

**Compte rendu du
23ème colloque Matériaux pour l'Aéronautique et l'Espace**
7-8 décembre 2009
Auditorium SAGEM, à Paris

Rédacteurs : Jean-Yves Guédou, Shigehisa Naka, Daniel Aliaga et Georges Désarmot



SESSION 1 – Matériaux et Environnement.

Cette session était consacrée aux problèmes d'environnement associés aux matériaux et à leurs procédés de mise en oeuvre. La première présentation a été faite par David Ford (EICF) qui a montré les impacts sur l'environnement liés à la réalisation par fonderie de précision de pièces et structures de turboréacteurs. Il a d'abord indiqué que les superalliages de fonderie répondaient eux mêmes aux élévations de température imposées pour réduire les nuisances environnementales des turbines aéronautiques. En ce qui concerne les procédés de fonderie eux mêmes, 2 lignes directrices guident ce souci de répondre aux normes environnementales: la réduction des déchets et le recyclage, règles qui s'appliquent à tous les niveaux du processus: réalisation des moules en cire, enrobage de céramique et problèmes associés aux liants organiques, coulée du métal. Les solutions techniques qui ont été développées pour répondre à ces questions apportent également souvent des réductions de coût sur les pièces. Le deuxième exposé présenté par Martine Villatte (EADS IW) a développé la mise au point d'un traitement de protection des alliages d'aluminium exempt de Cr^{VI} aujourd'hui interdit par la législation européenne. Il s'agit de l'anodisation dans un électrolyte composé d'acides sulfurique et tartrique dont la gamme a été optimisée en laboratoire pour obtenir les épaisseurs et morphologies désirées. Le traitement s'est révélé aussi efficace que l'anodisation chromique pour la protection des pièces vis à vis de la corrosion et n'a en outre nécessité que des adaptations limitées pour son introduction en production avec les équipements existants. Le troisième sujet abordé par Claudie Mathieu (FIPEC) concernait les répercussion de la directive REACH sur les formulations des peintures utilisées en Aéronautique. Le problème est complexe car les peintures sont constituées de solvants, liants, additifs et pigments tous susceptibles d'être soumis à des limitations strictes voire des interdictions quant à leur utilisation: il a été montré comment s'est déclinée dans le détail pas à pas cette réglementation au cours des deux dernières années via une « Safety Data Sheet » (SDS) régulièrement remise à jour. Dans le quatrième exposé, Roger Pays (Safran Propulsion Solide) a développé les stratégies mises en oeuvre pour éliminer le cadmium des revêtements tout en conservant une bonne efficacité vis à vis de la corrosion. La première approche est la mise au point de revêtements sacrificiels à base Zn, Al ou Mn, le plus développé étant actuellement le composé ZnNi qui est industriel. Ces dépôts sont effectués par voie électrolytique (eau, solvant ou liquide ionique) ou sèche ce qui évite les risques de fragilisation par l'hydrogène. L'autre voie consiste à utiliser autant que possible des matériaux intrinsèquement résistant à la corrosion comme les alliages de titane (boulonnerie, ressorts) ou les aciers inox à haute résistance (Custom465 de Carpenter ou MLX17 d'Aubert & Duval). Le dernier exposé de Nikolaos Alexopoulos (Aegean Univ.) ne concernait pas directement les questions d'Environnement mais le « Health Monitoring » avec le suivi in-situ d'endommagement dans des composites à fibres de verre au moyen de nano-tubes de carbone intégrés dans la structure. Cette méthode est fondée sur des variations de conductivité électrique et a été validée par des essais de traction ou flexion en laboratoire associés à des calculs EF.

