

9h00 - Accueil — Café.

9h30 - Le mot du -Président de l'AFM, E. Arquis.

9h35 - Présentation du thème, P. Gilles, Areva.

Session 1, Eric Feulvarch (ENISE) et Vincent Robin (EDF)

■ 9h40 **Le flambage des structures : dialogue expérience-calcul. L'apport déterminant de J-F. Jullien.**

A. Combescure (LaMCoS, INSA Lyon)

■ 10h10

L'essai de dilatométrie bloquée : un test unidimensionnel simple pour l'étude du comportement mécanique des matériaux en conditions de soudage.

L. Depradeux (EC2-Modélisation), V. Robin (EDF)

■ 10h20

Les lois de comportement sont-elles vouées à disparaître ?

M. Coret, A. Leygue, J. Rethoré, L. Stainier, E. Verron (GeM, Ecole Centrale de Nantes)

Discussions 15', Pause 15'

Session 2, François Pichot (SAFRAN) et Thibaut Chaise (INSA de Lyon)

■ 11h10

Prédiction de microstructure et fissuration à chaud en soudage.

A. Chiocca, A. Niel, V. Villaret, F. Soulié, F. Deschaux-Beaume, C. Bordreuil (LMGC, Université de Montpellier)

■ 11h30

La simulation numérique des conséquences mécaniques induites par les transformations métallurgiques lors d'une opération de soudage jusqu'à son intégration dans la chaîne complète de conception et de fabrication.

Y. Vincent (ESI Group.), S. Petit, J.F. Julien, P. Gilles, J.M. Bergheau

Discussions 15' - Déjeuner sur place à 12h05

Session 3, Laurent Jubin (CETIM), Philippe Bastid (TWI)

■ 13h50

Comparaison des déformations d'une pièce aéronautique soudée par laser CO2 ou laser YAG.

M. Touboul (Safran Aircraft Engines)

■ 14h10

Relation microstructure/propriétés mécaniques pour les alliages à durcissement structural suite à une opération de soudage ou de fabrication additive — cas d'un alliage Al-Mg-Si et d'un alliage à base Nickel.

D. Nélias, T. Chaise, (LaMCoS, INSA Lyon), M. Perez, S. Cazottes (Mateis, INSA Lyon)

Discussions 15'

Session 4, Philippe Lemasson (UBS), Florent Bridier (DCNS)

■ 14h45

Expériences de caractérisation des échanges thermiques pour la simulation numérique du soudage — Application au soudage laser et au FSW.

D. Deloison (Airbus Safran Launchers), D. Nélias (LaMCoS, INSA de Lyon)

■ 15h05

Vers une simulation numérique liquide-solide couplée des procédés de soudage

J-M. Bergheau (LTDS, ENISE)

Discussions et conclusions, fin du colloque à 16h00

Groupement Scientifique et Technique Simulation Numérique du Soudage

Le Groupe Scientifique et Technique Simulation Numérique du Soudage (SNS), au sein de l'AFM, accompagne depuis 2002 l'essor continu de la SNS en favorisant les liens et les échanges entre les différents acteurs industriels et universitaires.

Ces échanges d'informations permettent d'aider à définir les actions nécessaires à une caractérisation globale du soudage afin de simuler numériquement le comportement d'une structure soudée (distorsion, contraintes résiduelles, tenue en fatigue, endommagement), tout en s'appuyant sur des cas-tests de validation (comparaisons calcul/essai).

Cette manifestation annuelle fait suite aux colloques de :

- 2003** Prédiction des distorsions et composants soudés. Simulation et validation expérimentale.
- 2004** Simulation Numérique du Soudage multipasses, contraintes résiduelles, effet de revenu, maîtrise du chanfrein, méthodes simplifiées
- 2005** Impact de la modélisation des matériaux en simulation numérique du soudage.
- 2006** couplage procédé pièce : apport de chaleur, forme du cordon, soudabilité...».
- 2007** Traitement industriel des distorsions induites par le soudage.
- 2008** Comment valider la simulation numérique du soudage ?
- 2009** Validation de la simulation numérique du soudage : comment choisir les méthodes de mesure ?
- 2010** La fissuration des soudures.
- 2011** Modélisation et simulation pour la prévention de la ruine des structures soudées.
- 2012** Modélisation et Simulation Numérique du Soudage : « 10 ans de progrès en SNS ».
- 2013** Simulation du soudage et du brasage de matériaux hétérogènes.
- 2014** Couplage essais-simulation en soudage. Conception et interprétation des essais
- 2015** Modélisation du soudage de grands composants
- 2016** Comment les modèles et leurs caractérisations expérimentales influencent les résultats d'une simulation numérique.

Thème du colloque 2017

Le colloque 2017 aura pour thème « Exemples de collaborations fructueuses Académies Industries » au travers duquel sera rendu un hommage à Jean-François Jullien, Professeur à l'INSA de Lyon.

Les travaux de Jean-François Jullien ont porté notamment sur la simulation numérique du soudage (SNS), novatrice à l'époque de la création de ce GST dans les années 2000.

La SNS s'est aujourd'hui démocratisée mais de nombreuses problématiques de pointe restent ouvertes. L'action de Jean-François Jullien continue avec d'autres procédés, dont les sollicitations thermomécaniques et les conséquences sont comparables avec le soudage, telle que par exemple la fabrication additive. Au cours de ce colloque les thématiques suivantes seront abordées :

- flambage des structures,
- fissuration à chaud,
- déformations,
- contraintes résiduelles,
- essais de validation des lois de comportement,
- évolution et développement des techniques numériques,
- prédiction et influence des microstructures sur le comportement des matériaux,
- modélisation liquide-solide,
- procédés de soudage laser, FSW, TIG et fabrication additive,
- alliages d'aluminium, alliages base Nickel, aciers inoxydables austénitiques, aciers martensitiques.

Hommage au Professeur Jean-François Jullien

Le Professeur Jean-François Jullien était un initiateur et un émulateur de projets de recherche qui savait réunir les laboratoires et l'industrie autour d'objectifs communs. Ce talent, Jean-François l'a déployé successivement pour le génie civil, le flambage, le soudage, et enfin pour le séchage du bois. Dans chacun de ces thèmes qu'il embrassait avec énergie, il repérait les sujets porteurs de développements futurs, démarchait les industriels susceptibles d'être intéressés, et bâtissait un programme de recherche commun.

Ainsi, la Simulation Numérique du Soudage en France doit beaucoup aux programmes INZAT lancés à l'INSA-Lyon entre 1992 et 2010. Fin expérimentateur, il mit au point un dispositif simple et ingénieux : un disque en rotation chauffé par un Laser. Ce dispositif permit d'établir un modèle viscoplastique de transformation de phase pour l'acier ferritique des cuves des réacteurs nucléaires. Cet essai nommé INZAT fut repris par la suite dans d'autres laboratoires. Dans une même veine, la mise au point de l'essai Satoh a permis de compléter la caractérisation pour le 16MND5 ainsi que pour l'acier austénitique constituant les équipements anticorrosion. Cette petite barre bloquée à ses deux extrémités, chauffée puis refroidie est devenue un outil discriminant de mise à l'épreuve des lois de comportement thermomécaniques.

Grand rassembleur, Jean-François a su par la suite amener les acteurs du nucléaire et du monde de l'aéronautique à travailler de concert, en mettant sur pied un programme sur le soudage de plaques d'aluminium. On notera que les premiers projets, centrés sur la prédiction des distorsions, ont servi chez AREVA pour simuler le soudage des composants élancés de la chambre à vide du projet de réacteur à fusion ITER. Le soudage de l'aluminium traité thermiquement crée des joints qui concentrent les déformations. La simulation numérique est d'un apport précieux pour l'étude de l'intégrité de ces soudures, mais les cycles thermiques modifient la microstructure et le comportement de ces aluminiums. Heureusement, Jean-François a su passer le témoin au LaMCoS, qui en trois thèses a développé un nouveau modèle de comportement mécanique dépendant de l'histoire thermique.

