Études de l'adhérence et de l'endommagement de barrières thermiques avec des méthodes par chocs laser

Journées Annuelles du gdr COnCOrD – 09 octobre 2025

Eliott Degouilles, Vincent Guipont, Vincent Maurel

Centre des matériaux MinesParis-PSL, CNRS UMR 7633, 21 allée des marronniers, 78000 Versailles, France

Contexte et motivations



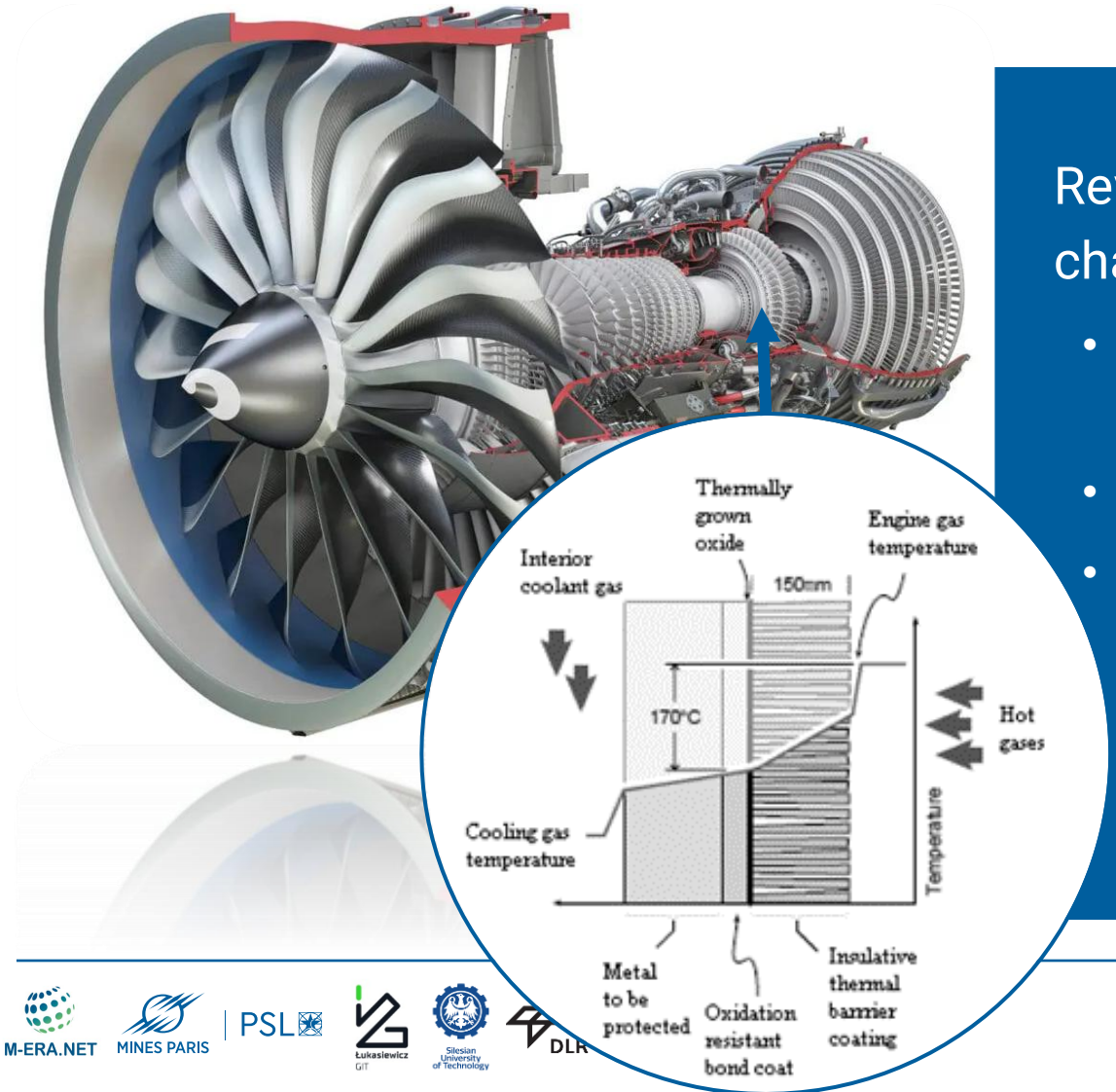
Principaux enjeux actuelles pour turbines à gaz

1. Augmentation des températures d'utilisation pour l'amélioration des rendements
2. Remplacement des carburants fossiles par le dihydrogène

Besoin de nouveau matériaux capable de :

- ➢ Résister à plus haute temperature (> 1200°C)
- ➢ Résister à l'environement (CMAS, vapeur d'eau)

