



INSTITUT  
Mines-Télécom



MINES  
ParisTech



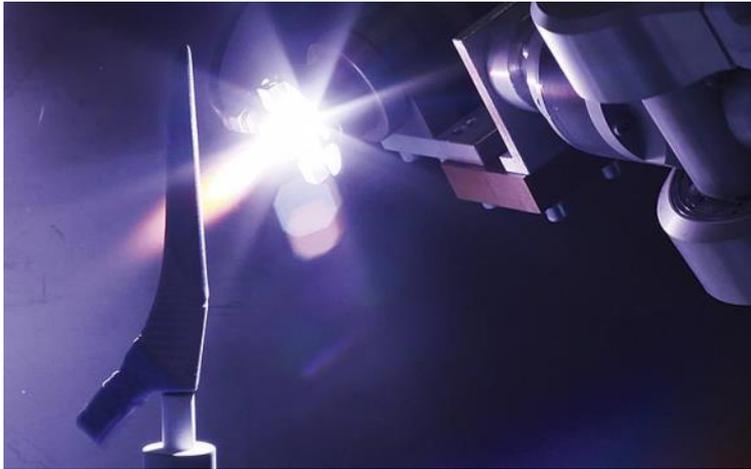
CENTRE DES MATERIAUX  
P.MFOURT

# Design d'interface pour améliorer l'adhérence de systèmes revêtus céramiques

V. Guipont / V. Maurel

MINES ParisTech,  
Département Mécanique et Matériaux  
MAT - Centre des matériaux  
CNRS UMR 7633  
BP 87 91003 Evry, France

# Revêtements biocéramiques (HAP) sur implant métallique (TA6V, CrCo)



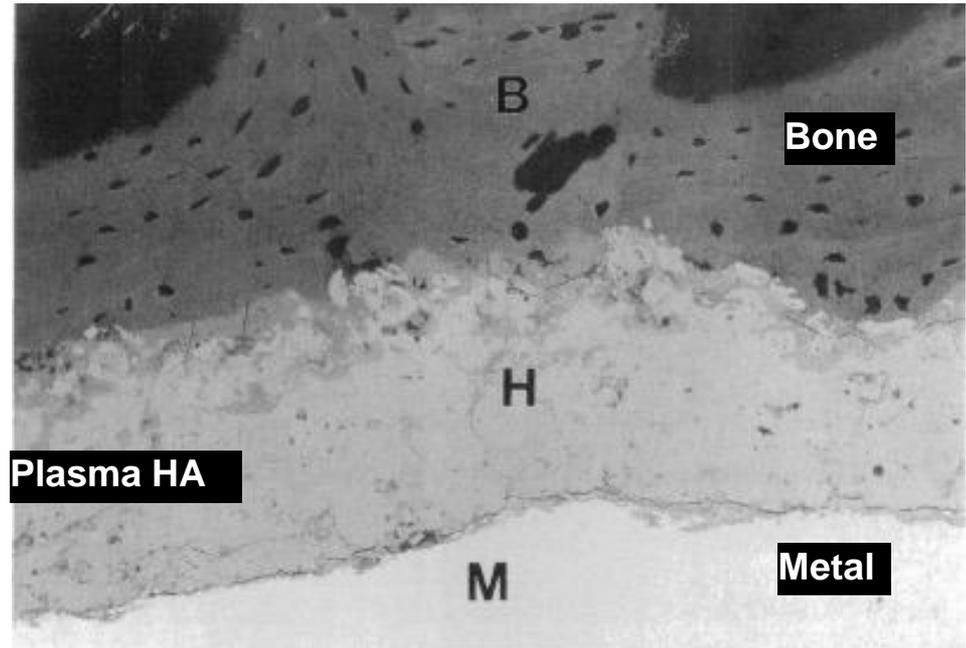
www.marle.fr



## Tenue mécanique du revêtement

→ à l'implantation (non cimentée)

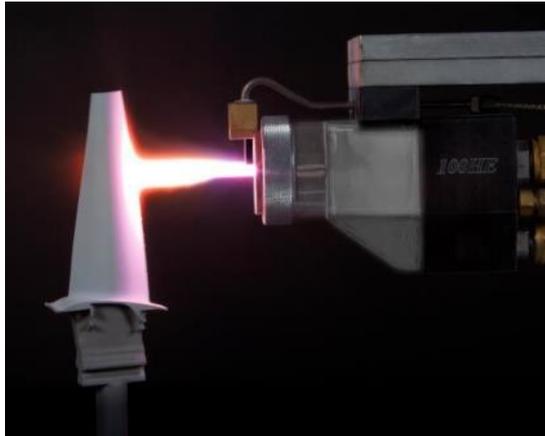
→ *In vivo* (37°C/milieu aqueux actifs)



W. L. Jaffe et D. F. Scott, *J Bone Joint Surg Am*, vol. 78, n° 12, p. 1918-34, 1996.

# Barrières Thermiques $ZrO_2-Y_2O_3$ poreuse sur superalliage (turbines aéronautique ou terrestre)

PLASMA



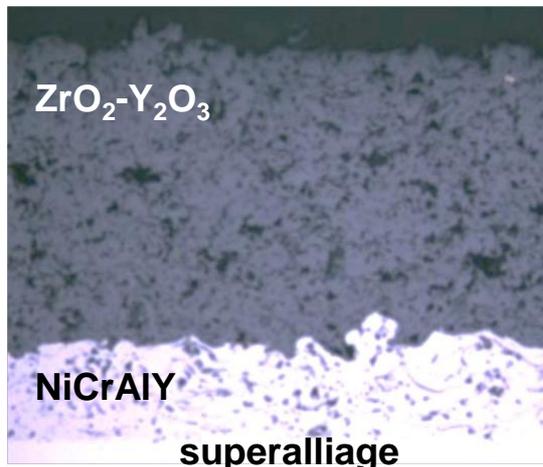
[www.progressivesurface.com](http://www.progressivesurface.com)

