

**Titre: Prolongation de la durée de vie des céramiques aéronautiques endommagées : réparabilité locale et auto-cicatrisation**

Enjeux scientifiques :

La prolongation de durée de vie des structures aéronautiques est aujourd'hui un enjeu majeur au plan économique et sociétal. Avec la quête permanente du gain de masse et la réduction de l'impact environnemental, il s'agit probablement de l'objectif le plus critique poursuivi par les acteurs de la recherche et de l'industrie aérospatiales. Les matériaux céramiques, notamment ceux utilisés comme revêtements de type « barrière thermique » sont hautement sollicités dans les turboréacteurs et doivent faire face à des chargements thermomécaniques extrêmes dans des conditions sévères d'oxydation. Pour développer des procédés adaptés à la réparation locale de ce type de système, soit par apport externe de matière soit par auto-cicatrisation soit en couplant les deux approches, pour comprendre les mécanismes d'endommagement mécaniques et physico-chimiques ainsi que les processus de régénération des microstructures, il est nécessaire de déployer une recherche multi-échelles et multi-physiques.

Le sujet de thèse proposé se situe à la convergence de plusieurs disciplines : **Mécanique** (Endommagement, Ténacité, ...), **Céramiques fonctionnelles** (du type barrières thermiques [TBC] ou barrières environnementales [EBC]) et **Réparation locale ou Auto-cicatrisation** (analogie avec les **systèmes biologiques**). En effet, au-delà de la réparation localisée, très importante pour combler des défauts localisés, le phénomène d'auto-cicatrisation des céramiques endommagées sera au cœur de ces travaux de thèse.

Le phénomène d'auto-cicatrisation (ou réparation active) est bien connu pour des matériaux polymères composites. Dans ce cas, la méthode « mime » la cicatrisation biologique via la circulation sanguine où de nouveaux constituants viennent réparer une blessure de la peau. Dans ce cas, de nombreux polyméristes travaillant sur ces sujets proposent de libérer un agent réparateur sur la zone endommagée du polymère. La molécule est alors stockée dans des microcapsules. En cas de fissuration, la capsule est brisée et l'agent libéré. Le matériau réparé retrouve environ 75 % de ses propriétés mécaniques.

L'extrapolation aux matériaux céramiques peut cependant s'avérer délicate dès lors que sa mise en œuvre suppose de travailler à hautes températures. En effet, la géométrie et la dureté de la paroi des microcapsules doivent être optimisées car ces dernières ne doivent se rompre que sous l'effet d'une fissure : une paroi trop épaisse empêchera la microcapsule de se briser alors qu'une paroi trop fine risque d'être détruite pendant la fabrication du matériau. L'idée ici est toujours de faire circuler l'agent « cicatrisant » dans un réseau de canaux initié par le réseau polymère précurseur de la céramique, comme dans le système sanguin. Ceci nécessite un diamètre de « canaux » dans les matériaux proche de ceux du système sanguin soit environ 10 microns. Il se trouve qu'une barrière thermique endommagée présente des réseaux de microfissures dont la taille est précisément de cet ordre de grandeur [1, 2]. La matière « active » sera donc apportée par des microcapsules emplies d'un agent cicatrisant (du type silicates, borates ou vanadates par exemple) qui se libèrera au moment de l'endommagement et permettra à la céramique de se restaurer. La formation de phases cicatrisantes sera caractérisée par diverses méthodes structurales ou microstructurales, et l'efficacité de l'auto-cicatrisation sera étudiée d'un point de vue mécanique et thermomécanique pour s'assurer que la céramique a recouvré ses propriétés d'usage après la phase de réparation « active » [3, 4].

Les objectifs de la thèse sont d'une part de mettre au point un procédé de fabrication de microcapsules d'agent cicatrisant et d'autre part de démontrer l'efficacité du principe de réparation active en sollicitant les systèmes multi-matériaux dans des conditions proches de celles rencontrées dans les turboréacteurs (oxydation cyclique, gradient thermique, érosion etc...). La transposition du procédé de réparation active ainsi développé à un prototype d'aube de turbine est également envisageable.

[1] L. Pin, V. Vidal, F. Blas, F. Ansart, S. Duluard, J.-P. Bonino, Y. Le Maoult and P. Lours.

Optimized sol-gel thermal barrier coatings for long-term cyclic oxidation life. Journal of the European Ceramic Society.(34)961-974. 2014

[2] L. Pin, Thèse de Doctorat de l'Université de Toulouse, Ecole doctorale Aéronautique-Astronautique, décembre 2012

[3] Ann-Sophie Farlea, Cees Kwakernaaka, Sybrand van der Zwaagb, Willem G. Sloof Journal of the European Ceramic Society 35 (2015) 37–45

[4] Debajyoti Mohanty, Anjan Sil, Kuntal Maiti Ceramics International 37 (2011) 1985–1992

Directeurs de thèse proposés :

Professeur Florence ANSART, **Laboratoire CIRIMAT**, UMR CNRS 5085

Professeur Philippe LOURS, **Laboratoire ICA**, Campus d'Albi