Contexte et motivations



Les systèmes barrières thermiques

Revêtements de protection pour les parties les plus chaudes des turbines à gaz

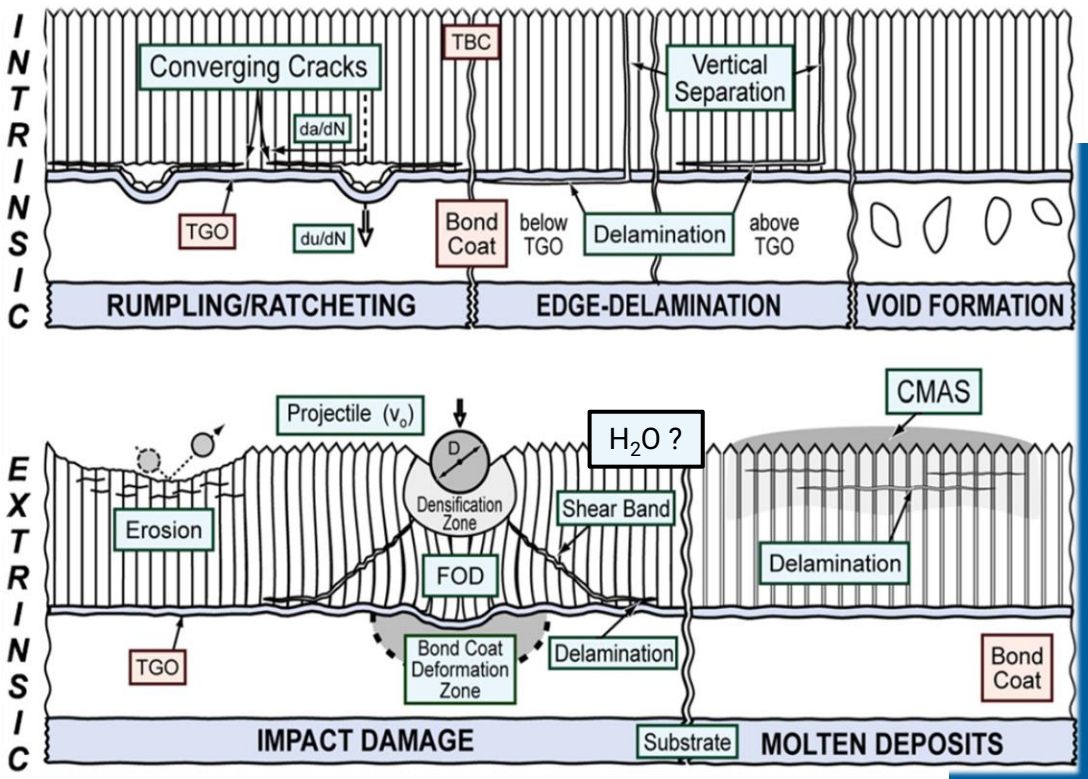
- Couche céramique poreuse isolante thermiquement pour protéger de la température ;
- Sous-couche métallique protégeant de l'oxydation ;
- Sur un substrat en superalliage.

Contexte et motivations

Projet TBC4H2

Thermal Barrier Coatings (TBCs) for greener heat-to-power applications: understanding limits of operation under hydrogen combustion and sustainable outlook

Contexte et motivations



A.G. Evans, D.R. Clarke, C.G. Levi, The influence of oxides on the performance of advanced gas turbines, Journal of the European Ceramic Society, Volume 28, Issue 7, 2008, Pages 1405-1419, ISSN 0955-2219, https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2007.12.023.

Mécanismes d'endommagement

Principaux mécanismes :

- Différences de dilatation thermique
- Croissance d'oxydes
- Effets d'environments (CMAS, vapeur d'eau ?)

Écaillage <=> Durée de vie

1 Contexte et motivations 2

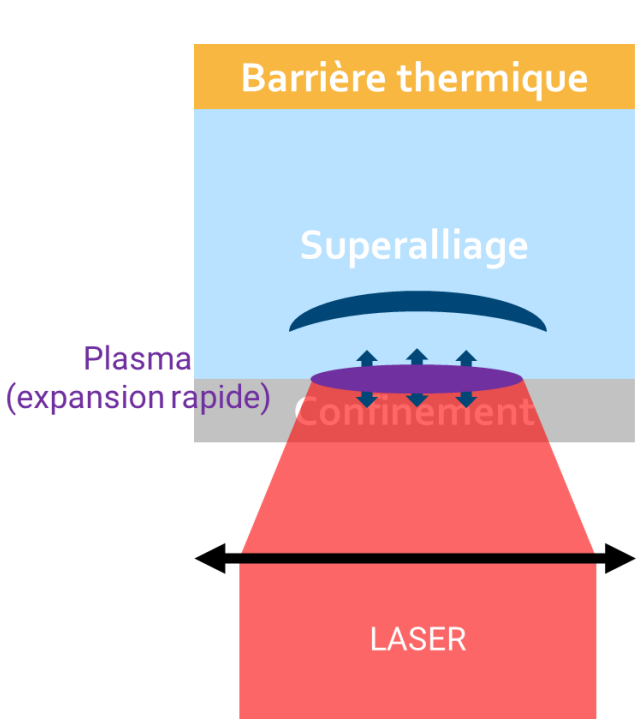
2 LASAT 7

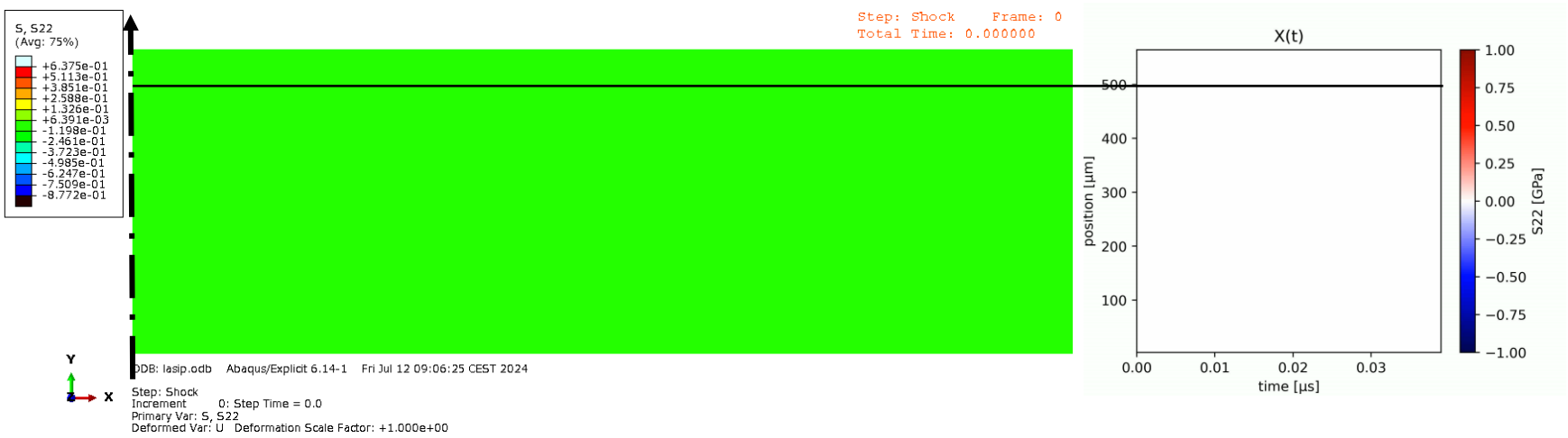
3 Système barrière thermique SPS + Pt-ɣ/ɣ’ 10

