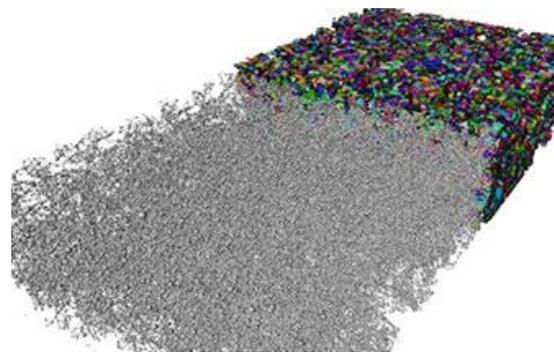




ASSOCIATION
FRANÇAISE
DE MÉCANIQUE

Modélisation et Simulation Numérique du Soudage Journée SNS-CFV

« Synergies de Simulation entre Fabrication additive et Soudage : nouveaux défis »



SNS
CFV
2018



Matériaux
& Techniques



26 Juin 2018 EdF Laboratoire Paris-Saclay

Programme de la journée SNS - CFV

« Synergies de Simulation entre Fabrication Additive et Soudage : nouveaux défis »

9h00 – Accueil - café

9h30 - Introduction (N. Rupa, EDF)

9h35 - Présentation de l'AFM (R. Dufour, AFM)

9h40 - Présentation du thème (O. Asserin, CEA)

Session 1 – Contexte et enjeux industriels

9h50 - Contexte et enjeux de la simulation de la fabrication additive chez SAFRAN
Clara Moriconi, SAFRAN

10h10 De la simulation du soudage à la simulation de la fabrication additive : contexte et enjeux chez ArianeGroup.
Loïc Debeugny, ArianeGroup

10h30 Fabrication additive métallique arc-fil : technologies et opportunités.
Fabrice Scandella, Institut de Soudure

Discussions puis pause

Session 2 – Simulation Numérique du soudage

11h25 Etat de l'art sur la modélisation multi physique de procédés de soudage à l'arc (TIG).
Marc Médale, IUSTI

11h45 Simulation thermomécanique du soudage : Modèles, Méthodes et Perspectives.
Jean-Michel Bergheau, LTDS ENISE

12h05 Compréhension et simulation de l'interaction physique laser-matière en SLM et du jet de poudre en DMD.
Morgan Dal, PIMM

Discussions puis repas sur place

Session 3 – Fabrication additive

14h10 Simulation numérique de la fabrication additive par fusion de lit de poudre : aspects thermomécaniques.

Gildas Guillemot, CEMEF

14h30 Additive Manufacturing : Microstructures, Structures and Properties
Eric Charkaluk, LMS

14h50 Modélisation multiphysique d'un procédé de fabrication additive arc-fil.
Muriel Carin, UBS

Discussions puis pause

Session 4 – Méthodes transverses

15h45 Réduction de modèle pour l'évaluation des contraintes internes et déformations résiduelles des pièces issues de fabrication additive.

Brice Bognet, GeM ECN

16h05 Simulation thermomécanique à l'échelle de la pièce, quelles perspectives pour la fabrication additive?

Olivier Desmaison, ESI-Group

16h25 Modes dynamiques de soudage pour l'hyper-réduction de simulations hors d'atteintes.

David Ryckelinck, Mines Paris Tech

Discussions – conclusions
fin du séminaire à 17h15

Le GST Simulation Numérique du Soudage

La Commission Simulation Numérique du Soudage, mise en place en 2002 au sein de l'AFM, a évolué en un Groupe Scientifique et Technique (GST) afin d'accompagner 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'améliorer la compréhension globale du soudage afin de simuler numériquement le comportement d'une structure soudée (soudabilité métallurgique, distorsions, contraintes résiduelles, tenue en fatigue, endommagement), tout en s'appuyant sur des cas-tests de validation (comparaisons calcul/essai).

La Commission Formage Virtuel

Le principal objectif de la Commission Formage Virtuel (CFV) est de favoriser les échanges scientifiques entre les spécialistes des sciences des matériaux, de la mécanique théorique des solides, des structures et des mathématiques appliquées (méthodes numériques) afin d'encourager le développement de méthodes avancées de formage virtuel. Ces échanges d'informations permettent d'améliorer la compréhension globale du soudage afin de simuler numériquement le comportement d'une structure soudée (soudabilité métallurgique, distorsions, 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 SNS de :

- 2003 Prédiction des distorsions et composants soudés. Simulation et validation expérimentale.
- 2004 Simulation Numérique du Soudage multipasse, 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.
- 2017 Exemples de collaborations fructueuses académies industries.

Thème de la journée SNS-CFV du 26 juin 2018

Cette année, les nouvelles technologies de fabrication additive sont à l'honneur au colloque annuel sur la Simulation Numérique du Soudage (SNS). En effet, soudage et fabrication additive sont des technologies très proches pouvant accroître leurs performances et progresser plus rapidement en mettant en commun leurs méthodologies numériques et expérimentales. Au travers d'une journée s'intitulant « Synergies de Simulation entre Fabrication Additive et Soudage : nouveaux défis », le colloque ambitionne de mettre en évidence les approches de simulation et les méthodes numériques complémentaires entre la fabrication additive et le soudage. Les exposés offriront un éclairage récent des besoins industriels et des recherches en cours sur ces deux technologies. Les échanges et discussions avec l'auditoire permettront en particulier de confronter les modèles et les simulations numériques pour identifier les synergies et fusionner les méthodologies tant du point de vue de la modélisation numérique que sur le plan des méthodes expérimentales destinées à valider les modèles et à contrôler la qualité des réalisations. Cette journée d'échange se déroulera dans les locaux d'EDF sur le Plateau de Saclay et sous l'égide du GST SNS et de la commission Formage Virtuelle. La rencontre sera l'occasion pour ces deux communautés de mutualiser leurs efforts, de profiter des compétences afin de relever les nouveaux défis des industriels qui s'intéressent aux procédés de fabrication.

Contexte et enjeux de la simulation de la fabrication additive chez Safran

Clara Moriconi,

clara.moriconi@safrangroup.com

Safran Tech

La fabrication additive métallique est en pleine expansion. Dans ce contexte, le développement de la simulation des procédés est clé pour mieux maîtriser ces « nouveaux » procédés, concevoir des pièces qui exploitent le potentiel de ces nouvelles technologies et accélérer la mise au point des gammes de production.

Le développement de la simulation aux échelles fines est un potentiel facteur d'accélération de la montée en maturité des procédés de fabrication additive. Ces modèles pourraient permettre de mieux analyser les phénomènes complexes observés pendant la fusion et d'optimiser les paramètres de la machine et de la matière (puissance, vitesse, distribution de taille et forme des poudres, stratégies de lasage...). Les machines de fabrication additive se dotent aujourd'hui de systèmes de contrôle temps réel de la fabrication ; déclinés au juste niveau, la simulation du procédé peut permettre d'analyser les données recueillies en cours de fabrication afin d'améliorer la détection d'éventuelles dérives et de choisir la stratégie à adopter pour la suite de la construction de la pièce.

En particulier, la simulation de l'interaction source d'énergie / matière peut permettre de prédire la forme et les dimensions du bain de fusion et des cordons, de prédire le champ thermique pendant la construction, et donc d'anticiper l'apparition de défauts et de mieux comprendre les phénomènes mécaniques observables sur pièces finies. Les porosités observées dans les pièces en fabrication additive ont plusieurs origines ; entre autres, en LBM, la projection de gouttelettes lors de la fusion peut générer des particules suffisamment grosses (>100 microns) pour ne pas être refondues complètement aux passages ultérieurs du laser et générer des défauts « linéaires » de plusieurs dixièmes de millimètres. On observe également des porosités de forme allongée, préférentiellement orientées horizontalement par rapport à la construction sur plateau. Il y a eu obstacle à la fusion par la présence d'une grosse particule, ou par absence de faisceau de fusion. Certains défauts sont débouchants – cf. Figure 1. Des fissures de différentes natures peuvent être observées : de type liquation, dues aux contraintes thermiques et à des géométries spécifiques (par exemple : interface pièce/plateau, ...) – cf. Figure 2. La simulation du procédé a un rôle déterminant à jouer dans la prédiction de ces différents défauts.



Figure 1 : Porosités type manque matière (a), soufflures (b) ou manque de fusion (c) en coupe micrographique



Figure 2 : Différents types de fissures observables en fabrication additive par Laser Beam Melting

En second lieu, la simulation des procédés a un rôle majeur à jouer dans le processus de conception des pièces en fabrication additive, en permettant de concevoir des pièces optimisées pour les gammes de production de fabrication additive. Dans un premier temps, on attend de la simulation des procédés qu'elle permette d'estimer les contraintes résiduelles (et les déformations induites) et la réussite de la fabrication (en évitant les fissures, la séparation pièce/plateau, les collisions avec le racleur, etc. – cf. Figures 3 à 5) de pièces industrielles. Le temps de restitution d'un calcul de ce type doit être compatible avec les exigences industrielles (de quelques minutes à quelques jours de calcul), pour permettre une utilisation régulière lors des itérations de conception.



Figure 4 : Exemple de macro-fissure sur une pièce en LBM apparue au cours de la fabrication

La simulation des procédés permet ici de limiter les coûts en anticipant les problèmes de fabrication le plus en amont possible dans le processus de développement d'un produit.

Pour aller plus loin, il sera nécessaire d'enrichir les méthodes de conception et de dimensionnement des pièces en fabrication additive en tenant compte de l'état de la pièce en



Figure 3 : Impact d'une déformation de pièce sur le lit de poudre, menant à une collision racleur/pièces

sortie de fabrication (déformations, contraintes résiduelles pouvant persister après traitements thermiques, métallurgie, état de surface...). Enfin, la simulation des procédés aura un rôle à jouer dans le développement de composants à gradients de microstructure, optimisés selon leurs fonctions cibles, pour tirer tout le potentiel de ces nouvelles technologies.



Figure 5 : Déformation d'une pièce en LBM due aux fortes contraintes résiduelles

De la simulation du soudage à la simulation de la fabrication additive : contexte et enjeux chez ArianeGroup

Loïc Debeugny

loic.debeugny@ariane.group

ArianeGroup

ArianeGroup est une coentreprise créée en 2014 et détenue à parts égales par Airbus et Safran pour notamment développer les lanceurs Ariane 6. La société est chargée du développement et de l'intégration des lanceurs. Elle a plusieurs filiales dont Arianespace qui est chargée de la commercialisation.