Ceux qui ont travaillé de près avec le Professeur Jullien, l'appelaient amicalement Jeff, conquis par la grande humanité, la diplomatie, l'énergie débordante et le sens de l'accueil de Jean-François. Jean-François Jullien a été l'initiateur et le porteur de plusieurs programmes de développement de la Simulation Numérique du Soudage qui ont permis de gagner la confiance de décideurs de l'industrie. La création de cas tests simples et ingénieux a permis la mise au point de lois de comportement et la constitution de bases de données matériau par l'INSA-Lyon. Ces travaux précurseurs ont fait de ces modèles, la base des outils de l'ingénieur en SNS.

Le séminaire de l'AFM en 2017 montrera que l'action de Jean-François Jullien se perpétue au travers des études industrielles actuelles en Simulation Numérique du Soudage et d'autres procédés thermomécaniques.

Le flambage des structures: dialogue expériences-calcul. L'apport déterminant de Jean François Jullien

Alain Combescure¹

¹ LaMCoS UMR CNRS 5259 INSA Lyon Université de Lyon, 18-20 Allée des sciences 69621 Villeurbanne cedex France, alain.combescure@insa-lyon.fr, <http://lamcos.insa-lyon.fr>

Mots Clés: *Flambage, Expériences, Simulation Numérique, Imperfections, Conditions limites, Thermique, Fluage.*

Cet exposé est dédié tout spécialement à Jean François Jullien qui nous a quitté fin juin 2016. Il est concentré sur ses apports déterminants pour la compréhension du flambage des structures minces.

On montrera comment les expérimentations d'une qualité exceptionnelle qu'il a su mener à bien, ont permis de clarifier un grand nombre de questions théoriques mal comprises à ce jour.

On s'attachera à élucider les raisons des énormes dispersions des résultats expérimentaux sur le cas très étudié du cylindre en compression axiale. Pour ce faire on montrera que les imperfections initiales, les conditions limites et le comportement non linéaire du matériau sont à prendre en compte pour pouvoir prédire le flambage de manière sûre. Les expérimentations que JF Jullien a développé sur des cylindres en Nickel électro déposé sur un moule ont permis de fabriquer des structures avec des défauts et des conditions limites parfaitement contrôlées et, ainsi obtenir des essais d'une très grande qualité et qui se comparent très bien aux prédictions par le calcul.

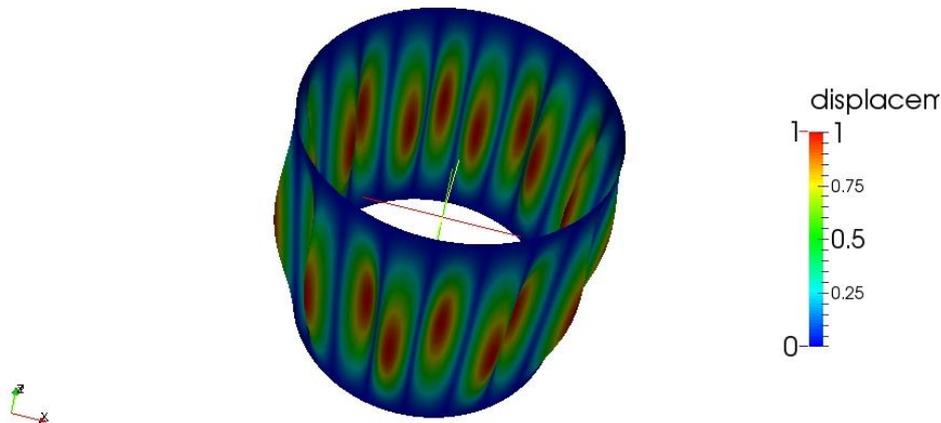
Dans un deuxième temps on développera le concept des coques ASTER inventé par JF Jullien et repris en le généralisant 30 ans plus tard par des chercheurs de Caltech. Ces coques ont une excellente résistance au flambage sous une charge de pression externe et sont quasiment insensibles aux défauts en compression axiale [1].



Coque ASTER Flambée sous pression externe

On montrera également le dispositif qu'il a inventé pour produire des contraintes de membrane en cas d'un gradient thermique. Ce dispositif a permis de montrer pour la première fois que le flambage pouvait se produire sous l'effet de gradients de température: ce résultat avait été trouvé par calcul mais on doutait de sa véracité, car ce cas était exclu des codes de dimensionnement.

Enfin on comparera expériences et calcul de flambage sous fluage [2]



Calcul d'une expérience de Flambage sous fluage

Références :

[1] ASTER Shell: a simple concept to significantly increase the plastic buckling strength of short cylinders subjected to combined external pressure, Combescure and Jullien, Combescure and Jullien *Adv. Model. and Simul. in Eng. Sci.* (2015) 2:26 DOI 10.1186/s40323-015-0047-3

[2] Creep buckling of cylinders under uniform external pressure: finite element simulation of buckling tests. A Combescure, J. F. Jullien (Soumis à IJSS)

L'essai de dilatométrie bloquée : un test unidimensionnel simple pour l'étude du comportement mécanique des matériaux en conditions de soudage

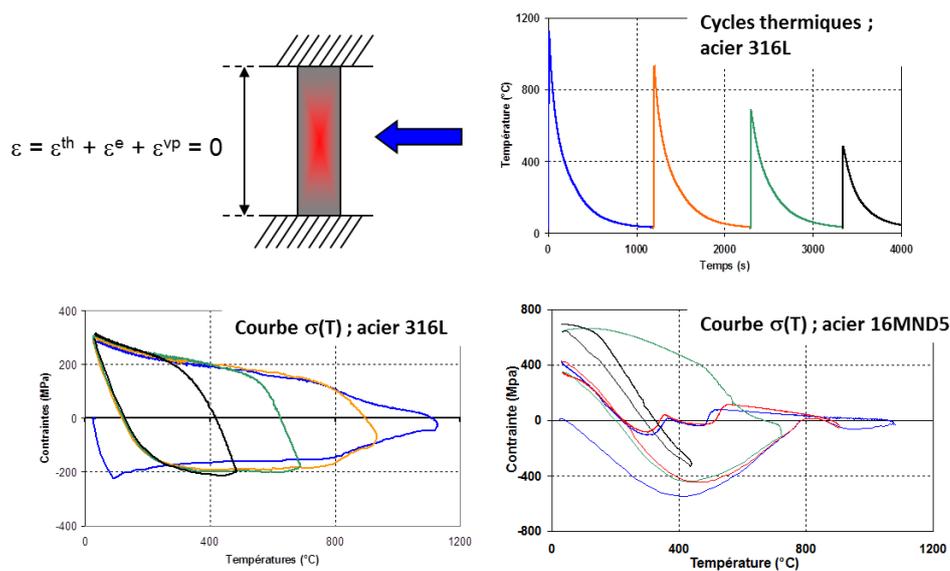
L. Depradeux (EC2-Modélisation), V. Robin (EDF)

Lors du soudage, les gradients de température mettent en jeu des incompatibilités locales de déformations occasionnant des contraintes et distorsions résiduelles au sein du matériau. Celles-ci résultent des déformations thermiques (et le cas échéant, métallurgiques) générées dans la zone chaude, et contrariées par les parties plus froides de la pièce.

L'essai de dilatométrie bloquée, proposé par K. Satoh dans les années 70 [1], [2], consiste à imposer des cycles de température représentatifs du soudage à une éprouvette cylindrique dont on bloque les déplacements longitudinaux de la zone utile. On reproduit ainsi, de manière qualitative au travers d'un essai uniaxial, les mécanismes à l'origine de l'apparition des contraintes résiduelles dans les soudures. Cet essai, relativement simple, a l'avantage de présenter des états de température et de contrainte homogènes dans la zone utile. Il permet l'enregistrement continu de la contrainte axiale tout au long du cycle thermique, et ainsi d'étudier l'influence de la plasticité ou des transformations de phases métallurgiques sur le niveau des contraintes. Cet essai ouvre donc un champ d'analyse très étendu dans le domaine du soudage et des traitements thermiques. Il permet l'étude détaillée des conséquences mécaniques des transformations de phases, ou d'autres phénomènes plus spécifiques comme la restauration d'écrouissage ou la plasticité dépendante du temps. Couplé à la simulation numérique, il permet également des recalages fins de lois de comportement, sur une large gamme de température et aussi d'identifier les domaines de température pour lesquels cette description fine joue un rôle majeur sur les contraintes résiduelles finale.

