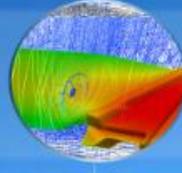
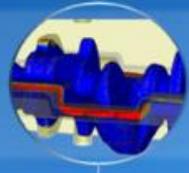


Colloque National Aussois 2024

Simulation & instrumentation des Procédés de Fabrication



22-26 Janvier

Mécamat

Recueil des Résumés

Colloque National MÉCAMAT
Simulation et instrumentation des procédés
d'élaboration et de fabrication

22-26 Janvier 2024

Aussois (Savoie) FRANCE

<https://aussois2024.sciencesconf.org/>

(version provisoire 14/01/2024)

Table des matières

Programme	4
Prix Poster Ada Lovelace	8
Cours	9
Approches thermodynamiques des transformations de phases 1 – diffusives, Charles-André Gandin	10
Méthodes numériques pour la simulation des procédés, Anne Habraken [et al.] . .	12
Essais et instrumentations pour la simulation des procédés, François Hild	13
Exposé "Un Autre Regard"	14
Transition énergétique et tensions internationales : Les défis des supply chains des métaux critiques, Vincent Donnen	15
Exposés	16
Fabrication additive métallique : modélisation et simulation numérique, Michel Bellet	17
Pilotage dynamique des lignes de recuit – vers l'industrie 4.0, Frédéric Bonnet . .	18
La fusion à arc sous vide appliquée aux alliages de Zirconium dédiés aux applications nucléaires, Isabelle Crassous	19

Modélisation de la recristallisation dynamique continue (CDRX) en champ complet dans DIGIMU, Pascal De Micheli [et al.]	20
Modélisation multi-échelles de solides à matrice polymère obtenus par deux procédés de fabrication, Issam Doghri	21
Approches multi-échelles des procédés par voie liquide pour l'élaboration de composites structuraux, Sylvain Drapier	22
Optimisation des procédés de finition de surface : Synergie entre simulation multi échelle, multiphysique et Machine Learning, Baptiste Fedi	23
Fonctionnalisation des surfaces et hyperdéformation : application aux secteurs de l'hydrogène et du biomédical., Thierry Grosdidier	24
Recyclage d'alliages de titane de qualité aéronautique par le procédé PAMCHR (Plasma Arc Melting and Cold Hearth Refining), Stéphane Hans	25
Simulation des déformations de pièces mécaniques induites par des traitements de surface thermo-chimiques et mécaniques, Régis Kubler [et al.]	26
Vers une amélioration du recyclage des métaux et alliages, Mathilde Laurent-Brocq	27
Caractérisation multi-physique de composites en cours de transformation, Steven Le Corre	28
Comportement en fatigue des pièces issues de FA métallique : impact des défauts et de la microstructure, Etienne Pessard	29
La réduction directe : principe de fonctionnement du procédé Midrex et perspectives pour la décarbonation de la sidérurgie, Thibault Quatravaux	30
Simulation des procédés d'usinage – besoins industriels & verrous, Joel Rech	32
Vue d'ensemble et challenges de la simulation des procédés composite à renforts 3D @Safran Aircraft Engines, Julien Schneider Die Gross	33
Simulation du chauffage dans un four, Lucas Sardo	34
La mise en forme virtuelle des tôles métalliques : état de l'art et perspectives, Sandrine Thuillier	35
Mise en forme des renforts fibreux - état de l'art et enjeux, Emmanuelle Vidal-Sallé [et al.]	36

Prix posters	37
Développement du procédé L-PBF avec préchauffage pour la fabrication de super-alliages base nickel non soudables, Matthieu Assainte [et al.]	38
Stratégie de frittage économique pour la production de pièces en acier inoxydable 316L par fabrication additive MEAM granulés, Sophie Badin [et al.]	39
Apports des simulations éléments finis sur agrégats polycristallins pour la compréhension et l'analyse de la dissipation des métaux sous sollicitations cycliques de faible amplitude, André Calazans Menescal De Souza [et al.]	40
Approche intégrée de corrélation d'images numériques pour l'évaluation des facteurs d'intensité de contrainte dans un essai de fretting, Filipe Da Rocha Chaves [et al.]	41
Calcul sur données issues de tomographies automatiques pour grandes variations géométriques : application à la simulation des procédés et à la vérification des fonctions mécaniques, Amelia Ferhat	42
Réparation par fabrication additive des pièces endommagées d'un lanceur réutilisable, Florian Girault [et al.]	43
Développement d'un protocole d'essais d'auto-échauffement sous sollicitations cycliques à 20kHz et à haute température, Alexis Mion [et al.]	44
Evaluation de la compacité d'un lit de poudre et méthodologie de mesure d'absorption par la méthode de la sphère d'Ulbricht, Thibaud Robert [et al.]	45
Prédiction de l'état mécanique et des défauts de recristallisation des pièces coulées monocristallines à base Nickel au cours du refroidissement, Louis Roche [et al.] .	46
 Posters	 47
Présentation de thèse : Etude de l'influence de l'azote sur le comportement mécanique et l'évolution de la microstructure de fils d'acier perlitique au cours du tréfilage, Enzo Ceron Arana	48
Fast numerical model for microstructure prediction adapted for DED process, Quentin Dollé [et al.]	49
Utilisation du formage incrémental robotisé à chaud sur polymère dans le cadre de la fabrication d'orthèses recyclables et biosourcées, Valentin Duarte Rocha [et al.]	51

Etude expérimentale et modélisation du comportement en flexion d'un alliage base Ni traité SMAT sollicité en température, Anna Garambois [et al.]	52
Jumeau numérique pour la mise en forme de tôles métalliques, Lisa Germain . . .	54
Méthode efficace pour simuler le transfert de chaleur et de masse durant le procédé de soudage et de fabrication additive, Yabo Jia [et al.]	55
Modèle macroscopique de plasticité par avalanches, Mathias Lamari [et al.] . . .	56
Caractérisation biaxiale de polymères imprimés 3D pour des simulateurs chirurgicaux patient-spécifiques, Margot Leclercq [et al.]	58
TECSANTE I3D : Une plateforme d'impression pour soutenir la recherche médicale et l'enseignement, Vincent Martin [et al.]	60
Etude de l'influence de l'orientation des défauts poreux liés à la trajectoire d'impression sur les propriétés élastoplastiques de pièces réalisées par procédé ADAM, Victoria Mondesir-About [et al.]	61
Etude de la fissuration à chaud du Norem02 déposé par procédé de soudage PTA, Maëlle Moor [et al.]	63
Instrumentation du procédé LMD-p in-operando en vue d'un contrôle en boucle fermée, Maxime Rey	66
Etude expérimentale et numérique des évolutions microstructurales dues à la déformation et à la température: cas de l'aluminium pur, Pauline Stricot [et al.] . .	67
Contrôle non destructif de changements micromécaniques locaux par microscopie micro-onde à balayage., Leila Sellami [et al.]	69
Etude expérimentale de la Fragilisation par l'hydrogène dans l'Inconel 718 sous chargements thermomécaniques complexes, Donaldine Tade [et al.]	70

Liste des auteurs

Programme

lundi 22 janvier 2024

- 08:30 - 09:00 Introduction - Ouverture du colloque - Comité d'Organisation
- 09:00 - 10:30 Approches thermodynamiques des transformations de phases 1 – diffusives - Charles-André GANDIN
- 10:30 - 11:00 Pause-café
- 11:00 - 12:30 Essais et instrumentations pour la simulation des procédés - François HILD
- 12:30 - 13:30 Déjeuner
- 13:30 - 17:00 Temps libre
- 17:00 - 18:30 Approches thermodynamiques des transformations de phases 2 – avec effets de contraintes - Benoît APPOLAIRE
- 18:30 - 20:00 Méthodes numériques pour la simulation des procédés - Anne HABRAKEN
- 20:00 - 21:30 Dîner

mardi 23 janvier 2024

- 08:30 - 09:10 Pilotage numérique des Hauts-Fourneaux et avenir de la filière - Oleksandr NECHIPORUK
- 09:10 - 09:50 La fusion à arc sous vide appliquée aux alliages de Zirconium dédiés aux applications nucléaires - Isabelle CRASSOUS
- 09:50 - 10:30 Modélisation Multiéchelle pour les procédés d'élaboration de composites structuraux par voie liquide - Sylvain DRAPIER
- 10:30 - 11:00 Pause-café
- 11:00 - 11:40 Simulation numérique du refroidissement d'aube de turbine monocristalline base Nickel après une opération de coulée par fusion dirigée - Carl LABERGERE
- 11:40 - 12:30 Simulation de la recristallisation dynamique continue (CDRX) en champ complet dans DIGIMU® : théorie et exemples concrets - Pascal DE MICHELI
- 12:30 - 13:30 Déjeuner
- 13:30 - 16:30 Temps Libre
- 16:30 - 18:30 Session posters & Prix poster Ada Lovelace – Doctorants
- 19:00 - 19:15 Remise du Prix posters - Jury Poster
- 19:15 - 20:00 Apéritif Savoyard
- 20:00 - 21:00 Dîner
- 21:00 - 22:00 Transition énergétique et tensions internationales : Les défis des supply chains des métaux critiques - Vincent DONNEN

mercredi 24 janvier 2024

- 08:30 - 09:10 Les procédés d'atomisation au service de la poudre - Lucas DEMBINSKI
- 09:10 - 09:50 Fabrication additive métallique : modélisation et simulation numérique - Michel BELLET
- 09:50 - 10:30 Comportement en fatigue des pièces issues de fabrication additive métallique : impacts des défauts et de la microstructure - Etienne PESSARD
- 10:30 - 11:00 Pause-café
- 11:00 - 11:40 Modélisation multi-échelles de solides à matrice polymère obtenus par deux procédés de fabrication - Issam DOGHRI
- 11:40 - 12:30 Dimensionnement et certification de pièces en composites tissés 3D : apports de la chaîne numérique de simulation des procédés - Julien SCHNEIDER
- 12:30 - 13:30 Déjeuner
- 13:30 - 17:00 Temps Libre
- 17:00 - 17:40 La mise en forme virtuelle des tôles métalliques : état de l'art et perspectives - Sandrine THUILLIER
- 17:40 - 18:20 Mise en forme des renforts fibreux - état de l'art et enjeux - Emmanuelle VIDAL-SALLE
- 18:20 - 19:00 Mise en forme dynamique de pièces et assemblages métalliques par procédés magnéto-pulsés - Jean-Paul CUQLELANDAIS
- 20:00 - 21:00 Dîner
- 21:00 - 22:00 Assemblée Générale MECAMAT - C.A Mécamat
- 22:00 - 22:45 Cocktail soirée prestige

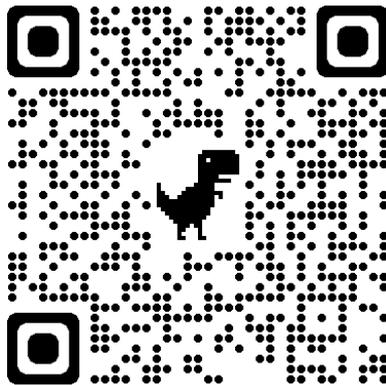
jeudi 25 janvier 2024

- 09:10 - 09:50 Optimisation des procédés de finition de surface : Synergie entre simulation multi échelle, multiphysique et Machine Learning - Baptiste FEDI
- 09:50 - 10:30 Fonctionnalisation des surfaces et hyperdéformation : applications récentes aux secteurs du stockage de l'hydrogène et du biomédical - Thierry GROSDIDIER
- 10:30 - 11:00 Pause-café
- 11:00 - 11:40 Simulation des procédés d'usinage – besoins industriels & verrous - Joël RECH
- 11:40 - 12:30 Caractérisation multi-physique de composites en cours de transformation - Steven LECORRE
- 12:30 - 13:30 Déjeuner
- 13:30 - 17:00 Temps libre
- 17:00 - 17:40 Simulation du chauffage dans un four - Lucas SARDO
- 17:40 - 18:20 Simulation des déformations de pièces mécaniques induites par des traitements de surface thermochimiques et mécaniques - Laurent BARRALLIER - Régis KUBLER
- 18:20 - 19:00 Pilotage dynamique des lignes de recuit – vers l'industrie 4.0 - Frédéric BONNET
- 20:00 - 21:00 Fondue Savoyarde
- 21:00 - 23:55 Soirée conviviale & dansante

vendredi 26 janvier 2024

- 08:30 - 09:10 Recyclage d'alliages de titane de qualité aéronautique par le procédé PAMCHR (Plasma Arc Melting and Cold Hearth Refining) - Stéphane HANS
- 09:10 - 09:50 La réduction directe : principe de fonctionnement du procédé Midrex et perspectives pour la décarbonation de la sidérurgie - Thibaut QUATRAVAUX
- 09:50 - 10:30 Vers une amélioration du recyclage des métaux et alliages - Mathilde LAURENT-BROCQ
- 10:30 - 11:00 Pause-café
- 11:00 - 12:00 Exposé de Synthèse - Jean-Michel BERGHEAU
- 12:00 - 12:30 Clôture du colloque - Comité d'organisation
- 12:30 - 13:30 Déjeuner

Le programme interactif du colloque est disponible sur le site internet du colloque : <https://aussois2024.sciencesconf.org/program>



Prix POSTER Ada LOVELACE

L'association Mécamat a décidé depuis 2021 de nommer son prix Poster à partir de personnalités scientifiques marquantes pour notre communauté. Cette session est l'occasion pour tous et en particulier les doctorants d'exposer leurs travaux en cours. Les thèmes des posters ne sont pas restreints aux thèmes du colloque.

La session poster est organisée le mardi 23 Janvier 2024 après-midi. La remise du prix sera faite le même jour lors de l'Apéritif Savoyard.

Cette édition Aussois 2024 a choisi comme personnalité Ada Lovelace.

Biographie (résumé d'après wikipedia)

Ada Lovelace, est née le 10 décembre 1815 à Londres et morte le 27 novembre 1852 à Marylebone dans la même ville, est une pionnière de la science informatique.

Elle est principalement connue pour avoir réalisé le premier véritable programme informatique, lors de son travail sur un ancêtre de l'ordinateur : la machine analytique de Charles Babbage. Dans ses notes, on trouve en effet le premier programme publié, destiné à être exécuté par une machine, ce qui fait d'Ada Lovelace la première personne à avoir programmé au monde. Elle a également entrevu et décrit certaines possibilités offertes par les calculateurs universels, allant bien au-delà du calcul numérique et de ce qu'imaginaient Babbage et ses contemporains. Aujourd'hui de nombreux développeurs connaissent le langage Ada, nommé en son honneur.

