

## **LE GROUPEMENT DE RECHERCHE SOLIDIFICATION DES ALLIAGES METALLIQUES**

Dans mon éditorial du N°6 de **TECH News FONDERIE**, j'indiquais que la recherche universitaire en France dans le domaine de la métallurgie et des matériaux était très structurée, puissante et prolifique, s'appuyant sur de très nombreux laboratoires dont une vingtaine travaillaient très activement à accroître la connaissance scientifique sur une thématique qui nous concerne au plus haut point, nous fondeurs, celle de la solidification des alliages métalliques.

Début décembre 2018 l'Ecole Centrale de Lille a accueilli pour ses journées annuelles, le Groupement de Recherche SAM (Solidification des Alliages Métalliques). Les présentations des différentes équipes ont été de très haut niveau, suscitant des échanges très fructueux et passionnés, laissant entrevoir des perspectives enthousiasmantes et un avenir prometteur concernant la maîtrise des microstructures.

Sylvère AKAMATSU, Directeur de recherche au CNRS et Directeur du GDR SAM, qui nous fait le plaisir dans cet article de nous présenter ce groupement de recherche, a accepté avec les membres de son Comité de Direction, que les résumés d'une partie des travaux qui ont été présentés à Lille soient portés à la connaissance des lecteurs de TNF.

Nous le/les remercions très sincèrement.  
Bonne lecture.

*Jean-Charles TISSIER - ATF*

### ***Présentation du GDR SAM « Solidification des alliages métalliques »***

***Silvère Akamatsu***

***INSP, Sorbonne Université – CNRS UMR 7588, 4 place Jussieu, 75005 Paris***

***silvere.akamatsu@insp.jussieu.fr***

La maîtrise de la solidification –procédés et matériaux– est un grand enjeu scientifique et technologique, en résonance avec les défis sociétaux de notre siècle – course à l'allégement, modélisation multiéchelle, technologies numériques. La recherche en solidification connaît un essor inédit. Elle bénéficie d'un renouvellement profond, nourri par les concepts théoriques de la physique non-linéaire, l'expérimentation in situ, et l'inouï développement du calcul numérique. Intrinsèquement multi-disciplinaire, la science de la solidification se situe à la frontière de la physique théorique, de la métallurgie et de la thermo-mécanique. Son champ d'investigation est vaste. Le Groupement de Recherche SAM *Solidification des Alliages Métalliques* a été créé par l'INC du CNRS en 2011 (Dir. H. Combeau, IJL) et renouvelé en 2015 (Dir. SA) jusque fin 2019. Il fédère les compétences issues de différentes disciplines scientifiques autour des points cruciaux de la solidification des métaux. Il structure une recherche de pointe, menée dans une vingtaine de laboratoires, regroupant ainsi environ 70 chercheurs et enseignants-chercheurs. Le contexte scientifique français, adossé à nos voisins européens, est éminemment

favorable. Les différentes approches y sont représentées : l'expérimentation, en particulier *in situ*, est motrice ; on compte plusieurs équipes parmi les meilleures spécialistes en simulation numérique ; l'ingénierie est diverse, active et source d'inspiration.

On rappelle que la solidification est une étape majeure dans les procédés d'élaboration de métaux, semi-conducteurs et céramiques. Le problème clé est celui de la formation des structures de solidification, qui sont l'héritage, figé dans le solide, de structures du front de solidification auto-organisées à l'échelle du micron, et d'instabilités thermo-mécaniques à l'échelle du container. Ces processus hors équilibre sont gouvernés par des couplages entre la diffusion (chaleur, solutés) et la réponse des interfaces solide-liquide en cours de propagation, auxquels s'ajoutent, le cas échéant, les champs de convection dans le liquide et de déformation du solide. Ces phénomènes complexes, multiéchelles et sensibles au chemin de solidification sont fascinants. Leur compréhension est stratégique pour le développement d'outils prédictifs au service de l'innovation industrielle.

