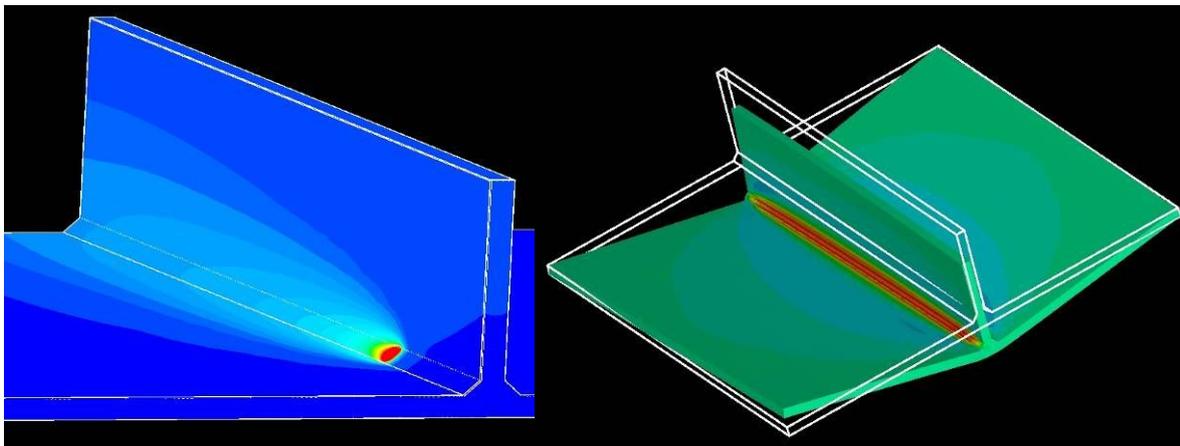


Figure 9 Simulation transitoires thermo-métallo-mécaniques des distorsions

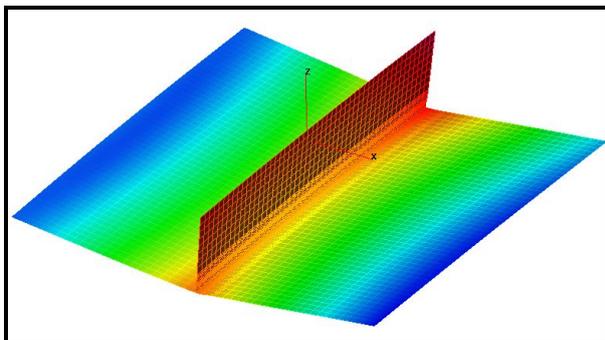


Figure 10 Simulation avec la méthode « local/global »

Lien avec la durée de vie

Pour réaliser l'analyse à la fatigue, nous avons établi un chainage logiciel entre SYSWELD pour déterminer les contraintes résiduelles et ensuite des calculs éléments finis élasto-plastique pour calculer les contraintes et déformations en enfin DesignLife pour évaluer la durée de vie. Les méthodes utilisées pour le calcul de fatigue sont basées sur une approche plane critique en contraintes / déformations normales. Différentes stratégies de calcul ont été utilisées:

- ✓ En définissant le cycle de chargement de fatigue dans SYSWELD: il s'agit d'un calcul élastoplastique dont le premier pas est l'état de contraintes résiduelles. C'est l'approche la plus précise mais la plus coûteuse en temps calculs.
- ✓ En effectuant un calcul statique linéaire pour l'effort appliqué puis en superposant ce résultat à celui des contraintes résiduelles avant éventuelle correction élastoplastique.

Cette méthode approchée a comme avantage la mise en œuvre facile et la plus rapide.

Les résultats des différentes simulations montrent l'amélioration de la tenue en fatigue lorsque le rayon de raccordement au pied du cordon augmente. Ceci ne fait que confirmer l'importance de la qualité de la soudure sur la résistance en fatigue des assemblages soudés.

Les figures 11, 12 et 13 présentent le cordon de soudure, la distribution des contraintes résiduelles et l'évaluation de la durée de vie pour deux rayons de raccordement d'un assemblage soudé (cas test Cetim).