EB - PVD

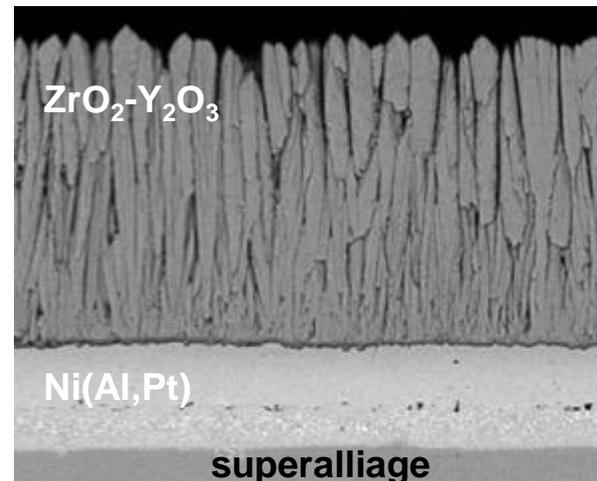


[www.psilttd.co.uk](http://www.psilttd.co.uk)

Interface  
rugueuse



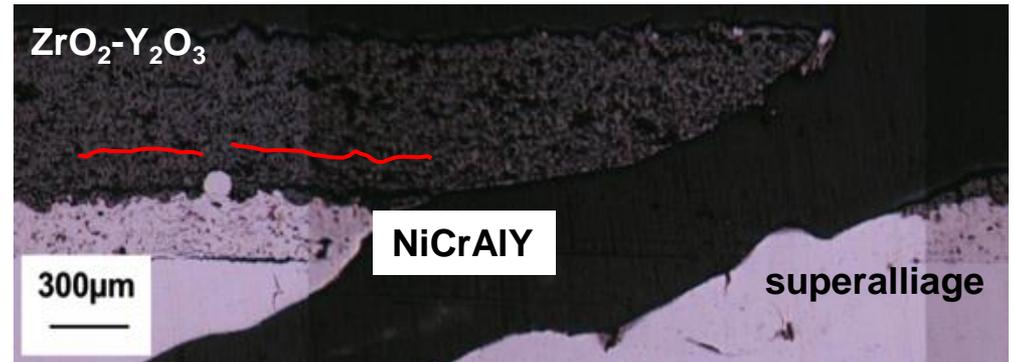
Interface  
oxydée



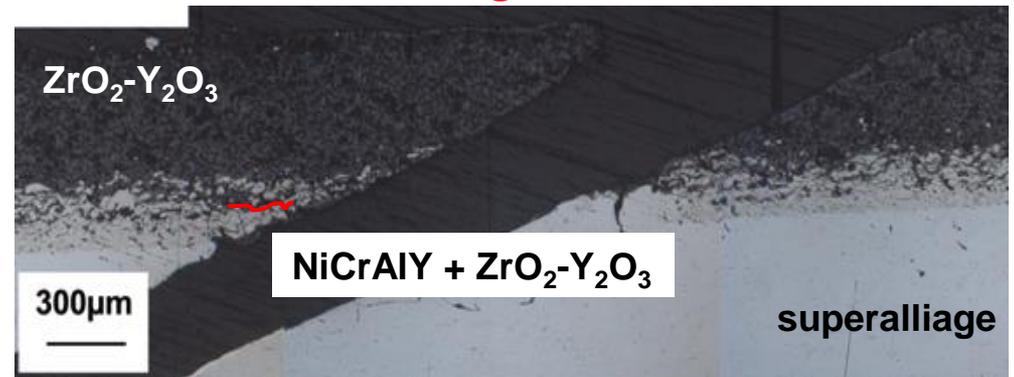
# Design d'interface et tenue à l'endommagement

→ Ex: Amélioration de la tenue au perçage laser des chambres de combustion revêtues BT plasma

Sous-couche plasma



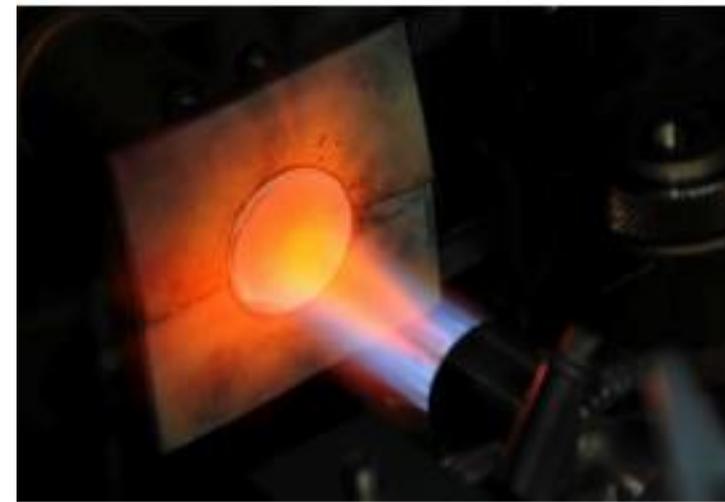
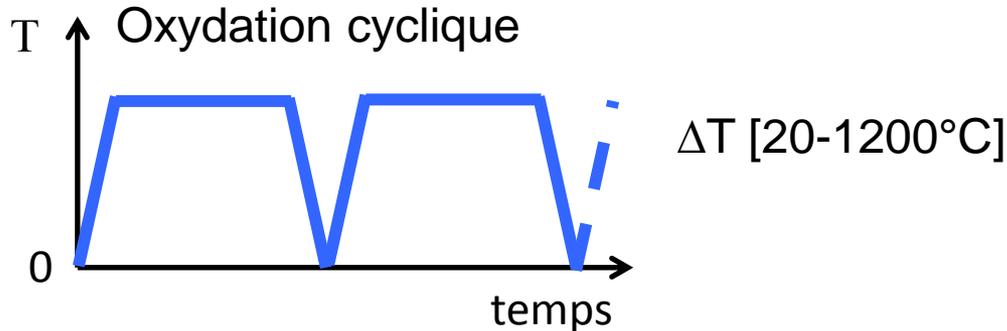
Sous couche à gradient