Le secteur spatial et celui des lanceurs en particulier est caractérisé par des cadences de production faibles en comparaison d'autres secteurs industriels et par des contraintes de masse importantes induisant des géométries de composant élémentaire souvent complexes. La fabrication additive, et en particulier la technologie sur lit de poudre, est donc tout particulièrement adaptée pour la réalisation de démonstrateurs et la production de ses composants complexes.



à gauche Croix de cardan moteur Vulcain 2 en fabrication additive (démonstration vol sur Ariane 5 en 2016), à droite Plaque d'injection moteur Vinci (moteur d'étage supérieur Ariane 6) en fabrication additive.

L'objectif de la présentation est de faire un focus sur l'intérêt de la simulation des procédés de fabrication additive pour répondre aux besoins industriels d'ArianeGroup :

- Réduction des coûts de développement et des temps de cycle de développement,
- Réduction des coûts de qualification des composants,
- Optimisation des paramètres procédés, amélioration des performances des composants et réduction des coûts de production.

Parmi les méthodes numériques existantes, l'utilisation de méthodes de simulation simplifiée (et calibrées) telles que les sources de chaleur équivalente dans un calcul thermomécanique ou bien les « *inherent strains* » dans un calcul purement mécanique permet d'anticiper les déformations induites par la fabrication sur lit de poudre. Cela a pour principal intérêt de :

- Anticiper les risques d'arrêt de fabrication, et réduire le nombre d'itérations de mise au point, permettant ainsi accélérer les cycles de mise au point,
- Optimiser les stratégies de supportages.

Le lien entre la simulation du soudage et de la fabrication additive sera également discuté. En effet ces méthodes numériques, qui viennent de la simulation du soudage, peuvent rapidement devenir problématiques en temps de calcul à cause du changement d'échelle des bains fondus.

A plus long terme, le développement de nouveaux modèles numériques à des échelles inférieures permettra d'une part d'alimenter les modèles précédents et d'autre part d'optimiser des paramètres du procédé comme la quantité de poudre apportée *via* des modèles d'éléments discret (par exemple), ou le niveau de porosité (et plus généralement la santé matière) *via* des modèles CFD et des modèles métallurgiques.

Fabrication additive métallique arc-fil : technologies et opportunités

Fabrice Scandella

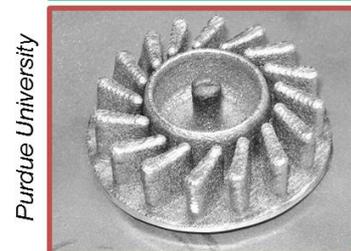
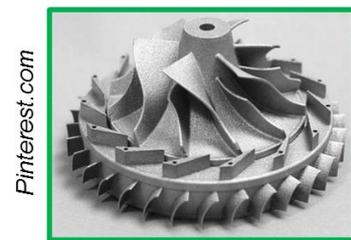
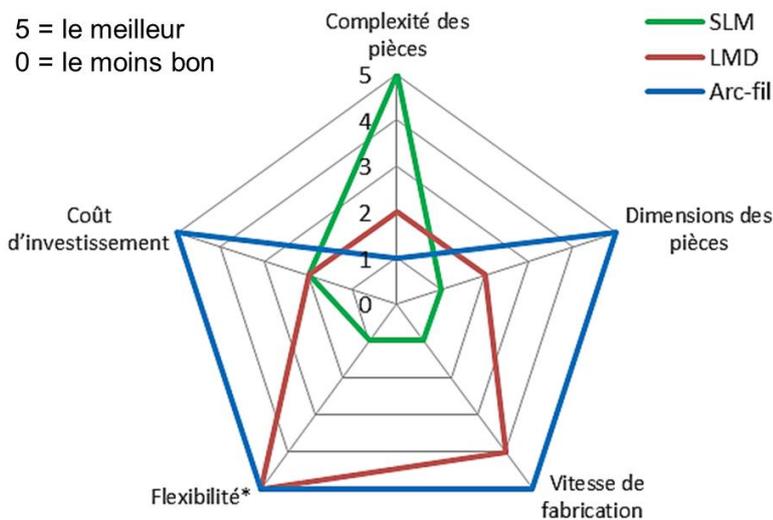
f.scandella@isgroupe.com

Institut de Soudure

Tous les procédés de soudage ou de rechargement peuvent potentiellement être utilisés en Fabrication Additive (FA) arc-fil à condition d'être automatisés ou robotisés et de disposer d'une capacité de dépôt de matière en 3D (ou au moins en 2,5D). En particulier, les robots polyarticulés sont répandus et peu onéreux, ont une vraie capacité 3D et offrent de grands volumes de travail. On peut y associer le procédé MIG-MAG - en particulier les variantes à énergie contrôlée, le procédé plasma ou encore le procédé TIG avec apport de fil froid ou chaud.

Parmi les avantages de la FA arc-fil, on peut citer la capacité de fabriquer des pièces de « grandes » dimensions, une productivité élevée, un investissement machine modéré surtout si l'on utilise un moyen existant de soudage, une très large gamme de produits d'apport (dont certains qualifiés, peu onéreux et de très nombreux fournisseurs), pas de recyclage (récupération, tamisage) de produit d'apport - donc un produit d'apport toujours « neuf », beaucoup moins de contraintes HSE et la possibilité de réaliser des pièces multimatériaux ou à gradient de propriétés. Il y a cependant des limites telles que l'impossibilité d'obtenir des pièces de forme complexe, avec des parois très fines ou encore contenant des petits canaux, un état de surface médiocre et une offre logicielle très restreinte pour passer d'un fichier CAO à un programme de robot polyarticulé.

La figure suivante montre le positionnement de la FA arc-fil par rapport aux technologies SLM (laser sur lit de poudre) et LMD (« projection » laser-poudre). Par flexibilité on entend la capacité du procédé à fabriquer, ajouter des fonctionnalités sur pièce existante ou encore réparer une pièce.



Les verrous technologiques à lever sont nombreux avant d'utiliser la FA arc-fil en production. Outre la disponibilité de logiciels permettant de passer d'un fichier CAO à un programme de robot polyarticulé, il faut pouvoir disposer de moyens de monitoring. Il est également difficile de prédire les déformations des pièces et bien entendu un alliage non soudable (par exemple la majorité des superalliages base Ni) ne peut pas être mis en œuvre en FA.

Malgré ces obstacles, de nombreux développements sont en cours par exemple en ce qui concerne des produits d'apport spécifiques pour la FA et les projets en FA arc-fil se multiplient sous l'impulsion des industriels qui sont de plus en plus nombreux à vouloir réaliser des pièces de grandes dimensions.

On ne connaît pas encore le marché de la FA arc-fil, mais il concernera à priori plus l'ajout de fonctionnalités que la fabrication de pièces sur un plateau et, sur une base purement économique, se développerait en priorité pour des pièces en acier inoxydable et base Ni plutôt que des aciers C-Mn. Les secteurs industriels à priori concernés seront l'industrie « lourde » (secteur minier, maritime, sidérurgique, pétrolier...) et peut être l'aéronautique, qui y voit un intérêt, mais dont les matériaux se prêtent moins à cette technologie. Pour que la FA arc-fil devienne une réalité industrielle, il faut qu'elle permette de produire des pièces moins cher et/ou de produire des pièces plus vite et/ou de se passer d'outillages spécifiques (matrices, moules), bien entendu en garantissant un produit de qualité au moins équivalente.

Etat de l'art sur la modélisation multiphysique de procédés de soudage à l'arc (TIG).

Marc MEDALE

marc.medale@univ-amu.fr

IUSTI

Résumé : L'approche multiphysique n'a été effectivement mise en œuvre en simulation numérique du soudage que depuis une quinzaine d'années, en raison des importants coûts de calculs qui résultent. Il nous est donc apparu opportun de dresser un bilan des apports réalisés et nous tenterons d'appréhender les tendances d'évolution des recherches dans ce domaine ainsi que leurs répercussions applicatives potentielles.

Introduction

L'objectif ultime des développeurs de modèles numériques est d'aboutir à un modèle prédictif, fiable et précis du problème que l'on cherche à simuler. Cet objectif semble loin d'être atteint dans la plupart des problèmes industriels de simulation numérique des procédés de soudage en général, et du soudage à l'arc en particulier. La principale raison est liée d'une part à la complexité des phénomènes physiques mis en jeu au cours du procédé de soudage, et d'autre part aux nombreuses interactions fortement non linéaires que ces divers phénomènes engendrent. Cependant, les travaux de recherche effectués en simulation numérique du soudage ont néanmoins permis d'acquérir une expertise et un savoir-faire qui permettent d'apporter des réponses, certes partielles mais néanmoins pertinentes, à deux problématiques industrielles : le calcul des contraintes résiduelles et des distorsions des assemblages soudés d'une part, et les études de soudabilité d'autre part. Pour ces deux classes de problèmes, les modèles physiques et numériques sont assez distincts et présentent des niveaux de sophistication très disparates.

Modélisation des transferts thermiques en soudage à l'arc

En ce qui concerne les études de soudabilité, l'objectif vise à simuler de manière prédictive l'opération de soudage par un modèle dont les données d'entrée sont issues des paramètres opératoires du procédé, connus du soudeur (tension, intensité, vitesse d'avance, débit de métal d'apport, etc.). Pour ce faire, il est essentiel d'intégrer au modèle les principaux phénomènes physiques qui régissent le procédé de soudage. On distingue généralement au moins cinq contributions principales :

1. la source d'énergie et son interaction avec les pièces à assembler, pour en quantifier le transfert effectif d'énergie ;
2. le métal d'apport s'il y en a et le bilan d'énergie associé (cinétique et enthalpique), ainsi que sa composition ;
3. les transferts thermiques couplés dans les pièces à assembler (changements de phases solide-liquide-vapeur, transferts dans les phases liquide et solide, rayonnement des surfaces et échanges avec les outillages, etc.) ;
4. l'évolution de la composition du matériau (transformations métallurgiques) et des propriétés thermiques et mécaniques qui en résultent ;
5. la détermination des contraintes et déformations dans l'assemblage jusqu'au retour à température ambiante et après dé-bridage.

Afin de connaître le transfert effectif d'énergie entre la source et les pièces à assembler, il faut modéliser les phénomènes physiques spécifiques à la source et au procédé de soudage utilisé. Les modèles numériques développés consistent à résoudre les équations de conservation de l'énergie, de la quantité de mouvement et de conservation de la masse dans le plasma et les pièces à assembler, ainsi que les équations électromagnétiques simplifiées (magnétostatique), cf. figure 1, (Tanaka et al, 2002 ; Hu and Tsai, 2007 ; Brochard, 2008). Ces simulations couplées permettent de quantifier le flux effectif de chaleur transféré de la cathode vers l'anode et les contraintes visqueuses que l'écoulement du plasma et du gaz de protection induisent à la surface du bain de fusion. Les

effets tridimensionnels et dynamiques ont ensuite été pris en compte de manière beaucoup plus détaillée (Traidia and Roger, 2011) en intégrant des effets de composition des aciers alliés (Koudadje, 2013), des fortes déformations de l'interface du bain de fusion (Pan et al., 2016 ; Nguyen et al., 2017 ; Yau et al., 2018).