SESSION 2 – Matériaux avancés

Comme nos colloques précédents, cette session avait pour but de présenter l'état de l'art de quelques-uns des nouveaux matériaux pour applications aérospatiales. La présentation de D. Bond (Messier Dowty) a porté sur l'introduction d'alliages de titane dans la construction des trains d'atterrissage destinés aux nouveaux avions longs courriers futurs. Par leur résistance spécifique élevée combinée à leur excellente tenue à la corrosion, l'utilisation de certains alliages de titane de type β - métastable (Ti 5-5-5-3) ou de type proche β (Ti 10-2-3) peut être envisagée pour remplacer les aciers à haute résistance actuellement en service. Tout en prévoyant un accroissement prochain de l'utilisation des alliages de titane pour trains d'atterrissage, l'auteur recense les challenges technologiques, parmi lesquels nous pouvons citer l'usinage, l'assemblage (le soudage en particulier) et l'accroissement des connaissances métallurgiques de l'alliage 5-5-5-3. La seconde présentation s'est rapportée aux composites à matrice titane (SiC/Ti). L'exposé de J.-M. Franchet (SNECMA) et S. Kruch (ONERA) relate le progrès accompli depuis quelques années dans la concrétisation industrielle, à l'aide de ces composites, des anneaux aubagés monoblocs (ANAM) destinés aux compresseurs HP de moteurs SNECMA futurs. Après avoir indiqué l'avantage du procédé maison EGV (enduction grande vitesse) vis-à-vis des procédés concurrents pour la réalisation des composites à fibres longues, les auteurs ont décrit d'abord différentes étapes de la mise en œuvre (enduction des fibres, assemblage, usinage, etc.) de cette technologie innovante, puis ont développé des résultats de l'effort consacré à l'analyse multi-échelle de la durée de vie des ANAM réalisées. La troisième présentation a concerné les alliages intermétalliques réfractaires à base de siliciures. Ces siliciures soit de Nb soit de Mo sont considérés comme matériaux structuraux à très haute température (>1300°C) pouvant remplacer à terme les superalliages monocristallins base nickel dans la fabrication des aubes de turbine HP. L'exposé de S. Drawin fait une synthèse des résultats des études menées depuis quelques années à l'ONERA en collaboration avec des partenaires français et européens (motoristes et laboratoires universitaires). On peut noter avec intérêt la réalisation des aubes de turbine par la voie de la fonderie d'un alliage du système Nb-Si. Les résultats présentés montrent toutefois que l'effort de R&D devrait être maintenu pour identifier des nuances d'alliages réellement attractifs au niveau de la résistance mécanique à chaud et de la tenue à l'oxydation. La quatrième présentation a porté sur les composites à matrice céramique (CMC). L'exposé d'E. Philippe et ses collaborateurs (SNECMA) relate l'effort consacré à la mise en application dans les moteurs d'avion de ces composites, initialement développés et utilisés pour la construction des moteurs lanceurs. Bien que ces matériaux (SiC/SiC en particulier) offrent les possibilités d'amélioration de la performance des moteurs d'avion (accroissement en température de fonctionnement, gain de masse, etc.), le problème majeur est la durée de vie liée à leur tenue à l'oxydation relativement limitée. Selon les auteurs, un important progrès a été réalisé depuis quelque temps montrant des résultats en

durée de vie suffisamment prometteurs. La cinquième présentation s'est rapportée aux céramiques eutectiques, qui sont des alliages d'oxydes élaborées par la fusion suivie de la solidification dirigée. L'exposé de M. Parlier et ses collaborateurs décrit le progrès accompli à l'ONERA dans la recherche et le développement de ces nouveaux matériaux, dont le potentiel (ex. excellente résistance mécanique à des températures de l'ordre de 1700°C) avait été démontré il y a une dizaine d'années au Japon par la firme japonaise UBE. Ayant identifié quelques nuances d'alliage prometteuses du point de vue du comportement mécanique et possédant maintenant un four Bridgman performant, l'équipe de M. Parlier essaie maintenant d'évaluer les possibilités de cette nouvelle technologie pour la réalisation des aubes de turbine de moteurs aéronautiques. Enfin, la sixième présentation a été consacrée aux alliages à mémoire de forme à haute température. L'exposé d'A. Denquin et ses collaborateurs fait une synthèse des études menées dans ce domaine à l'ONERA depuis quelques années. La découverte aux Etats-Unis de l'effet de mémoire se produisant à des températures exceptionnellement élevées (>700°C) dans les systèmes d'alliage tels que Nb-Ru et Ta-Ru a initié leur effort de recherche et de développement. La confirmation de l'effet et la consolidation des connaissances sur ces alliages par l'équipe d'A. Denquin ouvrent de nombreuses possibilités d'application en tant que matériaux multifonctionnels à haute température (ex. dans des moteurs d'avion).