ANR « ULTRA » Caroline Guinard Thèse MINES ParisTech

C. Guinard, G. Montay, V. Guipont, M. Jeandin, J. Girardot, M. Schneider, *Residual Stress Analysis of Laser-Drilled Thermal Barrier Coatings Involving Various Bond Coats*, *Journal of Thermal Spray Technology*, 24(1-2):252-262, 2015

## Des chargements sévères



### Multicouches

- Céramique / faible coefficient de dilatation
- Métal / fort coefficient de dilatation

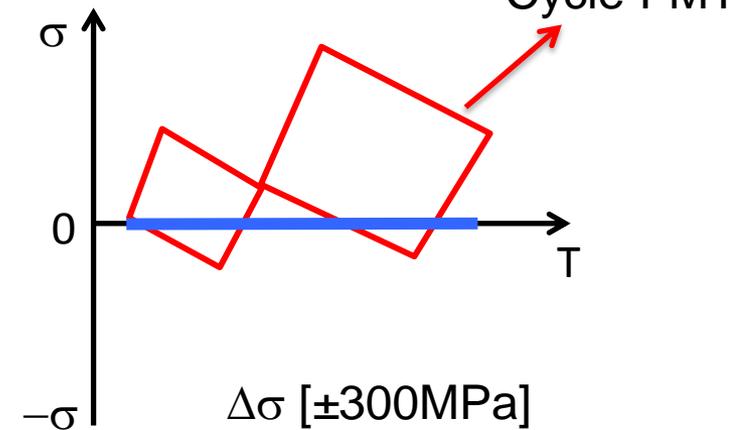
→ Céramique en compression à basse température

### Sur pièce

- Gradients
- Efforts combinés aux dilatations

→ Fatigue thermo-mécanique

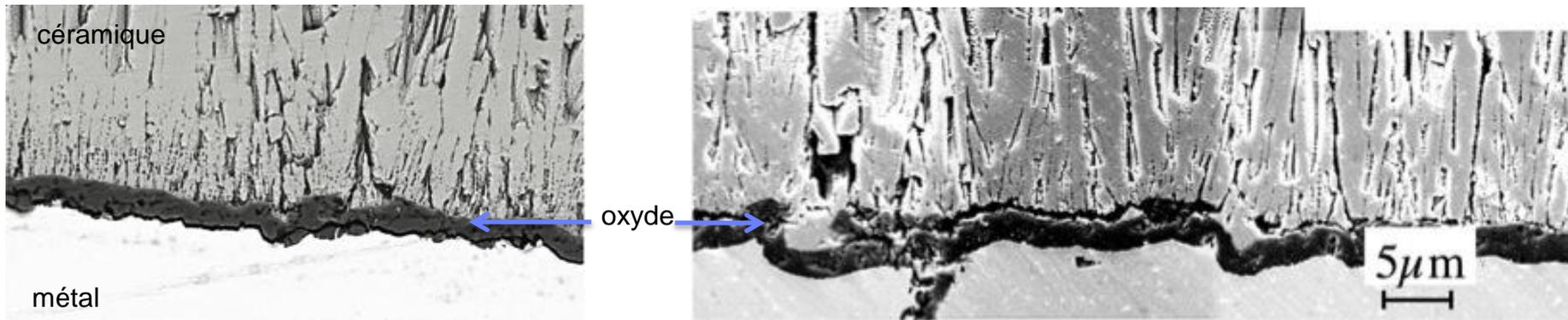
Contrainte (MPa)



[Rémy et al, 2002]

# Ruine par écaillage de la barrière thermique

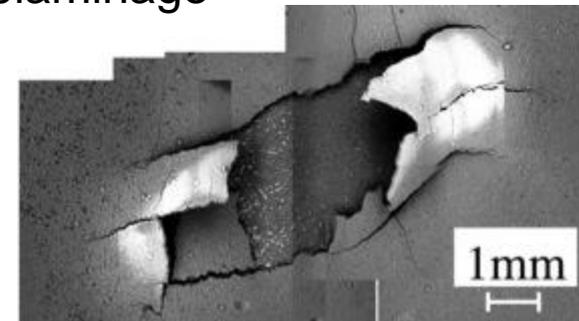
## ■ Transition d'échelle : fissuration de l'oxyde à écaillage macroscopique



Délaminage



Flambage



Écaillage

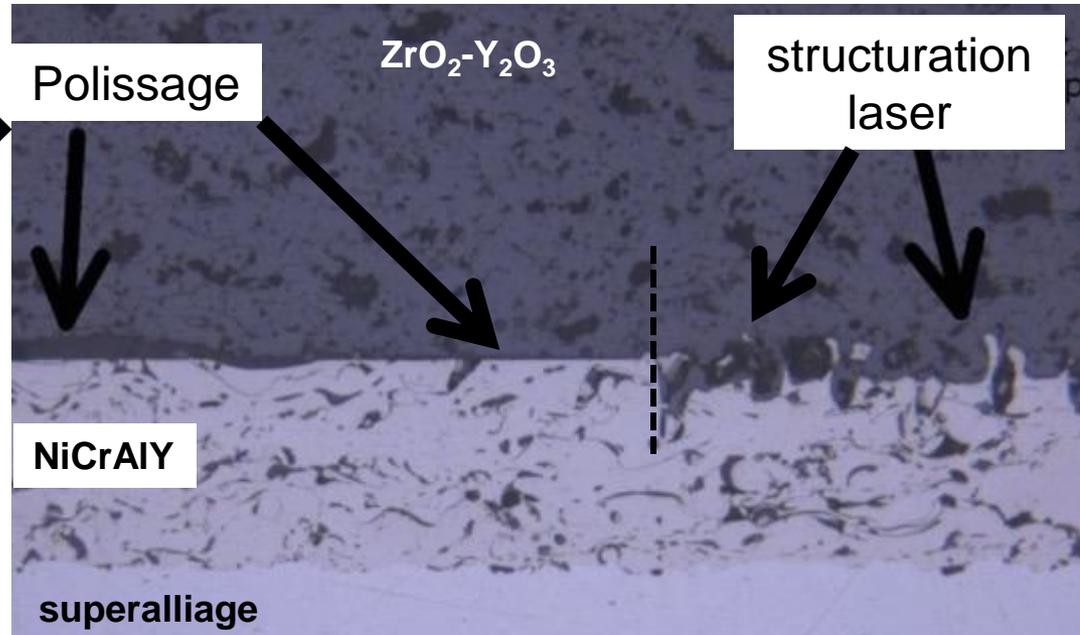
[Courcier 2011, Soullignac 2013]