Les défis actuels avec ces approches multi physiques concernent la prise en compte détaillée du métal d'apport dans le bain de fusion, ainsi que les interactions du plasma d'arc avec le milieu environnant (chanfrein étroit, pièces voisines, outillages, etc.).

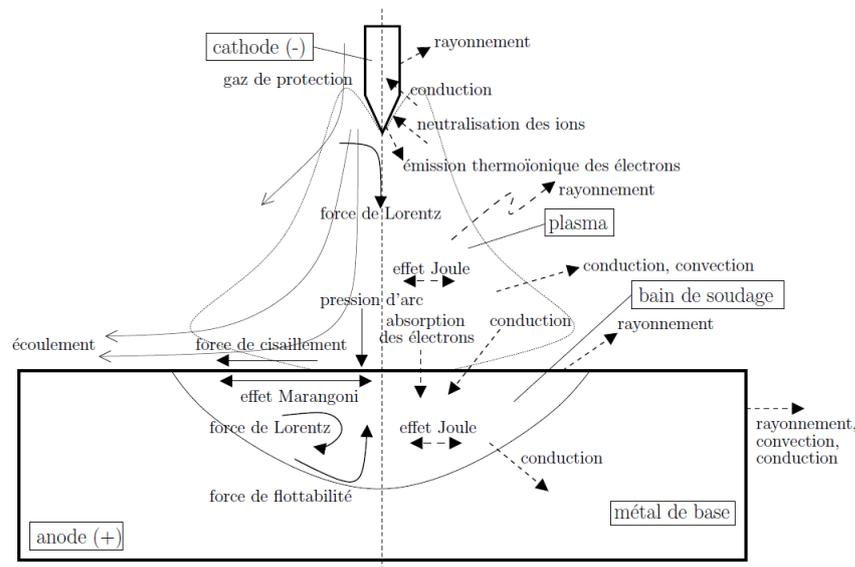


Figure 1 : principaux phénomènes impliqués dans la modélisation multi physique du soudage à l'arc (TIG).

Conclusions et perspectives

La simulation numérique du soudage à l'arc atteint peu à peu un niveau de maturité qui lui permette de répondre de manière pertinente à quelques problématiques industrielles. L'approche multi-physique du procédé est indiscutablement lourde et couteuse en temps de calcul, mais demeure incontournable pour comprendre la complexité des phénomènes physiques impliqués et leurs nombreuses interactions. Des recherches sont encore nécessaires pour arriver à des modèles numériques totalement prédictifs, en raison des difficultés rencontrées pour établir des bases de données fiables de propriétés thermo-physiques des matériaux à très hautes températures et sous champs électromagnétiques intenses.

Références

- Tanaka M., Terasaki H., Ushio M., and Lowke J.J., "A unified numerical modeling of stationary tungsten-inert-gas welding process", Metallurgical and Materials Transactions A, Vol. 33, pp. 2043-2052, 2002.
- Hu J. and Tsai H.L., "Heat and mass transfer in gas metal arc welding. Part I: The arc", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 50, pp. 833-846, 2007.
- Hu J. and Tsai H.L., "Heat and mass transfer in gas metal arc welding. Part II: The metal", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 50, pp. 808-820, 2007.
- Brochard M., Modèle couplé cathode-plasma-pièce en vue de la simulation du procédé de soudage à l'arc TIG, doctorat de l'Université d'Aix-Marseille et CEA, 2008.
- Traidia A., Roger F., Numerical and experimental study of arc and weld pool behaviour for pulsed current GTA welding. International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 54, pp. 2163-2179, 2011.
- Koudadje K., Etude expérimentale et modélisation numérique du bain de fusion en soudage TIG d'aciers, doctorat de l'Université d'Aix-Marseille et EDF, 2013.
- Pan J., Hu S., Yang L. and Chen S., Numerical analysis of the heat transfer and material flow during keyhole plasma arc welding using a fully coupled tungsten-plasma-anode model, Acta Materialia, Vol. 118, pp. 221-229, 2016.
- Nguyen M.C., Medale M., Asserin O., Gounand S. and Gilles P., Sensitivity to Welding Positions and Parameters in GTA, Welding With a 3D Multiphysics Numerical Model, Numerical Heat Transfer, Part A, Vol. 71, pp. 233-249, 2017.
- Yau X., Dorogan K., Borel D., Delmas J., Ferrand M. and Medale M., Unsteady Interfacial Coupling of Plasma / Weld pool models for GTA Welding. VII International Conference on Coupled Problems in Science and Engineering (Coupled Problems 2017), Rhodes Island, Greece, June 12-14th, 2017.

Simulation thermomécanique du soudage : modèles, méthodes et perspectives

J.M. Bergheau

bergheau@enise.fr

LTDS ENISE

Le développement des procédés fabrication additive (Selective Laser Melting, Direct Metal Deposition, ...) a pris un essor remarquable ces dernières années. Dans l'objectif principal de maîtriser le bain fondu, les températures atteintes, les microstructures métallurgiques qu'elles engendrent, et finalement les contraintes et distorsions résiduelles qui en résultent, la simulation numérique de ces procédés s'est concomitamment développée.

Les phénomènes physiques sur lesquels reposent ces procédés sont en fait tout à fait similaires à ceux mis en jeu par le soudage. La simulation numérique de ces 2 types de procédé repose en effet sur la modélisation des phénomènes thermiques, métallurgiques, mécaniques et de leurs interactions. On retrouve ainsi des problématiques tout à fait similaires et c'est donc tout naturellement que la simulation des procédés de fabrication additive bénéficie des acquis des modèles et méthodes développés pour la simulation du soudage.

Le Laboratoire de Tribologie et Dynamique des Systèmes a développé une grande expérience de la simulation numérique du soudage en s'appuyant sur le logiciel SYSWELD d'ESI Group, l'un des tout premiers logiciels dédié à la simulation numérique du soudage. Les travaux conduits 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 tout en restant applicables dans un contexte industriel.

Si les modèles mis en place dès le milieu des années 1980 pour simuler les cinétiques des transformations métallurgiques et le comportement des aciers en cours de transformation de phase 1 ont fait depuis leur preuve quant à leur capacité de modéliser les évolutions de microstructure et les contraintes résiduelles, de nouvelles méthodologies et de nouvelles méthodes numériques sont régulièrement développées pour répondre aux besoins industriels de facilité, précision et robustesse des simulations.

Ainsi, la prédiction des distorsions induites par le soudage nécessite des modèles à l'échelle de la structure dans son ensemble. Une approche locale/globale qui consiste à évaluer la structure métallurgique et les déformations plastiques sur un modèle local puis à les injecter, comme des déformations initiales, dans un modèle global de la structure, évidemment beaucoup moins fin dans la zone soudée que le modèle local, a ainsi été proposée. Une technique de macro-élément a également été développée pour passer du modèle local (3D) à un modèle global réalisé en éléments de coque. Cette approche donne des résultats tout à fait satisfaisants et s'inscrit parfaitement dans une démarche de conception visant à déterminer la séquence de soudage ou les conditions de bridage optimales 2.

La recherche de nouvelles méthodes numériques efficaces est également un axe fort du laboratoire. Parmi ces méthodes, on pourra citer, par exemple, le développement d'une approche enthalpique pour la simulation des problèmes de thermique avec changement de phase 3. Plus récemment, dans le cadre de la chaire ESI Group – EC Nantes, une approche originale Vademecum-GFEM a été mise en place. La méthode consiste à calculer off-line un enrichissement du champ de température au voisinage de la source de chaleur en fonction de la température au loin de la source en utilisant la PGD (Proper Generalized Decomposition), puis d'appliquer cet enrichissement dans une approche GFEM pour la simulation (on-line) du soudage 4.

La facilité de maillage en tétraèdres de pièces complexes par des outils automatiques nous a naturellement conduit à développer ce type d'élément pour des applications de soudage. Un élément fini tétraédrique mixte de type déplacement-pression P1/P1 stabilisé a ainsi été proposé et validé 5. Une autre approche reposant sur une intégration nodale et une technique SCNI (Stabilized Conforming Numerical Integration) dont les principaux intérêts, outre les maillages en tétraèdres,

sont d'une part de travailler avec des degrés de liberté de même nature et d'autre part, de disposer de toutes les grandeurs mécaniques aux nœuds, a également été développée 6.

Enfin, le soudage comme la fabrication additive mettant en jeu des sources de chaleur mobile, de nouveaux algorithmes de résolution dans le référentiel lié à la source de chaleur ont été développés éventuellement combinés à l'approche nodale mentionnée précédemment 6.