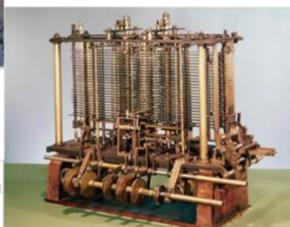


AUGUSTA ADA LOVELACE (1815-1852) PIONNIÈRE DE L'INFORMATIQUE

❖ Réalisation du premier programme informatique au 19^{ème} siècle

Fille du poète LORD BYRON, à 17 ans rencontre avec le mathématicien et inventeur de la machine à différences (une des premières calculatrices), CHARLES BABBAGE. Puis découverte de sa machine analytique (le premier ordinateur).

Octobre 1842, mathématicien FEDERICO LUIGI MENEBREA, publication en français d'un article sur le fonctionnement de la machine analytique.



1842-1843, traduction en anglais de l'article par ADA, qui y ajoute ses notes détaillées. Une d'elles, premier algorithme pouvant être exécuté par une machine, création d'un programme permettant de calculer les nombres de Bernoulli (note G).

Souvenir d'ADA se poursuivant grâce au langage de programmation ADA, conçu d'abord pour le département de la Défense des États-Unis et utilisé à nos jours dans plusieurs technologies modernes : l'automobile, les transports ferroviaires et les technologies aéronautiques.

❖ Clin d'œil 1 : portrait visible sur les hologrammes d'authentification des produits Microsoft

❖ Clin d'œil 2 : école d'informatique féminine ouverte à Paris en 2019, et lui rendant hommage : « Ada Tech School » (<https://adatechschool.fr/>)



Session Poster Ada Lovelace

Cours

Approches thermodynamiques des transformations de phases 1 – diffusives

Charles-André Gandin *† 1

¹ Mines Paris – PSL, CMEF UMR CNRS, Sophia Antipolis, France – MINES ParisTech PSL (CEMEF UMR CNRS 7635) – France

Les concepts de base de la thermodynamique appliquée aux transformations de phases seront donnés. Nous tenterons de systématiquement les illustrer à partir d'exemples issus de nos recherches, en nous limitant aux transformations de phase contrôlées par des phénomènes diffusifs. Les effets de contraintes sur les transformations de phases et les types de microstructures formées seront abordés dans une seconde partie, présentée par Benoît APPOLAIRE. La condition d'équilibre entre phases sera présentée. Dans cette hypothèse, le premier exemple montrera comment utiliser une base de données thermodynamiques et un diagramme de phases pour résoudre les transferts d'énergie et de masse des espèces chimiques d'un alliage en cours de solidification, et ce malgré la présence d'inhomogénéités chimiques provenant du transport convectif par la phase liquide (1). L'alliage sera un binaire Sn-Pb modèle, solidifié dans un dispositif expérimental de laboratoire. Puis l'effet de la diffusion chimique sur une transformation de phase sera considéré, incluant une séquence de réactions menant à la formation de microstructures dendritique, péri-tectique et eutectique dans un alliage binaire Al-Ni. L'hypothèse de l'équilibre thermodynamique à l'interface entre les phases sera ici maintenue. L'exemple illustratif sera également issu de calculs couplés à des données thermodynamiques, comparé à un système maintenu en lévitation suffisamment petit pour appliquer l'hypothèse d'une température uniforme (2). Afin d'illustrer le rôle de la courbure de l'interface sur l'équilibre thermodynamique, ainsi que de la diffusion multi-constituée, la croissance d'un précipité de phase solide β dans une matrice de phase α sera présentée, en supposant toujours l'équilibre thermodynamique interfacial, pour un alliage Ni-Al-Cr. Nous verrons comment les bases de données thermodynamiques peuvent servir à calculer une matrice de diffusion chimique et comment l'effet de la courbure de l'interface peut directement être calculé (3). Finalement, nous introduirons les notions de piégeage de soluté, de traînage de soluté et de cinétique d'attachement pouvant intervenir sur une interface en croissance. Cela nous permettra d'ouvrir la présentation à la déviation de l'équilibre thermodynamique et à un modèle de calcul d'un diagramme de phase " cinétique ", c'est-à-dire hors d'équilibre. Un modèle de cinétique de croissance dendritique sera alors introduit et exploité pour comprendre la sélection des microstructures formées lors du procédé de fabrication additive de fusion laser sur lit de poudre d'un acier 316L (4).

(1) T. Carozzani, Ch.-A. Gandin, H. Dignonnet, M. Bellet, K. Zaidat, Y. Fautrelle. Direct Simulation of a Solidification Benchmark Experiment. Metallurgical and Materials Transactions A 44 (2013) 873-887.

(2) D. Touret, Ch.-A. Gandin, T. Volkman, D. M. Herlach. Multiple non-equilibrium phase

*Intervenant

†Auteur correspondant:

transformations: Modeling versus electro-magnetic levitation experiment. *Acta materialia* 59 (2011) 4665-4677.

(3) G. Guillemot, Ch.-A. Gandin. An analytical model with interaction between species for growth and dissolution of precipitates. *Acta materialia* 134 (2017) 375-393.

(4) P. Martin, G. Guillemot, C. A. Hareland, P. W. Voorhees, Ch.-A. Gandin. Kinetic effects during the plane-front and dendritic solidification of multicomponent alloys. *Acta Materialia* 263 (2024) 119473.

Méthodes numériques pour la simulation des procédés

Anne Habraken ^{*} ¹, Thinh Q. D. Pham[†] ^{1,2}, Billy-Joe Bobach[‡] ¹, T. Vinh Hoang[§] ³, Xuan V. Tran[¶] ², Anne Mertens^{||} ¹, Jean-Philippe Ponthot^{**} ¹, Laurent Duchene^{††} ¹

¹ Université de Liège - Faculté des sciences appliquées – Belgique

² Thu Dau Mot University, Institute of Strategy Development, – Vietnam

³ RWTH-Aachen University, Chair of Math. for Uncertainty Quantification – Allemagne

Une revue des choix à poser face à la simulation des procédés d'élaboration et de fabrication est présentée. Le modélisateur doit déterminer l'échelle pertinente par rapport à son intérêt, les logiciels et les données disponibles et les phénomènes activés lors des procédés. Les approches telles que Molecular Dynamic (MD), Discrete Dislocation Dynamics (DDD), Quasi Continuum (QC), Phase Field (PF), Crystal Plasticity (CP) seront très brièvement présentées. Une attention plus particulière sera dédiée à la méthode des éléments finis (FEM) appliquée dans un premier temps à l'emboutissage de tôles métalliques. Dans ce cadre, les principes des éléments solid-shell seront rappelés. L'importance des lois constitutives "mésos" à l'échelle des dislocations, des cristaux et des lois dites phénoménologiques à l'échelle macroscopique, de leur identification sera démontrée pour un matériau poly cristallin ou comportant peu de cristaux (effet d'échelle). Afin d'aborder les simulations impliquant des phénomènes multi-physiques, des modèles éléments finis dédiés aux événements présents lors du refroidissement de pièces seront brièvement rappelés avant d'étendre le survol des outils de modélisations au cas de l'impression 3D métal avec le couplage entre FEM et Deep Learning (DL) et les perspectives de la méthode Particle Finite Element (PFEM).

*Intervenant

†Auteur correspondant: pqducthinhbka@gmail.com

‡Auteur correspondant: billy-joe.bobach@uliege.be

§Auteur correspondant: hoang.tr.vinh@gmail.com

¶Auteur correspondant: xuantv@tdmu.edu.vn

||Auteur correspondant: anne.mertens@uliege.be

**Auteur correspondant: jp.ponthot@uliege.be

††Auteur correspondant: l.duchene@ulg.ac.be

Essais et instrumentations pour la simulation des procédés

François Hild * ¹

¹ Laboratoire de Mécanique Paris-Saclay – Université Paris-Saclay, CentraleSupélec, ENS Paris-Saclay, CNRS, LMPS - Laboratoire de Mécanique Paris-Saclay, 91190, Gif-sur-Yvette, France. – 4 Av. des Sciences, 91190 Gif-sur-Yvette, France

Afin de diminuer les cycles de conception / fabrication de nouvelles pièces, les procédés de fabrication sont appelés à être optimisés tout en garantissant de hauts niveaux de fiabilité (notamment dans l'industrie des transports). Il s'agit notamment de diminuer les temps de fabrication de pièces aux formes toujours plus complexes avec une très bonne qualité de fini et une répétabilité forte. Par exemple, le choix des paramètres opératoires a un impact direct sur l'intégrité de surface pour les procédés par enlèvement de matière. Les connaissances actuelles ne permettent pas encore de prévoir de manière fiable l'influence du procédé de fabrication sur la pièce finie avant qu'il ne soit mis en œuvre. Ainsi, le choix des paramètres opératoires est très souvent empirique, ce qui diminue la productivité des procédés.

Une des voies de progrès par rapport aux défis précédents fait appel à la simulation numérique grâce à l'amélioration continue des logiciels de calculs par éléments finis et la puissance des calculateurs. Cependant, un des freins concerne la méconnaissance du comportement des matériaux sous des sollicitations représentatives des conditions rencontrées dans les procédés de fabrication (qui sont souvent très éloignées des essais élémentaires sous sollicitations quasi statiques et isothermes). L'idéal est alors de pouvoir identifier les paramètres des lois de comportement à partir de données obtenues *in situ* (i.e., lors du procédé de fabrication proprement dit). Cela permet non seulement d'avoir accès à des lois de comportement plus représentatives des conditions (souvent extrêmes) rencontrées mais également de valider toute la chaîne numérique.

Afin d'atteindre cet objectif ambitieux, il s'agit de pouvoir instrumenter de manière la plus exhaustive possible le procédé de fabrication envisagé. Par exemple, le suivi de l'effort de coupe à l'aide de platines dynamométriques et la mesure de l'épaisseur de copeaux a permis le développement des premiers modèles analytiques. Des mesures de températures ont ensuite été entreprises afin d'enrichir la base de données disponibles. De plus, des mesures cinématiques (par corrélation d'images) sont venues compléter les informations extraites *in situ*. Toutes ces données restent globales (résultante d'efforts) voire de surface (thermographie infrarouge et corrélation d'images). Pour d'autres types de processus (p.ex., solidification, polymérisation), des informations internes ont été collectées par radiographie et tomographie aux rayons X. Celles-ci permettent alors d'avoir une vision de plus en plus complète des mécanismes mis en jeu.

L'exposé illustrera, sur différents exemples, la manière dont l'instrumentation a évolué au cours des dernières années afin d'enrichir le plus possible la base de données expérimentales *in situ*. Les défis actuels seront également discutés.

*Intervenant

Exposé "Un Autre Regard"

Transition énergétique et tensions internationales : Les défis des supply chains des métaux critiques

Vincent Donnen * 1,2

¹ Ecole Nationale Supérieure des Mines de Nancy – Institut Mines-Télécom [Paris], Université de Lorraine – France

² Compagnie Des Métaux Rares – Suisse

Les besoins croissants en métaux critiques se heurtent à des enjeux croissants de résilience des chaînes d’approvisionnement du fait des spécificités intrinsèques des métaux critiques et de leurs marchés mais aussi d’un contexte d’évolution défavorable des risques.

Après une période de passivité, les pays occidentaux et l’Union Européenne se sont emparés du sujet devenu critique pour l’industrie et la souveraineté de nos territoires. Beaucoup d’initiatives sont en cours et beaucoup reste à faire pour identifier et répondre aux vulnérabilités d’une supply chain émergente nécessaire à la nouvelle révolution industrielle que nous vivons.

*Intervenant

Exposés

Fabrication additive métallique : modélisation et simulation numérique

Michel Bellet * ¹

¹ Michel Bellet – MINES ParisTech, PSL Research University, CEMEF – 06904 Sophia Antipolis, France

La présentation est axée en premier lieu sur la modélisation des principaux phénomènes physiques mis en jeu dans les procédés de fabrication additive métallique, en focalisant sur le procédé de fusion sélective de lit de poudre par laser (L-PBF). Dans un second temps, des techniques de simulation numérique, à l'échelle des dépôts élémentaires et à l'échelle des pièces construites, sont présentées.

*Intervenant

Pilotage dynamique des lignes de recuit – vers l’industrie 4.0

Frédéric Bonnet * ¹

¹ ArcelorMittal RD – ArcelorMittal Maizières Research SA – France

Le pilotage en temps réel des procédés sidérurgiques tels que le train à chaud ou les ligne de recuit sur la base d’une modélisation hybride couplant la modélisation multi-physique et les modèles de données est une transition majeure pour la différenciation de notre industrie. La modélisation métallurgique, les algorithmes d’apprentissage et de réduction de modèle, le développement de capteurs de nouvelle génération et les architectures informatiques de données permettent aujourd’hui de développer de nouvelles solutions pour répondre aux enjeux de l’industrie 4.0. Ces outils de pilotage vont permettre d’améliorer de manière significative le pilotage de nos lignes industrielles pour répondre aux enjeux de qualité produit, de maîtrise des dérives process, de programmation et gestion des transitoires pour les procédés continus et de transition énergétique... Au cours de cet exposé, des exemples de modélisation hybride pour le pilotage en temps réel des lignes de recuit seront présentés, couvrant différentes sections du process telles que les fours et les sections de refroidissement.

*Intervenant

La fusion à arc sous vide appliquée aux alliages de Zirconium dédiés aux applications nucléaires

Isabelle Crassous *† ¹

¹ Centre Recherche Composants – framatome UGINE – France

Le procédé de refusion à arc sous vide est particulièrement adapté pour la refusion d'alliages métalliques à haut point de fusion dédiés à des applications nécessitant une qualité élevée en matière de chimie et de structure comme le domaine du nucléaire, de l'aéronautique ou du médical. C'est dans ce cadre que le Centre de Recherche Composants de Framatome étudie ce procédé utilisé pour la production d'alliages de zirconium à haute valeur ajoutée grâce à la simulation numérique, à la mise en œuvre d'instrumentation innovante et à l'utilisation des nouvelles approches telles que l'intelligence artificielle et les Data Sciences.

*Intervenant

†Auteur correspondant: isabelle.crassous@framatome.com

Modélisation de la recristallisation dynamique continue (CDRX) en champ complet dans DIGIMU

Pascal De Micheli *[†] ¹, Victor Grand *[‡] ², Marc Bernacki *[§] ³

¹ Transvalor SA – entreprise privé – France

² Framatome – Entreprise privée – France

³ Centre de Mise en Forme des Matériaux – Mines Paris - PSL (École nationale supérieure des mines de Paris), Centre National de la Recherche Scientifique – France

Le modèle de prédiction de taille de grains et de sous grains en recristallisation continue (CDRX) à champ moyen de Gourdet-Montheillet a été adapté dans un contexte de modélisation à champ complet au sein du logiciel commercial DIGIMU®. Des paramètres sont identifiés pour du Zircaloy 4, pour lequel les prédictions du logiciel sont comparées aux observations expérimentales.