Durant ces dernières années, le GDR SAM a organisé des Journées annuelles et thématiques, des Journées communes avec d'autres réseaux (ThermHT, FERMI, RNM), et deux Ecoles thématiques (2014 et 2017). Ces actions, en association avec la commission thématique "Coulée et Solidification" de la SF2M (P. Jarry, Constellium) pour les aspects plus spécifiquement industriels, ont eu un succès largement reconnu et apprécié, notamment auprès des jeunes chercheurs.

Ces Journées annuelles, organisées les 3 et 4 décembre 2018 à l'EC Lille par A. Tandjaoui (LaMcube) sont focalisées sur les liens entre Structures de solidification et Propriétés mécaniques. Elles ont rassemblé 65 personnes, pour une douzaine de présentations scientifiques dont les résumés sont reproduits dans ce numéro de *Tech News Fonderie*. Elles ont aussi servi de point de départ à une réflexion sur l'avenir de la recherche en solidification en France, et à sa structuration future.

Site web : <http://solidification.cnrs.fr/>

## ***Microstructure de solidification et vieillissement des alliages hypoeutectiques plomb-antimoine***

***Quentin Boyadjian***

***IMN, Nantes***

L'impact de la microstructure des alliages Pb-Sb sur la résistance à la corrosion a été largement étudié pour les besoins de l'industrie automobile dans les applications de batterie. Certains auteurs ont établi le comportement mécanique et électrochimique des alliages hypoeutectiques PbSb dans le but de prévenir la rupture des grilles d'anodes en milieu acide. Ces auteurs ont rapporté que cette corrosion est un phénomène électrochimique qui dépend de la morphologie de la microstructure, cellulaire pour de faibles taux d'antimoine (<2%) et dendritique pour de fort taux d'antimoine (>4%). Ces deux morphologies peuvent cependant exister pour un taux de 3% massique d'antimoine en fonction de la vitesse de refroidissement. Cette transition a un impact sur la résistance à la corrosion car la réaction se localise sur la phase eutectique dans le cas d'une morphologie cellulaire et sur la phase riche en plomb dans le cas d'une morphologie dendritique. Les études actuelles se poursuivent pour comprendre le processus de formation de ces microstructures en

fonction de la vitesse de refroidissement et prédire le mode de corrosion mis en jeu en milieu marin.

---

## ***Fontes à haut silicium – Propriétés mécaniques et dégénérescence du graphite***

***Jacques Lacaze***

***CIRIMAT-Université de Toulouse***

Les fontes de fer graphitiques sont essentiellement des alliages Fe-C-Si de composition proche de celle de l'eutectique austénite-graphite. Lors du refroidissement après coulée, l'austénite se décompose par réaction eutectoïde en ferrite et graphite dans le système stable, ou en perlite (ferrite+cémentite) dans le système métastable, ou encore en un mélange des deux. L'augmentation de la teneur en silicium dans les fontes favorise la ferrite ductile au détriment de la perlite plus résistante, mais surtout augmente notablement la température eutectoïde ce qui permet de les employer jusqu'à près de 800°C. A cette augmentation en silicium est aussi associée une remarquable augmentation de la contrainte à 0,2% et de la contrainte à rupture qui permet aux fontes à haut silicium de concurrencer les fontes perlitiques. Cependant, la teneur en silicium est limitée à environ 4,5-5% en poids du fait de la fragilité de la ferrite au-delà [1,2]. Cette fragilité est due à une mise en ordre chimique connue dans les aciers au silicium.

De nombreuses pièces épaisses, par exemple des moteurs de grande capacité ou les moyeux des éoliennes, sont ainsi fabriquées par fonderie de fontes ferritiques à graphite sphéroïdal pour leur ductilité et leur bonne résistance en fatigue. Cependant, il est fréquent que la nodularité du graphite soit altérée dans ces pièces épaisses où il peut être remplacé en partie par du graphite morcelé (chunky). Cette dégénérescence est souvent associée à la durée de la solidification (plusieurs heures) mais aussi à la teneur en silicium ou à un sur-traitement en éléments sphéroïdisant du graphite (magnésium et cérium). Nous avons pu constater que les propriétés mécaniques ne sont pas sensiblement affectées par cette dégénérescence pour les alliages à haut silicium, alors qu'elles le sont pour les alliages standards [2].