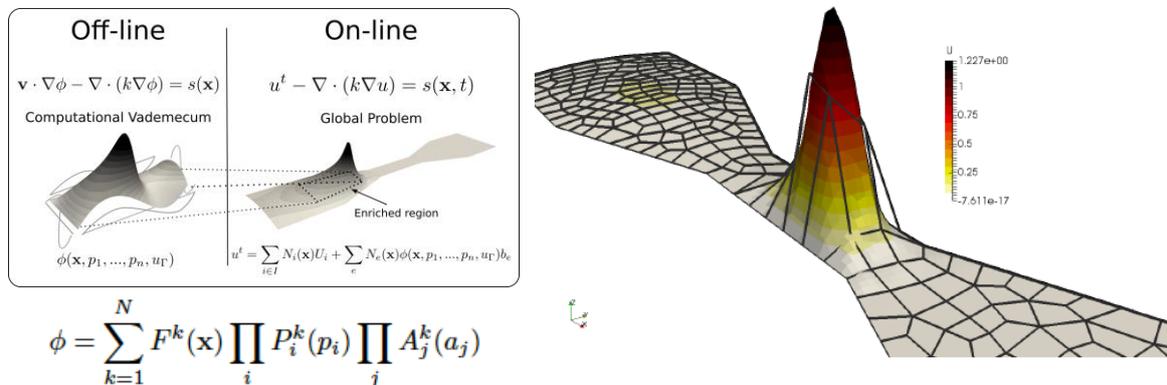


Figure 1 – Vademecum GFEM 4

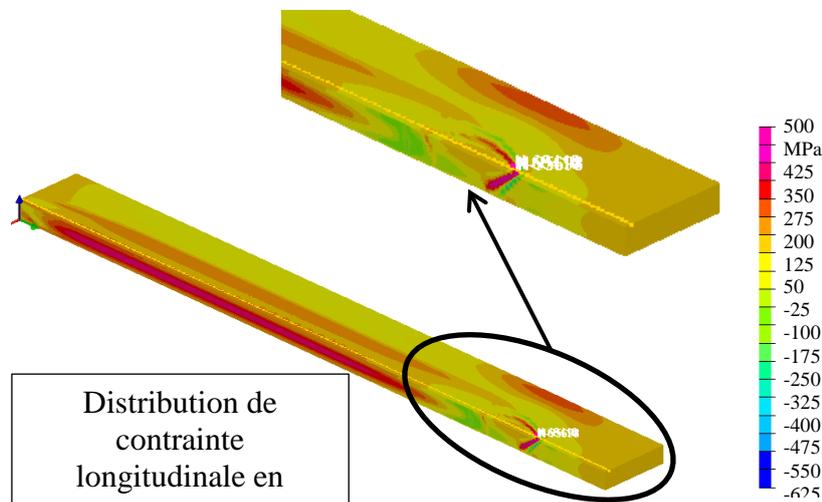


Figure 2 – Méthode nodale et calcul stationnaire

Références

1. Leblond J.B., Mottet G. & Devaux J.C., "A theoretical and numerical approach to the plastic behavior of steels during phase transformation, I : Derivation of general relations, II : Study of classical plasticity for ideal-plastic phases", *J. Mech. Phys. Solids*, **34**, 4, (1986), pp. 395-432.
2. Y. Duan, Y. Vincent, F. Boitout, J.B. Leblond, J.M. Bergheau, "Prediction of welding residual distortions of large structures using a local/global approach", *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 21, n°10, 2007, pp. 1700-1706.
3. E. Feulvarch, J.M. Bergheau, J.B. Leblond, « An implicit finite element algorithm for the simulation of diffusion with phase changes in solids », *Int. J. for Numer. Meth. In Engng*, n° 78, 2009, pp. 1492-1512.
4. D. Canales, A. Leygue, F. Chinesta, D. Gonzalez, E. Cueto, E. Feulvarch, J.-M. Bergheau, A. Huerta, « Vademecum-based GFEM (V-GFEM): Optimal Enrichment for transient problems », *Int. J. for Numer. Meth. In Engng.*, 2016, doi: 10.1002/nme.5240, Vol. 108, pp. 971-989.
5. E. Feulvarch, J.-C. Roux, J.-M. Bergheau, P. Gilles, "A stable P1/P1 finite element for finite strain von Mises elasto-plasticity", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2017, Vol. 324, pp. 537-545.
6. Bergheau J.-M., Leblond J.-B., 2017, A novel finite element method based on a nodal integration technique for nonlinear problems of solid mechanics , *XIV International Conference on Computational Plasticity. Fundamentals and Applications*, 05/09/2017 07/09/2017, Barcelone - Espagne.
7. Jia Y., Lacroix R., Roux J.-C., Feulvarch E., Bergheau J.-M., 2017, Numerical simulation of steady states associated with thermomechanical processes - Application to welding , *XIV International Conference on Computational Plasticity. Fundamentals and Applications*, 05/09/2017 - 07/09/2017, Barcelone.

Compréhension et simulation de l'interaction physique laser-matière en SLM et du jet de poudre en DMD.

M. Dal, P. Peyre, Y. Mayi, E. Ferreira

Morgan.DAL@ensam.eu

PIMM

Mots clefs : Simulation Numérique, Fabrication Directe, Fusion lit de poudre, Projection de poudre, laser.

La présentation porte sur les travaux actuels de simulation relatifs aux procédés de fabrication additive métallique et à leurs validations expérimentales. Les procédés de fusion de lit de poudre et de projection seront traités. Pour le premier, une attention particulière sera portée sur la zone fondue et son environnement proche. Seront présentés, par exemple, différentes méthodes de simulation de l'interface liquide – vapeur (figure 1), siège de phénomènes violents et encore mal maîtrisés. Les interactions entre les phénomènes de tension de superficielle, de fusion et de vaporisation, ainsi que les écoulements et les transferts de chaleur qui en résultent seront présentés. De plus, les simulations étant réalisées en considérant la poudre comme un milieu continu à propriétés équivalentes nous observerons les limites de ces modèles au regard de simulations locales particulières simplifiées.

Pour le second procédé, l'apport de matière et donc la partie jet de poudre sera étudiée en détail. Les effets des caractéristiques de la poudre, des écoulements gazeux ou encore du type de gaz de protection seront mis en avant (figure 2). Nous chercherons de cette manière à déterminer un apport de matière réaliste pour une simulation à l'échelle de la zone fondue.

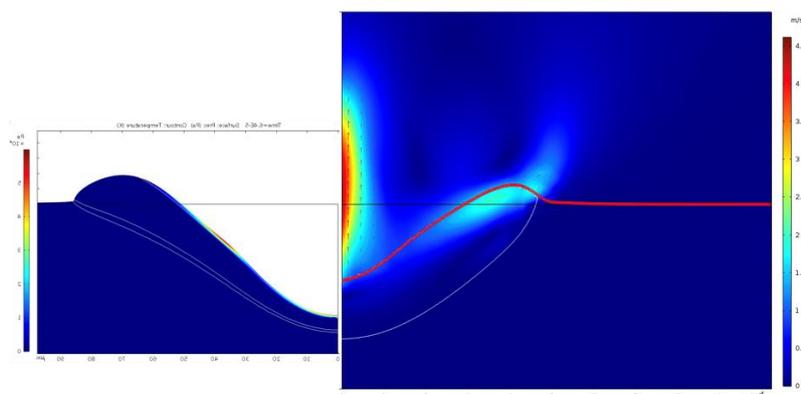


Figure 1 : Comparaison des méthodes de suivi d'interface appliquées à la fabrication additive.

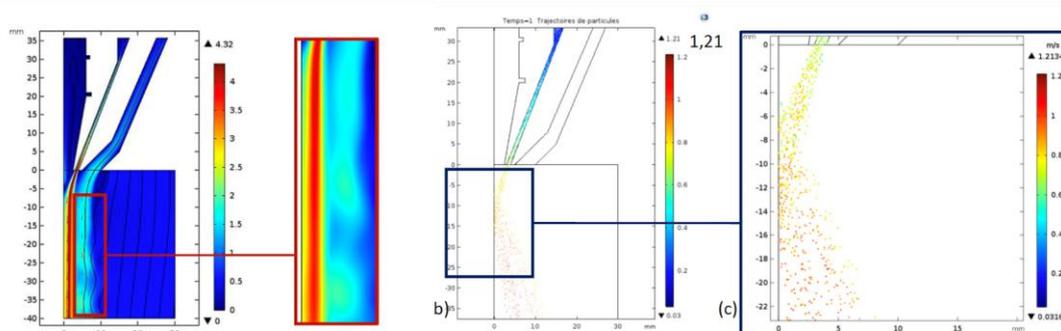


Figure 2 : Champs de vitesse du gaz et de la poudre simulés.

Simulation numérique de la fabrication additive par fusion de lit de poudre : aspects thermomécaniques

Q. Chen, Y. Zhang, **G. Guillemot**, Ch.-A. Gandin, M. Bellet

gildas.guillemot@mines-paristech.fr

CEMEF

Les procédés de fabrication additive par fusion de lit de poudre, basés sur l'approche LBM (Laser Beam Melting) ont connu, ces dernières années, un intérêt accru des milieux industriels et académiques. Ils offrent l'opportunité d'une réalisation directe, par un modèle CAO, de pièces de géométries complexes, suivie d'étapes de parachèvements limitées. Dans ce cadre, la durée du cycle conception / réalisation se trouve également fortement réduite. Ce procédé est, originellement, adapté à une large gamme de matériaux métalliques, couvrant les aciers, ainsi que les alliages d'aluminium, de titane ou de nickel, pour citer les applications les plus courantes. Plus récemment, le procédé LBM s'est également révélé adapté à la réalisation de pièces en céramiques oxydes, de tenue mécanique en service importante, ce qui constitue une voie prometteuse pour de futures applications dans le domaine aéronautique.

Néanmoins, lors du procédé, le développement de défauts est fréquemment constaté, dans le cadre du choix de paramètres non optimaux, lors des étapes de solidification ou de refroidissement. D'une part la formation de fissures, à l'échelle du cordon, est observée, due aux contraintes thermiques endurées. Des porosités sont, de même, observées lorsque la remontée du gaz piégé est trop limitée. La géométrie des cordons individuels peut, également, montrer des irrégularités d'aspect, conduisant, pour des vitesses de balayage élevées, au développement de domaines solides isolés. Enfin, la formation de cordons jointifs nécessite de définir une distance optimale entre passes et une trajectoire de balayage adaptée. A l'échelle spatiale supérieure, d'autres problématiques apparaissent. Ainsi, les dépôts successifs amènent à une accumulation de déformations et à des écarts géométriques. Enfin, des contraintes résiduelles importantes apparaissent, diminuant la tenue en service des pièces, ou obligeant à des traitements de détensionnement supplémentaires. Dans ce cadre, le CEMEF a développé récemment deux approches de simulation par méthode *level-set*, adaptées aux différentes échelles du procédé, et permettant d'investiguer l'évolution thermomécanique des pièces formées, dans l'objectif d'optimiser la conduite du procédé. Ces approches permettent d'étudier le procédé à différentes échelles temporelles et spatiales, en donnant accès aux informations pertinentes sur l'évolution des domaines solidifiés.

D'une part une approche multiphasée, à l'échelle du cordon, considérant la poudre comme un milieu continu, est proposée [1, 2, 4]. Elle permet de suivre l'interface matière / gaz, et l'évolution des phases formées. Dans ce cadre, une résolution thermique, dans une approche moyennée, est développée, intégrant une source volumique de Beer-Lambert. La résolution de l'équation de Navier-Stokes, en considérant les forces de tension de surface et de Marangoni permet, de même, de suivre les écoulements en surface et dans le bain, et de déterminer l'évolution du cordon autour de la *level-set* d'interface. Enfin, la résolution mécanique donne les champs de contrainte dans le cordon et son voisinage. Il devient ainsi possible d'estimer les risques de fissuration et l'intérêt d'une source de chaleur additionnelle. Ce modèle a permis de simuler le procédé LBM appliqué aux poudres d'alumine. La figure 1 montre, ainsi, l'évolution des écoulements en surface du bain pour une configuration de lasage donnée ($P_L = 84 \text{ W}$, $V_L = 200 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$) la direction des écoulements étant définie par la valeur appliquée du terme de Marangoni, et le gradient de température local.