Malgré ses nombreux avantages, cet essai reste cependant difficile à maîtriser expérimentalement. En particulier, le pilotage des vitesses élevées de chauffage et de refroidissement requises dans le contexte du soudage, le contrôle d'une température homogène dans la zone utile, la régulation des capteurs de force lorsque les transformations de phases apparaissent, sont autant de difficultés qui ont limité le recours à ce type d'essai dans un contexte industriel.

A la fin des années 1990, ces analyses ont été largement développées dans le cadre d'un programme de recherche, initié par le professeur J.F. Jullien à l'INSA de Lyon, et fédérant industrie nucléaire (EDF, Framatome, BCCN, CEA) et milieu universitaire (Laboratoires INSA URGC, GEMPPM, CETHIL, LTDS ENISE...). Avec comme objectif la prédiction des contraintes et distorsions de soudage, ce programme, baptisé « INZAT », a permis la mise en place de différents dispositifs d'essais, plus ou moins complexes [3][4][5][6]. Un dilatomètre sous contraintes « maison » permettant la caractérisation à chaud des différentes phases (EP ou EVP) ou la réalisation d'essais plus sophistiqués (essais de plasticité de transformation ou de restauration d'écrouissage lors des transformations) a été mis au point. Différents Essais « Satoh » ont ainsi pu être réalisés sur ce dispositif, permettant l'analyse fine de nombreux phénomènes intervenant lors du soudage, et la validation de modèles de comportement sophistiqués [7][8][8]. Ces travaux initiés par J. F. Jullien sur les aciers 316L et le 16MND5, se sont ensuite poursuivis au laboratoire LaMCoS et ont été étendus à d'autres types de matériaux (aluminiums, alliages base nickel), avec une démarche similaire [10] L'essai « Satoh » s'est depuis largement répandu et est devenu l'un des essais privilégiés pour analyser les phénomènes et caractériser les matériaux lors du soudage. D'un point de vue numérique, cet essai est également fréquemment utilisé pour mener des études paramétriques, valider des modèles, ou optimiser des caractérisations. Si cet essai fait désormais partie de l'outil « classique » d'analyse en simulation numérique du soudage, c'est en grande partie grâce à la contribution de J.F. Jullien qui a su créer une émulation entre milieux industriel et académique pour développer de précieux outils d'analyse et de compréhension des phénomènes.



Evolutions des contraintes axiales en fonction de la température lors d'un essai Satoh sur acier 316L et sur acier 16MND5

Références :

- [1] Satoh. K., Ohnishi, T., Transient thermal stresses of Weld Heat-Affected Zone by Both-Ends Fixed Bar Analogy, Transactions of Japan Welding Society, 1972, Vol. 3, N°1, pp.125-134.
- [2] Satoh, K., Thermal stresses developed in High Strength Steels Subjected to Thermal Cycles Simulating Weld Heat-Affected Zone, Transactions of Japan Welding Society, 1972, Vol. 3, N°1, pp.135-142.
- [3] Cavallo, N., Contribution à la validation expérimentale de modèles décrivant la ZAT lors d'une opération de soudage, Thèse INSA Lyon, 1998
- [4] Petit-Grostabussiat, S., Conséquences mécaniques des transformations structurales dans les alliages ferreux, Thèse INSA Lyon 2000
- [5] Vincent, Y., Simulation numérique des conséquences métallurgiques et mécaniques induites par une opération de soudage – Acier 16MND5, Thèse INSA Lyon, 2002
- [6] Depradeux L., Simulation numérique du soudage – Acier 316L
- [7] Bergheau J.M., Vincent Y., Leblond J. B., Jullien J.F., Viscoplastic behaviour of steels during welding, Science and Technology of Welding & Joining 9(4), 2004, pp.323-330
- [8] Depradeux L., Vincent Y., Jullien J.F., Validation de modèles viscoplastiques destinés à l'analyse de l'opération de soudage – Identification des paramètres et calage sur tests unidimensionnels – Acier 316L, Actes du 6ème Colloque National en Calcul des Structures, Giens20-23
- [9] Vincent Y., Jullien J.F., Gilles P., Thermo-mechanical consequences of phase transformations in the heat-affected zone using a cyclic uniaxial test, International Journal of Solids and Structures, Volume 42, Issue 14, July 2005, Pp. 4077–4098
- [10] Zain-ul-abdein M., Nélias D., Jullien J.F., Boitout F., Dischert L., Noe X., Finite element analysis of metallurgical phase transformations in AA 6056-T4 and their effects upon the residual stress and distortion states of a laser welded T-joint, International Journal of Pressure Vessels and Piping Vol. 88, Issue 1, Jan. 2011, p. 45–56

Les lois de comportement sont-elles vouées à disparaître ?

Michel Coret, Adrien Leygue, Julien Réthoré, Laurent Stainier, Erwan Verron
GEM, École Centrale de Nantes

Les lois de comportement pour la réponse mécanique des matériaux constituent toujours un point clé de la qualité des prédictions issues des simulations numériques. Toutefois, l'utilisation des modèles les plus complexes est loin d'être généralisée dans le domaine industriel. En effet, ces modèles paramétriques ne sont pas toujours disponibles dans les logiciels commerciaux et l'implantation au cas par cas est coûteuse (voir laborieuse) ; de plus les essais permettant d'identifier les paramètres de ces lois peuvent être nombreux, difficiles à mettre en œuvre, ou coûteux et pas forcément très représentatifs des conditions réelles.

La force des modèles de comportement paramétriques est de condenser une quantité importante de données expérimentales en quelques valeurs qui permettront à leur tour de simuler numériquement tous les chargements imaginables. Mais le modèle est aussi un goulet qui filtre fortement les données expérimentales que l'on oublie *in fine*.

Il est apparu récemment une autre méthode de simulation numérique basée sur une approche non paramétrique du comportement [1,2]. Cette approche baptisée *Data driven computational mechanics* suppose le comportement connu uniquement à travers des n -uplets de variables admissibles au sens du comportement (typiquement $\{\sigma, \varepsilon\}$ par exemple.). On cherche ensuite à minimiser l'écart aux données en vérifiant l'équilibre et les chargements.

Un point clé de la méthode *Data driven* concerne donc la production et l'utilisation efficace des données. La base de données devant être la plus complète possible, on se dirige vers des essais multiaxiaux sur des structures hétérogènes suivis par des mesures de champs.

Il reste finalement le problème délicat de l'extraction des features et en particulier des contraintes, qui est en passe d'être résolu [3,4].

Il faudra ensuite trouver des moyens efficaces de gérer numériquement la minimisation du comportement dans la base de données pouvant contenir des millions de n -uplets.

Références :

- [1] Trenton Kirchdoerfer and Michael Ortiz. Data-driven computational mechanics. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 304:81-101, 2016.
- [2] Trenton Kirchdoerfer and Michael Ortiz. Data-driven computing with noisy material sets. *arXiv preprint arXiv :1702.01574*, 2017.
- [3] Adrien Leygue and Julien Réthoré. Data driven constitutive identification. 2017.
- [4] Julien Réthoré, Adrien LEygue, Michel Coret, Laurent Stainier, and Erwan Verron. Computational measurements of stress fields from digital images. *Submitted to IJNME*, 2017

Prédiction de microstructure et fissuration en soudage

A.Chiocca, A.Niel, V.Villaret, F.Soulié, F.Deschaux-Beaume, C.Bordreuil

LMGC, Université de Montpellier, Montpellier, France

cyril.bordreuil@umontpellier.fr

La microstructure du joint soudé joue un rôle primordial sur la tenue mécanique des assemblages. La structure de grain dépend des caractéristiques du matériau en solidification et des paramètres procédés qui modifient considérablement les échanges thermiques. La fissuration à chaud se déroulant au cours du procédé de soudage dépend du comportement de la zone en cours de solidification et des sollicitations mécaniques qu'elle subit.