*Intervenant

[†]Auteur correspondant: pascal.demicheli@transvalor.com

[‡]Auteur correspondant: victor.grand@framatome.com

[§]Auteur correspondant: marc.bernacki@minesparis.psl.eu

Modélisation multi-échelles de solides à matrice polymère obtenus par deux procédés de fabrication

Issam Doghri * ¹

¹ Université Catholique de Louvain = Catholic University of Louvain – Belgique

On présente des approches multi-échelles récentes faisant le lien entre la performance thermomécanique finale de produits à matrice polymère et deux procédés de fabrication qui permettent de les élaborer.

Le premier procédé concerne le moulage par injection de pièces en polymère thermoplastique renforcé par des fibres de verre courtes. Comme dans tout petit élément de volume les fibres ne sont pas alignées, on évalue d'une manière objective plusieurs méthodes d'homogénéisation par champs moyens en élasticité linéaire (1). Ensuite, on développe et on évalue deux modèles d'homogénéisation dans le cadre non-linéaire, en supposant un comportement couplé viscoélastique-viscoplastique de la matrice (2).

Le second procédé concerne la fabrication additive de polymères thermoplastiques par SLS (Selective Laser Sintering). On développe d'abord un modèle d'évolution de la cristallinité basé sur une formulation de champ de phase (3). Ensuite, un modèle d'évolution de la porosité est proposé (4). L'homogénéisation permet de prédire la réponse macroscopique (5).

Une thématique importante concerne la prédiction de la durée de vie de produits sous fatigue à grand nombre de cycles. Comme le comportement reste dissipatif, une approche à plusieurs piliers est développée. D'abord, une méthode de calcul en viscoélasticité linéaire basée sur la transformée de Laplace-Carson et son inversion numérique est validée (6). Ensuite, les histoires de déformations totales obtenues servent de données à une approche d'homogénéisation dans le temps en viscoélasticité-viscoplasticité (7). Finalement, un modèle d'endommagement (8) est appliqué, identifié sur des résultats expérimentaux de fatigue et validé sur d'autres résultats.

*Intervenant

Approches multi-échelles des procédés par voie liquide pour l'élaboration de composites structuraux

Sylvain Drapier * ¹

¹ LGF UMR CNRS 5307 – École Nationale Supérieure des Mines - Saint-Étienne – France

Les procédés d'élaboration des composites, incluant les procédés par voie liquide, doivent être contrôlés à diverses échelles d'observation. On présente ici des modèles physiques et numériques capables de représenter l'écoulement d'une résine liquide dans un milieu fibreux orthotrope à plusieurs échelles de porosités. L'infusion est d'abord modélisée à l'échelle mésoscopique (mm) dans un milieu déformable, puis ensuite à l'échelle des fibres (μm) pour en tirer des modèles équivalents pertinents d'écoulements transitoires mésoscopiques.

*Intervenant

Optimisation des procédés de finition de surface : Synergie entre simulation multi échelle, multiphysique et Machine Learning

Baptiste Fedi * ¹

¹ HIVELEX – Société HIVELEX – Bordeaux, France

La simulation numérique est utilisée de manière généralisée dans de nombreux secteurs industriels ne pouvant imaginer être mis au point sans travaux de simulation amont ou parallèle afin d'optimiser les procédés. Paradoxalement, ces approches numériques sont peu utilisées dans le domaine des procédés de finitions de surfaces pouvant pourtant en bénéficier. La simulation numérique peut-être utilisée dans diverses applications comme les procédés électrochimiques classiques de protection de surface anticorrosion par exemple mais également dans le cas de nouvelles applications comme les procédés de parachèvement de pièces issues de fabrication additive métallique. Ces nouveaux besoins en termes de finitions de surface sur pièces de géométrie complexe, ont amené au développement récent de solutions hybrides couplant particules et électrochimie, nécessitant des couplages multiphysiques inédits afin de les modéliser. Nous verrons au cours de cette présentation comment des simulations par éléments finis sur CPU et par éléments discrets sur GPU, via des approches multiphysiques et multi échelle peuvent permettre d'améliorer la compréhension des phénomènes en jeu mais également fournir des méthodes et des outils d'optimisation des procédés de finitions de surface à l'échelle industrielle. Enfin, nous aborderons comment ces secteurs moins enclins à l'usage de la simulation, peuvent tirer parti des nouvelles méthodes numériques à disposition comme la data science et le machine learning ainsi que les algorithmes d'optimisation. Ces méthodologies pouvant être utilisées à différents niveaux, comme l'hybridation avec des simulations physiques, la création d'outils d'aide à la maîtrise des procédés, ou encore la réduction des temps de calculs de simulation.

*Intervenant

Fonctionnalisation des surfaces et hyperdéformation : application aux secteurs de l'hydrogène et du biomédical.

Thierry Grosdidier * ¹

¹ Laboratoire d'Étude des Microstructures et de Mécanique des Matériaux – Université de Lorraine, Centre National de la Recherche Scientifique, Arts et Métiers Sciences et Technologies, Centre National de la Recherche Scientifique : UMR7239 – France

La déformation plastique sévère est un des moyens de fonctionnalisation des surfaces. Diverses techniques de déformation plastique sévère des surfaces (Surface Severe Plastic Deformation) ont été développées ou optimisées au cours de ces dernières années. Cette communication présente un large aperçu des développements récents dans le domaine de la SSPD et de ses applications qui tirent parti des avantages d'une surface à gradient déformée avec à la fois (i) une résistance plus élevée et (ii) une " réactivité " améliorée.

*Intervenant

Recyclage d'alliages de titane de qualité aéronautique par le procédé PAMCHR (Plasma Arc Melting and Cold Hearth Refining)

Stéphane Hans * ¹

¹ Elaboration et Coulée des Alliages – Aubert Duval - Acérie des Ancizes – France

Le recyclage d'alliages de titane pour applications aéronautiques représente un enjeu majeur pour préserver les ressources, diminuer l'empreinte carbone et maîtriser les approvisionnements. La fusion et l'affinage du métal liquide sont réalisés par les procédés d'affinage en creuset froid comme le PAMCHR (Plasma Arc Melting and Cold Hearth Refining). Par la criticité des applications aéronautiques de ces alliages une compréhension fine des phénomènes physiques mis en jeu et la maîtrise des conditions de fusion / affinage sont nécessaires. La démarche d'étude visant à maîtriser l'homogénéité chimique et l'élimination des inclusions est présentée.

*Intervenant

Simulation des déformations de pièces mécaniques induites par des traitements de surface thermo-chimiques et mécaniques

Régis Kubler ^{*† 1}, Laurent Barrallier ^{* ‡}

¹ Arts et Métiers Sciences et Technologies – Arts et Métiers Paristech ENSAM Aix-en-Provence – France

Les traitements de surface génèrent des déformations libres de contraintes d'origine thermique, thermo-chimique ou mécanique via des transformations de phase ou de la plasticité. Ces déformations libres de contrainte incompatibles sont accommodées par des déformations élastiques générant des champs de contraintes résiduelles. Dans le cas de géométries non massives (plaque, tôle, voile), les champs de contraintes résiduelles se rééquilibrent en partie en induisant une déformée des pièces. En partant des équations de la mécanique et du concept de " déformation libre de contraintes ", cette étude présente des applications dans le cadre du traitement thermo-chimique de nitruration et du grenailage de précontrainte.

*Intervenant

†Auteur correspondant: regis.kubler@ensam.eu

‡Auteur correspondant: laurent.barrallier@ensam.eu

Vers une amélioration du recyclage des métaux et alliages

Mathilde Laurent-Brocq * ¹

¹ Institut de Chimie et des Matériaux Paris-Est – Université Paris-Est Créteil Val-de-Marne - Paris 12, Centre National de la Recherche Scientifique – France

Pour limiter le réchauffement climatique, l'Union Européenne s'est engagée à réduire ses émissions de gaz à effet de serre (GES) d'au moins 40 % en 2030. Afin d'atteindre cet objectif ambitieux, tout comme les autres secteurs, celui de la production des alliages métalliques doit drastiquement diminuer ses émissions.

Dans un premier temps, on proposera un état des lieux du cycle de vie actuel des métaux et de leur impact environnemental. On l'illustrera en particulier avec les exemples de l'acier et des alliages d'aluminium. Ensuite, on présentera les solutions mises en œuvre pour la récupération, le tri et le recyclage. On détaillera particulièrement l'étape clé de la re-fusion et les enjeux du contrôle des éléments d'alliages, dont les faiblesses actuelles mènent à des dilutions avec de la matière primaire, ou au sous-cyclage (1). Pour finir, des opportunités pour le futur visant à améliorer le recyclage ou à diminuer les besoins en métaux seront exposées. On détaillera le recyclage par voie solide, une voie alternative de recyclage des chutes d'usinage (2).

Références

- (1) M. Laurent-Brocq, L. Lilensten, Récupération et recyclage de l'aluminium - Stratégie, Techniques de l'ingénieur M2345 V2 (2023) 1-17.
- (2) M. Laurent-Brocq, L. Lilensten, C. Pinot, A. Schulze, A. Duchaussoy, J. Bourgon, E. Leroy, A.E. Tekkaya, Solid state recycling of aluminium chips: Multi-technique characterization and analysis of oxidation, *Materialia* 31 (2023) 101864.

*Intervenant

Caractérisation multi-physique de composites en cours de transformation

Steven Le Corre * 1,2

¹ Laboratoire de Thermique et Energie de Nantes – CNRS : UMR6607, Université de Nantes – Polytech’Nantes, Rue Christian Pauc - BP 50609 44306 NANTES CEDEX 3, France

² Laboratoire de Thermique et Energie de Nantes – CNRS : UMR6607, Nantes Université – France

Les procédés de mise en forme de matériaux composites mettent en jeu de nombreux phénomènes physiques couplés qui doivent être compris, modélisés et identifiés dans des conditions représentatives, afin de permettre la mise au point d’outils de simulation prédictifs suffisamment fins et réalistes. Ils doivent permettre de prédire non seulement la géométrie et les propriétés mécaniques finales, mais aussi l’état de contraintes résiduelles, inévitable dans ce type de matériaux, afin d’être capable à terme de prédire leur durabilité en service.

L’exposé focalisera sur la méthodologie et les développements expérimentaux développés au LTEN depuis de nombreuses années dans ce domaine pour la caractérisation expérimentale de composites thermodurcissables ou thermoplastiques en cours de transformation. Ces travaux comportent des volets thermiques, la mesure des changements de phase, de dimensions (dilata-tions, retraits de transformation anisotropes) ainsi que des évolutions rhéologiques durant cette phase de mise en forme.

*Intervenant

Comportement en fatigue des pièces issues de FA métallique : impact des défauts et de la microstructure

Etienne Pessard * ¹

¹ Laboratoire Arts et Métiers ParisTech d'Angers (LAMPA) – Arts et Métiers ParisTech – Arts et Métiers ParisTech - Centre d'Angers 2, Boulevard du Ronceray BP 93525 49035 Angers Cedex 01, France

L'intérêt de la FA (Fabrication Additive) est maintenant largement admis et de nombreux grands groupes ont investi lourdement dans ce domaine afin de réduire le coût des pièces produites, tout en augmentant leur complexité et technicité. Pour l'Industrie, la bonne tenue mécanique des pièces, et en particulier la tenue en Fatigue à Grand Nombre de Cycles (FGNC), est au cœur des attentions. Pour les métaux, le procédé de fusion laser sur lit de poudre L-PBF (Laser Powder Bed Fusion) est aujourd'hui le plus répandue et confère au matériau, certaines spécificités importantes à considérer en fatigue :

- **des pores en surface et à cœur** en faible densité (taux de densité matériau > 99.99%)
- **un mauvais état de surface**
- **une microstructure particulière**
- **des gradients de contraintes résiduelles**

L'objectif de cet exposé est de faire un bilan des avancées dans le domaine de la tenue en FGNC des pièces L-PBF en insistant sur les résultats expérimentaux.

Concernant l'**impact des porosités**, des résultats d'essais en traction répétée conduits sur le 316L montrent qu'un défaut à cœur doit être par exemple dix fois plus grand qu'un défaut en surface pour devenir critique en FGNC. En absence de pore, le 316L L-PBF possède également une **microstructure particulière** lui conférant une tenue en fatigue bien meilleure que son homologue corroyé. Des résultats obtenus sur le Ti6Al4V montrent que les pores ne sont parfois pas les seuls responsables de la dispersion de la tenue en FGNC. L'**hétérogénéité de tenue de la microstructure** issue du procédé L-PBF conduit pour ce matériau à une tenue très dispersée en absence de pore et à une sensibilité à la taille des **singularités de surface** très variable.

Une **approche probabiliste** prenant en compte les effets de la taille des pores et d'une **microstructure hétérogène** sera proposée. Cette proposition perfectible permettra d'aborder les défis associés au dimensionnement des pièces FA et à l'évolution constante de ces procédés.

*Intervenant

La réduction directe : principe de fonctionnement du procédé Midrex et perspectives pour la décarbonation de la sidérurgie

Thibault Quatravaux * ¹

¹ Institut Jean Lamour – LabEX DAMAS, Université de Lorraine, CNRS : UMR7198 – France

La réduction du fer est historiquement obtenue à l'échelle industrielle en utilisant le carbone et l'hydrogène comme agents réducteurs sous la forme de CO et de H₂. Ces agents réducteurs sont issus de la décomposition de matières carbonées telles que le coke, le charbon et les hydrocarbures. L'emploi massif de carbone fossile (charbon, coke et gaz naturel) par la sidérurgie est responsable d'environ 7 % des émissions de CO₂ anthropique.

Il existe deux principales routes d'élaboration du fer métallique à partir du minerai :

- Le haut fourneau fait partie d'un ensemble de procédés de pyrométallurgie appelé usine intégrée, composé par ailleurs de cokeries, d'unités d'agglomération et de convertisseurs à oxygène. L'usine intégrée est actuellement en France la seule route métallurgique de production d'acier à partir du minerai de fer dont les derniers sites de production sont situés à Dunkerque et Fos Sur Mer.
- Les procédés de réduction directe, dont la compagnie Midrex est majoritairement représentative, produisent du fer métallique à partir de minerai à plus basse température sans fusion de la matière, le plus souvent en utilisant du gaz naturel comme agent réducteur et source de chaleur. Le produit issu de cette réduction, une fois refroidi, peut être utilisé dans une aciérie électrique.