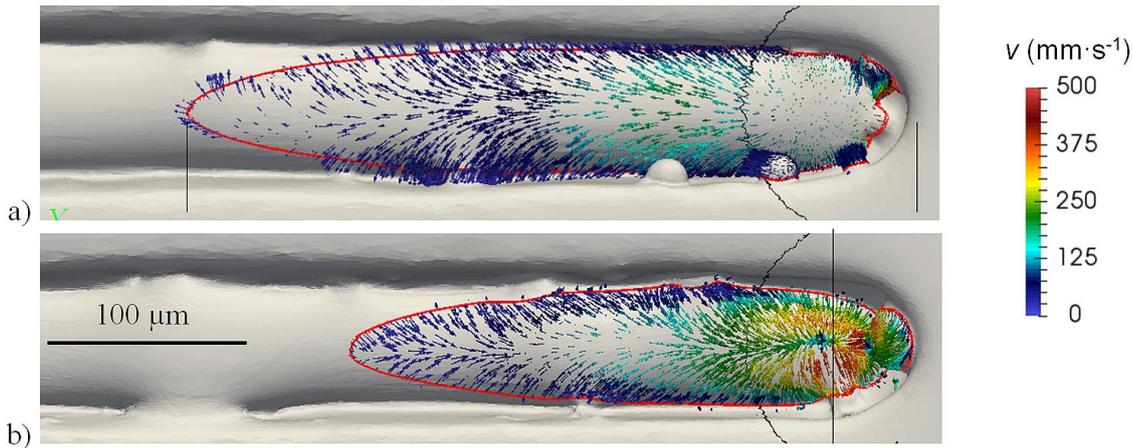


Fig. 1 : Fome du bain (contour rouge) et champ de vitesse surfacique pour deux valeurs du terme de Marangoni, $\partial\gamma / \partial T$, égaux à : a) $-8.2 \times 10^{-5} \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ (référence) et b) $+48 \times 10^{-5} \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ (modifiée)

Dans ce même cadre de résolution, la figure 2 montre le champ de contraintes stabilisé, après 8 ms de lasage ($P_L = 84 \text{ W}$, $V_L = 300 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$). On retrouve des contraintes compressives, dans le substrat, sous le laser, dues à l'expansion thermique. Des contraintes de traction élevées, propices à une éventuelle rupture, apparaissent dans la zone solide, après refroidissement.

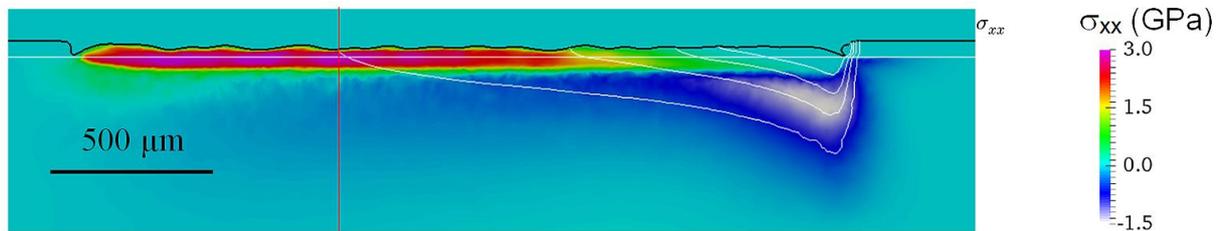


Fig. 2 : Evolution des contraintes dans la direction longitudinale, sur la longueur totale lasée. Les isothermes associées à $T = 500, 1000$ et 1500 et 2004 °C , sont illustrées (lignes blanches).

Une seconde méthode de résolution, à l'échelle macroscopique, est proposée également, basée sur un modèle en dépôt d'énergie [3, 4]. Dans cette approche, plusieurs fractions de couche sont déposées successivement et seules les résolutions thermiques et mécaniques solide sont appliquées, à l'échelle de la pièce en cours de réalisation. Cette approche offre néanmoins un compromis très intéressant entre la précision de simulation et le temps de calcul pour étudier une pièce complète. Elle a ainsi été appliquée, avec succès, à la simulation de l'élaboration d'une turbine en alliage base IN718 comme présenté en figure 3.

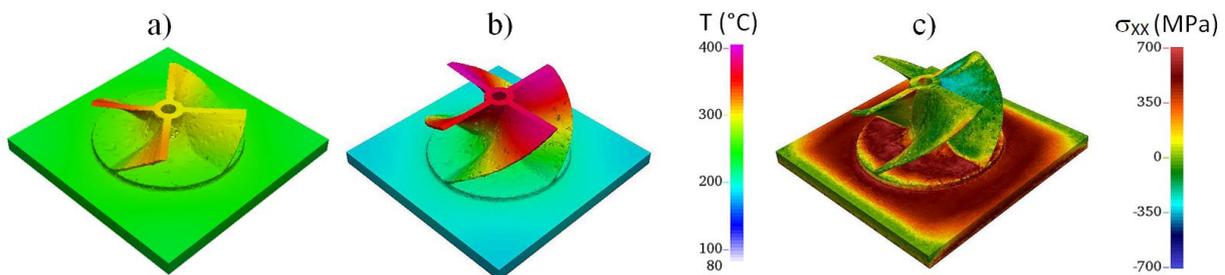


Fig. 3 : Champ thermique après a) 27 couches et b) 50 couches. c) Contraintes mécaniques résiduelles après refroidissement dans la pièce et le substrat (diamètre de base 30 mm et hauteur 10 mm)

Références

1. Q. Chen, G. Guillemot, Ch.-A. Gandin, M. Bellet, Addit. Manuf. 16 (2017) 124 – 137
2. Q. Chen, G. Guillemot, Ch.-A. Gandin, M. Bellet, Addit. Manuf. 21 (2018) 713 – 723
3. Y. Zhang, G. Guillemot, M. Bernacki, M. Bellet, Comput. Methods. Appl. Mech. Eng. 331 (2018) 514 – 535
4. Y. Zhang, Q. Chen, G. Guillemot, Ch.-A. Gandin, M. Bellet, CRAS, Computational Methods in Welding and Additive Manufacturing, En cours de publication

Additive Manufacturing : Microstructures, Structures and Properties

Eric Charkaluk

eric.charkaluk@polytechnique.edu

Laboratoire de Mécanique des Solides CNRS

With the fast development of additive manufacturing processes for metallic materials - powder bed or direct powder projection with laser or electron beam energy sources, for instance – the question of the optimal structure design can now be freely addressed, as practically all seems possible to manufacture. The next question is then: optimal regarding what? One of the important questions which has to be addressed is the durability of these structures regarding, for example, fatigue and/or fracture phenomena, as these structures will be used in many industrial domains (energy, aeronautics, aerospace, ground transportation...).

Here, the specificity and/or the common features of materials coming from such new additive manufacturing processes will be compared to more classical one, like casting process. Fatigue properties of Ti-6Al-4V specimens built by EBM and SLM are compared. Several parameters are assessed: processes, manufacturing direction, surface roughness, HIP treatment. Fatigue properties are analysed in relation with the crack initiation mechanisms identified on each specimen's post-mortem micrographs [1]. The results described in Figure 1 show that machined specimens conduct to better fatigue properties as surface defects are removed. HIP treatment improves fatigue properties by decreasing the defects size. Small differences in lifetime are observed between horizontal and vertical building directions because of different defect shapes regarding the loading axis. Finally, EBM and SLM parts have approximately the same fatigue properties, which are equivalent to conventional casting processes.

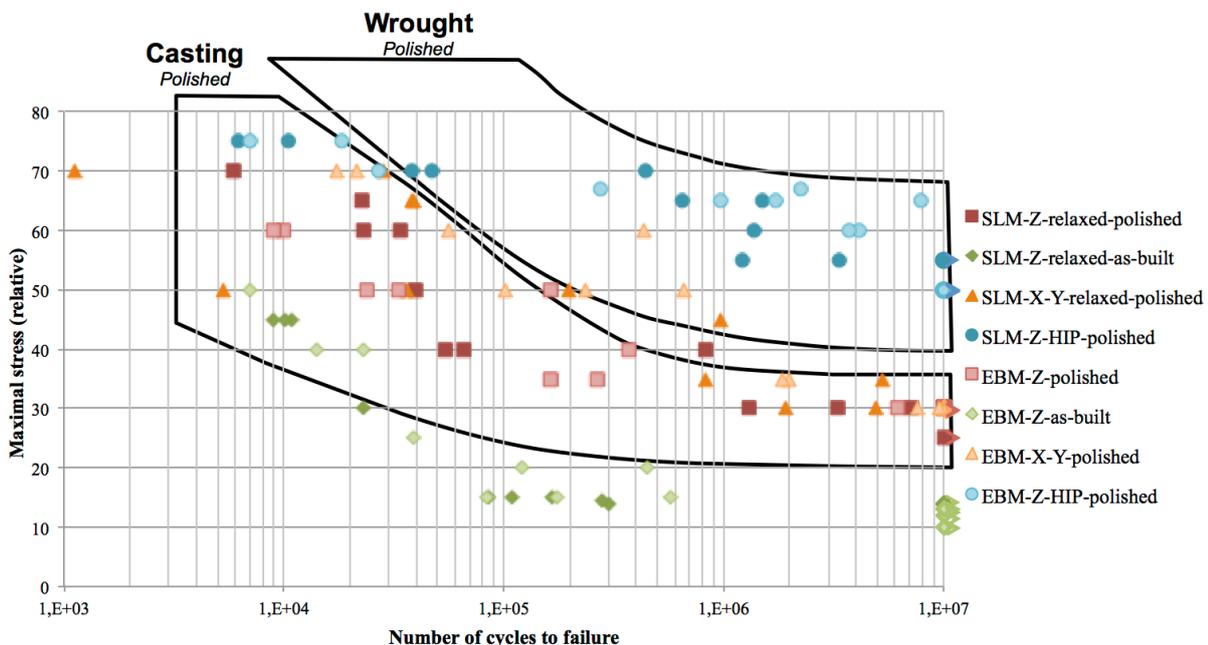


Figure 1: comparison of fatigue lifetime obtained for both SLM and EBM processes with more classical casting and wrought processes

But even if the complete damage process is not described, the interesting point is to study the type of defect conducting to crack initiation. Then, at the microstructure scale, it is shown that surface defects and unmelted zones seem to be the dominant features as shown on Figure 2.