Dans l'espoir de maîtriser la coulée et la solidification des fontes graphitiques, des travaux sont poursuivis pour mieux comprendre la formation du graphite sphéroïdal [3] et des graphites dits dégénérés tels que le graphite morcelé [4], ou encore celle du graphite compact [5]. Ces travaux profitent des progrès récents réalisés par les méthodes d'analyse, en particulier celles liées à la microscopie électronique. Ces méthodes permettent de caractériser les formes de croissance du graphite à l'échelle nanométrique et, dans certains cas, de préciser la distribution des éléments sphéroïdisants et des impuretés [6].

- 1 - R. González-Martínez, U. de la Torre, J. Lacaze, J. Sertucha, Effects of high silicon contents on graphite morphology and room temperature mechanical properties of as-cast ferritic ductile cast irons. Part I – Microstructure. *Materials Science and Engineering A*, 712, 2018, 794-802.
  - 2 - R. González-Martínez, U. de la Torre, A. Ebel, J. Lacaze, J. Sertucha, Effects of high silicon contents on graphite morphology and room temperature mechanical properties of as-cast ferritic ductile cast irons. Part II □ Mechanical properties. *Materials Science and Engineering A*, 712, 2018, 803-811.
  - 3 - J. Lacaze, J. Bourdie, M.J. Castro Roman, A 2-D nucleation-growth model of spheroidal graphite, *Acta mater.*, 134, 2017, 230-235
  - 4 - U. de la Torre, J. Lacaze, J. Sertucha, Chunky graphite formation in ductile cast irons: effect of silicon, carbon and rare earths, *Int. J. Mater. Res.*, 107, 2016, 1041-1050.
  - 5 - J. Lacaze, J. Sertucha, Some paradoxical observations about spheroidal graphite degeneracy, *China Foundry*, sous presse
  - 6 - J. Lacaze, *Solidification des fontes : quelques défis actuels*, *Forge et Fonderie*, 13, 2018, 12-16.
- 

## ***Modélisation des interactions solutales en croissance dendritique équiaxe dans des échantillons minces***

***Antonio Olmedilla, Miha Založnik\*, Hervé Combeau***

Institut Jean Lamour, CNRS – Université de Lorraine, F-54011 Nancy CEDEX, France  
LabEx DAMAS – Design of Alloy Metals for low-mAss Structures, IJL/LEM3, Nancy/Metz  
\*miha.zaloznik@univ-lorraine.fr, +33 3 7274 2672

La croissance des grains équiaxes pendant la solidification est soumise à l'influence forte des interactions solutales. Ces interactions déterminent la vitesse de croissance des bras de dendrite, la cinétique du changement de phase et la formation de la morphologie des grains. Leur compréhension est primordiale pour pouvoir quantifier la cinétique de croissance dans les conditions réelles du procédé. La croissance équiaxe sous influence des interactions solutales peut être étudiée dans des conditions contrôlées par imagerie X dans des échantillons minces. L'analyse de ces observations est difficile puisque la structure tridimensionnelle, fortement marquée par les interactions avec les parois du creuset, ne peut pas être observée directement.

Des informations supplémentaires peuvent être obtenues par modélisation numérique. Le modèle mésoscopique d'enveloppe permet de faire des simulations à l'échelle pertinente, jusqu'à une centaine de grains. Nous avons utilisé ce modèle pour simuler les expériences de solidification d'Al-20%pds Cu de Murphy et al. [1]. Nous présentons une analyse du système composé de 15 grains et nous montrons l'importance de la structure tridimensionnelle pour la cinétique de croissance. Nous soulevons les aspects suivants : (i) la nature tridimensionnelle de la diffusion dans les échantillons minces, (ii) l'influence de la rotation des grains, (iii) l'influence de la position des grains selon l'épaisseur de l'échantillon.

[1] A.G. Murphy et al., XRMON-SOL: Isothermal Equiaxed Solidification of a Grain Refined Al-20wt%Cu Alloy, *J. Cryst. Growth* 440 (2016) 38-46.