# Structuration morphologique de la surface

## Enlèvement de matière

- Motifs de surface issus de structuration laser ns

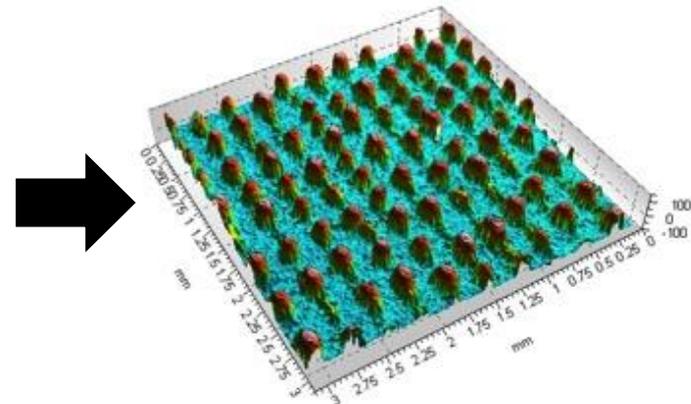
ANR « ULTRA » Caroline Guinard Thèse  
MINES ParisTech



## Apport de matière

- Motifs de surface issus de Fabrication Additive par laser (SLM)

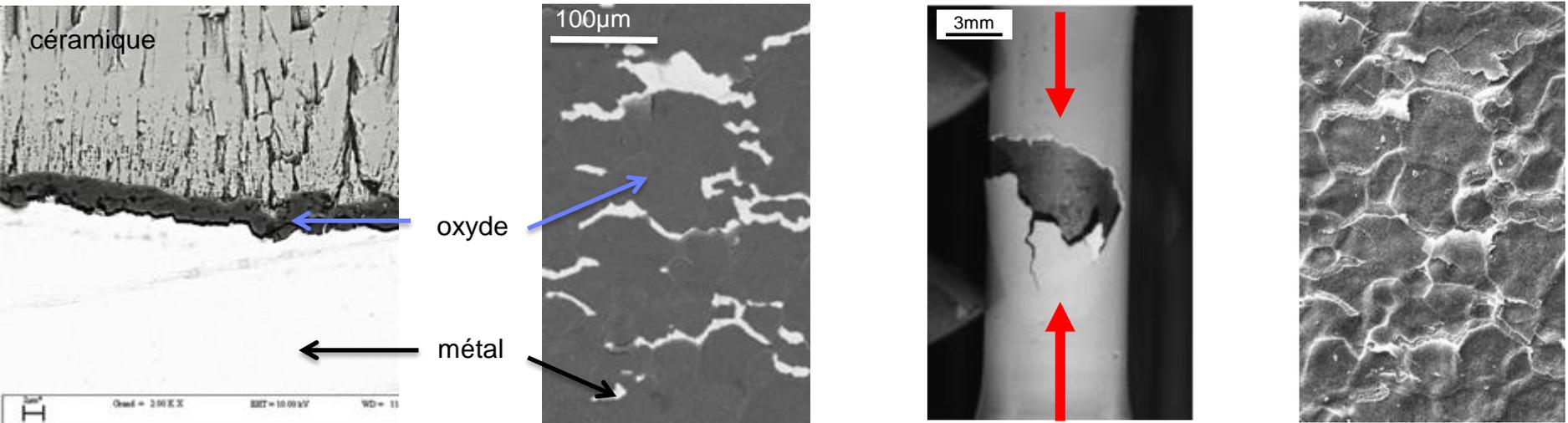
Sapardanis et al.  
(Coll. C.Colin, JD Bartout, MINES Paristech, CDM)



# Design d'interface

- **Structuration de surface / Site d'ancrage pour le revêtement et obstacles à la propagation d'une fissure d'interface**
  - **Nature de l'interface / rôle de l'oxydation**
  - **Dualité de la rugosité d'interface / Site d'initiation de décohésions locales liées aux contraintes hors-plan**
  - **Besoin de caractérisation fine et modélisation associée**
- **Quelles techniques de caractérisation?**

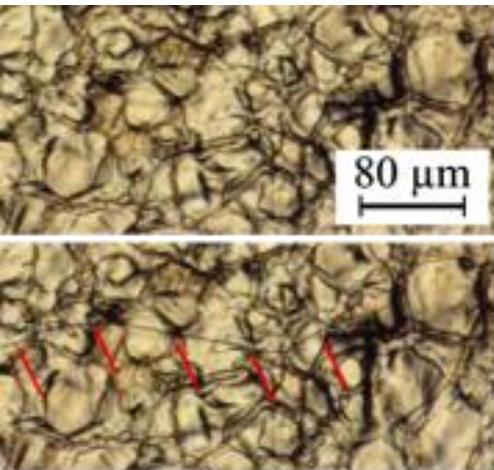
# Essai de compression à l'écaillage



- **Ex : Rôle de l'adhérence de l'oxyde dans l'écaillage de la barrière thermique**
- **Utilisation d'un essai de compression mécanique conduisant à**
  - La fissuration des interfaces
  - L'écaillage/la fissuration de l'oxyde
  - L'écaillage de la barrière thermique
- **Mesure de la fraction surfacique écaillée d'oxyde**
- **Analyse locale pour comprendre le lien entre la microstructure et l'écaillage de l'oxyde**  
[Bickard, Rémy, 1998 / Harvey, 2009 / Courcier 2011]