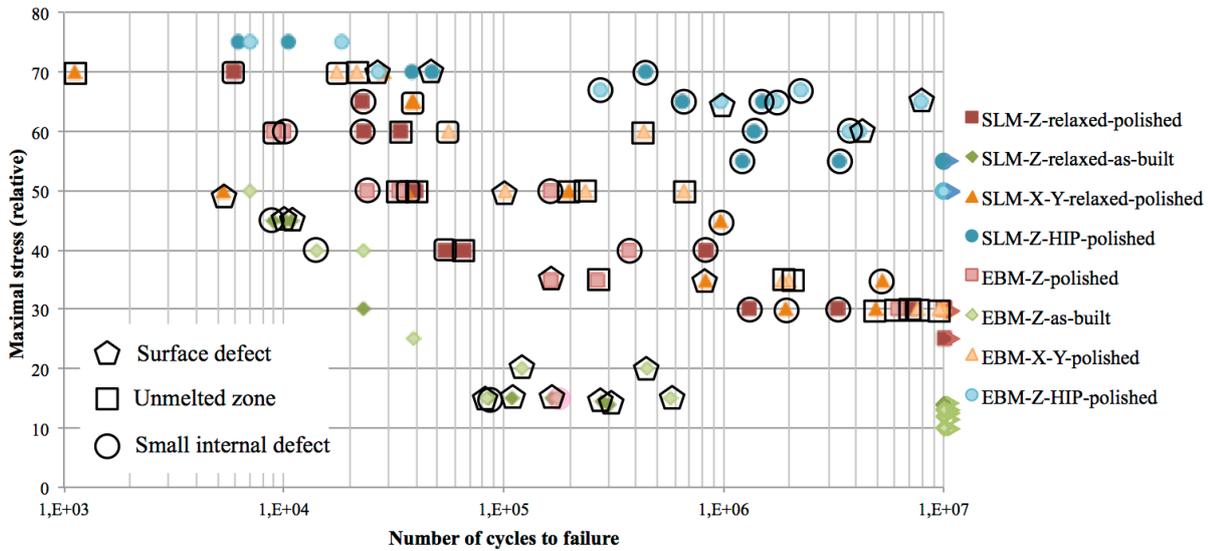


Figure 2: influence of the defects on the lifetimes obtained for both EBM and SLM processes.

As this type of defect is close to casting ones, these fatigue crack initiation processes then compared and discussed with the ones identified in specimens obtained from casting processes [2,3]. In these previous studies, the main interest was the possibility to observe, qualify and quantify on in-situ tests, the three dimensional mechanisms responsible of the crack initiation and the microcrack growth. Then, it will be shown that similarities can be drawn.

Références

1. V. Chastand, P. Quaegebeur, W. Maia, E. Charkaluk, Comparative study of fatigue properties of Ti-6Al-4V specimens built by electron beam melting (EBM) and selective laser melting (SLM). *Mat. Char.*, 2018. *Accepté.*
2. L. Wang, N. Limodin, A. El Bartali, J-F. Witz, R. Seghir, J-Y. Buffière, and E. Charkaluk. Influence of pores on crack initiation in monotonic tensile and cyclic loadings in lost foam casting A319 alloy by using 3D in-situ analysis. *Mat. Sci. Engng. A*, 673 :362–372, 2016.
3. N. Dahdah, N. Limodin, A. El Bartali, J-F. Witz, R. Seghir, E. Charkaluk, and J-Y. Buffière. Damage investigation in A319 aluminium alloy by X-Ray tomography and digital volume correlation during in situ high temperature fatigue tests. *Strain*, 52(4), pp. 324–335, 2016.

Modélisation multiphysique d'un procédé de fabrication additive arc-fil

Muriel Carin¹, Stephen Cadiou¹, Mickael Courtois¹, Philippe Le Masson¹,
Lauriane Guilmois^{1,2,3}, Pascal Paillard²

muriel.carin@univ-ubs.fr

¹Univ. Bretagne Sud, UMR CNRS 6027, IRDL, F-56100 Lorient

²Institut des Matériaux Jean Rouxel (IMN), Univ. Nantes, UMR CNRS 6502, F-44000 Nantes

³IRT Jules Vernes, Chemin du Chaffault, F-44340 Bouguenais

De nos jours, les industries telle que l'automobile ou l'aérospatiale sont à la recherche de nouvelles technologies permettant la fabrication de pièces métalliques de grandes dimensions et de géométrie complexe à haute intégrité structurale, et pouvant être directement utilisées dans les systèmes opérationnels. Ces dernières années, un intérêt croissant a donc été porté sur la fabrication additive arc-fil qui représente un des procédés de fabrication additive les plus efficaces en termes de taux de dépôt (2-10 kg/h [1]) et permet la construction de pièces de grandes dimensions, pouvant faire plusieurs mètres d'envergure [2]. Ce procédé, basé sur des technologies de soudage classique pour les matériaux métalliques (TIG, MIG, CMT, ...), consiste à utiliser un arc électrique pour fondre la matière apportée sous forme de fil. La pièce est alors construite couche par couche. Au cours de la fabrication de la pièce, la matière subit néanmoins des cycles thermiques très complexes, influençant sa microstructure et générant des contraintes résiduelles pouvant affecter les propriétés mécaniques finales de la pièce [3]. La simulation numérique peut se révéler un outil performant pour prédire les cycles thermiques et étudier les différentes stratégies de construction afin de minimiser ces défauts.

En raison des temps de calcul, les phénomènes physiques responsables du transfert de chaleur et de masse entre l'arc et la pièce sont souvent représentés dans la littérature par des termes sources simplifiés, utilisant par exemple le modèle classique proposé par Goldak [4, 5]. Des techniques de type activation/désactivation d'éléments sont alors utilisées pour simuler le dépôt de matière et prédire par la suite les contraintes et déformations [4, 5]. Dans ces approches, des données expérimentales sont nécessaires pour caler les paramètres des termes sources et connaître la forme du dépôt, qui sera supposée connue dans le modèle.

Dans le cadre de ce travail, notre objectif est de développer un modèle prédictif de fabrication additive arc-fil permettant de calculer les champs de température et la forme du dépôt au cours de la construction de la pièce couche par couche. Une première étape a été de développer un modèle d'arc 2D axisymétrique permettant de résoudre les équations de Maxwell, couplées avec les équations de la chaleur et de la mécanique des fluides afin de calculer les champs de températures, les champs de vitesse et de pression au sein de l'arc et du bain liquide. Pour ce modèle réalisé à l'aide du code COMSOL Multiphysics®, l'apport de matière n'est pas pris en compte. La figure N 1 illustre un champ de température et de vecteur vitesse, obtenu pour une intensité de 150 A. Ce modèle est validé en comparant les résultats obtenus pour le cas d'une électrode en tungstène (principe du soudage TIG) avec ceux donnés dans la littérature (Fig. 2).

Ce modèle 2D axisymétrique a ensuite été étendu afin de prendre en compte l'apport de matière. La méthode Level Set a été retenue afin de pouvoir simuler la chute des gouttes de métal dans le bain fondu. En vue de réduire les temps de calcul, la chaleur transmise par l'arc est modélisée à l'aide de termes sources calculés à partir du modèle complet d'arc et appliqués à l'interface plasma/bain de fusion. Les résultats du modèle sont comparés à des expérimentations menées à l'IMN, consistant à construire des barreaux cylindriques à l'aide d'un poste de soudage MIG CMT Fronius. Le fil d'apport est un acier de type 308 LSi de 1 mm de diamètre. Un débit d'argon pur de 14 L/min est utilisé. Des essais en mode CMT et pulsé ont été réalisés. La figure N 3 montre les barreaux réalisés en MIG pulsé avec un temps de pause variant de 11 à 95 s pour réaliser les 17 passes. Durant les essais, des films obtenus par caméra rapide et caméra thermique sont

enregistrés. La figure N 4 montre un exemple de simulation obtenue reproduisant une passe (Fig. 3). Pour ce modèle, le temps de chauffage est de 3 s avec un apport de 49 gouttes prédéfinies (température initiale de 2100 K, diamètre de 1,2 mm).

Il est ensuite envisagé de poursuivre ces développements en étendant le modèle à une configuration 3D permettant de simuler les champs de température et la construction du dépôt en fonction des paramètres opératoires.

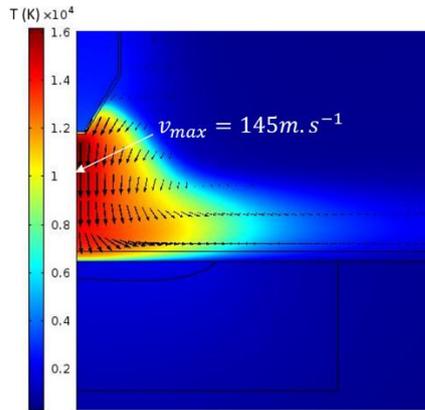


Fig 1 : Champ de température et vecteur vitesse obtenus avec le modèle d'arc plasma

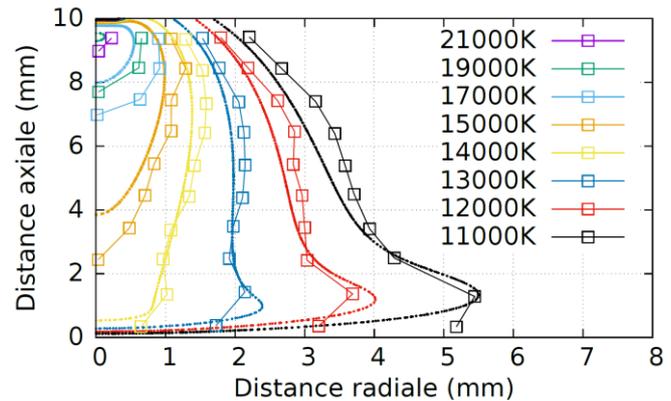


Fig 2 : Comparaison entre les isothermes calculées par notre modèle (trait pointillé) et les mesures de [6] (marqueur carré)