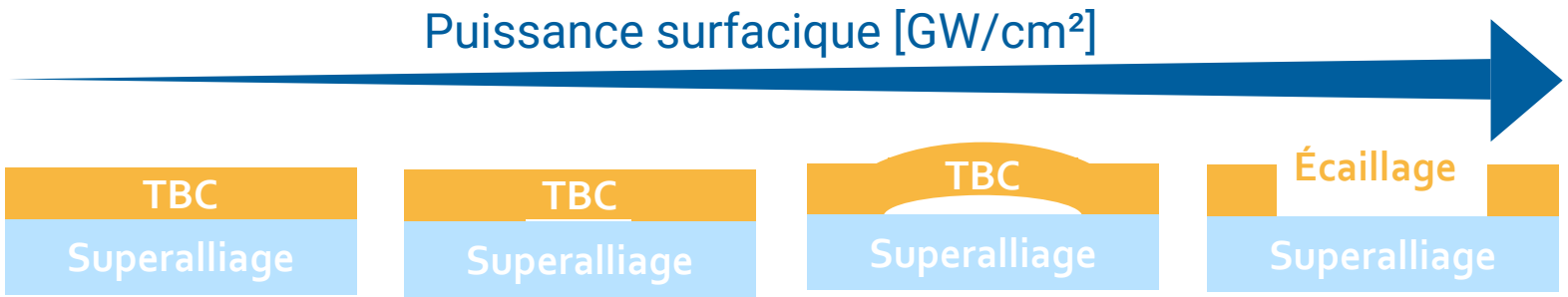
4 Effet de la pré-oxydation / du platine 12

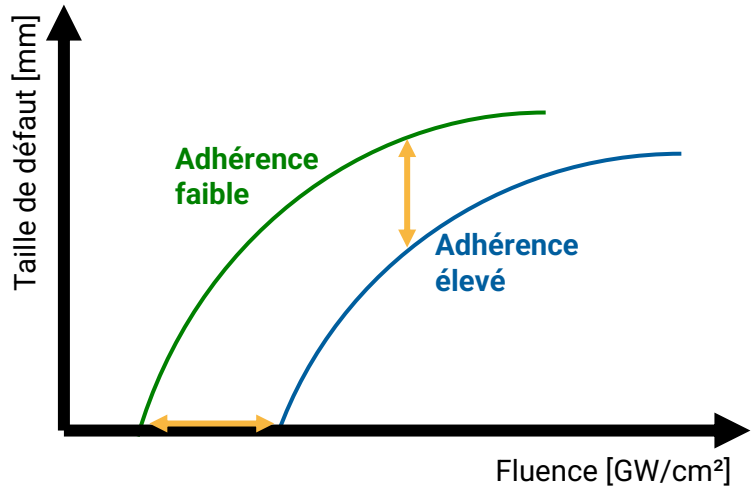
5 Effet du CMAS sur un système EB-PVD 19