---

## ***Etude de la structure et de la macro-ségrégation de lingots de 4.2 t coulés en source***

***Isabelle Poitraul***

***Industeel, ArcelorMittal, Le Creusot***

Face à la concurrence mondiale, les sidérurgistes français doivent innover en permanence pour proposer des produits de plus en plus performants. Un des défis actuels, en particulier pour les marchés du transport et de l'énergie, est la fabrication de pièces présentant une très grande homogénéité de propriétés. Ainsi, pour garantir les propriétés mécaniques (résilience, ténacité...) et les propriétés d'emplois (mise en forme, usinabilité, soudabilité, contrôles non destructifs...), les industriels sont obligés d'adapter leurs gammes de fabrication, en augmentant fortement leurs coûts et leurs délais. Or, une étape clé de la fabrication réside dans la solidification des lingots.

C'est pourquoi, 11 partenaires, dont plusieurs sidérurgistes et chercheurs, se sont regroupés dans le cadre d'un projet FUI appelé SOFT DEFIS, avec l'objectif d'optimiser la qualité des lingots par la mise à disposition de moyens (méthodologies, techniques et outils numériques dans le domaine de la coulée) validés sur des résultats expérimentaux à différentes échelles.

Une des tâches d'Industeel dans ce projet a été de couler, fin 2017, 16 lingots de 4.2 t en acier au carbone, avec des techniques différentes (inoculation, modification de la thermique, blocage des courants de convection...).

La caractérisation de ces lingots permet d'identifier les type et taille de structure, la position de la transition colonnaire-équiaxe et l'intensité de la macro ségrégation en fonction des actionneurs utilisés lors de la coulée. En parallèle, l'Institut Jean Lamour et le Cemef perfectionnent les logiciels de solidification qui sont développés depuis 30 ans pour prendre en compte ces nouvelles techniques.

---

## ***Influence de la microstructure de fonderie d'un alliage d'aluminium sur les mécanismes d'endommagement***

***Nathalie Limodin***

***LaMcube, EC Lille***

L'alliage AlSi7Cu3 fabriqué par le procédé à modèle perdu possède une microstructure complexe et multi-échelle. Afin d'étudier son rôle sur les mécanismes d'endommagement dans des conditions de chargement représentatives des conditions de service des culasses automobiles (20-250°C), il est nécessaire de caractériser cette microstructure et de réaliser des essais *in situ* sous tomographie par rayons X. La tomographie de laboratoire permet de caractériser la distribution des pores. L'espace interdendritique contient ensuite trois phases plus rigides : les intermétalliques au Cu, les intermétalliques au Fe et le Si eutectique ; cette dernière n'est pas visible en tomographie de laboratoire. Des essais de traction in-situ sous tomographie de laboratoire ont confirmé la compatibilité de l'alliage avec la technique de Corrélation d'Images Volumiques (CIV). Le mouchetis formé par les pores et les intermétalliques permet d'accéder aux champs de déformations au voisinage des pores et un bon accord est observé entre un calcul éléments finis réalisé sur un

modèle numérique 3D des pores dans une matrice d'aluminium et la mesure de champs par CIV. Ensuite, pour atteindre des durées d'acquisition compatibles avec celles des essais de fatigue et pouvoir observer le Si eutectique, des essais de fatigue oligocyclique ont été réalisés in-situ sous tomographie synchrotron à température ambiante mais aussi à 250°C. L'amorçage et la propagation des fissures sont suivis en volume dans l'échantillon à différents stades de sa durée de vie. Ces observations, corrélées aux champs de déformations 3D obtenus par CIV, permettent une meilleure compréhension des mécanismes agissant à l'échelle de la microstructure. Les fissures s'amorcent généralement au cours du premier cycle en sous surface près des zones de forte courbure des pores, mais aussi sur des inclusions rigides situées au voisinage des pores. Ensuite, elles se propagent suivant les inclusions rigides où la déformation cumulée de von Mises augmente. Ce scénario dépend toutefois de la température.