A ce jour, la réduction directe est la principale alternative à l'usine intégrée, représentant en 2022 environ 10 % de la production d'acier à partir de minerai. L'utilisation du gaz naturel en tant qu'agent réducteur permet de diviser par deux les émissions de CO₂ par tonne de fer réduit par rapport à la filière de l'usine intégrée.

La présentation portera sur la description du procédé Midrex, et plus particulièrement sur son point de fonctionnement.

L'exposé mettra en lumière les principaux organes qui composent ce procédé ainsi que les mécanismes de transformations successives du minerai, liés aux contraintes thermodynamiques de

*Intervenant

réaction et à la configuration gaz-solide à contre-courant du réacteur.

Une dernière partie sera consacrée aux possibilités d'évolution de ce procédé pour décarboner la production de fer métallique. Elle consiste à substituer le gaz naturel par du dihydrogène en tant qu'agent réducteur. Les modifications de ce type d'installation et les conséquences de cette évolution sur le point de fonctionnement seront abordées.

Simulation des procédés d’usinage – besoins industriels & verrous

Joel Rech ^{*† 1}

¹ Ecole Nationale d’Ingénieurs de Saint Etienne – Centrale Lyon - ENISE, LTDS UMR5513, 42000 Saint-Etienne, France – France

Au cours des dernières décennies, des progrès significatifs ont été réalisés dans le développement de modèles prédictifs axés sur l’industrie pour les opérations d’usinage. Cet exposé présentera une vision globale des modèles prédictifs de performance pour l’usinage et identifie les forces et les faiblesses des modèles actuels. Il comprend une évaluation critique des techniques de modélisation pertinentes et de leur applicabilité et/ou de leurs limites pour la prédiction des opérations d’usinage complexes réalisées dans l’industrie. Les modèles en usinage visent souvent à prédire des variables fondamentales telles que les contraintes, les déformations, les vitesses de déformation, les températures, etc. Toutefois, pour être utiles à l’industrie, ces variables doivent être corrélées à des mesures de performance : qualité du produit (précision, tolérances dimensionnelles, finition, etc.), intégrité de la surface et de la sous-surface, usure de l’outil, forme/rupture des copeaux, formation des bavures, stabilité de la machine, etc. L’adoption des modèles d’usinage par l’industrie dépend essentiellement de la capacité d’un modèle à établir ce lien et à prédire les performances d’usinage. C’est pourquoi cet exposé proposera d’identifier les enjeux du développement de modèles prédictifs pour les opérations d’usinage, en ciblant principalement les applications industrielles.

*Intervenant

† Auteur correspondant: joel.rech@enise.fr

Vue d'ensemble et challenges de la simulation des procédés composite à renforts 3D @Safran Aircraft Engines

Julien Schneider Die Gross * ¹

¹ Safran Aircraft Engines – Entreprise privée – France

Cette exposé aura pour but de présenter l'ensemble des simulations numériques de fabrication des pièces composites à renforts tridimensionnel. Un focus sera fait sur les pièces actuellement industrialisées, mais aussi sur celles en cours de développement.

Après une mise en contexte de l'industrialisation de ces structures composites à hautes performances obtenues par tissage de préforme et injection RTM, il sera présenté brièvement les gammes de fabrication des 2 principales pièces composites du module de soufflante (FAN) du moteur LEAP. Il sera ainsi discuté de diverses thématiques numériques telles que la thermique moule, l'injection, la mise en forme et les contraintes internes induites par l'ensemble du processus. En parallèle, il sera abordé les besoins de chainage d'outils numériques tout en considérant la simulation multi-échelles, impérative à la compréhension et la maîtrise de tels composites architecturés, hétérogènes et anisotropes.

Lors de la présentation de tous ces thèmes et méthodes numériques, un accent sera donné sur l'état de l'art à Safran Aircraft Engines sur les différents types de simulation mais aussi sur le besoin impératif du suivi, de l'instrumentation et de la caractérisation afin d'obtenir des modélisations réalistes, voire prédictives. Pour cela il sera aussi abordé les partenariats académiques existants et à construire permettant de relever les challenges envisagés par SAFRAN tant coté industrialisation que Matériau&Procédé.

*Intervenant

Simulation du chauffage dans un four

Lucas Sardo * ¹

¹ Sciences Computers Consultants – SCIENCES COMPUTERS CONSULTANTS – 10 rue du plateau des Glières, 42 000 Saint-Etienne, France

Les procédés de traitement thermique, chauffage et trempe sont très largement utilisés dans l'industrie mais sont grandement énergivores. En effet, dans le contexte actuel, les temps de cycle très longs de ces process représentent des coûts énergétiques, environnementaux et économiques croissants et potentiellement handicapants pour l'industrie. La simulation numérique apparaît aujourd'hui comme LA solution pour réaliser les tests et phases d'optimisation de ces installations de manière totalement virtuelle.

Simuler le chauffage d'une pièce dans les fours nécessite de décrire précisément les écoulements dans la partie " fluide " du four et les évolutions de température à la fois dans les pièces mais également dans le fluide. Le choix a été fait d'utiliser une approche monolithique (c'est-à-dire où un seul domaine est utilisé à la fois pour la partie fluide et solide), où l'interface solide-fluide est identifiée grâce à une fonction Level-set. Pour décrire les différentes parties du domaine, plusieurs approches existent, dont : avoir un maillage anisotrope raffiné à la frontière des différents objets (1) ou l'utilisation de maillages géométriquement conformes à l'interface (2). Chaque solution dispose ses avantages et inconvénients. Nous aborderons dans cette présentation les choix faits lors de la réalisation d'un logiciel commercial permettant aux utilisateurs de simuler aisément des installations complexes, qui consistent en un mélange de différentes approches.

Dans le cas présenté (figure 1), nous simulerons le chauffage d'un four industriel (5x4x3m) avec un chargement complexe de quatre lingots de grande taille (3.3tonnes, 1.8m de long, 0.7m de diamètre chacun). Des lingots froids sont enfournés dans un four à 1200°C. Le procédé a pour but d'obtenir une température à cœur homogène sur les différents lingots, avant forgeage. L'objectif de cette simulation est alors d'établir le temps de chauffe optimal de ces lingots pour lequel la température est relativement homogène au sein des pièces, en tenant compte des conditions et scénarii de procédés. Ainsi, grâce à qobeo®[®], une analyse numérique et 100% virtuelle des procédés peut être mise en place afin de réaliser des économies notables en termes de temps, d'énergie, de matériaux et d'investissement.

*Intervenant

La mise en forme virtuelle des tôles métalliques : état de l'art et perspectives

Sandrine Thuillier *† 1

¹ IRDL – Université Bretagne Sud, UMR CNRS 6027, Lorient, France, Université Bretagne Sud, UMR CNRS 6027, Lorient, France – France

La simulation numérique des procédés de mise en forme, en particulier des tôles métalliques, a connu un essor extraordinaire à partir des années 1985, avec le développement d'outils de simulation numérique par la méthode des éléments finis, la modélisation du contact/frottement, la caractérisation et la modélisation du comportement mécanique des matériaux sous des trajets complexes de déformation (écrouissage, anisotropie) et la prise en compte des limites de formabilité. Aujourd'hui, la conception virtuelle des procédés de mise en forme et d'assemblage par déformation plastique s'est imposée comme une étape incontournable en milieu industriel. Les conférences/workshop Numisheet, dédiées à *Numerical simulation of 3D sheet metal forming processes*, dont la première a eu lieu en 1991 et la dernière en date en 2023, ainsi que les événements du *International Deep Drawing Research Group (IDDRG, depuis 1960)* illustrent l'intérêt à l'échelle internationale de ce thème. L'objectif de cette présentation est de dresser un portrait de l'état actuel de la qualité et la fiabilité des prédictions numériques, en considérant quelques applications, et d'illustrer les perspectives.

*Intervenant

†Auteur correspondant: sandrine.thuillier@univ-ubs.fr

Mise en forme des renforts fibreux - état de l'art et enjeux

Emmanuelle Vidal-Sallé ^{*† 1}, Juien Colmars ¹, Naim Naouar ², Auriane Platzer ³, Philippe Boisse

¹ Univ Lyon, INSA Lyon, CNRS, LaMCoS, UMR5259 – Univ Lyon, INSA Lyon, CNRS, LaMCoS, UMR5259, 69621 Villeurbanne, France – France

² Univ Lyon, CNRS, INSA Lyon, LaMCoS, UMR5259 – Univ Lyon, CNRS, INSA Lyon, LaMCoS, UMR5259, 69621 Villeurbanne, France – France

³ Univ Lyon, INSA Lyon, CNRS, LaMCoS, UMR5259 – Univ Lyon, INSA Lyon, CNRS, LaMCoS, UMR5259, 69621 Villeurbanne, France – France

Au cours des 20 dernières années, l'utilisation des matériaux composites à renforts continus a connu une croissance importante dans tous les secteurs de l'industrie. Cette croissance a eu pour corolaire le développement de nombreuses recherches sur la formabilité des renforts fibreux pour les composites et le développement d'outils de modélisation dédiés.

L'exposé proposé a pour ambition de présenter l'évolution de ces outils de modélisation et leurs performances actuelles.

Lors de leur mise en forme, ces renforts présentent des modes de déformation différents de ceux des matériaux continus : leurs directions d'anisotropie évoluent fortement, de même que leur densité ; les glissements possibles aux différentes échelles rendent difficiles l'établissement de lois de comportement pertinentes en grandes transformations dans le cadre classique des matériaux de Cauchy ; et les étapes ultérieures de mise en forme que constituent l'imprégnation de la matrice et son changement d'état rendent nécessaires l'introduction de nombreux couplages.

L'exposé présentera les différentes étapes de la modélisation des renforts et de leur mise en forme aussi bien à l'échelle du composant mécanique (échelle macroscopique) qu'aux échelles inférieures : l'échelle du fil ou de la mèche (échelle mésoscopique) et échelle du filament ou de la fibre (échelle microscopique). En effet, un enjeu majeur de la modélisation des renforts fibreux réside dans la capacité à choisir la bonne échelle de représentation pour capturer les phénomènes voulus : la mise en forme induit-elle des défauts ? Les fibres sont-elles où on le souhaite aussi bien en termes de densité que d'orientation ?

En s'appuyant sur la littérature récente, les lois de comportement aux différentes échelles seront présentées ainsi que les dernières innovations en termes d'éléments finis dédiés avec un focus spécial sur les perspectives liées à l'utilisation croissante des fibres naturelles et des matrices thermoplastiques qui nécessitent l'introduction de nouveaux outils.

*Intervenant

†Auteur correspondant: emmanuelle.vidal-salle@insa-lyon.fr

Prix posters

Développement du procédé L-PBF avec préchauffage pour la fabrication de superalliages base nickel non soudables

Matthieu Assainte * ^{1,2}, Christophe Colin ¹, Sylvain Depinoy ¹,
Jean-Dominique Bartout ¹, Lyliat Ferhat ¹, Nicolas Leriche ²

¹ Centre des Matériaux – Mines Paris - PSL (École nationale supérieure des mines de Paris), Centre National de la Recherche Scientifique – France

² Safran Additive Manufacturing Campus – Safran SA – France

A travers le projet NILS, SAFRAN souhaite supprimer la fissuration qui se manifeste pendant et après la rapide et complète solidification de bains en IN738LC obtenus par fusion laser sur lit de poudre (L-PBF). Le préchauffage semble être une solution pertinente pour s'affranchir de gradients thermiques et de retraits à la solidification très élevés, responsables en partie du phénomène de fissuration à chaud. Dans cette thèse, un mode de préchauffage innovant est développé. Il s'agit d'utiliser un laser défocalisé comme source de préchauffage en plus du laser de fusion focalisé. Pour maîtriser et contrôler ce préchauffage local, le procédé est instrumenté de deux caméras infrarouges. La première est coaxiale au laser et mesure un champ local de température à l'échelle du bain de fusion. La seconde est hors axe et enregistre la distribution de la température à la surface de la pièce fabriquée couche après couche.

*Intervenant

Stratégie de frittage économique pour la production de pièces en acier inoxydable 316L par fabrication additive MEAM granulés

Sophie Badin ^{*† 1,2}, Vincent Martin ¹, Luis Tejada ¹, Jean-François Witz ¹,
Delphine Auzène ², Vincent Magnier ¹, Ousseïni Marou-Alzouma ², Denis
Najjar ¹

¹ Laboratoire de Mécanique, Multiphysique, Multiéchelle - UMR 9013 – Centrale Lille, Université de Lille, Centre National de la Recherche Scientifique, Centre National de la Recherche Scientifique :
UMR9013 – France

² CRITT - Matériaux Innovation – – – France

La fabrication additive métallique est aujourd’hui dominée par des procédés coûteux de fusion sur lit de poudre. Cependant, elle devient de plus en plus accessible grâce à l’émergence de procédés inspirés du moulage par injection de métal (MIM) et basés sur l’extrusion de matière, appelés MEAM (Material Extrusion Additive Manufacturing). Cette étude a ainsi pour but de démontrer la possibilité de produire des pièces métalliques complexes, imprimées et frittées, avec un investissement initial inférieur à 10k€, en utilisant un four tubulaire de laboratoire et en remplaçant le dihydrogène largement utilisé dans l’industrie du MIM. Axée sur le frittage de l’acier inoxydable 316L imprimé par extrusion de granulés, cette étude donne une vue d’ensemble de l’effet des environnements de frittage sélectionnés, à savoir l’azote, l’argon et le vide primaire, sur les propriétés mécaniques, en comparaison avec les conditions industrielles. Dans l’ensemble le frittage sous vide permet d’obtenir des propriétés mécaniques similaires au frittage industriel sous dihydrogène et conformes aux normes applicables au MIM. En revanche, le frittage sous azote entraîne une augmentation de la résistance élastique, au détriment de l’allongement à la rupture, en raison des modifications microstructurales. Enfin, le frittage sous argon conduit à des propriétés intermédiaires.