LASER Shock Adhesion Test

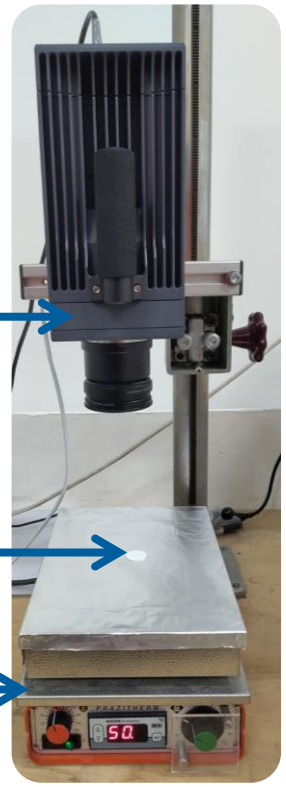


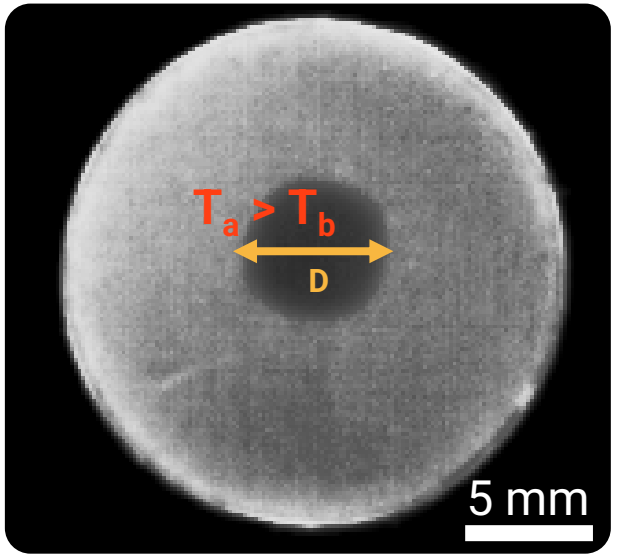


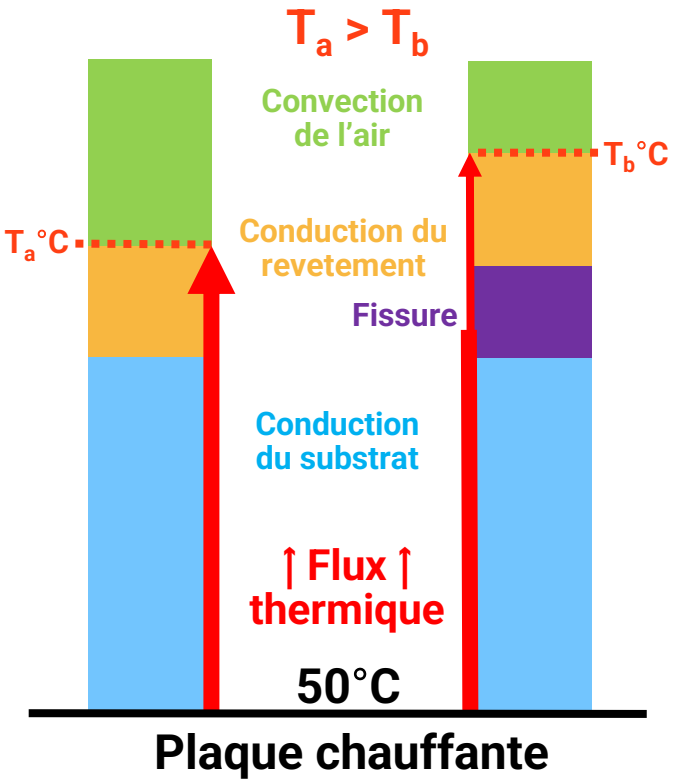


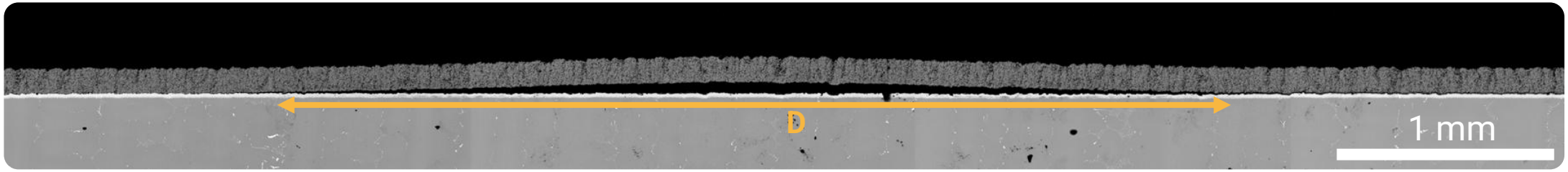


Contrôle non-destructif : Thermographie IR





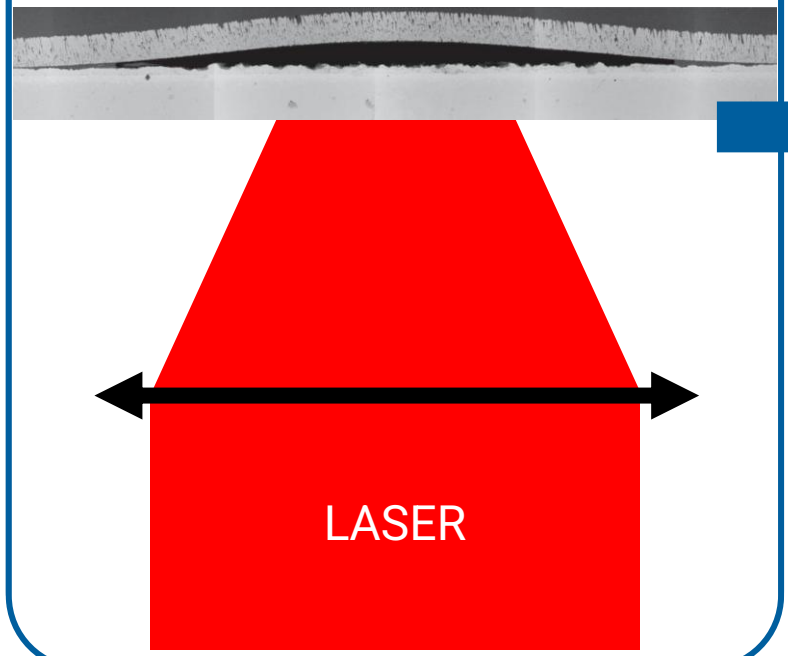




LASDAM : LAser Shock for DAmage Monitoring

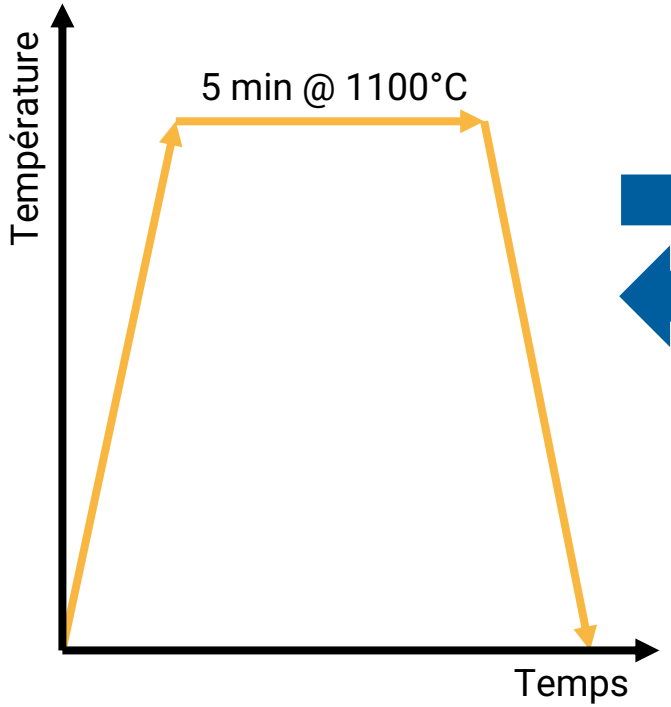
LASAT

Insertion d'un défaut calibré à l'interface