---

***Jointes de grains : Mieux comprendre leur formation en solidification pour mieux maîtriser les propriétés mécaniques des matériaux polycristallins***

***Damien Turret***

***IMDEA, Madrid, Espagne***

En métallurgie, les joints de grain sont des frontières séparant des régions de l'espace d'orientations cristallines distinctes. L'effet des joints de grains sur le mouvement de dislocations cristallines détermine en grande partie le comportement en déformation plastique des matériaux. À une échelle macroscopique « moyennée », certaines conséquences de ces interactions entre joints de grain et dislocations sont identifiées depuis de nombreuses années, tel que l'effet de la taille de grain sur les propriétés mécaniques (loi de Hall-Petch). Les joints de grains évoluent généralement sous l'effet de divers traitements thermiques et mécaniques imposés, à l'état solide, à la plupart des alliages métalliques d'usage courant. Néanmoins, leur origine remonte à l'étape initiale de solidification depuis l'état liquide. Dans cette présentation, nous aborderons la compétition de croissance entre grains pendant la solidification (cellulaire ou dendritique) à l'échelle du joint de grain individuel. En utilisant des simulations champs de phase, et le support d'observations expérimentales, nous discuterons des mécanismes de sélection de joints de grain. Nous mentionnerons les limites de l'étude, notamment en termes d'échelles de temps et d'espace accessibles par la simulation numérique aux échelles pertinentes. Nous illustrerons aussi certaines approches prometteuses quant à l'identification des mécanismes de sélection de joints de grains en solidification, et de leur comportement mécanique, tel que la simulation multi-échelle et les méthodes d'observations in situ.

---

## ***Plans d'accrochage et plans de coïncidence interphase en croissance eutectique lamellaire***

***Sabine Bottin-Rousseau***

***INSP, Sorbonne Université, CNRS UMR 7588, Paris***

En solidification directionnelle d'alliages eutectiques binaires en échantillons minces, on observe deux types de morphologies de croissance suivant l'anisotropie de l'énergie libre interfaciale des joints interphases dans le solide. Lorsque cette anisotropie est faible la dynamique du grain eutectique est dite "flottante" et les lamelles sont régulières et perpendiculaires au front de croissance. Lorsque l'anisotropie est forte, les lamelles sont « accrochées » suivant un plan fixe et croissent suivant une inclinaison déterminée par la cristallographie. Je présenterai la conjecture théorique que nous avons proposée, et confirmée numériquement, pour prédire cette direction d'accrochage. Pour aller plus loin, nous avons fait une étude par solidification directionnelle (SD) in situ et solidification directionnelle en rotation (SDR) de l'alliage eutectique In-In<sub>2</sub>Bi. Par des analyses cristallographiques (figures de pôles par diffraction de rayons X ; EBSD) ex situ, nous avons identifié une relation d'orientation (RO) prépondérante entre les deux phases solides, dans les grains accrochés. Nous montrons que les trois plans d'accrochages des lamelles observés en RDS se trouvent soit près du plan de coïncidence, soit sur un des plans équivalents de l'une des deux phases. Nous avons amorcé une étude similaire sur un alliage bien connu, Al-Al<sub>2</sub>Cu. Ceci devrait nous permettre une meilleure comparaison avec les résultats de la littérature métallurgique, et avec des simulations numériques quantitatives.

---

## ***Influence de l'ordre icosaédral à courte distance dans le liquide sur la germination-croissance d'alliages fcc***

***Michel Rappaz<sup>a</sup> et Julien Zollinger<sup>b</sup>***

<sup>a</sup> Institut des matériaux, École Polytechnique Fédérale de Lausanne,  
Station 12, CH-1015 Lausanne, Suisse

<sup>b</sup> Institut Jean Lamour, Département de science et génie des matériaux et métallurgie,  
Université de Lorraine, Campus ARTEM, Allée André Guinier, F-54011 Nancy