*Intervenant

†Auteur correspondant: s.badin@critt-mi.com

Apports des simulations éléments finis sur agrégats polycristallins pour la compréhension et l'analyse de la dissipation des métaux sous sollicitations cycliques de faible amplitude

André Calazans Menescal De Souza ^{*† 1}, Sylvain Moyne ¹, Cédric Doudard ¹, Luc Saint-Sulpice ², Sylvain Calloch ¹

¹ Institut de Recherche Dupuy de Lôme – École Nationale Supérieure de Techniques Avancées Bretagne – France

² Institut de Recherche Dupuy de Lôme – Ecole Nationale d'Ingénieurs de Brest – France

L'analyse de la dissipation sous chargements cycliques, communément appelée mesures d'auto-échauffement, est une méthode rapide de plus en plus répandue pour estimer les propriétés en fatigue polycyclique (1). La mise en place de modèles établissant le lien entre les mesures d'auto-échauffement et les propriétés en fatigue reste une étape essentielle si on souhaite tirer pleinement profit de l'apport de cette approche. Dans ce travail, il est proposé d'utiliser des simulations éléments finis sur agrégats polycristallins pour analyser l'évolution de la dissipation en fonction du chargement lors de sollicitations cycliques de faibles amplitudes, et in fine alimenter ces modèles. L'accent est particulièrement mis sur l'étude de l'apparition hétérogène des phénomènes de micro-plasticité dans l'agrégat à l'origine de la dissipation (i.e., plasticité localisée dans quelques grains seulement). Un dialogue peut alors être établi avec des approches mésoscopiques, comme celles utilisant des processus ponctuel de Poisson (1) décrivant, de façon phénoménologique, l'apparition progressive et localisée de ces mécanismes.

Des chargements cycliques avec un rapport de charge $R = -1$ ont été considérés dans le cadre de cette étude. L'étude de l'influence de la loi de comportement définie au niveau des systèmes de glissement a également été menée. Les premiers résultats obtenus montrent un bon accord avec les résultats expérimentaux classiques de la littérature.

*Intervenant

†Auteur correspondant: andre.calazans@ensta-bretagne.org

Approche intégrée de corrélation d'images numériques pour l'évaluation des facteurs d'intensité de contrainte dans un essai de fretting

Filipe Da Rocha Chaves ^{*† 1}, Sylvie Pommier^{‡ 1}, Yoann Guilhem ¹,
Nathalie Serres ², Jean Balmon ²

¹ Ecole Normale Supérieure Paris-Saclay – LMPS - Laboratoire de Mécanique Paris-Saclay – France

² Safran Aircraft Engines – Département de Matériaux et Procédés – France

Présent dans le domaine de l'aéronautique, le fretting est un phénomène qui se produit à l'interface de différents contacts au sein d'un turboréacteur, pouvant entraîner l'amorçage de fissures et, par conséquent, des dommages importants aux composants concernés (1). Dans des conditions de glissement partiel, la sévérité du chargement de contact peut être évaluée grâce aux facteurs d'intensité de contrainte (FICs). Des essais expérimentaux de fretting, réalisés avec différents niveaux d'efforts tangentiels, ont permis d'accéder aux facteurs d'intensité de contrainte à travers une approche intégrée de corrélation d'images numériques (CIN). Finalement, une étude de sensibilité des paramètres a été réalisée pour évaluer l'impact sur les facteurs d'intensité de contrainte.

*Intervenant

†Auteur correspondant: chaves.engmec@gmail.com

‡Auteur correspondant: sylvie.pommier@universite-paris-saclay.fr

Calcul sur données issues de tomographies automatiques pour grandes variations géométriques : application à la simulation des procédés et à la vérification des fonctions mécaniques

Amelia Ferhat * 1,2

¹ Centre des Matériaux – Mines Paris - PSL (École nationale supérieure des mines de Paris), Centre National de la Recherche Scientifique – France

² Safran Tech – SAFRAN (FRANCE) – France

La correspondance ou l'appariement entre deux nuages de points en 3D ou 2D est un problème central en modélisation géométrique et en imagerie. Dans cet article, nous proposons une méthode d'appariement entre deux géométries à savoir une géométrie théorique, réalisée par une conception assistée par ordinateur (CAO) d'un noyau d'une aube de turbine et une géométrie de la pièce réelle produite à la suite du processus de fabrication. Les deux géométries sont représentées par des maillages triangulaires en 3D. Nous utilisons une approche spectrale basée sur l'opérateur de Laplace Beltrami. En effet, les vecteurs propres associés aux petites valeurs propre de cet opérateur nous permettent d'une part de sélectionner, par un algorithme de spectral clustering, quelques points du maillage CAO qui seront appariés aux points du maillage de la pièce réelle et d'autre part définir une nouvelle métrique pour la recherche des correspondances entre les deux maillages dans des cas où la distance euclidienne classique échoue. De plus, le spectre de cet opérateur calculé sur le maillage CAO donne une représentation de sa géométrie dans une base de vecteurs propres réduites, ce qui nous permettra de faire du Mesh morphing, c'est à dire passer d'un maillage théorique à un maillage qui prend en compte les variations géométriques de la pièce réelle.

*Intervenant

Réparation par fabrication additive des pièces endommagées d'un lanceur réutilisable

Florian Girault * ^{1,2}, Louise Toualbi ², Eric Charkaluk ¹

¹ Laboratoire de mécanique des solides – Ecole Polytechnique, Centre National de la Recherche Scientifique, Institut Polytechnique de Paris – France

² ONERA-The French Aerospace Lab – ONERA – France

La réparation des pièces industrielles endommagées représente un défi industriel important : la réduction des coûts, l'augmentation de la durée de vie et la réduction des déchets sont quelques-uns des objectifs poursuivis. L'utilisation de procédés de réparation conventionnels de fabrication additive, qui se caractérisent par une transformation à l'état liquide, pour des alliages d'aluminium à durcissement structural, est compliquée par leurs caractéristiques métallurgiques et la difficulté de traiter thermiquement des pièces massives.

Cette étude se concentre sur le procédé Additive Friction Stir Deposition, dans le but de valider cette méthode de réparation dans le contexte d'une application pour un lanceur réutilisable. Le comportement de l'interface entre la pièce endommagée à réparer et le matériau déposé en surface sera particulièrement étudié.

La méthodologie est la suivante. Tout d'abord, les microscopies optique et électronique à balayage sont utilisées pour analyser la microstructure des échantillons réparés, en particulier la cristallographie locale. Ensuite, une étude expérimentale est menée afin de caractériser le comportement mécanique des pièces réparées. Puis des essais de traction in situ MEB sont effectués, couplés à une analyse en corrélation d'images basée sur de la lithographie et un mouchetis afin d'accéder aux champs de déformation locaux. Plusieurs domaines ont été explorés, en tenant compte des variations de la microstructure dans les pièces réparées : le matériau d'origine et le matériau déposé.

L'impact de plusieurs caractéristiques microstructurales sur la localisation de la déformation plastique est étudié. Les phases intermétalliques les plus grossières se révèlent fragiles, se fissurant à des charges intermédiaires et déclenchant une forte concentration de déformation dans leur voisinage. Les paramètres cristallographiques et les champs de déformation ont également été corrélés, les résultats dépendant de l'emplacement de la zone analysée. Les joints de grains sont également identifiés comme des sites de forte déformation plastique. Cependant, en raison de l'interdépendance des contributions à la déformation plastique de chaque paramètre, ils ne peuvent être analysés séparément. Par conséquent, un scénario permettant d'expliquer la déformation plastique en fonction de la microstructure locale est proposé, en tenant compte de ces interconnexions.

*Intervenant

Développement d'un protocole d'essais d'auto-échauffement sous sollicitations cycliques à 20kHz et à haute température

Alexis Mion * ^{1,2}, Cédric Doudard ¹, Jonathan Cormier ³, Vincent Roué ⁴,
Sylvain Calloch ¹

¹ IRDL - UMR CNRS 6027 – ENSTA Bretagne – France

² Safran Aircraft Engines – SAFRAN (FRANCE) – Site de Villaroche, France

³ Institut Pprime – Université de Poitiers, École Nationale Supérieure de Mécanique et d'Aérotechnique [Poitiers], Centre National de la Recherche Scientifique – France

⁴ Safran Aircraft Engines – SAFRAN (FRANCE) – France

Les pièces constituant les parties chaudes des turboréacteurs sont soumises à de sévères sollicitations thermomécaniques, notamment de type vibratoire. L'amélioration des performances des moteurs d'avion, qui passe par l'augmentation des températures de fonctionnement, et un besoin permanent de réduction de masse conduit les aubages à supporter des sollicitations toujours plus sévères, en contrainte et en température. Dans ce contexte, il est alors primordial d'améliorer les méthodes de dimensionnement en fatigue à grand et très grand nombre de cycles. Cependant, la mise en place de modèles prédictifs reste difficile puisque le comportement en fatigue dépend de nombreux paramètres, rendant les essais de caractérisation très nombreux et il s'agit donc d'un processus long et très coûteux.

La méthode de l'auto-échauffement, qui se base sur la mesure de l'évolution de la température d'une éprouvette sous sollicitations cycliques, permet de réduire considérablement les temps de caractérisation en fatigue. En effet, cette signature thermique est la conséquence de mécanismes dissipatifs irréversibles, dont certains sont responsables de l'endommagement en fatigue. L'identification de ces mécanismes par la mesure de la dissipation cyclique permet alors à l'essai d'auto-échauffement d'apporter des informations complémentaires à celles issues d'un essai de fatigue classique.

L'objectif de cette étude est de proposer un protocole d'essai d'auto-échauffement sous sollicitations cycliques à 20 kHz et à haute température, ainsi qu'une méthode d'analyse adaptée. Des essais sont alors conduits sur l'alliage AM1, un superalliage base nickel monocristallin, jusqu'à une température de 950°C.

*Intervenant

Evaluation de la compacité d'un lit de poudre et méthodologie de mesure d'absorption par la méthode de la sphère d'Ulbricht

Thibaud Robert ^{*† 1}, Robin Kromer ¹, François-Xavier Kromm ¹,
Guillaume Nordet ¹, Corinne Arvieu^{‡ 1}

¹ Institut de Mécanique et d'Ingénierie – Université de Bordeaux, Institut polytechnique de Bordeaux, Centre National de la Recherche Scientifique, Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement, Arts et Métiers Sciences et Technologies – France

Pour le procédé de fusion laser sur lit de poudre (LPBF), la compacité du lit de poudre est une caractéristique importante puisque celle-ci définit la quantité de poudre fusionnée localement et détermine la qualité de la production. Les protocoles de mesures basés sur une pesée de petite quantité de poudre ou encore des analyses par photographie sont difficilement applicables sur les machines industrielles. Une méthode a été développée afin de relier la compacité du lit de poudre à son absorptivité, mesurée par la technique de la sphère intégrante d'Ulbricht. Ainsi, une mesure locale de l'absorptivité du lit de poudre permet de connaître la compacité du lit de poudre à l'endroit de la mesure.

*Intervenant

†Auteur correspondant: thibaud.robert@u-bordeaux.fr

‡Auteur correspondant: corinne.arvieu@u-bordeaux.fr

Prédiction de l'état mécanique et des défauts de recristallisation des pièces coulées monocristallines à base Nickel au cours du refroidissement

Louis Roche * ^{1,2}, Houssem Badreddine * ^{† 1}, Carl Labergere * ^{‡ 1}, Mylène Leduc *

², Ngadia Taha Niane *

2

¹ Lasmis – ICD – LASMIS. Université de Technologie de Troyes – France

² Safran Tech PFX – Safran SA – France

Dans la présente étude on s'intéresse à la prédiction du défaut de recristallisation d'une aube de turbine monocristalline à base Nickel pendant une opération de coulée. En effet, lors de la solidification, des déformations sont introduites entraînant la germination de grains fortement désorientés conduisant à une dégradation significative des propriétés mécaniques. Des précédents travaux ont mené à la construction d'un modèle thermo-élastoviscoplastique avec prise en compte de la transformation des états liquide→pâteux→solide pour simuler le refroidissement après une opération de fonderie en cire perdue. Dans ce travail l'attention a été apportée dans un premier temps à l'ajout de nouveaux critères de recristallisation et les résultats numériques ont été comparés aux résultats expérimentaux et dans un second temps sur l'optimisation du modèle numérique.

*Intervenant

[†]Auteur correspondant: houssem.badreddine@utt.fr

[‡]Auteur correspondant: carl.labergere@utt.fr

Posters

Présentation de thèse : Etude de l'influence de l'azote sur le comportement mécanique et l'évolution de la microstructure de fils d'acier perlitique au cours du tréfilage

Enzo Ceron Arana * ¹

¹ Laboratoire de Mécanique Paris-Saclay – CentraleSupélec, Université Paris-Saclay, Centre National de la Recherche Scientifique, Ecole Normale Supérieure Paris-Saclay, Institut de Chimie Moléculaire et des Matériaux d'Orsay (ICMMO) – France

Un des objectifs de l'entreprise Michelin est d'augmenter le taux de matière recyclé utilisé dans leurs pneus. Les renforts métalliques (câbles composés de fils tréfilés) présents au sein du pneu devront donc être remplacés par des aciers recyclés. Il est nécessaire que ces aciers soient fortement déformables. En effet, le procédé peut faire monter la déformation jusqu'à 350%. Cependant, les aciers recyclés au four à arc électrique ont une constitution plus riche en azote. Cela entraîne des changements microstructuraux ainsi que des changements de propriétés mécaniques à l'échelle globale et locale. Des analyses préliminaires ont déjà permis de déterminer certaines évolutions de propriétés : écart de comportement du fil en torsion, plus grande sensibilité au vieillissement, influence sur la déformabilité, ... Le but de cette thèse est de comprendre l'effet qu'a la présence de l'azote sur ces fils d'aciers perlitique ainsi que sur le procédé de tréfilage en lui-même. La réalisation d'essais mécaniques aux échelles macroscopique et microscopique permettra d'obtenir le comportement des fils d'aciers pour différents taux d'azote et à différentes étapes du procédé de tréfilage. De la même façon, l'évolution de la microstructure sera investiguée et décrit en fonction des mêmes paramètres. Cet acier étant perlitique, l'anisotropie du matériau sera également étudiée car son influence est très importante. En couplant ces résultats à un outil de simulation reproduisant le procédé de tréfilage pour des aciers non recyclés, il sera donc possible de mettre en place un nouveau modèle prenant en compte l'azote au sein du fil tréfilé. Cela permettra à Michelin de mettre en place des nouveaux schémas de tréfilage et éventuellement de changer le processus industriel afin d'introduire ces aciers recyclés dans les nouveaux pneus.

Mots clés: caractérisation, microstructure, comportement mécanique, acier perlitique, essais macroscopiques, essais microscopiques, anisotropie, taux d'azote, vieillissement, déformabilité.