Dans cette présentation, quelques éléments permettant de décrire les mécanismes impliqués lors de la génération de la structure de grain au cours du soudage à l'arc seront étudiés. Pour cela, un dispositif permettant d'étudier à l'échelle de la microstructure les différents échanges se manifestant entre la partie en cours de solidification et le bain liquide sera décrit. Un dispositif est également mis en place pour observer l'influence de la modification des paramètres liés au procédé sur les transferts d'énergie à l'échelle du bain liquide.

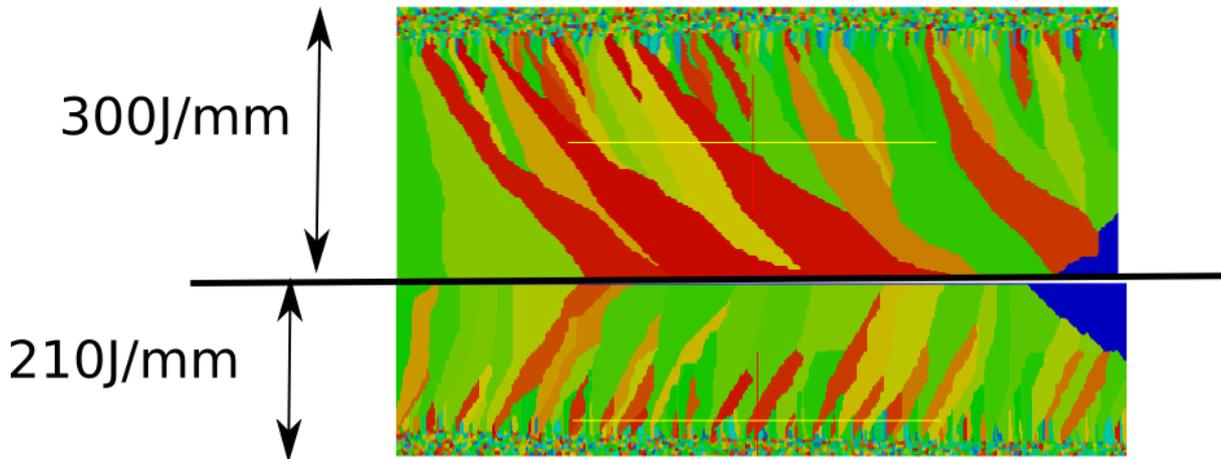


*Observation de l'interface en cours de solidification lors d'une ligne de fusion.
Observation et détermination des mouvements dans le bain liquide pouvant modifier les échanges thermiques [1].*

L'ensemble des essais est réalisé sur un alliage d'aluminium CuNi sur lequel des lignes de fusions seront réalisés. Des analyses EBSD permettront de comparer les différentes structures de grains obtenus lors de la modification des paramètres procédés.

Les analyses expérimentales ont permis de mettre en évidence l'importance de la croissance des bras de dendrites et leur relation avec les écoulements. Afin de prédire les structures de grain, un automate cellulaire a été mis en place afin de modéliser la génération de microstructure lors d'une ligne de fusion sur l'alliage binaire Cu30Ni. L'automate cellulaire est couplé à la simulation thermique du procédé et permet de comparer les prédictions aux essais réalisés.

L'automate cellulaire permet de définir des grains, de définir les joints de grain et de prédire leur orientation.



Prédiction de la structure de grain pour deux conditions opératoires différentes (300J/mm et 210J/mm). Les couleurs correspondent à une orientation cristallographique. Les cellules d'une même couleur appartiennent à un même grain.

La fissuration à chaud est alors étudiée à partir de ces résultats. La fissuration à chaud considérée dans cette présentation se déroule souvent de manière intergranulaire dans la zone en cours de solidification. L'automate cellulaire permet une extraction des joints de grains. Une simulation thermomécanique du procédé permet de connaître l'état mécanique et thermique dans la zone en cours de solidification.

Le modèle RDG [2] a été adapté pour modéliser le comportement d'un joint de grain au cours de la solidification en intégrant les effets de la coalescence. En couplant ce modèle, à la prédiction d'un réseau intergranulaire et la simulation thermique, la zone critique en cours de solidification peut être prédite. La modélisation couple alors l'influence des paramètres procédés tant au niveau de leur relation avec l'établissement d'un chargement mécanique et thermique, et le comportement en solidification du matériau [3].

Références :

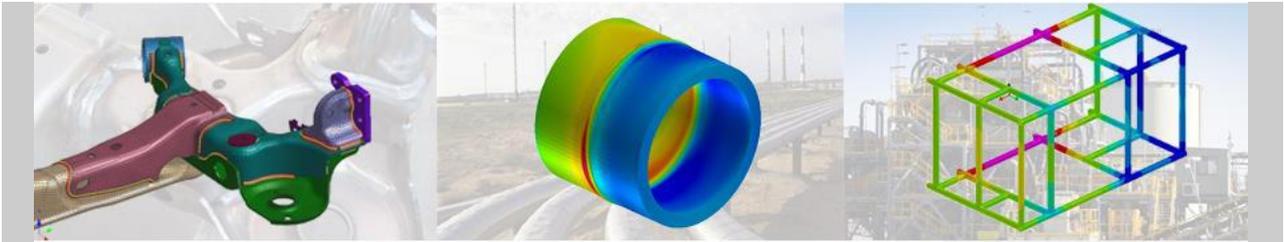
[1] Chiocca.A, Soulié.F, F.Deschaux-Beaume, C.Bordreuil *In situ observations and measurements during solidification of CuNi weld pools*, Science and Technology of welding and joining, Vol21, p578-584 , 2016

[2] Rappaz, Drezet, Gremaud, *A new hot tearing criterion*, Metallurgical and Materials Transactions A, Vol 30, p449-455

[3] C.Bordreuil, A.Niel, *Modelling of hot cracking in welding with cellular automaton with an intergranular fluid flow model* , Computational Materials Science, Vol 82, p442-450

La simulation numérique des conséquences mécaniques induites par les transformations métallurgiques lors d'une opération de soudage jusqu'à son intégration dans la chaîne complète de conception et de fabrication.

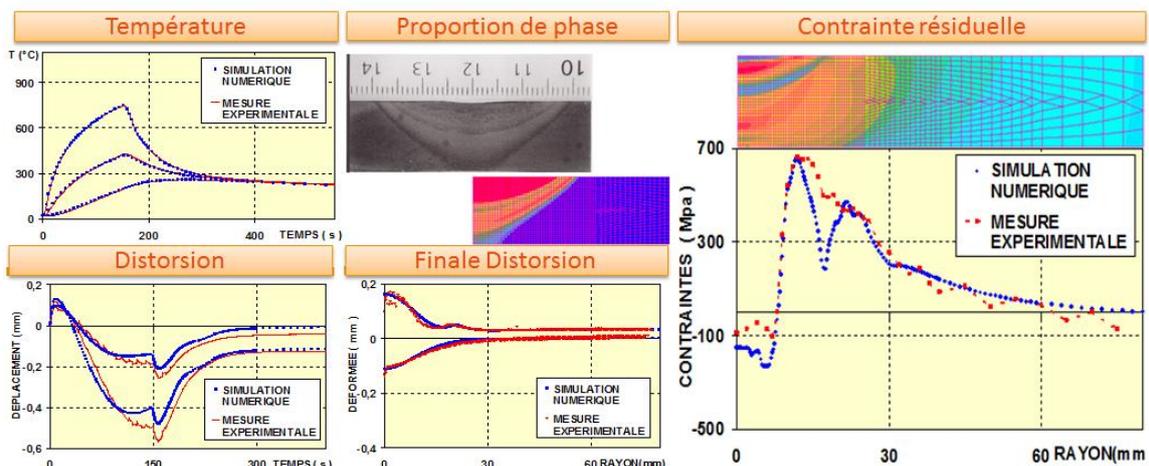
Vincent, Y., Petit, S., Jullien, J.F., Gilles, Ph., Bergheau, J.M.