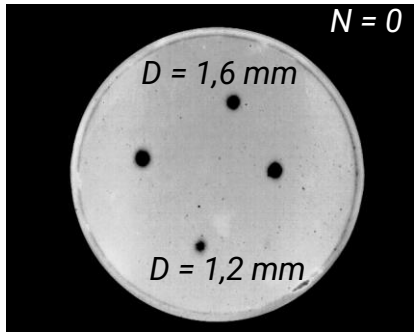
Chargement thermomécaniques

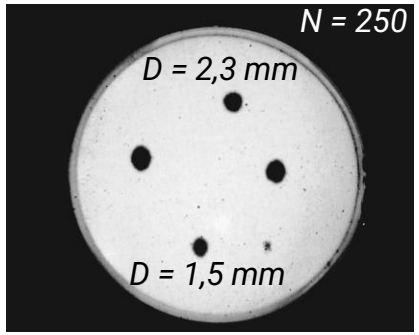
Cyclage thermique



Mesures Non-Destructives

Thermographie Infrarouge

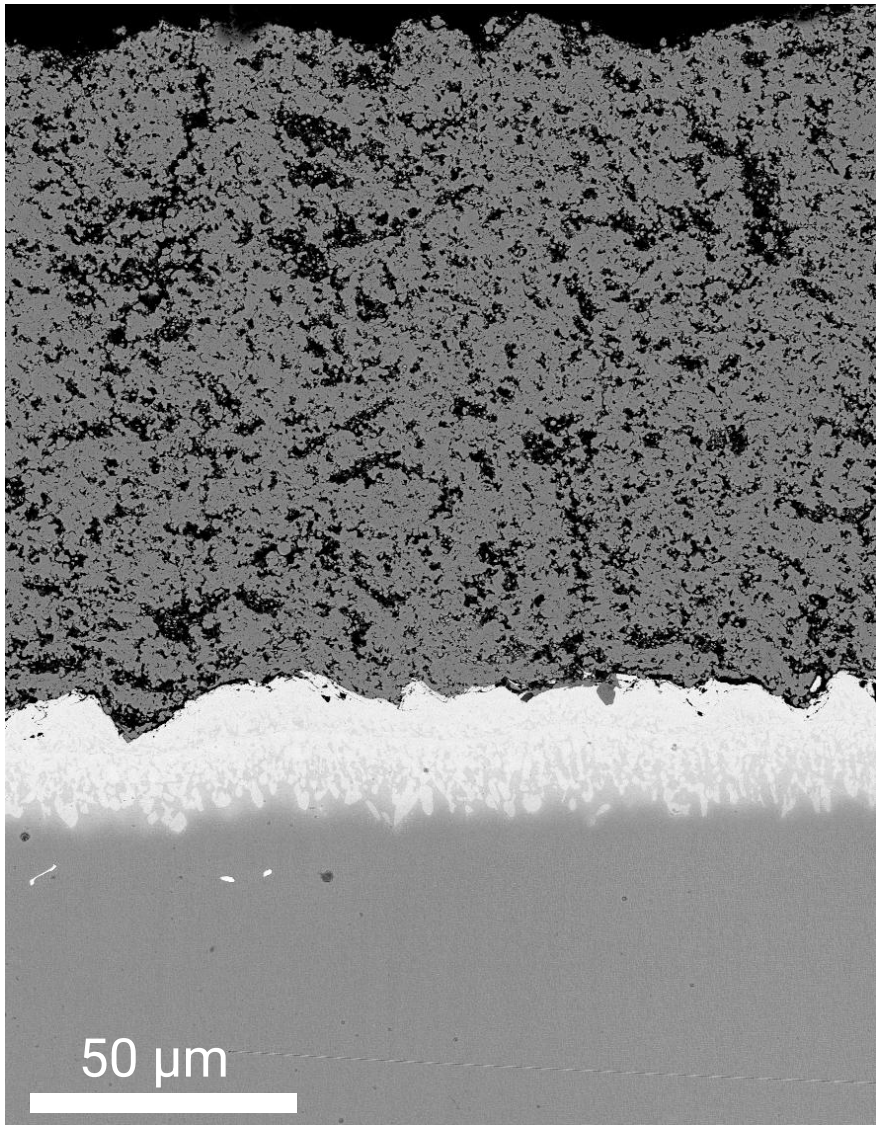


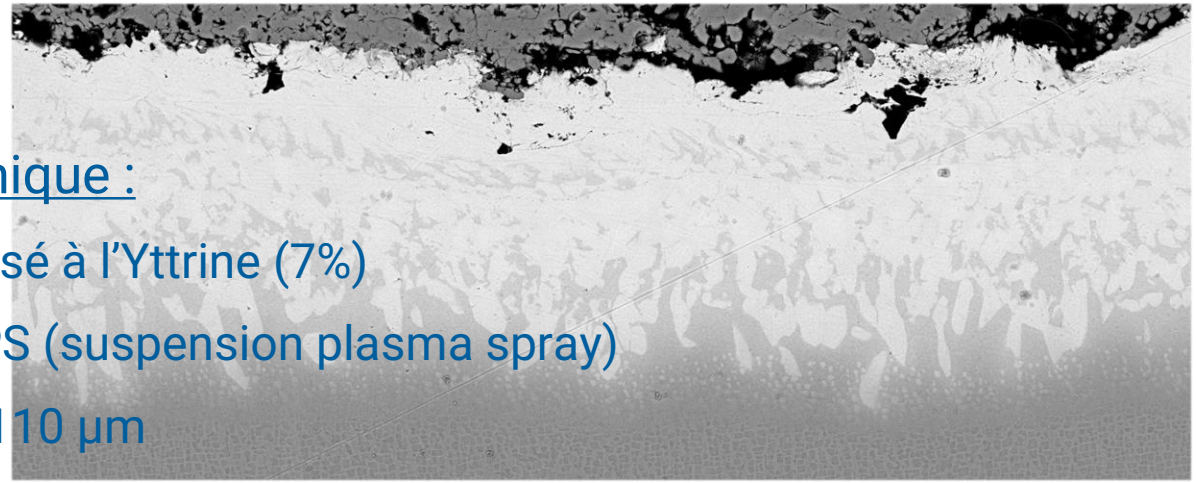


Credits : Capucine Billard

1	Contexte et motivations	2
2	LASAT	7
3	Système barrière thermique SPS + Pt-ɣ/ɣ’	10
4	Effet de la pré-oxydation / du platine	12
5	Effet du CMAS sur un système EB-PVD	19