*Intervenant

Fast numerical model for microstructure prediction adapted for DED process

Quentin Dollé * ¹, Jean-François Witz , Ahmed El Bartali , Daniel Weisz-Patrault

¹ Univ. Lille – Univ. Lille, CNRS, Centrale Lille, FRE 2016 - LaMcube, F-59000 Lille, France – France

Additive manufacturing parts have specific microstructures related to the specific thermal conditions undergone during the process. Process parameters have substantial impact on the resulting microstructure which partly drive the mechanical behavior of the final part. Targeting microstructures could be expected in a matter of optimization. To do so, thermal activity is a suitable gateway bridging process parameters and microstructure while monitoring it in-situ. Cellular Automaton models are widely used to simulate solidification process during additive manufacturing, however the computational cost remains significant especially for large simulations (1). In the continuity of recent models (2,3), the present work aims at upscaling complex phenomena taking place at the scale of the solidification process into simpler evolution laws in the spirit of (4,5). As the resulting microstructure is strongly correlated to the unknown microstructure of the substrate upon which the epitaxial growth takes place, the proposed approach leads to a statistical analysis of the microstructure resulting from the solidification process.

In this study, coupled together, a two-color pyrometer and a monochromatic infrared camera provide a temperature field near the melt pool. Cooling rates, thermal gradients and melt pool shape are then observed. Changing process parameters affect thermal activity near the melt pool changing the resulting microstructure. Knowing the relationship between thermal activity and microstructure, the previous infrared sensors become suitable tools for in-situ monitoring of the process.

Références

- (1) Y. Lian et al. *A cellular automaton finite volume method for microstructure evolution during additive manufacturing*, Materials & Design. Volume 169, 5 May 2019, 107672.
- (2) D. Tourret, A. Karma Multiscale dendritic needle network model of alloy solidification, *Acta Materialia*, 61-17-6474-6491
- (3) S. Paul et al. *A Discrete Dendrite Dynamics Model for Epitaxial Columnar Grain Growth in Metal Additive Manufacturing with Application to Inconel*, Additive Manufacturing, 36-101611-2020
- (4) Sakout, S., Weisz-Patrault, D., & Ehrlicher, A. (2020). Energetic upscaling strategy for grain growth. i: Fast mesoscopic model based on dissipation. *Acta Materialia*, 196, 261-279.

*Intervenant

(5) Weisz-Patrault, D., Sakout, S., & Ehlacher, A. (2021). Energetic upscaling strategy for grain growth. II: Probabilistic macroscopic model identified by Bayesian techniques. *Acta Materialia*, 210, 116805.

Utilisation du formage incrémental robotisé à chaud sur polymère dans le cadre de la fabrication d'orthèses recyclables et biosourcées

Valentin Duarte Rocha ^{*† 1}, Laurence Giraud Moreau^{‡ 1}, Abel Cherouat^{§ 2}

¹ Laboratoire des Systèmes Mécaniques et d'Ingénierie Simultanée – Université de Technologie de Troyes – France

² Automatic mesh generation and advanced methods – Université de Technologie de Troyes – France

Le formage incrémental est un procédé innovant de fabrication de surface particulièrement adapté aux petites séries et au prototypage. Son utilisation dans le cas de la fabrication d'orthèses à base de polymères reste encore limitée. Grâce à une plateforme expérimentale portant sur le formage mono-point à chaud sur polystyrène choc sur bras robot ainsi que la réalisation d'un modèle numérique pour comparer les résultats obtenus. Nous montrerons que la réalisation de surface dimensionnellement viable et adaptative pour une utilisation médicale est possible. Dans un premier temps avec un polymère recyclable et par la suite sur des polymères ou composites biosourcés afin de répondre au besoin d'appareillage plus écologique.

*Intervenant

† Auteur correspondant: valentin.duarte_rocha@utt.fr

‡ Auteur correspondant: laurence.moreau@utt.fr

§ Auteur correspondant: abel.cherouat@utt.fr

Etude expérimentale et modélisation du comportement en flexion d'un alliage base Ni traité SMAT sollicité en température

Anna Garambois * ¹, Pascale Kanoute ¹, Louise Toualbi ¹, Yves Renollet ¹,
Quentin Barres ¹, Delphine Retraint ²

¹ ONERA – DMAS ONERA – France

² Université de Technologie de Troyes – LASMIS – France

Les procédés de traitement de surface de type grenailage sont aujourd'hui largement utilisés en aéronautique dans le but d'améliorer les propriétés mécaniques de surface de pièces critiques comme les disques de turbine. Ce traitement de grenailage influence grandement le comportement global et améliore la durée de vie en fatigue des matériaux grenailés en retardant l'amorçage de fissures. Le procédé SMAT (Surface Mechanical Attrition Treatment) est un procédé dérivé du grenailage permettant de créer une couche nanocristalline à la surface des pièces mécaniques traitées, sans en modifier la composition chimique, ni la microstructure à cœur. Le principe repose sur la mise en mouvement de billes parfaitement sphériques, en acier, à l'aide d'un générateur ultrasonore (20 kHz). Les billes impactent la surface du matériau de manière répétée et aléatoire, créant ainsi des déformations plastiques sévères. Plusieurs études ont mis en évidence une augmentation de la limite d'élasticité, de la contrainte à rupture ainsi que de la durée de vie en fatigue de pièces métalliques traitées par SMAT. L'objectif de cette étude est de caractériser l'effet du SMAT et de modéliser son impact sur les propriétés mécaniques d'un superalliage base nickel, l'Inconel 718. Dans ce contexte, cela suppose de développer une méthodologie qui sache rendre compte du gradient de propriétés du matériau. En effet, le matériau obtenu après traitement présente, en plus du raffinement de la microstructure en surface, un gradient d'écroissage et de contraintes résiduelles depuis la surface traitée SMAT vers le cœur de la pièce. Pour répondre à cette problématique, le comportement monotone du matériau sous sollicitations thermomécaniques a été étudié par le biais d'essais de flexion 4 points réalisés *in situ* sous MEB à 20°C et 450°C sur des éprouvettes traitées SMAT. On cherche ainsi à étudier les déformations locales de la couche affectée par le procédé SMAT à l'échelle microscopique. En parallèle, des observations MEB, des mesures de microdureté et des mesures de désorientations cristallines par EBSD ont été réalisées afin de caractériser le gradient de propriétés du matériau. En parallèle, des simulations par éléments finis des essais de flexion menés à 20°C et 450°C ont été entreprises dans le but de caractériser par méthode inverse le comportement du matériau traité. Cela implique l'introduction des contraintes résiduelles induites par le procédé dans le calcul puis la modélisation de leur évolution au cours de l'essai de flexion. Les essais de flexion ont mis en évidence une entrée en plasticité retardée du matériau traité SMAT à 20°C et 450°C en comparaison du matériau non traité. De plus, il semblerait que les mécanismes d'écroissage soient grandement modifiés par le procédé. On distingue aussi un effet des contraintes résiduelles présentes dans le matériau, se traduisant notamment par un décalage de la fibre neutre. Enfin, les simulations par

*Intervenant

éléments finis semblent indiquer que la prise en compte dans le calcul des contraintes résiduelles seules ne permet pas de décrire correctement le comportement du matériau traité.

Jumeau numérique pour la mise en forme de tôles métalliques

Lisa Germain * ¹

¹ Institut de Recherche Dupuy de Lôme – Université de Bretagne Sud [UBS] – France

Le contexte général de cette étude est le développement d'un jumeau numérique pour un procédé de mise en forme de tôles métalliques multi-étapes. Plusieurs procédés sont considérés dans un premier temps, tels que l'emboutissage de godets cylindriques, le pliage d'une forme en U et les modèles numériques sont développés, afin d'analyser la sensibilité des grandeurs de sortie aux paramètres d'entrée tels que les propriétés mécaniques du matériau, la lubrification, les efforts sur les outils.

*Intervenant

Méthode efficace pour simuler le transfert de chaleur et de masse durant le procédé de soudage et de fabrication additive

Yabo Jia * ¹, Yassine Saadlaoui ², Eric Feulvarch ², Jean-Michel Bergheau ²

¹ Laboratoire d'Automatique, de Mécanique et d'Informatique industrielles et Humaines - UMR 8201 – Centre National de la Recherche Scientifique, Université Polytechnique Hauts-de-France, INSA Institut National des Sciences Appliquées Hauts-de-France – France

² Laboratoire de Tribologie et Dynamique des Systèmes – Ecole Centrale de Lyon, Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Saint Etienne, Centre National de la Recherche Scientifique – France

La prédiction numérique de la morphologie du bain de fusion et de la répartition de la température des processus thermomécaniques (soudage, fabrication additive) joue un rôle important dans la compréhension des relations entre les paramètres du processus et la qualité des pièces fabriquées. Les modèles de conduction thermique sont limités dans leur prévisibilité car les phénomènes de transport dans le bain de fusion sont ignorés. En revanche, le modèle multiphysique permet de prendre en compte le transfert de chaleur, l'évolution de la surface libre et les phénomènes de transport dans le bain de fusion, conduisant ainsi à des prédictions plus précises. Cependant, le coût de calcul des modèles multiphysiques les rend peu pratiques pour les simulations à échelle partielle. Dans cet article, la technique de séparation des zones (fluide and solide) basé sur la méthode des éléments finis est présenté, qui permet de résoudre séparément le problème du thermo-fluide uniquement dans la petite zone mobile qui contient le bain de fusion et le problème de transfert de chaleur dans le reste. Par conséquent, cette nouvelle technique proposée est prédictive ainsi que le modèle de thermo-fluide complet, tout en étant beaucoup plus efficace qu'un modèle de thermo-fluide complet car il y a beaucoup moins de degrés de liberté (DOF) pour résoudre. Enfin, des tests de validation numérique dans les simulations de soudage et de fabrication additive mettent en évidence son efficacité et son haute-fidélité.

*Intervenant

Modèle macroscopique de plasticité par avalanches

Mathias Lamari ^{*† 1}, Pierre Kerfriden , Vladislav A. Yastrebov , Kais Ammar , Samuel Forest

¹ Mines Paris - PSL (École nationale supérieure des mines de Paris) – Université Paris sciences et lettres – 60, boulevard Saint-Michel 75006 Paris, France

L'écoulement plastique est considéré classiquement comme un écoulement continu dans les codes par éléments finis (EF), que ce soit en plasticité isotrope, anisotrope ou en plasticité cristalline. Ce postulat de la mécanique des milieux continus contredit la nature intermittente de la plasticité aux échelles élémentaires. Lors de la compression de micropiliers, la courbe déformation/contrainte montre la présence de fortes serrations, en lien avec l'activation brutale d'un nombre très faible de plan de glissement (1). Sur des échantillons centimétriques monocristallins, des expériences d'émission acoustique et d'extensométrie haute résolution démontrent aussi le caractère non-chaotique mais au contraire organisé de l'écoulement plastique lié aux avalanches de dislocations dues à leur interactions élastiques (2). Avec l'avancement de la nanotechnologie, il devient nécessaire de développer un modèle prenant en compte l'intermittence spatio-temporelle de la plasticité qui soit utilisable dans des codes EF. Comprendre la plasticité cristalline à cette échelle ouvre la voie à un large éventail de nouvelles applications en ingénierie, telles que l'usinage à l'échelle nanométrique et la conception de nouveaux matériaux radicaux, comme les aciers hiérarchiques.

Différents modèles dans la littérature démontrent aussi l'intermittence de la plasticité, comme le modèle tensoriel mésoscopique (MTM) (3), ou à des échelles atomiques, les modèles de dynamique moléculaire (DM) et de dynamique discrètes des dislocations (DDD). Ces derniers reproduisent précisément le caractère corrélé des avalanches de dislocations et la distribution de leur amplitude suivant des lois puissances trouvée expérimentalement (2).

Dans ce travail, nous proposons une nouvelle approche pour prendre en compte l'intermittence de la déformation plastique, qui reste dans le formalisme de la mécanique des milieux continus. Nous introduisons une constante, le quantum de déformation plastique, noté Δp_{\min} , qui correspond à la déformation plastique portée par l'avalanche minimale de dislocations pouvant exister au sein du matériau. Le modèle incrémental proposé dans ce travail repose sur l'algorithme traditionnel prédicteur-correcteur pour calculer le comportement élastoplastique d'un matériau soumis à une déformation extérieure quelconque. Par simplicité, l'élasticité et la plasticité du matériau sont considérés isotropes. Le modèle est présenté dans le cadre des petites déformations pour la plasticité de von Mises. Lors du calcul, l'incrément de déformation plastique équivalente Δp est calculé par la méthode du retour radial, à l'aide de la surface de charge et de la loi de normalité. Cet incrément Δp est ensuite comparé au quantum plastique Δp_{\min} , et doit lui être supérieur pour que le matériaux plastifie. Les résultats du modèle implémenté en python à l'aide

*Intervenant

†Auteur correspondant: mathias.lamari@minesparis.psl.eu

de la librairie FEniCSX seront explicités dans un cas homogène et avec des géométries complexes. Les simulations montrent que l'introduction du quantum plastique permet de retrouver l'intermittence spatio-temporelle de l'écoulement plastique, et rend compte dans un modèle EF de l'auto-organisation de l'écoulement plastique lors de sollicitations complexes.

(1) P. Zhang, O. U. Salman, J.Y. Zhang, G. Liu, J. Weiss, L. Truskinovsky, J. Sun, Taming intermittent plasticity at small scales, *Acta Materialia*, vol.128, p.351-p.364, 2017.

(2) J. Weiss, T. Richeton, F. Louchet, F. Chmelik, P. Dobron, D. Entemeyer, M. Lebyodkin, T. Lebedkina, C. Fressengeas, R. J. McDonald, Evidence for universal intermittent crystal plasticity from acoustic emission and high-resolution extensometry experiments, *Physical Review B*, vol.76, p.224110-1-p.224110-8, 2007.

(3) R. Baggio, O.U. Salman, L. Truskinovsky, Inelastic rotations and pseudoturbulent plastic avalanches in crystals, *Physical Review E*, vol.107, p.005000-1-p.005000-19, 2023.

Caractérisation biaxiale de polymères imprimés 3D pour des simulateurs chirurgicaux patient-spécifiques

Margot Leclercq * ¹, Jan Neggers , Elsa Vennat

¹ Laboratoire de Mécanique de Paris Saclay (LMPS) – École normale supérieure de Cachan - ENS Cachan, CNRS - CentraleSupelec – France

Les procédés de fabrication additive s'installent progressivement au sein du secteur médical en permettant l'obtention de dispositifs patients-spécifiques qui améliorent la prise en charge tout en réduisant les coûts associés. Dans le cas particulier des interventions de Réparation Endovasculaire d'Anevrisme (EVAR), l'impression 3D est utilisée pour fournir des modèles 3D réalistes d'anatomies pathologiques permettant de former les chirurgiens, répéter des cas complexes et améliorer les procédures per- opératoires. Grâce au procédé de fabrication additive PolyJet, ces modèles physiques peuvent être imprimés par combinaison de différents matériaux photopolymères souples et rigides pour reproduire le retour haptique de l'aorte humaine au sein du replica.