Le soudage de deux pièces métalliques est l'obtention d'une continuité par fusion ou diffusion locale grâce à un apport de chaleur et éventuellement d'un métal d'apport. L'évolution des procédés de soudage appliqués aux aciers a permis d'atteindre aujourd'hui une bonne reproductibilité de l'opération et une bonne qualité des assemblages soudés. Les soudures constituent tout de même les points faibles des structures. Les évolutions de température, associées à l'opération de soudage, ont notamment pour conséquences un champ de déformations et de contraintes non uniformes liés aux dilatations locales du métal suivies de retraits. Leurs rôles peuvent être déterminants sur la qualité et la tenue mécanique du composant soudé ; les contraintes résiduelles induites par le soudage accentuant tous les risques d'endommagement par fatigue, par fluage, par corrosion et par rupture fragile.

La compréhension de tous les phénomènes thermique, métallurgique et mécanique, qui accompagnent une opération de soudage, ne permettra jamais de définir un processus parfait. Cependant ces connaissances servent à mieux estimer les effets des paramètres et surtout rendent « possibles », depuis l'apparition d'importantes puissances de calcul, la réalisation de simulations numériques prédictives. Ces dernières permettent d'appréhender les interactions entre tous les phénomènes physiques mis en jeu et par conséquent de comprendre puis d'optimiser les procédés et les conséquences induites sur les distorsions, les contraintes résiduelles et finalement la performance produit.

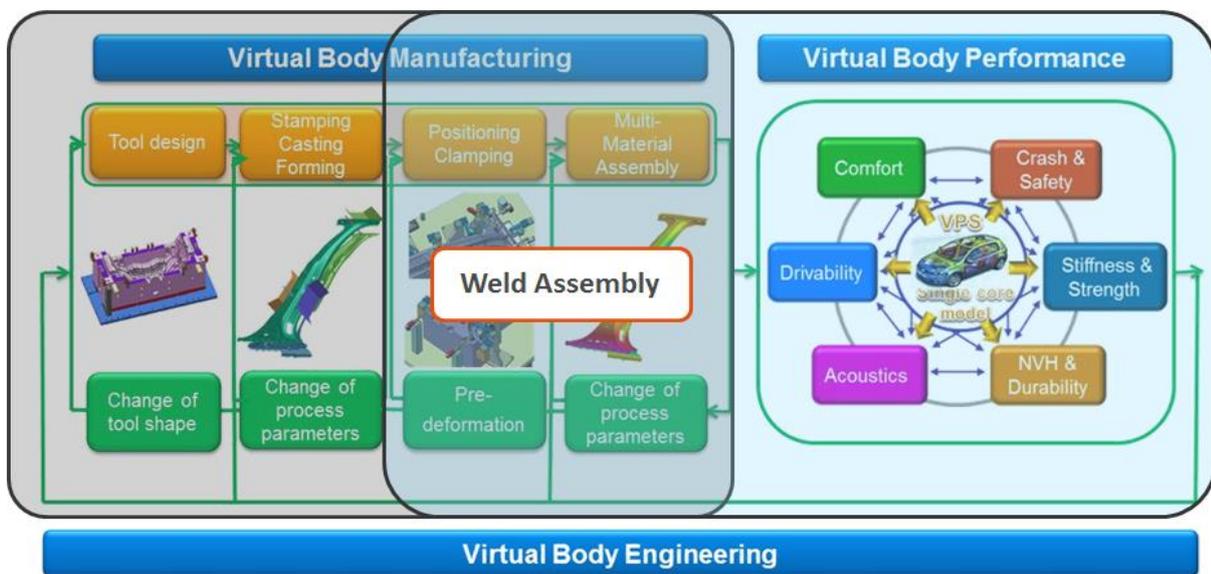
Dans le cadre de cette présentation nous présenterons des analyses comparatives calcul-expérience permettant de tester les modèles implantés dans les modèles éléments finis, d'analyser la sensibilité des paramètres, d'apprécier les effets des hypothèses d'identification des lois de comportement... En d'autres termes, d'apporter un jugement global sur l'aptitude du code de calcul SYSWELED à décrire les comportements thermo-métallurgique et thermomécanique sur des cas tests précis.



Cependant les effets induits par le soudage ne sont pas les seuls à être pris en compte. Tous les procédés de fabrication peuvent induire des effets négatifs sur la performance produit. Ces procédés de fabrication peuvent être multiples partant de l'emboutissage ou du forgeage, vers les différents traitements thermo-chimiques, thermiques, l'usinage jusqu'au soudage, le revenu et parfois la rectification.

L'objectif final n'est plus donc d'être capable de prendre en compte les conséquences induites par l'opération de soudage « seule » mais réellement de prendre en compte les conséquences induites par l'ensemble des procédés de fabrications.

Chainer l'ensemble de ces simulations permet d'anticiper les évolutions dimensionnelles et de prédire la performance produit en superposant les contraintes internes de fabrication aux contraintes de dimensionnement. L'objectif est d'intégrer la simulation et de faire bon du premier coup et ainsi de réduire les coûts et les temps lors de la conception et la fabrication de l'assemblage final comme nous pouvons l'illustrer ci-dessous pour l'automobile :



Comparaison des déformations d'une pièce aéronautique soudée par LASER CO₂ ou LASER YAG

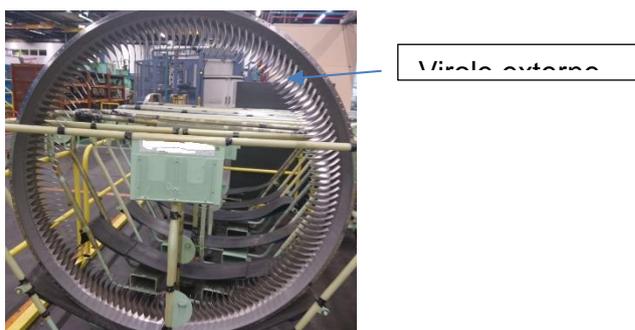
Mathieu TOUBOUL, SAFRAN AIRCRAFT ENGINES
Centre de Compétence Industrielle en Assemblage Métallurgique

Introduction

L'objet de cette étude est de monter la corrélation entre les simulations locale-globale d'une pièce aéronautique et les relevés de déformations de ce composant en fin de gamme de fabrication. De plus, le but de cette étude est de comparer l'impact des procédés LASER CO₂ et LASER YAG sur la déformation de cette pièce.

Simulation du soudage fusion : application au redresseur

Notre cas d'étude s'intéresse aux redresseurs à basse pression qui sont situés en amont du moteur). Les redresseurs peuvent être vus comme une succession d'étages de roues aubagées dont chaque étage (généralement 4) permet de redresser le flux d'air entre chaque étage mobile du compresseur basse pression.



Un redresseur

Simulation locale-globale : recalage source de chaleur

Tout d'abord, il faut recaler la source de chaleur grâce à une simulation numérique thermomécanique transitoire sur une géométrie simplifiée de type plaque. La source de chaleur utilisée est de type Goldak adaptée au soudage LASER. L'objectif est de reproduire les dimensions de la zone fondue observée expérimentalement.

Les Tableau 1 et Tableau 2 montrent que nous reproduisons correctement le cordon de soudure observé expérimentalement.

	observation	simulation	écart
Largeur endroit	4,31mm	4,3mm	0,2%
Largeur envers	3,67mm	3,6mm	1,9%
Largeur mini	3,41mm	3,1mm	9%

Tableau 1 : Dimension du cordon de soudure pour le procédé LASER YAG

	observation	simulation	écart
Largeur endroit	2,6mm	2,6mm	0%
Largeur envers	1,8mm	1,8mm	0%
Largeur mini	1,45mm	1,3mm	10%

Tableau 2 : Dimension du cordon de soudure pour le procédé LASER CO₂

Il est à noter que si on souhaite réaliser une comparaison entre plusieurs procédés, il faut absolument que les dimensions de la zone fondue soient différentes.

Simulation globale

Par la suite les champs de déformation plastique issus de l'étape précédente sont intégrés à une simulation globale de la pièce étudiée. Puis un calcul élastique correspondant au soudage de chacune des aubes sur le redresseur est réalisé.

La simulation numérique montre que les déformations globales de la pièce sont fortement dépendantes du procédé. En effet, on constate que le rayon se rétrécit de manière plus importante dans le cas du soudage LASER YAG (cf. Figure 1).