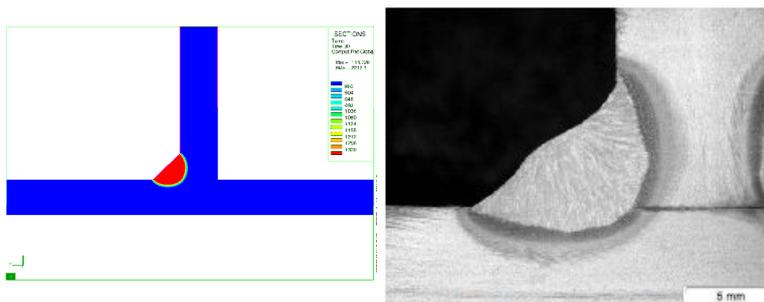


Figure 11 Simulation SYSWELD du chargement thermique et vue du cordon de soudure

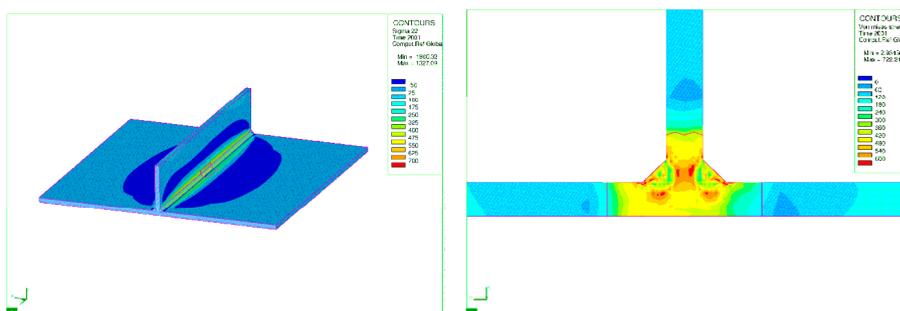


Figure 12 Simulation SYSWELD chargement mécanique

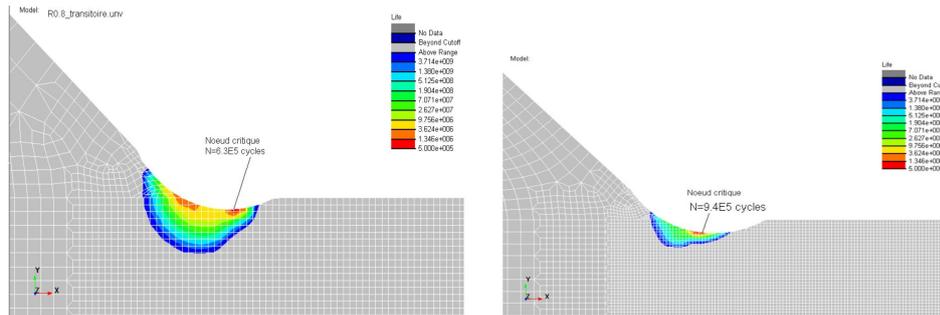


Figure 13 Durée de vie pour deux rayons de raccordement.

GUIDES METHODOLOGIQUES

Deux guides méthodologiques renfermant les bonnes pratiques retenues au cours du projet pour mettre en œuvre les outils logiciels, pour sélectionner les modèles procédés et matériaux adaptés aux applications, et pour valider les calculs et réaliser des mesures;

Guide méthodologique cas-tests

Ce guide, d'une centaine de pages, est composé de deux chapitres l'un décrivant les méthodes d'instrumentation et l'exploitation d'une expérience de soudage et l'autre la méthodologie de mise en œuvre des outils MUSICA.

Méthodes d'instrumentation et d'exploitation d'une expérience

Les méthodes d'instrumentations sont distinguées suivant qu'elles concernent les mesures thermiques ou mécaniques. Concernant les mesures thermiques, la méthodologie pour l'instrumentation thermique et l'identification des sources de chaleurs est décrite, notamment le dimensionnement de l'instrumentation, savoir ou positionner les thermocouples et combien en utiliser, quelle source de chaleur (température imposée, flux imposé, sources volumiques) est adaptée en fonction du type de problème à résoudre.

Cette méthodologie est différenciée suivant que l'instrumentation est réalisée dans un cadre industriel de laboratoire. Certains cas particuliers comme le cas du soudage multipasse ou celui de fortes déformations du chanfrein sont abordés.

Concernant l'instrumentation mécanique, les contraintes (genèses et conséquences) ainsi que leurs méthodes de mesure sont détaillés. Ainsi les principes de l'analyse des contraintes résiduelles par diffraction de rayons X, par diffraction des neutrons, la méthode du perçage incrémental, la méthode ultrasonore sont présentés et discutés au regard de leur utilisation dans le cadre du soudage et de la validation expérimentale.

Les profils usuels des contraintes résiduelles et distorsions engendrées par une opération de soudage sont donnés. Ils permettent au soudeur d'évaluer les conséquences du soudage et de donner au simulateur des éléments de vérifications de ses résultats de calculs.

Les distorsions engendrées par une opération de soudage comme le retrait transverse, le retrait longitudinal, la distorsion angulaire, la distorsion de rotation, la flexion longitudinale, le flambage sont explicités et des modèles analytiques permettant d'évaluer rapidement les distorsions sont rappelées.

Méthodologie de mise en œuvre des outils MUSICA.

La méthodologie complète de mise en œuvre des outils MUSICA est présentée et mise en application sur les trois cas tests réalisés au cours du projet.

Les méthodes disponibles leurs intérêts et limites, le problème du calage de la source de chaleur, le choix du modèle de comportement mécanique, la création des cordons de soudure, la prise en compte des caractéristiques physiques et les points à considérer pour la génération du maillage, discrétisation, et conditions aux limites, sont détaillés.

Des résultats comme l'influence des sources de chaleur, de la loi d'érouissage sur les contraintes et déformations résiduelles, du type de simulation (la méthode des macros dépôts en énergie, la méthode des macros dépôts en température, la méthode « Local-Global », la méthode « pas à pas ») sur les déformations et contraintes résiduelles qui ont été tirés des résultats obtenus par les calculs des trois cas tests industriels proposés par les partenaires, sont donnés.