En revanche, la reproduction fiable des états de contrainte et de déformation dans le simulateur imprimé 3D reste un défi important. Elle requiert une bonne compréhension du comportement mécanique des matériaux imprimés, encore à établir. La caractérisation de leur comportement est complexifiée par les liens structure – process – propriétés de la technologie PolyJet montrés par plusieurs auteurs, induisant par exemple certaines propriétés matériaux anisotropes (1)(2)(3). Alors que la plupart de ces études s'intéressent à la réponse des matériaux en sollicitation uniaxiale, le modèle anatomique imprimé 3D subit plutôt des sollicitations multiaxiales complexes au cours de la procédure chirurgicale. Cette étude enrichit la compréhension de la réponse mécanique via des essais en sollicitation biaxiale tout en tenant compte de l'anisotropie des matériaux imprimés. L'identification des propriétés matériaux sur ces essais complexes à caractériser est réalisée par méthode intégrée de corrélation d'images (4).

References

(1) M. Barclift et C. Williams, " EXAMINING VARIABILITY IN THE MECHANICAL PROPERTIES OF PARTS MANUFACTURED VIA POLYJET DIRECT 3 D PRINTING ", 2012.

(2) P. Gay, D. Blanco, F. Pelayo, A. Noriega, et P. Fernandez, " Analysis of Factors Influencing the Mechanical Properties of Flat PolyJet Manufactured Parts ", *Procedia Eng.*, vol. 132, p. 70-77, janv. 2015, doi: 10.1016/j.proeng.2015.12.481.

(3) M. Matusu et al., " The effects of the printing direction and UV artificial degradation on

*Intervenant

the mechanical properties using AM PolyJet technology ", Appl. Comput. Mech., vol. 15, no 1, Art. no 1, juin 2021, doi: 10.24132/acm.2021.649.

(4) J. Neggers, F. Mathieu, F. Hild, et S. Roux, " Simultaneous full-field multi-experiment identification ", Mech. Mater., vol. 133, p. 71-84, juin 2019, doi: 10.1016/j.mechmat.2019.03.001.

TECSANTE I3D : Une plateforme d'impression pour soutenir la recherche médicale et l'enseignement

Vincent Martin ^{*†} ¹, Jean-François Witz ², Marion Dehurtevent ¹, Nicolas
Blanchemain ¹, Romain Nicot ¹

¹ Univ. Lille, INSERM, CHU Lille, U1008 – Advanced Drug Delivery Systems, Lille, France – Univ.
Lille, Inserm, CHU Lille – France

² Laboratoire de Mécanique, Multiphysique, Multiéchelle - UMR 9013 – Centrale Lille, Université de
Lille, Centre National de la Recherche Scientifique, Centre National de la Recherche Scientifique :
UMR9013 – France

Dans le cadre du projet CPER TECSANTE (Contrat Plan État Région), l'unité INSERM U1008 et le laboratoire LaMcube mettent en place une plateforme d'impression 3D multi-procédés. Celle-ci a pour objectifs d'accompagner les projets de recherche en impression 3D de l'université et du CHU de Lille, ainsi que de participer au transfert de la R&D vers la pédagogie.

*Intervenant

†Auteur correspondant: vincent.martin@univ-lille.fr

Etude de l'influence de l'orientation des défauts poreux liés à la trajectoire d'impression sur les propriétés élastoplastiques de pièces réalisées par procédé ADAM

Victoria Mondesir–About ^{*† 1}, Pascal Lafon ¹, Alexandre Charles , Eric Labbé ²

¹ Laboratoire des Systèmes Mécaniques et d'Ingénierie Simultanée – Université de Technologie de Troyes – France

² EISINe-Campus Sup Ardenne – Université de Reims Champagne-Ardenne, France – France

Parmi les procédés de fabrication additive, la Fabrication Additive par Diffusion Atomique (ADAM) se caractérise par une séquence innovante de procédés existants. Au cours de l'étape d'impression un filament constitué de poudre métallique dans une matrice polymérique est déposé suivant une trajectoire de remplissage prédéfinie. La pièce obtenue, appelée pièce verte, est ensuite déliantée chimiquement puis frittée, le polymère restant est alors sublimé tandis que les particules métalliques coalescent par diffusion atomique (2).

Au cours de ces étapes des défauts poreux apparaissent, deux types de défauts sont observés : des cavités allongées dans une direction préférentielle et dont l'axe d'élongation dépend de la direction d'impression ainsi que des pores sphériques, répartis aléatoirement au sein de la matrice métallique, qui se forment lors de l'étape de frittage (3). Ces deux types de défauts influencent les propriétés mécaniques de la pièce finale (1). L'objet de cette étude concerne l'influence de l'orientation des cavités allongées associée à trois configurations d'impression : à plat avec remplissage en diagonales à 45° par rapport à la direction Y ("flat"), sur la tranche ("edge") et à la verticale ("upright").

Afin de quantifier l'impact des structures de défauts poreux associées à ces configurations d'impression une Analyse par Eléments Finis (FEA) est menée sur trois types de Volumes Élémentaires Représentatifs (VER) modélisant par des formes archétypales les cavités observées. Ces VER générés présentent des taux de porosité de 0.7 % à 3.5 %. Un déplacement uniaxial selon la direction Y est imposé, la loi de comportement associée est élastoplastique avec écrouissage linéaire isotrope. L'évolution en fonction du taux de porosité (tx poro) des courbes de déformation-contrainte ainsi que celle des valeurs apparentes du module d'Young, du module d'écrouissage et de la limite d'élasticité conventionnelle à 0.2 % est ainsi mise en évidence et quantifiée.

Références

(1) Y. Abe et al., Effect of Layer Directions on Internal Structures and Tensile Properties of 17-4PH Stainless Steel Parts Fabricated by Fused Deposition of Metals, Materials, Vol.14, n°2,

*Intervenant

†Auteur correspondant: victoria.mondesir--about@utt.fr

(2021) p243.

(2) T. Henry et al., Mechanical behavior of 17-4 PH stainless steel processed by atomic diffusion additive manufacturing, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol.114, n^o7-8, (2021) p2103-2114.

(3) G. Singh et al., Copper additive manufacturing using MIM feedstock : adjustment of printing, debinding, and sintering parameters for processing dense and defectless parts, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol.115, n^o1-2 (2021) p449-462.

Etude de la fissuration à chaud du Norem02 déposé par procédé de soudage PTA

Maëlle Moor ^{*† 1,2}, Nicolas Tardif^{† 1}, Daniel Nelias^{§ 1}, Joel Courbon^{¶ 2},
Miguel Yescas ³

¹ Laboratoire de Mécanique des Contacts et des Structures [Villeurbanne] – Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, Centre National de la Recherche Scientifique, Centre National de la Recherche Scientifique : UMR5259 – France

² Matériaux, ingénierie et science [Villeurbanne] – Université Claude Bernard Lyon 1, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, Centre National de la Recherche Scientifique, Centre National de la Recherche Scientifique : UMR5510 – France

³ Section DTIMM – FRAMATOME – France

Afin de réduire les expositions aux sources de rayonnement secondaire des employés dans les centrales nucléaires EPR, Framatome a fait le choix de limiter la présence de cobalt des différents composants en contact avec le milieu primaire, notamment dans les tuyauteries. Pour remplacer des alliages de cobalt, comme le StelliteTM, un alliage de base fer, dénommé NOREM02, a été retenu. Cet alliage est utilisé comme revêtement dur pour limiter l'usure des pièces d'étanchéité grâce à sa grande dureté et représente le meilleur compromis aux alliages base cobalt malgré ses propriétés tribologiques inférieures. Le NOREM02 est déposé par procédé de soudage PTA (Plasma Transferred Arc) à l'aide d'une torche, créant un arc plasma amorçant la fusion du métal de base et la protection gazeuse de la soudure, et projetant la poudre de NOREM02 dans le bain de fusion. Le rechargement PTA est un procédé multicouche, généralement réalisé en deux ou trois couches pour atteindre l'épaisseur spécifiée de dépôt dur de 5 mm (1).

La microstructure du NOREM02 est principalement austénitique et intègre un réseau continu de carbures primaires de chrome, et de carbures riches en molybdène (2). Le procédé de rechargement créé une microstructure très colonnaire, et génère des contraintes transitoires de soudage. Cela rend le matériau sensible aux phénomènes de fissuration à chaud (FAC) (3). Deux d'entre eux ont été mis en évidence dans le cas de l'alliage. La fissuration à chaud par solidification, qui a lieu directement dans la zone fondue lors du refroidissement de l'état liquide à l'état solide. Il est directement dépendant de l'intervalle de température de solidification du mélange, de la solidification colonnaire, des contraintes de soudage, et d'éléments chimiques favorisant les phases secondaires à plus bas point de fusion (4)(5)(6). Le second phénomène est la perte de ductilité à chaud à l'état solide de l'alliage (Ductility Dip Cracking : DDC). Il a lieu à l'état solide entre 0,5 Ts et 0,8Ts et peut donc avoir lieu dans la Zone Affectée Thermiquement (ZAT) du rechargement multicouche PTA. Les causes de ce phénomène sont à l'heure actuelle toujours discutées (glissement de joint de grains, morphologie des joints de grains, présence de carbures secondaires, de ségrégations de soufre et phosphore aux joints de grains) (7)(8). La DDC conduit à de la

*Intervenant

†Auteur correspondant: maelle.moor@insa-lyon.fr

‡Auteur correspondant: nicolas.tardif@insa-lyon.fr

§Auteur correspondant: daniel.nelias@insa-lyon.fr

¶Auteur correspondant: joel.courbon@insa-lyon.fr

fissuration interdendritique.

L'objectif du projet de thèse est d'étudier la susceptibilité du NOREM02 à la fissuration à chaud vis-à-vis des deux phénomènes ci-dessus. Il s'agit d'identifier les mécanismes de solidification et d'établir des liens entre microstructure et comportement mécanique à chaud sous transitoire thermomécanique représentatif d'un rechargement multicouche PTA. Pour cela nous réaliserons des caractérisations microstructurales post-mortem d'échantillons soumis à des sollicitations thermomécaniques représentatives. Nous réaliserons également une étude paramétrique sur l'effet de la variabilité de composition chimique de l'alliage (globale et locale).

Deux essais thermomécaniques représentatifs seront réalisés :

- Des essais de traction sous transitoires thermiques permettant d'étudier la susceptibilité à la DDC. Ces essais seront réalisés sur le dispositif Gleeble3500.
- Des essais PVR (plaque soumise à une traction à vitesse de déplacement imposée linéaire lors du passage d'une source de chaleur) plus représentatifs des états de contraintes lors du rechargement PTA et permettant l'étude de la susceptibilité à chacun des mécanismes de fissuration à chaud (liquation, solidification, creux de ductilité) (9).

Ces essais seront instrumentés de façon systématique par une mesure couplée des champs thermiques et cinématiques afin de déterminer les champs thermomécaniques dans les régions d'intérêt des essais (zones fissurées) avec une résolution spatiale et temporelle fine. L'analyse de ces essais permettra un dialogue essais/simulation numérique pour identifier des critères de rupture macroscopiques associés aux différents mécanismes de fissuration (10).

Pour cette présentation de poster, je présenterai les protocoles d'essais et les méthodes de couplage thermique et cinématique qui seront mis en place.

Références

- (1) Beaurin, G. SIMULATION ET ÉTUDE EXPÉRIMENTALE DES CONTRAINTES RÉSIDUELLES DANS LES DÉPÔTS DURS NOREM DES MATÉRIELS DE ROBINETTERIE. **2012**.
- (2) Beaurin, G.; Mathieu, J.-P.; Gauthier, E.; Nelias, D.; Coret, M.; Arnoldi, F. Microstructural and Mechanical Properties Evolutions of Plasma Transferred Arc Deposited Norem02 Hardfacing Alloy at High Temperature. *Mater. Sci. Eng. A* **2011**, *528* (15), 5096–5105. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.02.077>.
- (3) Que, Z.; Ahonen, M.; Virkkunen, I.; Nevasmaa, P.; Rautala, P.; Reinval, H. Study of Cracking and Microstructure in Co-Free Valve Seat Hardfacing. *Nucl. Mater. Energy* **2022**, *31*, 101202. <https://doi.org/10.1016/j.nme.2022.101202>.
- (4) Rappaz, M.; Drezet, J.-M.; Gremaud, M. A New Hot-Tearing Criterion. *Metall. Mater. Trans. A* **1999**, *30* (2), 449–455. <https://doi.org/10.1007/s11661-999-0334-z>.
- (5) Kujanpää, V.; Suutala, N.; Takalo, T.; Moisio, T. Correlation Between Solidification Cracking and Microstructure in Austenitic and Austenitic-Ferritic Stainless Steel. *Welding Research International* 9(2):55-76. *Weld. Res. Int.* **1979**, *9*, 55–76.
- (6) Bouffier, L. Modélisation de la fissuration à chaud lors du soudage de l'alliage base nickel IN600. **2013**.

(7) Rapetti, A. Fissuration à Chaud Par Chute de Ductilité Dans Les Métaux d'apport Pour Le Soudage d'alliages à Base de Nickel. **2018**. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.27610.08642>.

(8) Kreuter, V, V. C. (2015). Optimization and Application of the Strain-To-Fracture Test for Studying Ductility-Dip Cracking in Ni-base Alloys (Master's thesis, Ohio State University). OhioLINK Electronic Theses and Dissertations Center.