Cette contribution a pour but de présenter une revue des effets induits par des éléments-trace sur la solidification d'alliages fcc via la formation dans le liquide d'un ordre icosaédral à courte distance (Icosahedral Short Range Order ou ISRO). L'ISRO, conjecturé en 1952 par Frank [1] et responsable de la formation de quasicristaux (iQC), peut avoir des effets importants sur la solidification d'alliages « conventionnels » comme l'ont montré les travaux récents de Kurtuldu et al [2-4]. A partir d'analyses cristallographiques détaillées dans des alliages base Al et Au, il a été montré qu'il peut induire une germination de la phase fcc médiée par iQC avec l'addition de quelques centaines ou dizaines de ppm de Cr et d'Ir, respectivement. Cela affine la structure de grains tout en induisant de nombreux joints de grains maclés et des relations de multimaclage entre grains voisins qui reproduisent la géométrie icosaédrale [2,3]. Mais l'ISRO peut également influencer la direction de croissance des dendrites dans Al-Zn:Cr lorsque la vitesse de solidification augmente,

via apparemment d'un terme d'attachement cinétique [4]. Très récemment, nous avons mis en évidence dans un alliage Au - 20%pds Cu - 5%pds Ag deux phénomènes confirmant ces effets cinétiques induits par ISRO à grande vitesse de solidification lorsque 100 ppm d'Ir sont ajoutés [5] : (i) une décomposition spinodale du liquide faisant apparaître une population de petits précipités ou dendrites maclées très riches en Cu indépendante de grains plus gros multimaclés riches en Au; (ii) un changement de la microstructure des grains riches en Au, à savoir des cellules texturées  $\langle 111 \rangle$  dans la zone colonnaire avec Ir, alors que sans Ir ils sont clairement dendritiques avec une texture  $\langle 100 \rangle$ .

- [1] F. Frank, 'Supercooling of liquids', Proc. R. Soc. Lond. Ser. -Math. Phys. Sci., vol. 215, no. 1120, pp. 43–46, 1952.
- [2] G. Kurtuldu, P. Jarry et M. Rappaz, 'Influence of Cr on the nucleation of primary Al and formation of twinned dendrites in Al-Zn-Cr alloys: Can icosahedral solid clusters play a role?', Acta Mater., vol. 61, no. 19, pp. 7098–7108, Nov. 2013.
- [3] G. Kurtuldu, A. Sicco et M. Rappaz, 'Icosahedral quasicrystal-enhanced nucleation of the fcc phase in liquid gold alloys', Acta Mater., vol. 70, pp. 240–248, May 2014.
- [4] G. Kurtuldu, 'Influence of trace elements on the nucleation and solidification morphologies of fcc alloys and relationship with icosahedral quasicrystal formation', PhD thesis, EPFL, Lausanne, 2014.
- [5] J. Zollinger, B. Rouat, S. K. Pillai, and M. Rappaz, 'Influence of Ir additions and icosahedral short range order (ISRO) on nucleation and growth kinetics in Au-20.5wt%Cu-4.5wt%Ag alloy', Acta Mater., p. Submitted., 2018.

---

## ***Etude de la formation de la structure de grain d'alliages Al-Cu affinés par radiographie X en laboratoire***

***Guillaume Reinhart***

***IM2NP, Université Aix-Marseille***

Les propriétés mécaniques des matériaux sont en grande partie liées à la structure formée au cours de l'étape de solidification. Avoir un contrôle précis de l'étape de croissance est donc crucial. Deux types de structures de grain sont couramment obtenues au cours de la solidification d'alliages métalliques : une structure colonnaire avec des propriétés anisotropes, et une structure équiaxe avec des propriétés plus homogènes. Une structure fine et homogène est généralement requise dans la plupart des alliages à base aluminium utilisés dans les applications industrielles. Cette caractéristique est favorisée par l'ajout de particules affinantes dans la phase liquide qui servent de sites de germination hétérogène. L'affinage de la structure de grain dans les alliages métalliques comporte plusieurs mécanismes complexes, de la germination à la croissance dendritique et les interactions solutales. La structure de grains est d'autant plus difficile à prédire quand des phénomènes tels que la convection et la poussée d'Archimède doivent être considérés. Des études expérimentales dans des conditions où les effets de la gravité peuvent être limités, ou bien comparés rigoureusement sont donc de grand intérêt pour la validation des modèles théoriques inclus dans les codes des simulations numériques utilisées dans l'industrie.