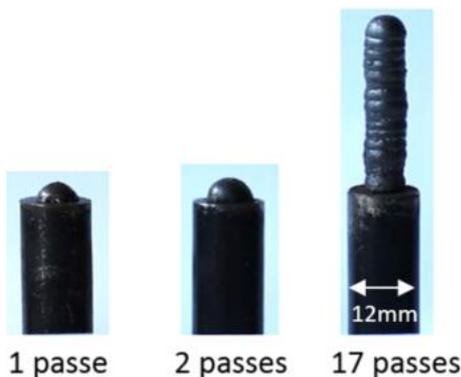


Fig 3 : Exemples de barreaux obtenus avec de l'acier 308LSi en procédé pulsé

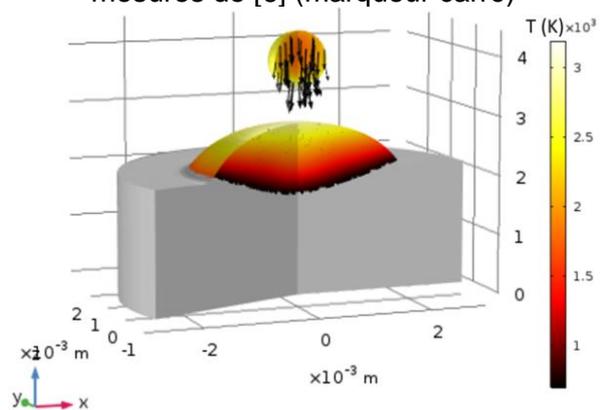


Fig 4 : Simulation 2D axisymétrique de la construction d'un barreau

Références

1. Ding, D., Pan, Z., Cuiuri, D., & Li, H. (2015). Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 81(1-4), 465-481.
2. Ding, D., Pan, Z., Cuiuri, D., & Li, H. (2015). A multi-bead overlapping model for robotic wire and arc additive manufacturing (WAAM). *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 31, 101-110.
3. Szost, B. A., Terzi, S., Martina, F., Boisselier, D., Prytuliak, A., Pirling, T., Hofmann, M., & Jarvis, D. J. (2016). A comparative study of additive manufacturing techniques: Residual stress and microstructural analysis of CLAD and WAAM printed Ti-6Al-4V components. *Materials & Design*, 89, 559-567.
4. Montevecchi, F., Venturini, G., Scippa, A., & Campatelli, G. (2016). Finite Element Modelling of Wire-arc-additive-manufacturing Process. *Procedia CIRP*, 55, 109-114
5. Anca, A., Fachinotti, V. D., Escobar-Palafox, G., & Cardona, A. (2011). Computational modelling of shaped metal deposition. *International journal for numerical methods in engineering*, 85(1), 84-106.
6. Hsu, K. C., Etemadi, K., & Pfender, E. (1983). Study of the free-burning high-intensity argon arc. *Journal of applied physics*, 54(3), 1293-1301

Réduction de modèle pour l'évaluation des contraintes internes et déformations résiduelles des pièces issues de fabrication additive

B. Bognet¹, O. Desmaison²
brice.bognet@ec-nantes.fr

¹GEM, ECN

²ESI Group

Introduction

La fabrication additive et les procédés de soudage génèrent un certain nombre de défis pour la simulation. En effet, des comportements multiphysiques très locaux et fortement non-linéaires ont des influences importantes sur la réponse globale de la pièce. De plus la physique de ces procédés est fortement transitoire, nécessitant en plus d'une discrétisation spatiale fine, un nombre de pas de temps important, et possiblement des remaillages au cours du temps. Ces contraintes induisent un temps de calcul élevé et limite grandement les possibilités de simulation de tels procédés.

Le procédé de fabrication couche par couche impose un maillage suffisamment fin dans l'épaisseur pour représenter chaque couche (couches de 50 à 100µm d'épaisseur) et le grand nombre de couches nécessaire pour réaliser la pièce induit un nombre de pas de temps important. Une méthode de résolution par éléments finis traditionnelle impose donc un maillage fin et un grand nombre de pas de temps, conduisant à un temps de calcul élevé voir prohibitif [3].

La stratégie présentée ici repose sur une simplification de la physique combinée à une approche de séparation des variables. La physique prise en compte dans le modèle se réduit à un chargement thermoélastique équivalent pour chaque nouvelle couche ajoutée, combinée avec un modèle de matériau élasto-plastique. La séparation de variables permet de représenter la géométrie comme une somme de problèmes 3D définis sur chaque couche. La stratégie de résolution basée sur la PGD (Proper Generalized Decomposition [1]) permet de calculer la solution sous forme de produits de fonctions d'espace et de fonctions de numéro de couche.

Décomposition du problème 3D/1D

Contraire aux méthodes de décomposition de domaines classiques [2] distribuant les degrés de libertés du modèle dans des sous-domaines, la méthode proposée ici se base sur la similarité du volume de construction de chaque couche et n'utilise qu'un sous-domaine discrétisé représentant l'ensemble des couches. Une dimension supplémentaire représentant le numéro de la couche dans le modèle permet de reconstruire l'ensemble du volume. Chaque couche étant différente, une fonction présence matière différente lui est associée. Finalement, le domaine peut être reconstruit sous la forme suivante :

$$\Omega(X, Y, Z) = \sum_{i=0}^N (\Omega(x, y, z) \cdot f(x, y)_i + i \cdot e),$$

où (X,Y,Z) sont les coordonnées globales, N le nombre de couches, $\Omega(x,y,z)$ le volume de construction d'une couche, $f(x,y)_i$ la fonction de présence matière de la couche i et e l'épaisseur d'une couche. La couche 0 représente la plaque support.

De manière similaire, le champ de déplacement s'écrit :

$$\mathbf{U}(x, y, z, n) = \sum_{i=1}^N \mathbf{U}_{(xyz)}(x, y, z) \circ \mathbf{U}_{(n)}(n),$$

où n est le numéro de la couche.

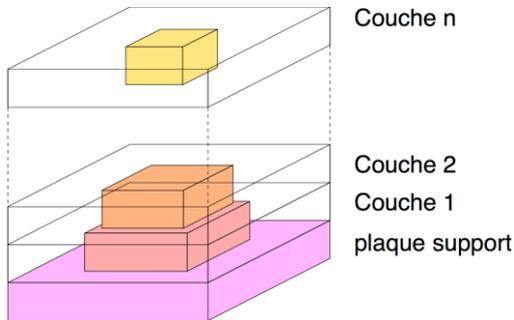


Figure 1 – Domain duplication

Les couches sont ajoutées itérativement en agrandissant le problème dans la coordonnée n . Pour la dépose de la première couche, le domaine en n se compose de 2 nœuds associés respectivement à la plaque support, et la première couche déposée (voir figure 1). La plaque support a une fonction indicatrice matière $f(x,y) \neq 0$ vraie sur tout le domaine de construction $\Omega(x, y, z)$.

Au fur et à mesure que les couches sont ajoutées, le problème en n est agrandi d'un nœud supplémentaire et un calcul non-linéaire est effectué pour obtenir la déformation et l'état de contrainte élasto-plastique dans la pièce après l'ajout de la couche concernée.

Conclusion

Le fait que le volume de construction de chaque couche est identique permet ici de résoudre le problème en utilisant une représentation en variables séparée. L'avantage de l'utilisation de la représentation séparée est double : il permet de réduire le nombre de degrés de liberté du problème car seul le volume de construction d'une couche est maillé en 3D. De plus les fonctions spatiales en (x, y, z) calculées sont conservées pour les ajouts de couches suivants et sont utilisées comme base de projection pour la solution avant de l'enrichir d'avantage avec d'éventuelles nouvelles fonctions, contribuant également à réduire le temps de calcul.

Références

1. A Ammar, B Mokdad, F Chinesta, and R Keunings. A new family of solvers for some classes of multidimensional partial differential equations encountered in kinetic theory modelling of complex fluids - Part II : Transient simulation using space-time separated representations. *Journal Of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 144(2-3) :98–121, 2007.
2. Pierre Gosselet and Christian Rey. Non-overlapping domain decomposition methods in structural mechanics. *Archives of computational methods in engineering*, 13(July 2005) :515–572, 2006.
3. Andreas Malmelöv, Andreas Lundbäck, and Lars-Erik Lindgren. Simulation for Additive Manufacturing Validation of an approach to reduce simulation time for additive manufacturing. (October) :11–12, 2017.

Simulation thermomécanique à l'échelle de la pièce, quelles perspectives pour la Fabrication Additive ?

Olivier Desmaison, Pierre-Adrien Pires

Olivier.Desmaison@esi-group.com

ESI Group

Plusieurs analyses du marché ont démontré que la demande pour la simulation des procédés de fabrication additive était double. D'un côté, les ingénieurs production qui conçoivent et fabriquent des pièces métalliques ont besoin de s'assurer de la bonne fabricabilité de leurs pièces et du respect de ses cotations dimensionnelles. D'un autre, en amont de la phase de production, les ingénieurs procédés ont besoin de qualifier la paramétrisation machine qui permette de garantir les caractéristiques mécaniques des pièces fabriquées. Pour répondre à chacun de ces besoins, une échelle de simulation prédomine, souvent choisie afin de répondre à des contraintes de temps de calcul mais aussi imposée par la physique à modéliser. Ainsi l'échelle macroscopique (échelle du composant) est usuellement utilisée pour l'analyse de la fabricabilité, tandis que la santé matière dans la pièce est étudiée à l'échelle microscopique (échelle de la poudre ou du bain de fusion).

Une des complexités dans la maîtrise du procédé de fabrication par fusion de lits de poudre réside dans la forte influence de la stratégie de lasage sur la distorsion de la pièce et sur sa métallurgie finale. Pour pouvoir modéliser ce couplage, des modèles numériques ont été développés à partir d'approches locale/globale thermomécaniques qui devaient pouvoir répondre à la double demande du marché. Ainsi, le couplage de plusieurs modèles permettrait de passer d'une simulation des écoulements dans un bain de fusion, conséquence de la fusion de quelques particules de poudre, à la calibration d'une source de chaleur volumique équivalente se déplaçant sur quelques millimètres, à la quantification d'un cycle thermique à appliquer à une couche complète de poudre pour enfin déterminer l'évolution de la température dans la pièce en fabrication. Les écarts d'échelles spatio-temporelles entre les différents modèles doivent alors être maîtrisés et les hypothèses simplificatrices justifiables pour assurer une certaine consistance dans ce chainage numérique. A cela s'ajoute une démarche similaire menée dans le but de calculer les déformations intrinsèques de la pièce confrontée à son propre chargement thermique. L'analyse de la fabricabilité d'une pièce dans un temps industriellement admissible n'est alors plus envisageable à partir d'un tel couplage séquentiel de modèles.