SESSION 3 – Procédés Innovants.

Cette session a été ouverte par l'exposé de Didier Lang (EADS IW) qui a présenté les futures tendances pour les matériaux et les procédés des structures aéronautiques. L'exposé était général mais bien centré sur la compétition d'une part entre les matériaux (composites thermodurs, thermoplastiques et métalliques) et d'autre part entre les procédés ou l'on a pu mesurer l'impact de l'automatisation et des nouvelles technologies sur les futures structures. En particulier pour les matériaux composites, il a bien montré les directions fortes que sont l'intégration de fonction et la fabrication au plus près des côtes finales. Cet exposé introductif a été suivi par des présentations plus ciblées sur de nouvelles technologies, une présentation concernant les matériaux composite, trois sur des technologies applicables aux matériaux métalliques et une plus spécifique aux céramiques.

La présentation de Mourad Chohra (Dassault Aviation) s'inscrivait dans la continuité de l'exposé introductif et concernait les matériaux composites. L'auteur a présenté l'automatisation du placement filamentaire appliqué à la réalisation de préformes complexes en fibres de carbone. Il nous a permis d'entrevoir des parties structurales futures où la technologie LCM (« Liquid Composite Moulding ») permettra d'obtenir des pièces de formes complexes à partir de préformes optimisées réalisées en automatique par placement filamentaire.

Les trois présentations suivantes concernaient des technologies applicables aux matériaux métalliques, il s'agissait soit de technique anciennes présentant des améliorations très significatives comme le grenailage par laser ou de technologies émergentes que sont la fabrication directe ou le formage incrémental de tôles métalliques. Le grenailage laser a été présenté par Olivier Higounenc (MIC), il a montré l'intérêt de cette technologie qui permet de multiplier au moins par 3 (comparativement au grenailage traditionnel) la profondeur affectée par les contraintes résiduelle de compression. Ainsi des profondeurs de plus de 5 mm sur les alliages d'aluminium et de 2 mm sur titane et acier peuvent être obtenues. Des applications concernant des gains en fatigue (en endurance et ralentissement de fissures courtes) et le formage ont été présentées. La présentation suivante traitée de fabrication directe par Gilles Surdon (Dassault Aviation). Après avoir présenté synthétiquement la technologie de fabrication directe par laser, l'auteur a montré que la technologie avait été appliquée aux matériaux Inco 718 et TA6V et que l'optimisation du traitement thermique conduisait à des propriétés mécaniques équivalentes aux fabrications traditionnelles. Il a terminé en donnant les axes à développer pour une plus large industrialisation et un élargissement du champ des applications potentielles. Enfin à propos des technologies applicables aux matériaux métalliques, Joachim Zettler (EADS IW) a présenté une technologie très intéressante de formage de tôles (titane ou aluminium) par formage incrémental. Il s'agit en quelque sorte d'un martelage robotisé applicable à des pièces qui ne sont pas (ou pas facilement) emboutissable !!! Au delà de la courbe limite de formage, on peut donc utiliser cette technologie, une chaudronnerie moderne qui a suscité une discussion animée avec l'auditoire.