Il est maintenant bien établi que la radiographie X est une méthode de choix pour observer la dynamique des phénomènes ayant lieu au cours de la solidification d'alliages métalliques, en particulier en tirant avantage de l'important flux de photon disponible sur les sources synchrotron. Récemment, de nouvelles opportunités sont apparues avec le développement de dispositifs compacts permettant l'observation in

situ dans des conditions de microgravité ainsi qu'avec différentes orientations de l'échantillon étudiés par rapport à la direction de la gravité.

Dans cette communication, l'analyse de la solidification d'un alliage Al-20%pds.Cu affiné sera présentée. Des expériences de solidification dirigée ont été réalisées dans un dispositif de la laboratoire intitulé SFINX (*Solidification Furnace with IN situ X-ray radiography*) permettant l'observation de la solidification par radiographie X. La solidification d'échantillons minces a été réalisée pour plusieurs vitesses de refroidissement et plusieurs gradients de températures, ainsi que dans trois configurations de solidification : horizontale avec la surface principale de l'échantillon perpendiculaire au vecteur gravité, vers le haut avec la direction de croissance parallèle et opposée au vecteur gravité, et vers le bas avec la direction de croissance parallèle et dans le même sens que le vecteur gravité. Une étude comparative a ainsi pu être effectuée afin de mettre en évidence différents effets liés à la gravité sur la croissance des grains dendritiques et sur la formation de la structure de grain

---

## ***Thermo-mechanical modeling of additive manufacturing by powder bed fusion at macro-scale***

***Yancheng Zhang, Michel Bellet, Gildas Guillemot, Charles-André Gandin***

Mines ParisTech, PSL Research University, CEMEF, UMR CNRS 7635, Sophia Antipolis, France

A macro 3D finite element model is developed to study thermo-mechanical analysis during metal selective laser melting. The approach is conducted on the scale of the part to be formed, using a level set framework to track the interface between the constructed workpiece and non-melted powder, and interface between the gas domain and the successive powder bed layers. In order to keep sustainable the computational efficiency, the powder bed deposition and the energy input are simplified by the scale of an entire layer or fractions of each layer. Layer fractions are identified directly from a description of the global laser scan plan of the part to be built. Each fraction is heated during a time interval corresponding to the exposure time to the laser beam, and then cooled down during a time interval equal to the scan time for the considered layer fraction. The global heat transfer through the part under additive construction and through the powder material non-exposed to the laser beam is simulated. The proposed model is able to predict the temperature distribution and evolution in the constructed workpiece and non-melted powder during the SLM process at the macroscale, for parts of complex geometry. By the elasto-viscoplastic mechanical solver, this model is possible to predict the distortions of the constructed part during and post process. To reduce the computational cost, a refining and de-refining mesh adaptation is carried out with a conform mesh strategy. Application is shown for a nickel based alloy (IN718), but the numerical model can be easily extended to other materials by using their data sets. In addition, the relevant research activities in CEMEF are also presented.

**Keywords:** SLM, Macroscopic, thermo-mechanical modeling, finite element, level set, adapted mesh, G-code

---

# ***Aciers coulés par centrifugation pour applications hautes températures, résistance au fluage et à l'environnement***

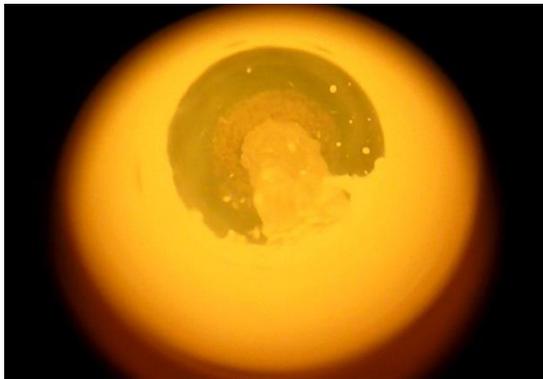
***Xavier Sauvage<sup>1</sup>, Mathieu Couvrat<sup>2</sup>***