Si on s'intéresse à la déformation de la virole externe (Figure 2), on constate que l'aube se déforme également plus dans le cas du soudage LASER YAG notamment dans sa partie centrale.

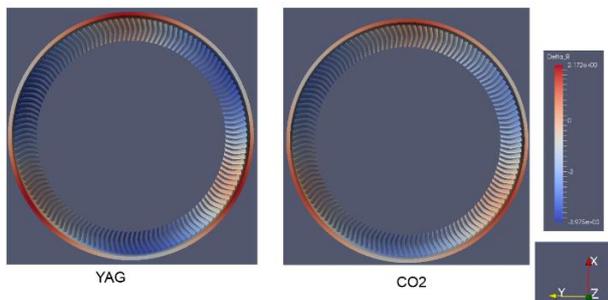


Figure 1 : Déformée dans la direction radiale du redresseur soudé en YAG (à gauche) et en CO₂ (à droite)

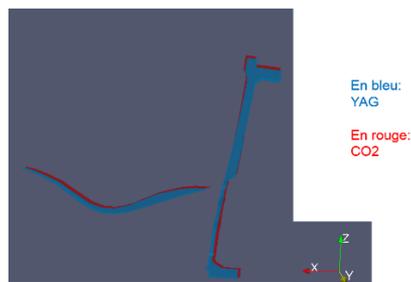


Figure 2 Comparaison des déformées d'une aube après soudage YAG (en bleu) et soudage CO₂ (en rouge) [déformée amplifiée par un facteur 5]

Comparaison résultats numériques / mesures expérimentales

Afin de valider les résultats de la simulation, ces derniers ont été confrontés aux mesures CMT réalisés sur pièce en fin de gamme. Pour caractériser la déformation de la pièce, le rayon est mesuré à différentes hauteurs de la virole externe.

La Figure 3 montre une comparaison entre les mesures CMT et les résultats de simulation pour le procédé LASER CO₂. On constate que nous obtenons des déformations plus faibles que celle obtenue expérimentalement. Ceci est normal car les données expérimentales sont en fin de gamme et par conséquent la pièce a subi d'autres étapes de la gamme de fabrication qui ont déformés d'avantage la pièce.

De plus, on constate que les allures de la déformation numérique et expérimentale sont proches.

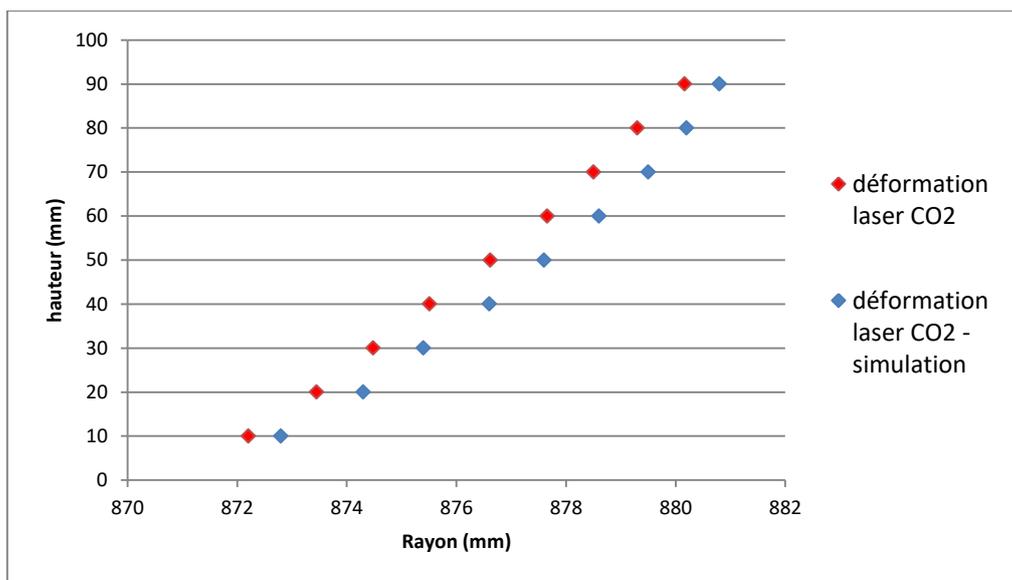


Figure 3 : Comparaison de l'évolution du rayon du redresseur entre les observations expérimentales et les résultats numériques

Lorsque l'on compare les deux procédés, on constate que l'écart en les procédés LASER YAG et LASER CO₂ est assez constant et vaut entre 0,1 et 0,2 mm (Figure 4). Ce qui correspond aux observations expérimentales.

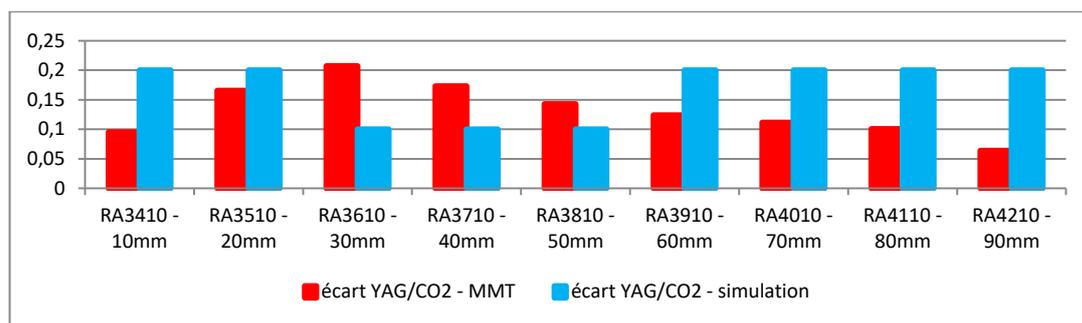


Figure 4 : Variation des écarts entre YAG/CO₂ selon différentes cotes sur l'aube – comparaison entre observation expérimentale et résultats numériques

Conclusion

La simulation a été utilisée dans cette étude pour comparer l'impact des procédés LASER YAG et LASER CO₂ sur un redresseur. Elle a permis de mettre en évidence des déformations plus importantes dans le cas du LASER YAG. Ces constatations ont été confirmées par des mesures expérimentales. Les écarts donnés par les calculs correspondent à ceux observés expérimentalement

Les résultats de simulation numérique ont également été validés en termes d'allure de la déformée de la pièce par comparaison à des mesures expérimentales.

Cette étude va permettre d'anticiper les écarts de déformations entre les deux procédés et d'adapter les outillages afin de réduire les déformations des redresseurs soudés en YAG.

Relation microstructure/propriétés mécaniques pour les alliages à durcissement structural suite à une opération de soudage ou de fabrication additive – cas d'un alliage Al-Mg-Si et d'un alliage à base Nickel

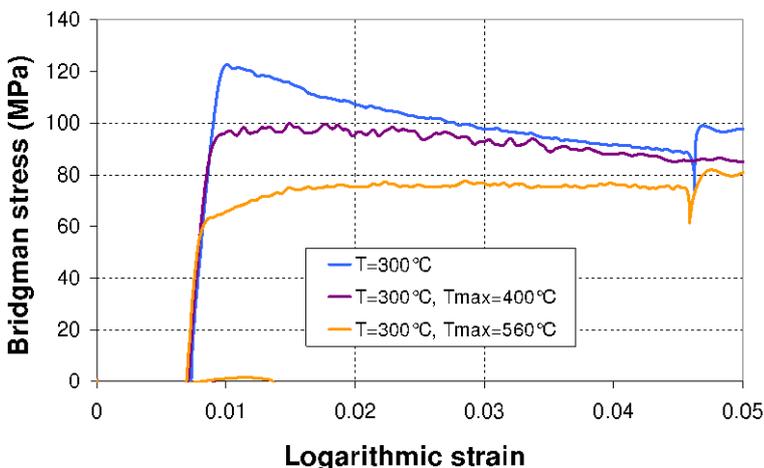
Daniel Nélias¹, Thibaut Chaise¹, Michel Perez², Sophie Cazottes²

¹ Univ. Lyon, INSA-Lyon, LaMCoS UMR CNRS 5259, F69621 Villeurbanne, France

² Univ. Lyon, INSA-Lyon, MATEIS UMR CNRS 5510, F69621 Villeurbanne, France

Les alliages à durcissement structural ont des propriétés mécaniques très dépendantes de l'histoire thermique qu'ils ont subie. Il s'agit en premier lieu de la limite élastique, et aussi du module tangent (dans le domaine plastique) et des paramètres d'écrouissage en chargement cyclique. Par exemple il n'est pas rare d'observer un changement d'un facteur 5 entre la limite élastique loin des zones affectées thermiquement et celles où le matériau a été fondu.