Enfin, il y avait également une présentation concernant la densification des céramiques par SPS (« Spark Plasma Sintering »). Claude Estournes (CIRIMAT) nous a présenté cette technologie, et même si les mécanismes de fonctionnement ne sont pas totalement élucidés, il a pu discuter des mécanismes intervenant lors de la consolidation d'oxydes (Al_2O_3 et Y_2O_3). Il a ensuite montré comment cette technologie pouvait être utilisée pour consolider des céramiques poreuses ou des nanomatériaux. Alors qu'au Japon cette technologie voit se multiplier les applications, il est intéressant de voir quelle commence à se développer en Europe.

SESSION 4 – Simulation et modélisation des procédés.

La présentation de Jean-Yves Cognard (ENSIETA Brest) a mis en exergue la complexité de l'interprétation d'essais mécaniques sur des assemblages collés hybrides, pour lesquels les effets de bord, l'usinage, les sollicitations hors plan non contrôlées et le serrage peuvent largement fausser les résultats et par conséquent les prédictions ultérieures. L'essai ARCAN modifié permet de localiser les contraintes loin des zones perturbées, de faire varier la mixité des chargements (traction, compression, cisaillement) et d'envisager une optimisation plus fine d'assemblages hybrides à destination aéronautique. La présentation de Romain Créac'hcadec (ENSIETA) s'est focalisée sur le comportement mécanique de l'adhésif dans des assemblages collés (hybrides ou non). L'essai ARCAN modifié a été utilisé pour établir une loi élasto-visco-plastique dépendant de la pression hydrostatique mais indépendante de l'essai. Des effets comme ceux de chargements non linéaires, le vieillissement et la température peuvent être pris en compte. Ces travaux constituent une avancée très intéressante dans le domaine des assemblages collés.

La modélisation de la cuisson de CMO dans des procédés d'infusion présentée par Bertrand Laine (ONERA) est un bon exemple d'application de techniques mathématiques dites de réduction de modèle. Il s'agit de pouvoir contrôler en boucle fermée et en temps réel l'évolution d'un système physique et d'agir sur les paramètres du process (transfert de chaleur, cinétique de réaction, contraintes mécaniques) et de modifier en conséquences les conditions limites au moyen d'informations issues de capteurs, idéalement disposés dans la pièce. Mathématiquement on couple un modèle multiphysique COMSOL à une technique efficace de réduction de modèle à modes propres orthogonaux où l'on utilise les méthode de décomposition de Lanczos et de stockage séquentiel de Karhunen Loeve. En 2D la modélisation reproduit bien l'expérience. Des gains de rapidité sont encore nécessaires pour traiter les cas 3D qui seront prochainement à la portée des modélisateurs.

La modélisation de la solidification de pièces aéronautiques en alliages à base nickel vise la prévention de l'apparition de défauts (défauts structuraux, ségrégations, porosités, taches, fissures de rétraint, contraintes résiduelles) donc d'être en mesure de prévoir l'évolution d'un autre type de modèle physique que le précédent mais par des voies différentes en vue d'aboutir à des alliages ayant les propriétés voulues. L'exposé de Charles-André Gandin (ARMINES CEMEF) présenté des modélisations existant à chacune des échelles habituelles : macro/transfert de masse et de chaleur, mésostructure de grains, micro/champ de phase-structures dendritiques et interdendritiques. Les couplages micro-méso-macro restent encore à développer mais d'ores et déjà existent des extensions à des systèmes binaires incluant l'aspect mésoscopique.

L'exposé de Roger Reed (Univ. Birmingham) a proposé l'obtention d'alliages complexes tels les superalliages monocristallins base nickel reposant sur des règles simples de conception. Des modèles existent pour décrire le fluage, la structure microcristalline, la coulabilité, la densité, le coût de la matière. Leur utilisation peut conduire à restreindre l'espace des compositions et le nombre d'essais de formulation certes au prix de compromis. Cet exposé a été l'occasion d'une longue discussion sur l'applicabilité des méthodes proposées au regard de la très longue expérience acquise dans le domaine des superalliages.