

# Design des Matériaux et des Structures

## Année 2019-2020

**Société partenaire :** Safran Tech

**Lieu de réalisation de l'étude :** Centre des Matériaux et Safran Tech

### Encadrement

---

Stéphane Gourdin (Safran Tech), Vincent Maurel, Vincent Guipont (Centre des Matériaux -MINES ParisTech)

### Titre

---

Caractérisation mécanique et mesures de propriétés locales d'un système multi-couches barrière thermique à l'aide de la nanoindentation

### Mots-clés

---

Nanoindentation, Propriétés Mécanique, Module Young, Dureté, Barrière thermique, Microstructure, Vieillessement

### Contexte de l'étude

---

Les barrières thermiques sont largement utilisées par le groupe Safran pour les structures chaudes des turbines aéronautiques. Pour le cas d'une aube mobile haute pression, la combinaison des canaux de refroidissement avec ce revêtement protecteur permet un abattement considérable de la température maximale perçue par le substrat (superalliage à base nickel). Dans l'objectif de soumettre ces structures à des températures toujours plus élevées, il est crucial d'intégrer la dégradation du revêtement barrière thermique explicitement dans la prévision de la durée de vie des structures.

L'évolution microstructurale du système barrière thermique à proximité de la couche d'alumine est complexe. Il fait intervenir des phénomènes physiques se déroulant indépendamment dans chaque couche du système (la céramique, la couche d'oxyde, la sous-couche et le substrat) mais également en interaction entre celles-ci. Cette évolution microstructurale peut être observée via des analyses au microscope électronique à balayage mais pourrait aussi être caractérisée mécaniquement via des essais locaux par indentation instrumentée par exemple. L'essai d'indentation consiste à faire pénétrer à la surface d'un matériau un indenteur d'une géométrie définie et d'une grande dureté par rapport au matériau indenté puis à l'extraire. Après indentation d'un matériau présentant des propriétés inélastiques, une empreinte est susceptible d'être visible. Ses dimensions et sa géométrie dépendent à la fois du type d'indenteur utilisé, de l'effort exercé et des propriétés du matériau testé.

Cette méthode de caractérisation locale a ainsi permis de pouvoir évaluer les propriétés élastiques et inélastiques à l'échelle du grain dans des matériaux métalliques (Fröhlich et al., 1977, Loubet et al., 1984, Oliver and Pharr, 2004, S. Pathak, S.R. Kalidindi 2015), d'étudier l'influence de l'orientation cristallographique et de l'écrouissage sur l'empreinte d'indentation (Zambaldi and Raabe, 2010, Yao et al., 2014) ou bien encore sur les mesures de dureté et du module d'indentation (Vlassak and Nix, 1993, 1994, Delobelle et al., 2009, 2011). L'indentation instrumentée constituerait donc un moyen intéressant de pouvoir quantifier l'évolution microstructurale d'un système barrière thermique après différents vieillissements.

## Objectif et travail demandé

---

Premier semestre : Etude bibliographique portant sur les systèmes barrière thermique et sur l'indentation instrumentée. Il s'agira notamment de référencer les méthodes de caractérisation et d'identification de lois de comportement à une échelle très locale par indentation instrumentée.

Deuxième semestre : Des essais de caractérisation mécanique par indentation instrumentée devront être effectués. Ils auront pour objectif d'évaluer le module élastique de chaque couche ainsi que la réponse élasto-plastique monotone et cyclique de la sous-couche en vue d'identifier une loi de comportement. Des cartographies de dureté seront ensuite réalisées sur une coupe transverse pour différents vieillissements en fatigue thermique. Ces analyses pourront également être corrélées aux observations réalisées au microscope électronique à balayage et éventuellement complétées par d'autres conditions de vieillissement.

## Profil demandé

---

De bonnes connaissances en matériaux et mécanique avec une expérience en mesures physiques. Un goût prononcé pour la modélisation et l'expérimentation. Autonomie et rigueur. Qualité rédactionnelle.

## Références bibliographiques

---

- Delobelle, P., Richard, F., Qasmi, M., 2009. Quelques potentialités de l'essai de nanoindentation. Cas du nickel polycristallin et électrodéposé : interprétation du module d'indentation, de la dureté, des effets d'échelle et des paramètres d'identification inverse. *Matér. Tech.* 96, 83–94.
- Delobelle, P., Dali, S., Richard, F., 2011. Interprétation du module d'indentation dans le cas des matériaux anisotropes et/ou actifs. *Matér. Tech.* 99, 185–196.
- Fröhlich, F., Grau, P., Grellmann, W., 1977. Performance and analysis of recording microhardness tests. *Phys. Status Solidi A* 42, 79–89.
- Loubet, J.L., Georges, J.M., Marchesini, O., Meille, G., 1984. Vickers Indentation Curves of Magnesium Oxide (MgO). *J. Tribol.* 106, 43–48.
- Oliver, W.C., Pharr, G.M., 2004. Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: Advances in understanding and refinements to methodology. *J. Mater. Res.* 19, 3–20.
- Pathak, S., Kalidindi, S. R., 2015. Spherical nanoindentation stress–strain curves. *Mater. Sci. Eng. R.* 91, 1–36.
- Vlassak, J.J., Nix, W.D., 1993. Indentation modulus of elastically anisotropic half spaces. *Philos. Mag. A* 67, 1045–1056.
- Vlassak, J.J., Nix, W.D., 1994. Measuring the elastic properties of anisotropic materials by means of indentation experiments. *J. Mech. Phys. Solids* 42, 1223–1245.
- Yao, W.Z., Krill, C.E., Albinski, B., Schneider, H.-C., You, J.H., 2014. Plastic material parameters and plastic anisotropy of tungsten single crystal: a spherical micro-indentation study. *J. Mater. Sci.* 49, 3705–3715.
- Zambaldi, C., Raabe, D., 2010. Plastic anisotropy of  $\gamma$ -TiAl revealed by axisymmetric indentation. *Acta Mater.* 58, 3516–3530.