(9) Norme Essais PVR, ISO. ISO/TR 17641-3:2005(F). ISO, 2005, Essais destructifs des soudures sur matériaux métalliques - Essais de fissuration à chaud des assemblages soudés - Procédés de soudage à l'arc - Partie 3: Essais sur éprouvette soumise à une charge extérieure

(10) Jailin, T.; Tardif, N.; Chaudet, P.; Desquines, J.; Coret, M.; Baietto, M.-C.; Georghum, V. Measuring Both Thermal and Kinematic Full-Fields Using a Single CMOS Camera during High Temperature Tests. *Opt. Lasers Eng.* **2022**, *158*, 107107. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2022.107107>

Instrumentation du procédé LMD-p in-operando en vue d'un contrôle en boucle fermée

Maxime Rey * ¹

¹ Institut National des Sciences Appliquées de Lyon – Institut National des Sciences Appliquées,
Université de Lyon – France

Les technologies de fabrication additive métallique de type LMD-p (projection de poudre sous flux dirigé) sont des procédés jeunes qui souffrent d'un manque de fiabilité pour atteindre les standards industriels d'une production automatisée capable de produire des séries unitaires à plus volumineuses de pièces de haute qualité. Les pièces qui en découlent peuvent être caractérisées par des phases hors-équilibre, des fissures de solidification/liquation, une solidification directionnelle, des contraintes résiduelles, des porosités, de la délamination, du gauchissement. Certaines de ces caractéristiques peuvent être significativement atténuées par une optimisation du procédé, un monitoring in-operando et un contrôle en boucle fermée du procédé. Via ce poster on présentera le monitoring in-operando du procédé basé sur une mesure du champ thermique du bain fondu couplé avec une mesure topographique du cordon en cours de fabrication. Le monitoring est appliqué à des fabrications de murs en 316L en faisant varier l'énergie surfacique (J/mm^2), le dépôt linéique (g/mm) entre chaque mur. Le lien entre monitoring et état résiduel est mis en évidence. En perspective ces travaux serviront à nourrir des critères de contrôle en boucle fermée du procédé.

*Intervenant

Etude expérimentale et numérique des évolutions microstructurales dues à la déformation et à la température: cas de l'aluminium pur

Pauline Stricot * ¹, Anna Ask ¹, Louise Toualbi ¹, Quentin Barres ¹, Yves Renollet ¹, Henry Proudhon ², Samuel Forest ²

¹ DMAS, ONERA, Université Paris Saclay [Châtillon] – ONERA, Université Paris-Saclay – France

² Centre des Matériaux – Mines Paris - PSL (École nationale supérieure des mines de Paris), Centre National de la Recherche Scientifique – France

La métallurgie conventionnelle est basée sur des procédés thermomécaniques comme le laminage, le tréfilage ou encore le forgeage. Le couplage entre la déformation et la température mis en jeu lors de ces procédés provoque des modifications de microstructure qui impactent fortement les propriétés macroscopiques des métaux. Parmi les mécanismes d'évolution microstructurale qui peuvent apparaître se trouvent la migration de joint de grains, la restauration et la recristallisation, mécanismes qui, bien que connus et caractérisés de longue date, restent difficiles à modéliser.

Le modèle numérique de Ask et al. (1) permet de simuler à l'échelle mésoscopique les évolutions microstructurales induites par la déformation et la température par le biais d'un couplage fort entre la plasticité cristalline et le modèle champ de phases KWC via les milieux de Cosserat. Ce couplage fort entre plasticité et modèle champ de phase permet à la fois de prendre en compte la réorientation du réseau cristallin due à la déformation et celle due à la migration de joint de grains sous un même formalisme compatible avec la thermodynamique des processus irréversibles. Ce modèle, bien qu'encore en cours de développement dans le logiciel Z-set, présente des résultats prometteurs pour la simulation des phénomènes mis en jeux lors des procédés thermomécaniques. En effet, des exemples d'évolutions microstructurales pendant un cisaillement à chaud ont été simulées sur des microstructures numériques simples (1).

L'objectif de ce travail est de proposer une campagne expérimentale permettant la calibration du modèle numérique. Pour cela, des essais *in situ* dans un microscope à balayage (MEB) sont réalisés sur des éprouvettes d'aluminium pur (99,999%), sollicitées à l'aide d'une platine de traction micromécanique à chaud, qui permet d'étudier les effets de la température, de la déformation et du couplage entre les deux. Les essais sont réalisés dans l'enceinte du MEB pour permettre de suivre, au cours de la sollicitation thermique, mécanique ou thermomécanique, les évolutions microstructurales grâce à l'analyse EBSD. Les cartographies EBSD (Electron BackScattered Diffraction) permettent d'obtenir l'orientation cristallographique en chaque point de la zone analysée, ce qui représente une donnée d'entrée de notre modèle. Elles permettent également, grâce à des mesures de désorientation, d'avoir accès à une estimation de l'énergie stockée sous

*Intervenant

forme de GND à l'intérieur des grains qui sert de force motrice pour la migration des joints de grains.

Dans le cadre de ce travail, la calibration du modèle est réalisée de manière successive, avec, dans un premier temps, des essais de recuits (solicitation uniquement thermique) pour le modèle champ de phase, puis des essais de traction (solicitation purement mécanique) pour comparer les résultats à ceux donnés par le modèle de plasticité cristalline. Pour l'instant, des essais préliminaires de recuit et de déformation ont pu être réalisés.

Ces premiers résultats ont permis la mise en place du protocole expérimental et des outils d'analyse. Ils restent cependant limités par le fait que les simulations reposent sur une information 2D de la microstructure, issue de l'analyse EBSD réalisée en surface. L'objectif pour la suite de ce travail est de reproduire ces essais sur des éprouvettes préalablement analysées par DCT (Diffraction Contrast Tomography) par l'entreprise Xnovotech, afin la cartographie 3D de la microstructure polycristalline qui sera reproduite pour les simulations. Les évolutions microstructurales prévues par les modèles pourront alors être comparées en surface aux évolutions observées expérimentalement dans le MEB à l'EBSD. Une fois les modèles de plasticité cristalline et de champ de phases calibrés en 3D, des essais de traction à chaud *in situ* MEB pourront être réalisés afin de calibrer le modèle couplé dans sa globalité.

(1) A. Ask, S. Forest, B. Appolaire, et K. Ammar, " Microstructure evolution in deformed polycrystals predicted by a diffuse interface Cosserat approach ", *Adv. Model. Simul. Eng. Sci.*, vol. 7, no 1, p. 9, févr. 2020, doi: 10.1186/s40323-020-00146-5.

Contrôle non destructif de changements micromécaniques locaux par microscopie micro-onde à balayage.

Leila Sellami * ^{1,2}, Benoît Panicaud ¹, Racha Hammoud ¹, Virgil Optasanu ², Rémi Martin ³, Laurent Kubat ³, Manuel Francois ¹, Eric Bourillot ²

¹ Laboratoire des Systèmes Mécaniques et d'Ingénierie Simultanée – Université de Technologie de Troyes – France

² Institut Carnot de Bourgogne – Université de Bourgogne Franche-Comté, Dijon – France

³ CK Switches – Littelfuse – France

Une technique d'analyse micro-onde associée à un microscope à force atomique AFM (Atomic Force Microscopy) a été développée pour la mesure des changements micromécaniques locaux d'échantillons de petites dimensions. Elle apparait comme tout à fait pertinente et prometteuse en ce qu'elle permet d'effectuer des mesures sur des surfaces avec une résolution latérale nanométrique et donne la possibilité d'obtenir un gradient dans la profondeur de manière non destructive. Cette dernière peut être ajustée à volonté en changeant la fréquence du signal.

*Intervenant

Etude expérimentale de la Fragilisation par l'hydrogène dans l'Inconel 718 sous chargements thermomécaniques complexes

Donaldine Tade * ¹, Jamaa Bouhattate ², Xavier Feugas ², Abdelali Oudriss ², Vincent Bonnard ³, Aldo Marano ¹

¹ ONERA – DMAS ONERA – France

² Université de la Rochelle – Laboratoire des sciences de l'ingénieur pour l'environnement, LaSIE, UMR CNRS 7356 – France

³ ONERA – DMAS ONERA – France

La thèse se penche sur la durabilité du matériau constitutif de l'injecteur dans un avion propulsé par combustion d'hydrogène. En effet, les systèmes d'injections envisagés en IN718_LBM(1) seront exposés à des sollicitations thermomécaniques cycliques complexes, en présence d'hydrogène gazeux à haute pression. De nombreuses études ont montré qu'une exposition prolongée à un flux d'hydrogène et à des conditions de service spécifiques induit une fragilisation des métaux et une rupture prématurée de ceux-ci. Nombreux sont ceux (1), (2) qui abordent l'effet de la pression sur le degré de sensibilité à la FPH(2) dans les bases Nickel. Cependant, peu mettent en lumière l'effet de la concentration et du flux sur la FPH dans l'IN718. En effet, deux modes de fragilisation sont enregistrés lors de l'exposition à l'hydrogène gazeux : La fragilisation externe par l'hydrogène due à l'exposition à un milieu externe hydrogéné et la fragilisation interne par l'hydrogène due à l'absorption de l'hydrogène à l'intérieur du matériau, tous deux peuvent affaiblir la structure conduisant à un abattement sur la durée de vie (DDV).

Ici, les influences respectives de ces deux modes de fragilisation seront étudiées pour une large gamme de température. L'approche envisagée s'attachera dans un premier temps à étudier l'impact de l'hydrogène sur le comportement au travers du matériau de l'échelle microscopique à l'échelle macroscopique. Enfin, l'impact de la FPH sera envisagé sur la durée de vie sur toute la gamme de température, mais aussi jusqu'à son impact sur des trajets anisothermes, représentatifs de la pièce en service. L'ensemble de cette étude vise à alimenter la chaîne de connaissance sur la FPH et ainsi contribuer au développement d'une chaîne complète de calcul de la DDV d'un injecteur soumis à un environnement hydrogéné.

(1) IN718_LBM : Inconel 718 obtenue par fusion sur lit de poudre

(2) FPH : **F**ragilisation **P**ar l'**H**ydrogène

Références

(1) S. Puydebois, A. Oudriss, P. Bernard, L. Briottet, et X. Feugas, " Hydrogen effect on the fatigue behavior of LBM Inconel 718 ", *MATEC Web Conf.*, vol. 165, p. 02010, 2018.

*Intervenant

(2) J. A. Lee, " Hydrogen embrittlement of nickel, cobalt and iron-based superalloys ", in *Gaseous Hydrogen Embrittlement of Materials in Energy Technologies*, Elsevier, 2012, p. 624-667.

Liste des auteurs

- Ammar, Kais, 54
ARVIEU, Corinne, 43
Ask, Anna, 65
ASSAINTE, Matthieu, 36
Auzène, Delphine, 37
- Badin, Sophie, 37
Badreddine, Houssein, 44
Balmon, Jean, 39
Barrallier, Laurent, 24
Barres, Quentin, 50, 65
BARTOUT, Jean-Dominique, 36
Bellet, Michel, 15
Bergheau, Jean-Michel, 53
Bernacki, Marc, 18
Blanchemain, Nicolas, 58
Bobach, Billy-Joe, 10
Boisse, Philippe, 34
Bonnand, Vincent, 68
Bonnet, Frédéric, 16
Bouhattate, Jamaa, 68
Bourillot, Eric, 67
- CALAZANS MENESCAL DE SOUZA, André, 38
CALLOCH, Sylvain, 38
Calloch, Sylvain, 42
Ceron Arana, Enzo, 46
Charkaluk, Eric, 41
CHARLES, Alexandre, 59
Cherouat, Abel, 49
Colin, Christophe, 36
Colmars, Juén, 34
Cormier, Jonathan, 42
Courbon, Joël, 61
CRASSOUS, Isabelle, 17
- DA ROCHA CHAVES, Filipe, 39
DE MICHELI, Pascal, 18
Dehurtevent, Marion, 58
Depinoy, Sylvain, 36
Doghri, Issam, 19
Dollé, Quentin, 47
Donnen, Vincent, 13
DOUDARD, Cédric, 38, 42
Drapier, Sylvain, 20
Duarte Rocha, Valentin, 49
Duchene, Laurent, 10
- El Bartali, Ahmed, 47
Feaugas, Xavier, 68
- FERHAT, AMELIA, 40
FERHAT, Lyliat, 36
FEULVARCH, Eric, 53
FOREST, Samuel, 54
Forest, Samuel, 65
FRANCOIS, Manuel, 67
- Gandin, Charles-André, 8
Garambois, Anna, 50
Germain, Lisa, 52
Giraud Moreau, Laurence, 49
Girault, Florian, 41
GRAND, Victor, 18
GROSDIDIER, Thierry, 22
Guilhem, Yoann, 39
- Habraken, Anne, 10
Hammoud, Racha, 67
Hans, Stéphane, 23
Hild, François, 11
Hoang, T. Vinh, 10
- JIA, Yabo, 53
- Kanoute, Pascale, 50
Kerfriden, Pierre, 54
KROMER, Robin, 43
KROMM, François-Xavier, 43
Kubat, Laurent, 67
Kubler, Régis, 24
- Labbé, Eric, 59
LABERGERE, Carl, 44
LAFON, Pascal, 59
Lamari, Mathias, 54
Laurent-Brocq, Mathilde, 25
Le Corre, Steven, 26
Leclercq, Margot, 56
Leduc, Mylène, 44
Leriche, Nicolas, 36
- Magnier, Vincent, 37
Marano, Aldo, 68
Marou-Alzouma, Ousseïni, 37
Martin, Rémi, 67
MARTIN, Vincent, 37, 58

Mertens, Anne, 10
 Mion, Alexis, 42
 MONDESIR–ABOUT, Victoria, 59
 MOOR, Maëlle, 61
 Moyne, Sylvain, 38

 Najjar, Denis, 37
 NAOUAR, Naim, 34
 Neggers, Jan, 56
 nelias, daniel, 61
 Niane, Ngadia Taha, 44
 Nicot, Romain, 58
 NORDET, Guillaume, 43

 Optasanu, Virgil, 67
 Oudriss, Abdelali, 68

 Panicaud, Benoît, 67
 Pessard, Etienne, 27
 Pham, Think Q. D., 10
 PLATZER, Auriane, 34
 POMMIER, Sylvie, 39
 Ponthot, Jean-Philippe, 10
 Proudhon, Henry, 65

 Quatravaux, Thibault, 28

 Rech, Joel, 30
 Renollet, Yves, 50, 65
 Retraint, Delphine, 50
 Rey, Maxime, 64
 ROBERT, Thibaud, 43
 Roche, Louis, 44
 Roué, Vincent, 42

 SAADLAOUI, Yassine, 53
 Saint-Sulpice, Luc, 38
 Sardo, Lucas, 32
 SCHNEIDER DIE GROSS, Julien, 31
 Sellami, Leila, 67
 Serres, Nathalie, 39
 STRICOT, Pauline, 65

 TADE, Donaldine, 68
 Tardif, Nicolas, 61
 Tejada, Luis, 37
 THUILLIER, SANDRINE, 33
 TOUALBI, Louise, 41, 50
 Toualbi, Louise, 65
 Tran, Xuan V., 10

 VENNAT, Elsa, 56
 Vidal-Sallé, Emmanuelle, 34

 Weisz-Patrault, Daniel, 47

 Witz, Jean-François, 37, 47, 58

 Yastrebov, Vladislav A., 54
 YESCAS, Miguel, 61