Guide méthodologique modèles

Ce guide d'une cinquantaine de pages est composé de trois chapitres, les deux premiers concernent la simulation thermomécanique et thermomécanique des contraintes résiduelles et distorsions de soudage et le troisième la simulation multiphysique du procédé de soudage.

Sélection des modèles mécaniques en fonction des résultats attendus

L'importance de la prise en compte des phénomènes métallurgiques, l'effet des paramètres matériaux et du type de modèle, sur les cycles thermiques de soudage, sur les contraintes résiduelles de soudage, sur les déformations résiduelles de soudage, est expliquée. Des recommandations sont données et explicités sur les différents choix effectués sur les cas des trois cas tests industriels proposés par les partenaires.

Méthodes de caractérisation des paramètres des lois de comportement

Les principes généraux de l'identification des paramètres (la méthode de Newton Raphson, la méthode de Levenberg-Marquardt), le modèle élastoplastique à érouissage cinématique non linéaire (Leblond-Bergheau) dédié à la simulation du soudage sont présentés puis des exemples de calage et de calcul sur un essai de traction – compression sont donnés.

Simulation multiphysique

Cette partie concerne les différents couplages multiphysiques dans le bain et son atmosphère environnante à prendre en compte dans une modélisation *in extenso* du procédé de soudage à l'arc. Le procédé de soudage à l'arc et une revue des modèles physiques de la littérature sont présentés. Les différentes zones caractéristiques de l'arc de soudage TIG comme le la colonne d'arc les zones cathodiques et anodiques ; les modèles de cathode, de plasma d'arc de bain de soudage de l'interface plasma/cathode et de l'interface plasma/anode définissant l'état de l'art pour la modélisation du soudage à l'arc sont décrits. Les avancées majeures dans la modélisation de l'arc ou du bain.

Pour terminer une revue, tirée d'expériences, de l'influence de quelques paramètres de soudage, (l'intensité du courant, la hauteur d'arc et l'angle d'affûtage de l'électrode) sur l'énergie transmise à la pièce, sur le rendement de l'arc et sur la géométrie du bain.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Le projet multipartenaire MUSICA, regroupant AREVA, le CEA, le CETIM, ESI Group et l'Institut de Soudure a permis des avancées majeures en terme de logiciel métier pour la simulation du soudage (que ce soit WPROCESS pour la détermination de l'apport de chaleur et la simulation multiphysique du procédé de soudage ou bien la suite logicielle métier proposée par ESI Group permettant de traiter une grande variété de problèmes du procédé aux effets thermomécaniques du soudage). La chaîne logicielle MUSICA démontre la faisabilité de la réalisation d'outils prédictifs pour la simulation du soudage depuis le procédé jusqu'à ses conséquences (distorsions, contraintes, impact sur la durée de vie).

Les défis relevés, comme le traitement de cas tests industriels, la réalisation d'un outil métier en trois ans, auront permis à chaque partenaire, de se former, de progresser, et de se forger des compétences solides en instrumentation en modélisation et en simulation numérique du soudage.

La mutualisation des connaissances antérieures et acquises au cours du projet aura été un facteur déterminant pour mener à bien ce projet et aura permis de plus d'aboutir à deux très riches et uniques guides méthodologiques contenant les bonnes pratiques pour la modélisation et la simulation soudage.

Finalement, les résultats du projet MUSICA ouvrent la voie de la simulation industrielle 3D multiphysique prédictive du soudage qui sera le point de mire d'un MUSICA II et le point d'accès à la prédiction de la soudabilité.

Les perspectives attendues de la simulation numériques du soudage sont :

d'améliorer les outils de maillage, réaliser des mises en données directement depuis la CAO, d'augmenter la capacité prédictive en intégrant la modélisation multiphysique des procédés, simulation 3D du soudage à l'arc avec apport de matière, la réduction des temps de calculs (calcul distribué, réduction de modèles, méthodes simplifiées prédimensionnement), simulation multipasse ou multicomposant à l'échelle de la semaine, la chaîne complète industrielle depuis le procédé jusqu'à la durée de vie intégrée dans une unique interface.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] F. Boitout, Document ESI Group 2009
- [2] "Projet MUSICA : logiciel Procédés V1.Spécifications et description d'une session utilisateur" Rapport CEA: " SEMT/LTA/PT/08-014"
- [3] J-M. Bergheau, 'Comment la simulation numérique contribue à l'optimisation des procédés de soudage et à la qualité des assemblages réalisés', Soudage et Techniques Connexes Vol. 59 Janvier-Février 2005
- [4] SYSWELD user's guide 2009
- [5] Y. Duan, 'Modélisation numérique des distorsions résiduelles de soudage de structures minces' Thèse 2007 - Ecole Nationale Supérieure des Mines de St-Etienne, Laboratoire de Tribologie et Dynamique des Systèmes