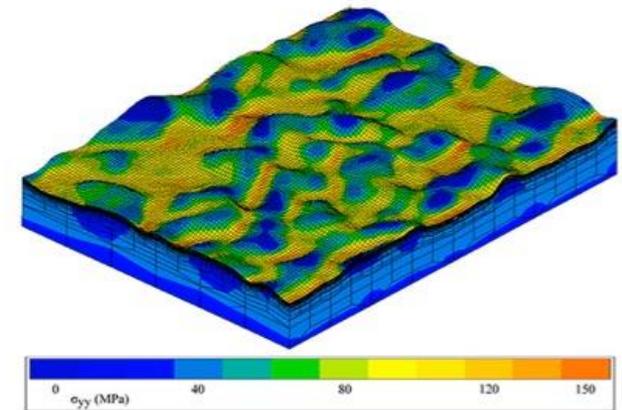
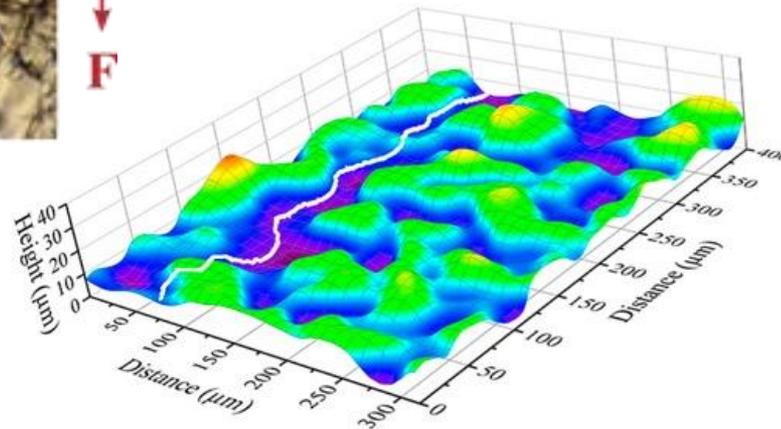
# Observation surfacique *in situ*

- Microscope numérique / résolution  $\sim 1\mu\text{m}$
- Ex: mesure de fissures dans le domaine fragile de revêtements (Ni,Pt)Al



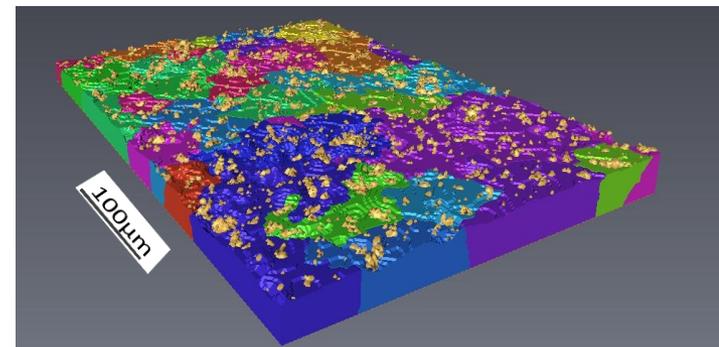
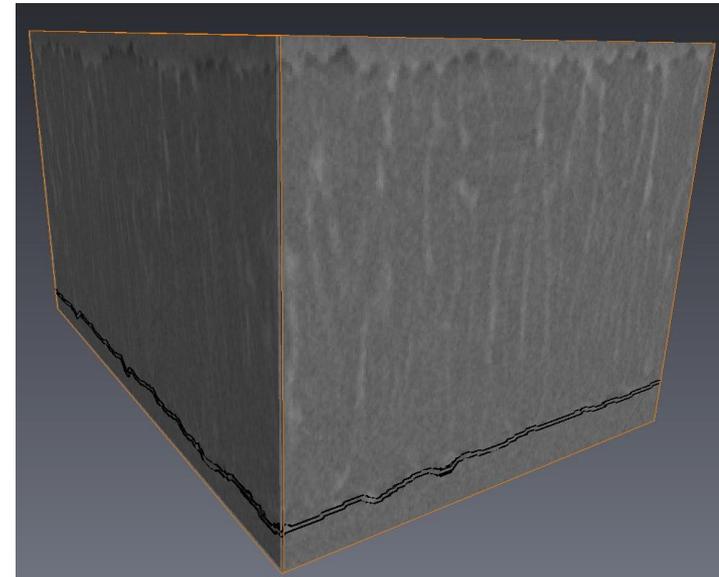
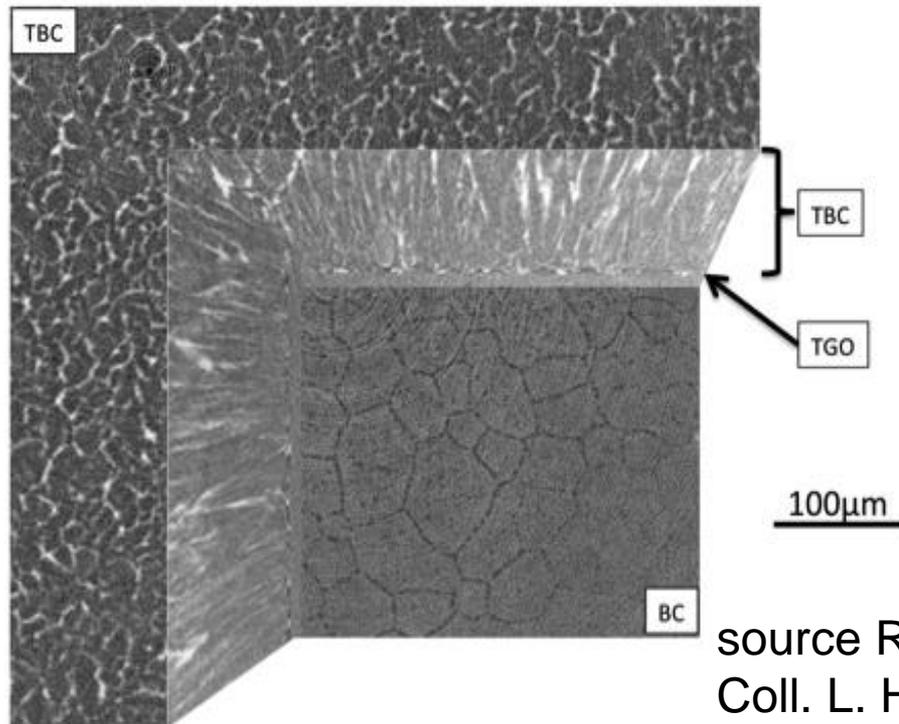
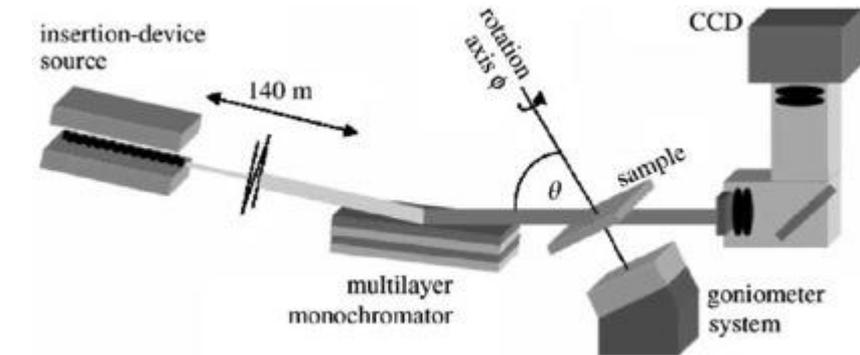
F  
↑  
↓  
F