Système étudié



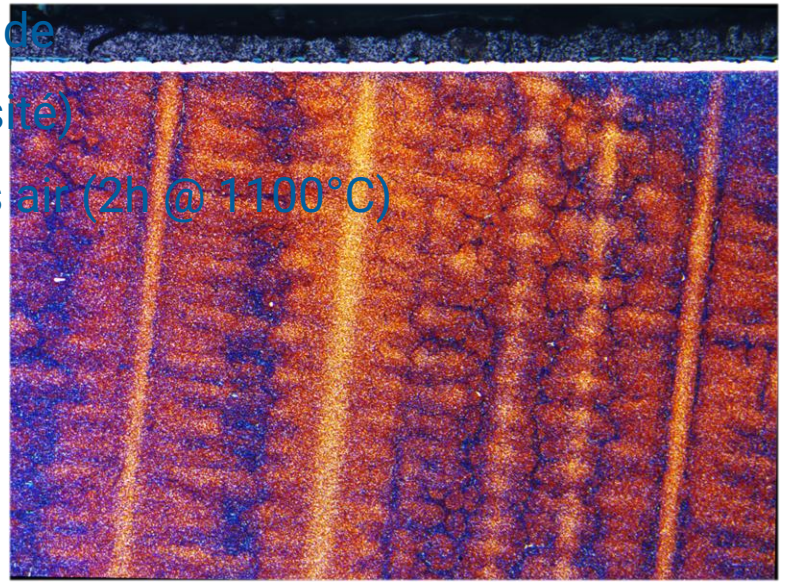


Barrière thermique :

- Zircone stabilisé à l'Yttrine (7%)
- Projeté par SPS (suspension plasma spray)
- Épaisseur de 110 µm

Sous-couche : Pt-ɣ/ɣ' de diffusion

1. Électro-déposition de 5,2 / 6,4 / 8,0 µm de Pt
2. Traitement de diffusion sous vide
3. Sablage (augmente de la rugosité)
4. Avec / Sans pré-oxidation sous air (2h @ 1100°C)



Substrat : René N5

- Superalliages 2nd génération
- Monocristal [001]↑
- Épaisseur 2 mm

1 Contexte et motivations 2

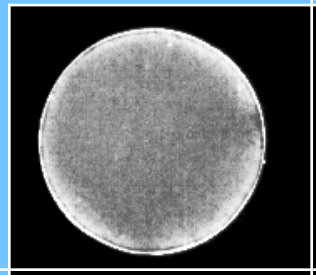
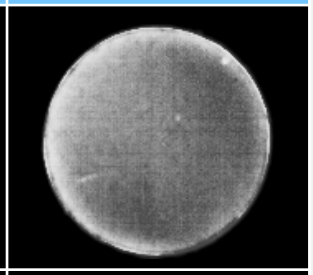
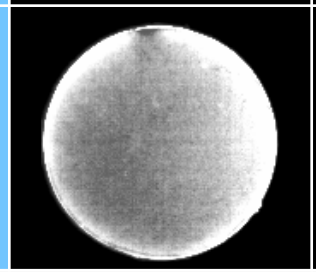
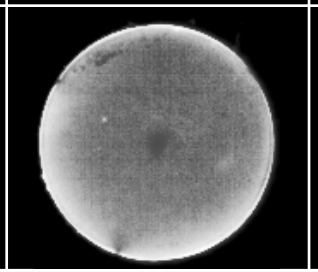
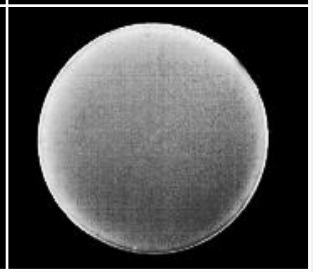
2 LASAT 7