*1- Groupe de Physique des Matériaux, UMR CNRS 6634, Université de Rouen, Avenue de l'Université, BP12, 76801 Saint Etienne du Rouvray*

*2- Manoir Industries, 12 rue des Ardennes, 27590 Pitres*

Les conditions extrêmes rencontrées dans les fours de Pétrochimie nécessitent l'utilisation d'aciers très fortement alliés dits « réfractaire ». Les ensembles tubulaires constituant les fours sont fabriqués par fonderie en centrifugation. Les deux principales propriétés dimensionnantes dans ce contexte d'utilisation sont le fluage à des températures supérieures à 1000°C et la résistance à des contraintes environnementales sévères d'oxydation, carburation et nitruration. La forte teneur en chrome de ces nuances (entre 25% et 40%) leur assure une bonne résistance à la carburation et à l'oxydation par la formation d'une couche d'oxyde de chrome protectrice. La tenue mécanique à haute température dépend d'une part du caractère austénitique de la matrice mais aussi grandement de la structure de solidification. Le matériau coulé se caractérise par des ensembles dendritiques formant des grains millimétriques, ainsi que par la présence d'une précipitation primaire interdendritique et eutectique de carbures  $M_7C_3$  et MC.

Dans la première partie de cet exposé, nous présenterons le contexte industriel et les aspects liés au procédé particulier de la coulée par centrifugation. Dans une seconde partie, nous nous concentrerons sur les évolutions microstructurales à haute température (précipitation secondaire, oxydation) et leur impact sur la tenue en service.



Vue de face d'un tube (diamètre 20 cm) en cours de remplissage lors de la coulée par centrifugation (coquille en rotation)

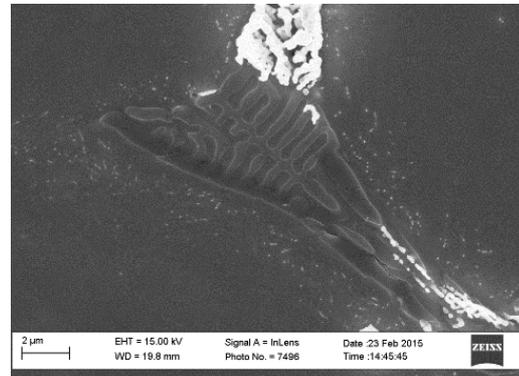


Image MEB montrant des carbures primaires ( $M_7C_3$  initial transformé en  $M_{23}C_6$  sombre, NbC blanc) et des précipités secondaires nanométriques ( $M_{23}C_6$ ) ayant germés dans la matrice dendritique

---

***Modification de la microstructure de solidification par ultrason en coulée semi-continue verticale d'alliage aluminium 6XXX***

**Georges Salloum Abou Jaoudé**  
**Constellium C-TEC, Voreppe**

Dans ce travail, nous avons introduit des ultrasons de puissance dans le marais en coulée semi-continue verticale de billettes 6XXX de Ø 152 mm pour influencer la morphologie de croissance des grains d'aluminium. Les grains dans la partie centrale du marais sont fortement dendritiques et allongés dans la direction de la sonotrode. Nous suggérons que les ultrasons génèrent un écoulement acoustique dans le marais, qui s'oppose à la convection naturelle, affectant ainsi la direction de la croissance des grains ; ceci est soutenu par la modélisation numérique. Nous avons constaté que la macroségrégation peut être réduite en ajustant la position de la sonotrode dans le marais et la puissance ultrasonore. De plus, la taille des grains s'est révélée nettement plus fine que celle de la référence en dehors de la partie centrale de la billette. Cela pourrait être un effet de la fragmentation dendritique forcée par ultrason.

Mots-clés: coulée semi-continue verticale, traitement par ultrasons, alliages d'aluminium 6XXX, microstructure, morphologie dendritique, affinage du grain, écoulement acoustique, cavitation acoustique, modélisation numérique.

---