- Détection de fissure
- **Mesure de déformation locale = à l'échelle « de la fissure »**
- Maillage EF de la morphologie réelle / analyse des mécanismes
- Lien fissuration / morphologie



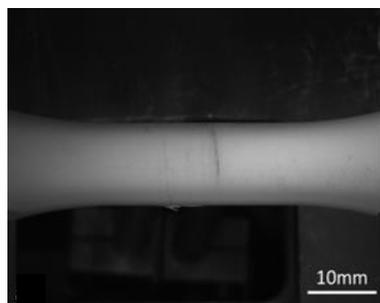
[Esin et al, acta mat 2016]

# Laminographie X pour la mesure des défauts d'interface

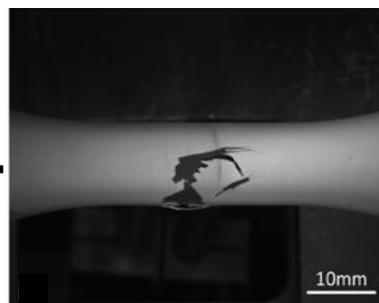


source RX polychromatique (30-65 keV)  
Coll. L. Helfen (ESRF) / Th. Morgeneyer (Mines)

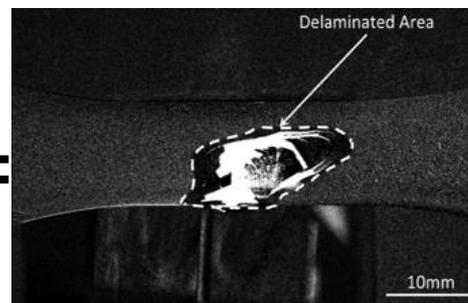
# Influence de la rugosité sur la propagation de fissure