3 Système barrière thermique SPS + Pt-ɣ/ɣ’ 10

4 Effet de la pré-oxydation / du platine 12

5 Effet du CMAS sur un système EB-PVD 19

Échantillons de l’étude

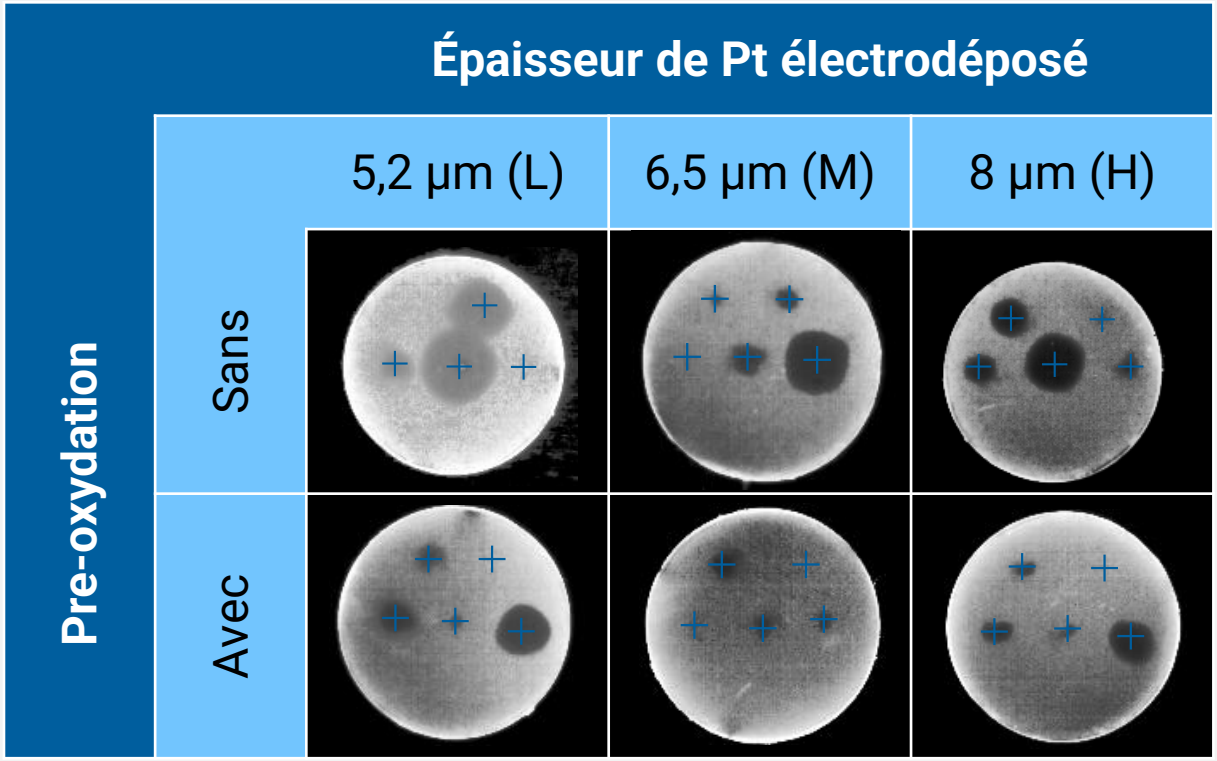
Pre-oxydation	Épaisseur de Pt électrodéposé		
	5,2 µm (L)	6,5 µm (M)	8 µm (H)
Sans			
Avec			

6 pions ø19 mm

7YSZ par SPS sur René N5 revétu Pt-ɣ/ɣ’

- 3 quantités de platines différentes :
  + Pt faible – 5,2 µm
  + Pt moyen – 6,4 µm
  + Pt élevé – 8,0 µm
- Avec ou Sans traitement de pré-oxydation sous air pendant 2h à 1100°C

Condition de choc laser et mesures IR

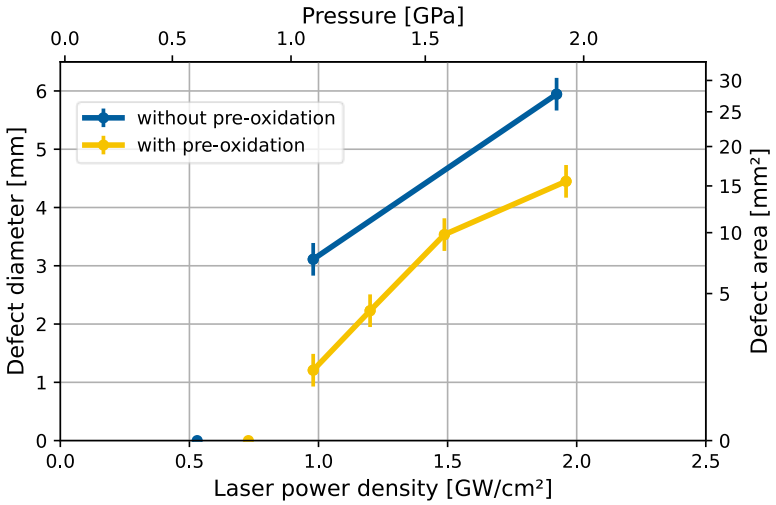


5 chocs laser par échantillon

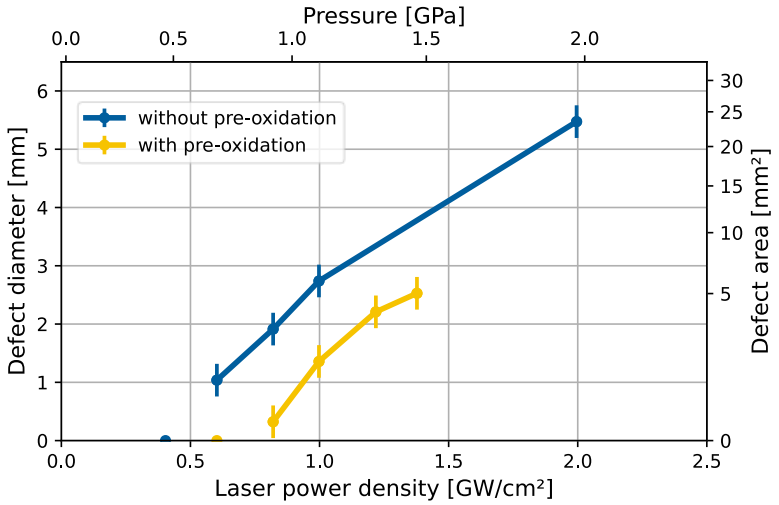
- Fluence laser : de 0,4 à 2,0 GW/cm²
- Diamètre de focalisation : 2 mm
- Longueur d'onde : 532 nm
- Durée de pulse : 5,2 ns