Par ailleurs dans les procédés de fabrication ou réparation type soudage, rechargement et fabrication additive, les vitesses de chauffage et de refroidissement sont très rapides. Cela conduit à des modifications microstructurales pendant l'élaboration, et donc un changement des propriétés mécaniques au cours du process. Dans certains cas ou pour des points particuliers, un adoucissement du matériau peut-être observé. Sur le plan numérique cela pose des difficultés comme la non-convergence ou des instabilités numériques.



Courbe contrainte-déformation à 300 °C pour un alliage d'aluminium 6061-T6 après différentes histoires thermiques (soit en partant de la température ambiante ou après un préchauffage à 400 ou à 560 °C) [1].

Aujourd'hui quelques logiciels métiers permettent de simuler les changements de phase et la fraction volumique de chacune en fonction du temps et de la température (austénite, martensite, ferrite, etc). Il est aussi possible de développer des routines utilisateurs pour des codes éléments finis plus génériques pour essayer de prédire ces phases en présence. En revanche il n'existe pas aujourd'hui de logiciels commerciaux capables de prendre en compte l'effet de la croissance, coalescence et dissolution de précipités durcissants dans la prédiction des lois de comportement utilisées dans les codes éléments finis.

L'objet de l'exposé sera donc, pour deux matériaux différents : AA6061 et l'Inconel 718, de montrer l'effet que les précipités durcissants joue sur les propriétés mécaniques, et qu'il est possible de prédire ce comportement. Une confrontation simulation/mesure sera enfin présentée pour illustrer le propos.

Référence :

[1] D. Maisonnette et al. / International Journal of Pressure Vessels and Piping 149 (2017) 55-65.

Expériences de caractérisation des échanges thermiques pour la simulation numérique du soudage – Application au soudage laser et au FSW.

D. Deloison (Airbus), D. Nélias (LaMCoS, INSA de Lyon)

L'application des technologies de soudage aux éléments de fuselage des avions commerciaux est assez récente et reste encore relativement peu développée. C'est cependant un axe important pour la diminution des coûts de fabrication.

La simulation du soudage est un soutien pour le développement des procédés pour notamment la maîtrise des distorsions et l'estimation des cycles thermiques.

Airbus Group a entamé des actions de recherches avec l'INSA de Lyon sur la simulation du soudage laser au début des années 2000, puis s'est focalisé sur la simulation du Friction Stir Welding avec l'Ecole des Mines de Saint Etienne.

Pour ces deux technologies (Figures 1 et 2), les échanges thermiques avec les outillages supports sont très importants, au vu des faibles épaisseurs des structures et, pour le FSW, à cause des efforts verticaux.

Au cours des expérimentations développées pour caractériser et valider les simulations numériques, une attention particulière a été portée aux échanges avec les outillages (Figures 2 et 3). Des résistances thermiques de contact, parfois fonction, de la température ont dû être utilisées dans les simulations et faire l'objet d'un processus d'identification ([R3]). D'excellentes reproductions des cycles thermiques ont alors été obtenues (Figure 5).

Pour le FSW, il faudra sans doute aller plus loin et s'orienter vers des résistances thermiques fonction de la pression de contact.



Figure 1 : Soudage laser d'un panneau de fuselage (Premium Aerotec)

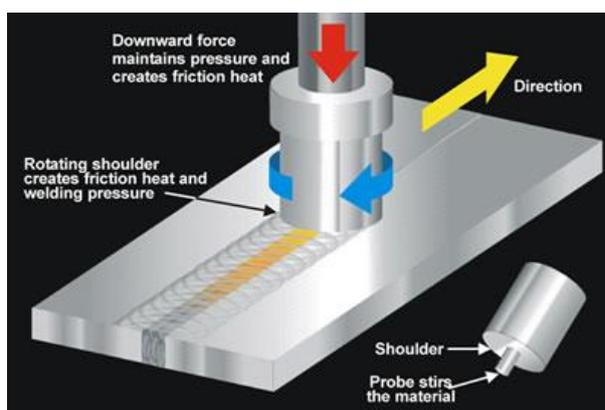


Figure 2 : Schéma de principe du Friction Stir Welding (ESAB).

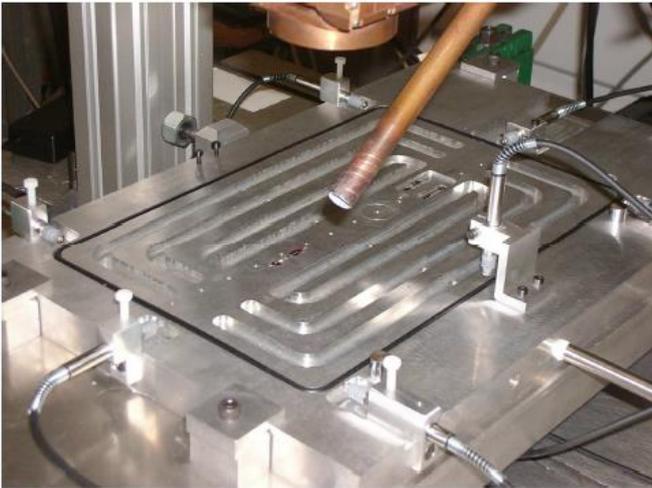


Figure 3 : Outillage à dépression utilisé pour les expériences de soudage laser [R1]



Figure 4 : Instrumentation des essais de FSW (travaux internes Airbus)

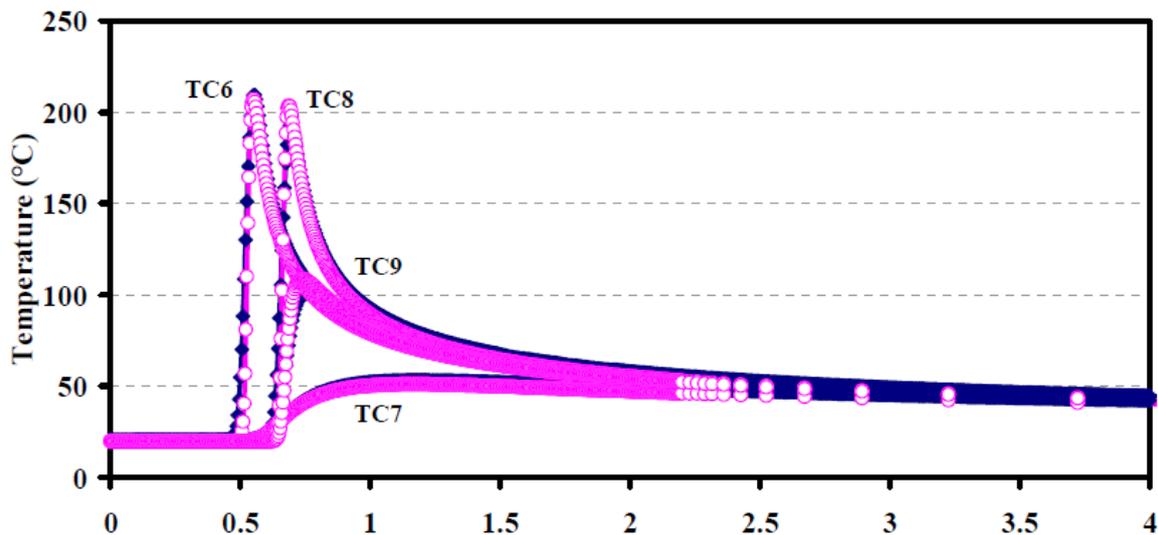


Figure 5 : Comparaison simulation/expérience après identification des conditions thermiques [R1]