La méthode qui prédomine aujourd'hui chez les éditeurs de logiciels pour prédire les déformations d'une pièce lors de sa fabrication est la méthode dite « Shrinkage ». Elle est l'image de la rétraction thermique dans la pièce induite par le refroidissement des cordons fusionnés au fur et à mesure de la fabrication. Un chargement en déformation est alors appliqué à un ensemble d'éléments (constituant une couche) pour rendre compte de ce « shrinkage ». Cette méthode présente l'avantage de pouvoir prédire rapidement et simplement la déformation d'une pièce en fabrication sans devoir réaliser une analyse thermomécanique longue et fastidieuse. Deux approches existent alors pour calibrer ce chargement :

- Une approche dite expérimentale nécessitant la fabrication d'une éprouvette qui se déforme fortement une fois découpée du plateau. Une analyse inverse permet alors de définir le tenseur de déformation qui, utilisé dans une simulation, permet de retranscrire indirectement la combinaison de l'ensemble des paramètres procédés propre à ce cas. Pour autant, la nécessité de réaliser une nouvelle éprouvette pour chaque jeu de paramètres est contraignante et l'extrapolation du comportement observé sur l'éprouvette à celui attendu dans la pièce est d'autant moins juste que les deux géométries diffèrent dimensionnellement.

- Une approche dite macro-thermique qui s'appuie sur l'analyse de l'énergie globale apportée dans la pièce pour prédire son histoire thermique. Ce modèle permet alors d'adapter le chargement thermomécanique appliqué couche après couche au modèle en combinant les effets des paramètres procédé sur les transferts d'énergie dans la pièce et l'influence de la géométrie pour une meilleure prédiction de la fabricabilité de la pièce.

Les deux approches ont été testées à partir de la solution ESI AM et appliquées à la simulation de pièces industrielles dans le cadre du projet SOFIA (voir figure ci-dessous). Les observations et conclusions liées à cette étude seront présentées lors de la journée de la Simulation Numérique du Soudage 2018.

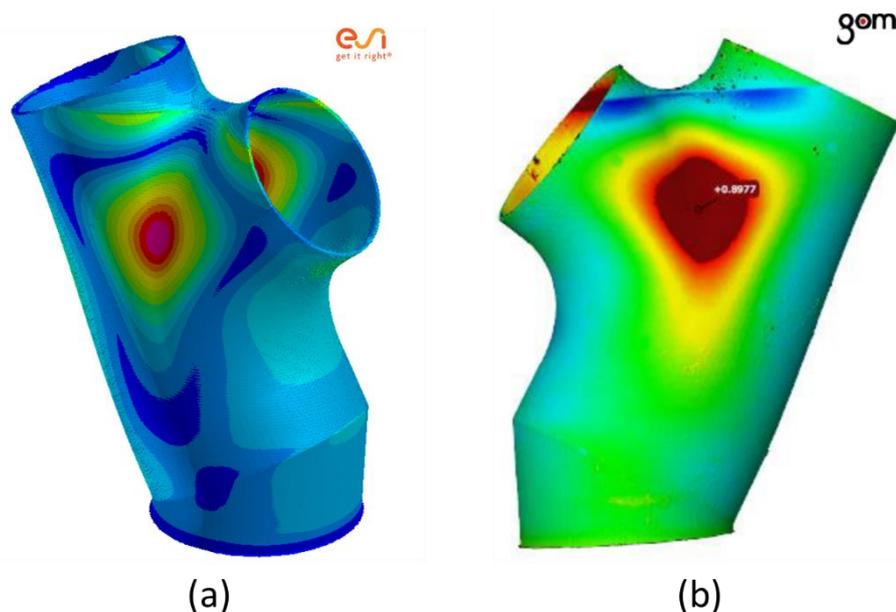


Figure 6: Tubulure fabriquée dans le cadre du projet SOFIA (AddUp – Zodiac): (a) Résultat de la simulation numérique, champ de distorsion de la pièce, (b) Mesures expérimentales de déviations par rapport à la géométrie initiale.

Modes dynamiques de soudage pour l'hyper-réduction de simulations hors d'atteintes

Pablo Pereira Alvarez¹, David Ryckelynck¹, Tuan Dinh Trong², Mickael Abbas², Sofiane Hendili², Josselin Delmas²

david.ryckelynck@mines-paristech.fr

¹Mines ParisTech

²EDF

En contexte industriel, la simulation du soudage multipasse est bien souvent hors d'atteinte. C'est à dire qu'il est difficile d'aller au bout des simulations, faute de temps ou de moyen de calcul disponible. L'objectif de ce travail est d'utiliser un modèle hyper-réduit pour calculer plusieurs cordons sans jamais réaliser jusqu'au bout la simulation par éléments finis qui est souhaitée.

Le problème cible possède M cordons de soudure similaires et parallèles. Nous nous intéressons à la simulation simplifiée des cordons de soudure, après avoir réalisé la simulation de $m < M$ premiers cordons par la méthode des éléments finis. Le modèle hyper-réduit proposé est construit progressivement afin de tenir compte de l'effet thermomécanique des cordons ajoutés. Il est actualisé au début de la simulation simplifiée de chaque nouveau cordon.

Les données issues de la simulation des cordons 1 à m sont représentées par les vecteurs $(\mathbf{v}_k)_{k=1}^m$, où $\mathbf{v}_k \in \mathbb{R}^N n_t$ avec N nombre de degrés de liberté du maillage complet et n_t nombre de pas de temps dans la simulation d'un cordon. Nous soulignons qu'il s'agit bien d'un vecteur. Dans le cas du soudage, \mathbf{v}_k contient les valeurs nodales des températures, ou des déplacements, ou des contraintes, pour tous les instants de la simulation d'un cordon. En exploitant la méthode des modes dynamiques [1], on cherche une relation de récurrence linéaire de la forme :

$$[\mathbf{v}_2, \dots, \mathbf{v}_m] = [\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_{m-1}] \mathbf{S} + \mathbf{r}^m, \quad \|\mathbf{r}^m\| < \varepsilon_{tol}$$

où ε_{tol} est supposé négligeable. On note $\mathbf{V}^{(a,b)} = [\mathbf{v}_a, \dots, \mathbf{v}_b]$, pour $b > a$. La méthode des modes dynamiques procède en deux étapes :

- réaliser une décomposition en valeurs singulières, tronquée, de $\mathbf{V}^{(1, m-1)}$:

$$\mathbf{V}^{(1, m-1)} = \mathbf{U} \mathbf{\Sigma} \mathbf{W}^T$$

- projeter les données contenues dans $\mathbf{V}^{(2, m)}$:

$$\mathbf{s} = \mathbf{U}^T \mathbf{V}^{(2, m)} \mathbf{W} \mathbf{\Sigma}^{-1}$$

Connaissant \mathbf{S} on peut obtenir une prévision de $\mathbf{V}^{(3, m+1)}$ par extrapolation :

$$\mathbf{V}^{(3, m+1)} \approx \mathbf{V}^{(2, m)} \mathbf{S}$$

Or la dernière colonne de la prévision de $\mathbf{V}^{(3, m+1)}$ contient une prévision de \mathbf{v}_{m+1} sans résoudre d'équations aux éléments finis. Dans le cas qui nous intéresse, il s'agit d'une prévision de la simulation du soudage du cordon $m + 1$, sur tout le maillage et pour toute la durée de la simulation du cordon. Ce vecteur est réorganisé sous la forme d'une matrice de $\mathbb{R}^N \times n_t$, pour obtenir une matrice de n_t champs représentés par leurs valeurs nodales et un maillage. On applique alors la méthode POD sur ces données pour en extraire une base réduite notée $\mathbf{A}^{(u, m+1)}$ pour les déplacements. On procède de même pour les contraintes afin d'obtenir une base réduite de contraintes notée $\mathbf{A}^{(\sigma, m+1)}$. Puis on déroule la méthode d'hyper-réduction classique [2] ou hybride [3] à partir de ces deux bases réduites. Ici, en pratique, la méthode hybride consiste à activer une étape de correction de type éléments finis dans le maillage réduit produit par la méthode d'hyper-

réduction. Ces deux méthodes sont disponibles dans *Code_Aster* et dans *Zset*. Notons que l'étape de construction des modes dynamiques est non intrusive. Elle a été réalisée ici en langage Python.

Pour pouvoir poursuivre la procédure d'extrapolation des prévisions par des modes dynamiques, pour simuler le cordon $m + p$ avec $p > 1$, nous devons étendre les températures, les déplacements et les contraintes calculés par hyper-réduction hybride à l'ensemble du domaine. Nous exploitons pour cela la méthode Gappy POD [4]. Ainsi nous pouvons simuler M cordons en exploitant $m < M$ simulations par éléments finis et $M - m$ simulations simplifiées par hyper-réduction hybride.

Comme exemple d'application, nous avons choisi de modéliser une plaque carrée de côté 100 mm et de 20 mm d'épaisseur. Sur la surface supérieure de cette plaque, nous allons réaliser 10 passes de soudage. Pour chaque cordon, on a deux mailles en largeur, une maille sur l'épaisseur et la longueur est maillée de manière conforme avec la plaque. Nous obtenons un maillage de 28996 nœuds au total.



Prévisions des contraintes du cordon $m + 1$ ($m = 4$) : à gauche par les modes dynamiques, à droite par éléments finis.

Le speed up du calcul mécanique sur le modèle hyper-réduit (sans correction par éléments finis) est de 8, tandis que le speed up du calcul sur le modèle hybride est de 4. Les erreurs de prévision des contraintes pour deux types de modèles hyper-réduits sont de : 44% pour l'approche classique et de 9% pour l'approche hybride.

En conclusion ces résultats sont prometteurs car ils ont été obtenus sur un problème de petite taille, avec peu d'inconnues et peu de cordon à simuler. L'hyper-réduction devrait conduire à de plus grandes réductions de temps de calcul sur des modèles de plus grande taille, sans altérer la précision des prévisions des contraintes. Il y a néanmoins une accumulation des erreurs. Un grand nombre de cordons simulés requière des modes dynamiques précis.

Références

1. PETER J. SCHMID. Dynamic mode decomposition of numerical and experimental data. *Journal of Fluid Mechanics*, 656 :5–28, 2010.
2. D. RYCKELYNCK. A priori hyperreduction method: an adaptive approach. *Journal of Computational Physics*, 202(1) :346 – 366, 2005.
3. J. BAIGES, R. CODINA AND S. IDELSON. A domain decomposition strategy for reduced order models : application to the incompressible NAVIER-STOKES equations. *Comput. Methods Appl. Mech. Engng.*, 267 :23–42, 2013.
4. D. RYCKELYNCK, K. LAMPOH AND S. QUILICI. Hyperreduced predictions for lifetime assessment of elasto- plastic structures. *Meccanica*, 51(2) :309–317, 2016.

Organisateurs

Olivier ASSERIN (CEA)

Carl LABERGÈRE (UTT)

Vincent ROBIN (EDF)

Josselin DELMAS (EDF)



Journée SNS – CFV

« Synergies de Simulation entre Fabrication Additive et Soudage : nouveaux défis »

26 juin 2018 – EDF Laboratoire Paris-Saclay