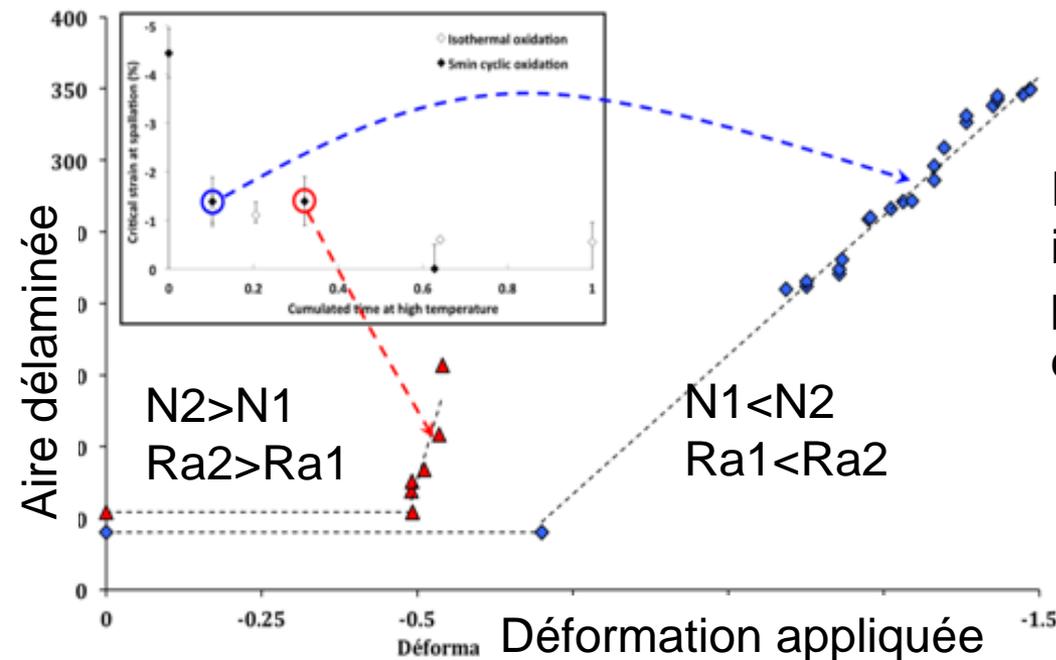
Etat de référence



Etat délaminé



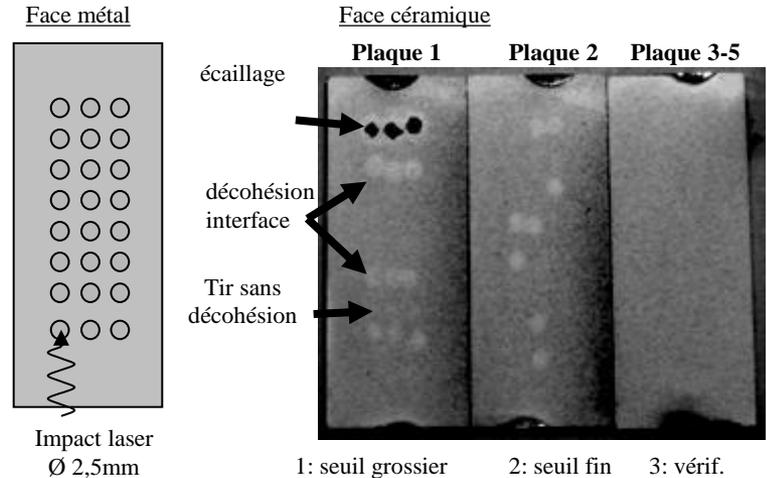
Détection de la zone délaminée par analyse d'images



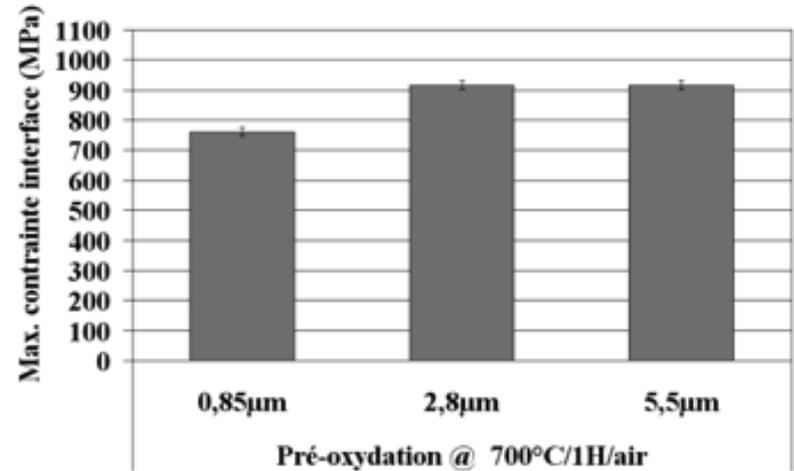
Pour une même déformation, les interfaces les plus vieilles et donc les plus rugueuses conduisent à une aire délaminée supérieure

[Soulignac 2013]

# Caractérisation de l'adhérence par choc laser



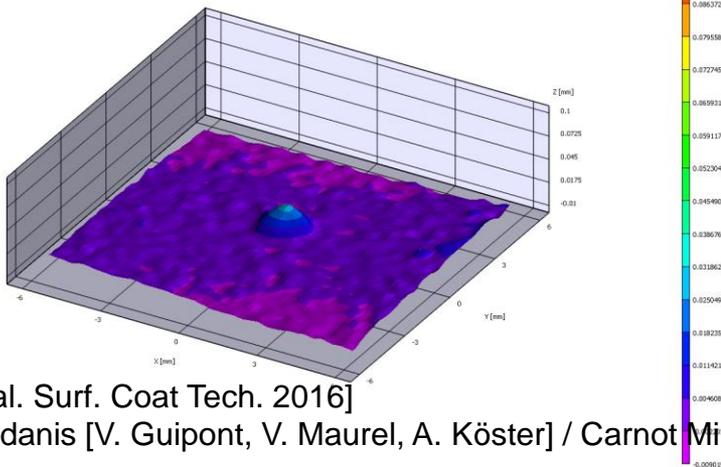
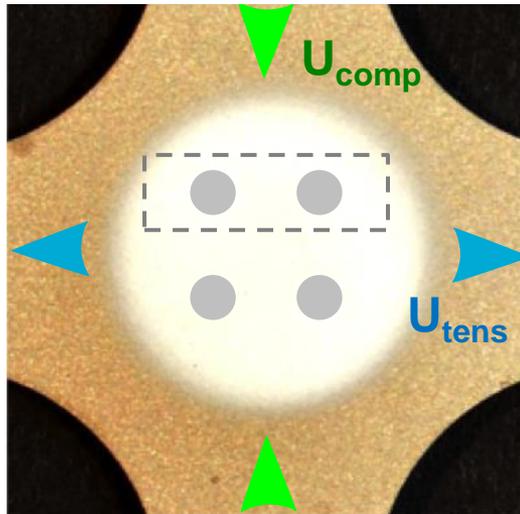
- **Essai LASAT : Caractérisation / pièces par détection d'un seuil d'énergie conduisant au délaminage de l'interface**
- **Application biocéramique : l'oxyde augmente l'adhérence du revêtement**



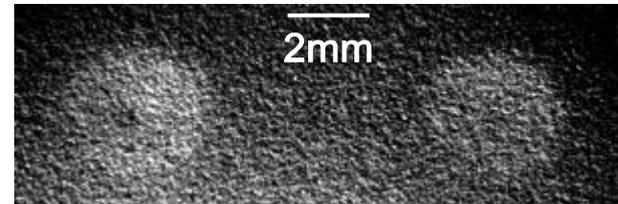
V.Guipont, S.Bansard, M.Jeandin, K.A.Khor, M.Nivard, L.Berthe, J.P.Cuq-Lelandais, M.Boustie : *Bond strength determination of hydroxyapatite coatings on Ti-6Al-4V substrates using the LAser Shock Adhesion Test (LASAT)*, Journal of Biomedical Materials Research Part A, 95A(4) : 1096-1104, 201

# Introduction d'un défaut contrôlé par choc laser (LASAT)

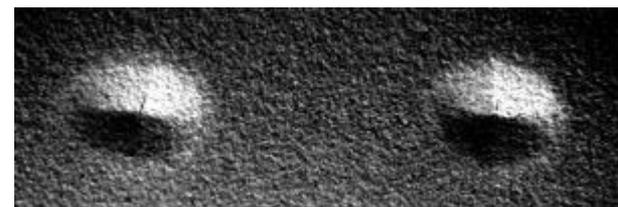
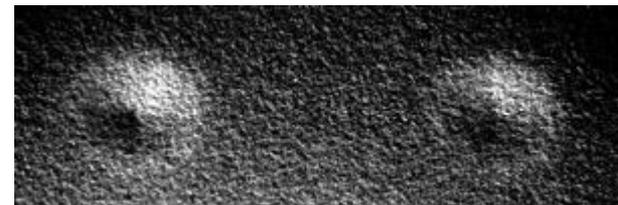
■ Essai de délaminage sous chargement multiaxial : cisaillement macroscopique