Références :

- [R1] Muhammad Zain-UI-Abdein, D. Nelias, JF Jullien, D. Deloison, « Thermo-mechanical Analysis of Laser Beam Welding of Thin Plate with Complex Boundary Conditions_ », Journal of material Forming, 2008
- [R2] Muhammad Zain-UI-Abdein, « Experimental and Numerical Simulation of Laser Beam Welding Induced Residual Stresses an Distorsions in AA 6056-T4 Sheets for Aeronautic Applications », PhD Thesis, 2009
- [R3] Baptiste Guerin, «Soudage d'alliages d'aluminium par la technologie Friction Stir Welding Bobbin Tool », Thèse ENSMSE, 2010

Vers une simulation numérique liquide-solide couplée des procédés de soudage

J.M. Bergheau, H. Sallem, Y. Saadlaoui, A. Delache, E. Feulvarch, J.B. Leblond

La simulation numérique du soudage est un sujet d'intérêt croissant depuis une bonne trentaine d'années. D'abord destinés à prédire les contraintes résiduelles générées par une opération de soudage conventionnel, les travaux de recherche se sont peu à peu orientés vers la simulation des distorsions, une meilleure maîtrise du bain fondu, du procédé lui-même et vers d'autres procédés comme le soudage par friction-malaxage ou encore le soudage par résistance. Dans ce contexte le Professeur Jean-François Jullien a joué un rôle essentiel en mettant en place les programmes INZAT et en soutenant sans réserve la mise en place d'un groupe de recherche Stéphano-Lyonnais au passage des années 2000, groupe qui depuis plus de 15 ans se réunit chaque année.

Les travaux conduits au Laboratoire de Tribologie et Dynamique des Systèmes ont pour objectif de maîtriser le mieux possible l'état mécanique qui se développe dans les matériaux au cours d'une opération de soudage. Il s'agit d'aboutir à des modèles de simulation le plus proches possible de la réalité physique mais applicables sur des composants industriels. Les travaux se sont ainsi orientés ces dernières années dans deux grands axes. Le premier vise à mettre en place des modèles physiques capables de représenter le comportement des matériaux depuis son état liquide jusqu'à température ambiante ; le deuxième à développer et valider des éléments finis adaptés à des simulations en contexte industriel.

Le premier axe s'inscrit dans la continuité des travaux de thèse de H. Amin El Sayed [1]. Ces travaux avaient pour objectif de simuler l'opération de soudage en y intégrant, dans une même simulation, à la fois les écoulements dans le bain fondu et les déformations de la matière solide, ceci afin d'aboutir à un calcul réellement prédictif. Le principe de base consiste à utiliser une approche dite ALE (Arbitrary Lagrangian-Eulerian approach) dans laquelle les nœuds du maillage « suivent » le mouvement de la partie solide mais pas celui de la partie fluide. Ainsi la formulation mise en œuvre numériquement est de type lagrangien dans le solide, mais eulérien (avec vitesse arbitraire des nœuds) dans le fluide. Ceci permet de bien représenter les mouvements du bord (solide) de la structure, tout en évitant une représentation lagrangienne des mouvements du fluide qui, étant donnée l'importance de ces mouvements, nécessiterait des remaillages incessants et en pratique irréalisables. Les travaux conduits par Hussein Amin El Sayed ont permis de mettre en place des premiers outils mais si l'approche reste prometteuse, il reste encore un gros travail à réaliser pour résoudre notamment les problèmes de convergence posés par cette approche, qui fait l'objet de la thèse de Yassin Saadlaoui.

Les difficultés rencontrées nous ont alors orientés vers une approche plus simple où les moteurs d'écoulement comme l'effet Marangoni dans le bain fondu ne sont pas pris en compte. Si les écoulements dans le bain fondu ne sont alors pas modélisés, le comportement du matériau est néanmoins représenté par un modèle de fluide newtonien dans son état liquide et par un modèle élastoviscoplastique en phase solide. Mais la formulation mise en œuvre numériquement peut être maintenant totalement lagrangienne. Pour régulariser au maximum le problème, une modélisation de la zone pâteuse a été proposée pour assurer une transition continue du comportement entre l'état liquide et l'état solide [2]. De plus, pour stabiliser la phase liquide dont la résistance mécanique est énormément plus faible que celle du solide environnant, les effets de tension de surface (effort normal seulement) sont introduits par la méthode proposée dans [3] (figure 1). Une simulation globale réalisée sur un alliage base nickel (IN600) a permis de montrer

l'efficacité numérique des méthodes proposées [4, 5]. Notons que l'intérêt d'une telle approche est d'appréhender l'état mécanique au cours du soudage et non seulement les contraintes résiduelles après soudage. Ainsi, une modélisation mécanique réaliste du bain fondu et de la zone pâteuse pourrait nous permettre de mieux prédire les risques de fissuration à chaud mais cela reste encore à démontrer.



Figure 1 – Effet de la tension de surface sur la déformation du bain fondu dans une approche lagrangienne

Le développement d'éléments finis robustes fait l'objet du deuxième axe de travail. La facilité de maillage en tétraèdres de pièces complexes par des outils automatiques nous a naturellement conduits à développer ce type d'élément pour des applications de soudage. Un élément fini tétraédrique de type déplacement-pression P1+/P1 a ainsi été développé et validé en élastoviscoplasticité dans un premier temps [6]. Mais les difficultés rencontrées dans certaines situations pour la convergence des calculs (difficultés généralement reliées au noeud interne) nous ont conduit à simplifier cet élément pour proposer un élément tétraédrique sans nœud interne de type déplacement-pression P1/P1. Si cet élément, qui ne satisfait pas la condition LBB, ne peut être utilisé pour des écoulements parfaitement incompressibles (cas des fluides), la présence d'une certaine compressibilité liée à l'élasticité nous garantit l'unicité de la solution en élastoviscoplasticité. Une méthode de stabilisation a par ailleurs récemment été proposée pour réduire les oscillations de pression quelquefois observées dans la solution [7].

Références

- [1] Hussein Amin El Sayed, « Simulation numérique du soudage : Couplage des écoulements dans le bain fondu avec les déformations de la partie solide », Thèse de doctorat de l'ENISE et Ecole des Mines de Saint-Etienne, septembre 2014.
- [2] H. Amin El Sayed, E. Feulvarch, F. Boitout, J.B. Leblond, J.M. Bergheau, « A behavior law for the numerical simulation of the mushy zone in welding », *Computational Plasticity XII - Fundamentals and Applications*, E. Onate, D.R.J. Owen, D. Peric and B. Suarez (Eds), 2013, pp.164- 171.
- [3] J.B. Leblond, H. Amin El Sayed, J.M. Bergheau, « On the incorporation of surface tension in finiteelement calculations », *Comptes Rendus Mécanique*, vol. 341, 2013, pp.770-775.
- [4] Sallem H., Feulvarch E., Amin El Sayed H., Souloumiac B., Leblond J.-B., Bergheau J.-M., 2015, "Recent advances in residual stress simulation caused by the welding process", *Computational Plasticity XIII - Fundamentals and Applications*, ISBN 978-84-944244-6-5, International Center for Numerical Methods in Engineering , 771-782.
- [5] H. Sallem, Y. Saadlaoui, E. Feulvarch, J.-M. Bergheau, « A Lagrangian approach based model to simulate residual stresses in welding process », *International conference on COmputational methods in Manufacturing Processes (ICOMP 2016)*, Liège, 18-20 mai 2016
- [6] T. Heuzé, H. Amin-El-Sayed, J.B. Leblond, J.M. Bergheau, « Verification of the P1+/P1 finite element with a benchmark test based on the Couette viscometer – II : Thermo-elasto-plastic solid behaviour in small and large strains », *Computers and Mathematics with Applications*, Vol. 67, Issue 8, may 2014, pp. 1482-1496.
- [7] E. Feulvarch, H. Amin El Sayed, J.C. Roux, J.M. Bergheau, « A stabilized P1/P1 finite element for the mechanical analysis of solid metals », *International Journal of Materials Forming*, 2015, DOI 10.1007/s12289-015-125

NOTES