Initial step



Intermediate steps



Final step



Loading

$U_{comp}$

0  $\mu\text{m}$

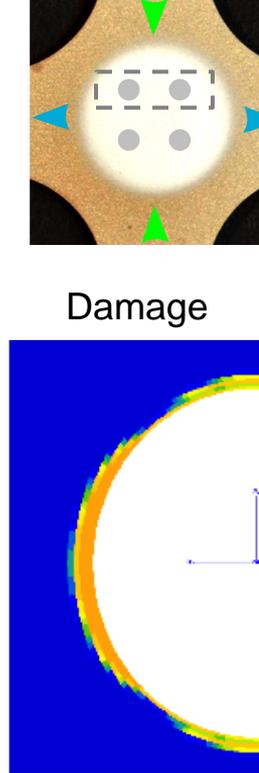
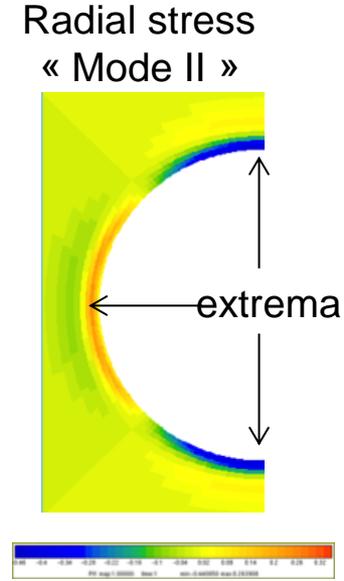
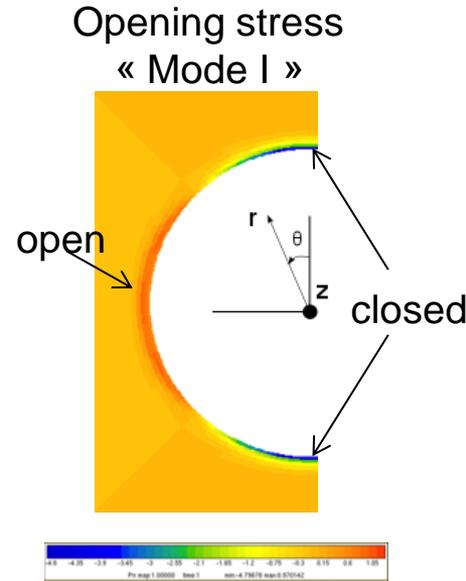
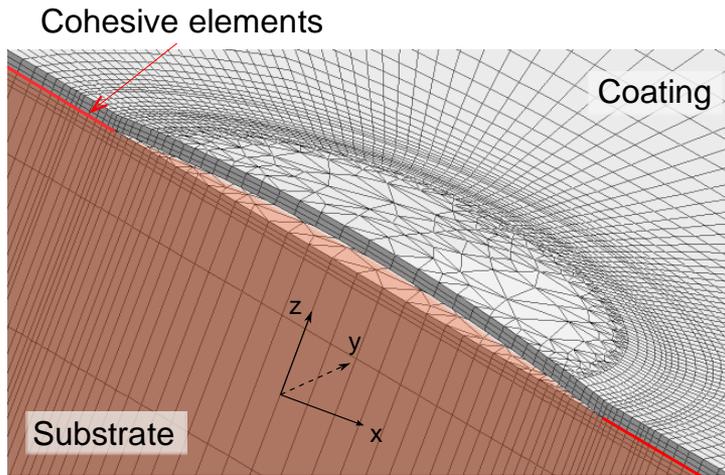
-200  $\mu\text{m}$

-276  $\mu\text{m}$

- 320  $\mu\text{m}$

[Sapardanis et al. Surf. Coat Tech. 2016]  
Thèse H. Sapardanis [V. Guipont, V. Maurel, A. Köster] / Carnot Mines

# Analyse mécanique de la propagation d'une fissure d'interface



## Permet d'expliquer la forme "diamant" du délaminage

- Influence de la fermeture de fissure
- La fissure se propage (même fermée) là où le « mode II » est maximum (cisaillement maximal de l'interface)

Permet de caractériser les propriétés de l'interface et du revêtement céramique

# Conclusion

## ■ Design d'interface pour les revêtements céramiques

- **Structuration de surface** : Optimisation de l'adhérence par ancrage mécanique
- **Physicochimie** : Propriétés de l'oxyde

## ■ Caractérisation

- Choc laser, échantillon ou pièce
- Essai d'écaillage : mesures plus précises (résolution temporelle)
- Outils de la Métallurgie-Mécanique : allier observation de surface et en volume in situ et ex situ

## ■ Modélisation

- Permet de faire le lien entre morphologie (voire la nature chimique) des interfaces et l'adhérence
- Indispensable pour la caractérisation des propriétés mécaniques des interfaces (énergie cohésive) et des dépôts (module élastique, gradients de propriétés, ténacité)

# Merci pour votre attention

## ■ Présentation sur la base de travaux conjoints avec

- Luc Rémy, Alain Köster, Vladimir Esin
- Michel Jeandin, François Borit
- Thilo Morgeneyer, Laurent Corté
- Lukas Helfen ESRF
- André Malié, Pascal Bilhé, Jean-Yves Guédou, Arnaud Longuet, Serge Selezneff, Safran/Snecma
- Steve Duvinage, Matthieu Rambaudon, Nicole de Dave
- Hélène Sapardanis, Caroline Guinard, Geoffrey Begué, Romain Soullignac, Paul Breton, Mark Harvey, Christophe Courcier