Courbes LASAT : effet de la pré-oxydation

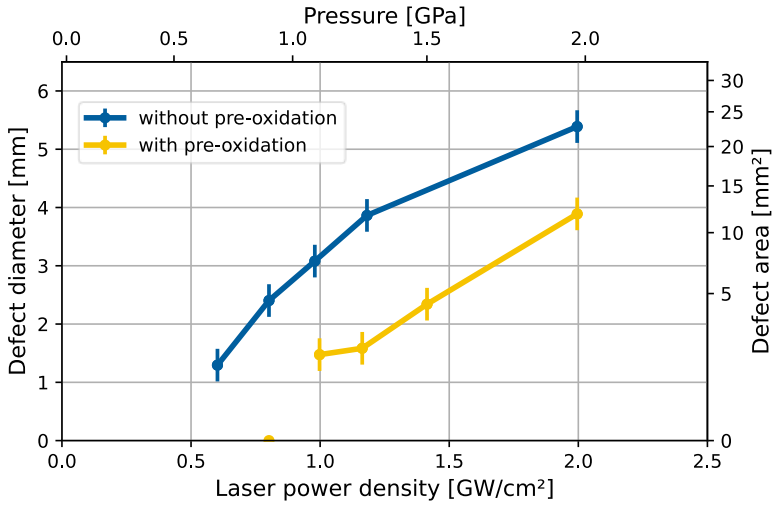
Platine **Faible**



Platine **Moyen**



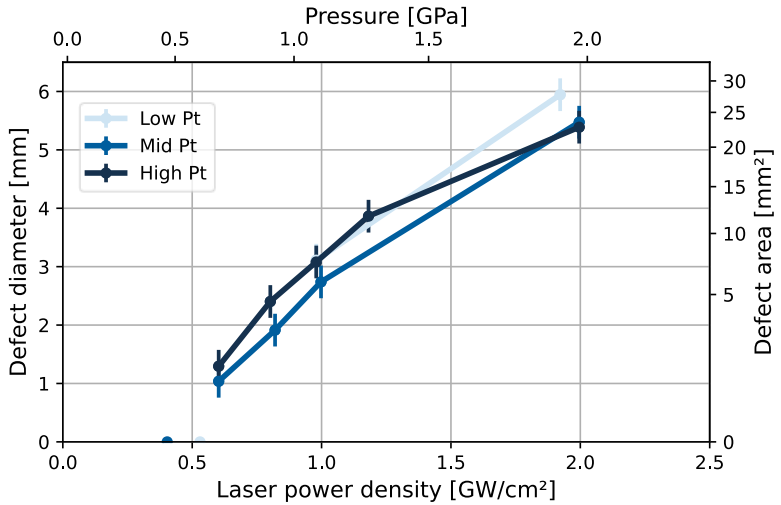
Platine **Élevé**



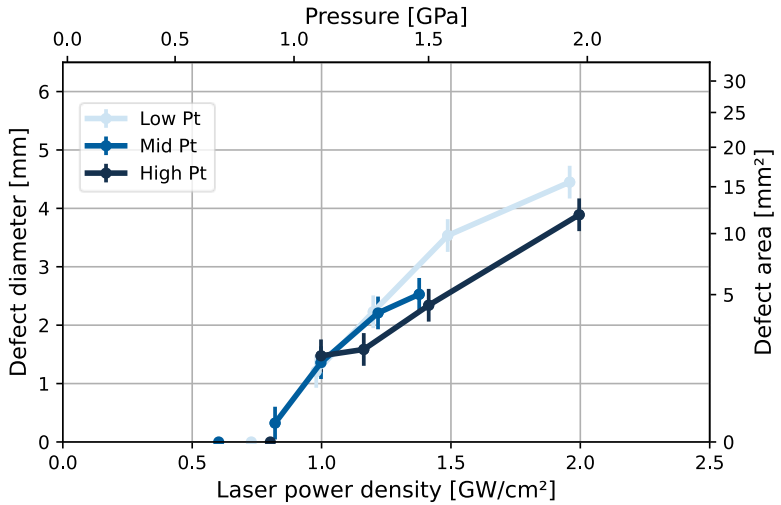
Résultat : Le traitement de pré-oxydation améliore l'adhérence

Courbes LASAT : effet du platine

Sans Pré-oxydation

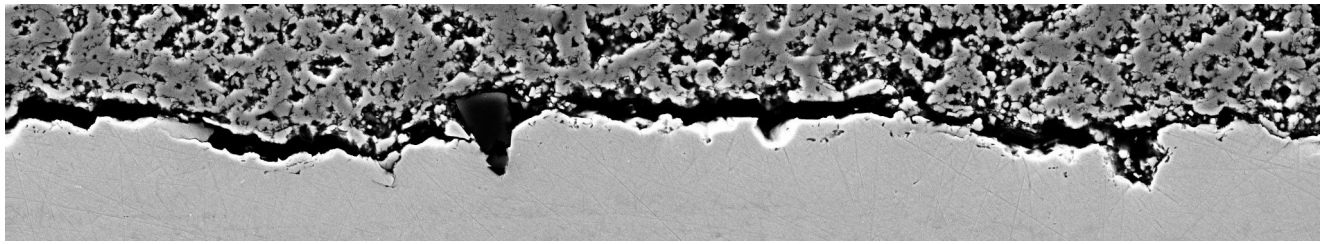


Avec Pré-oxydation

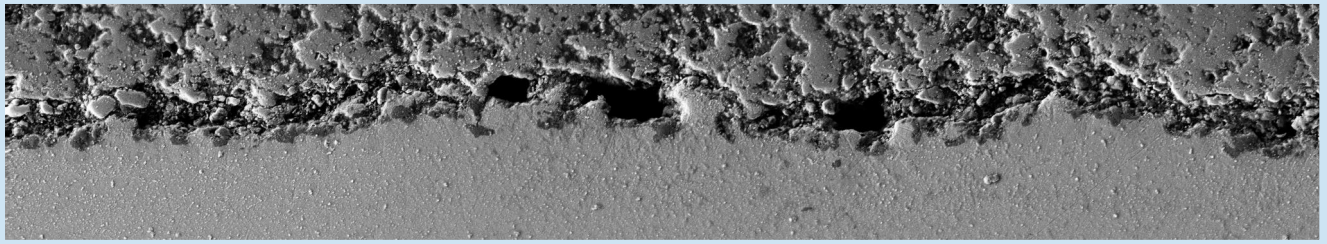


Sans pré-oxydation ▸ Pas d'oxydes

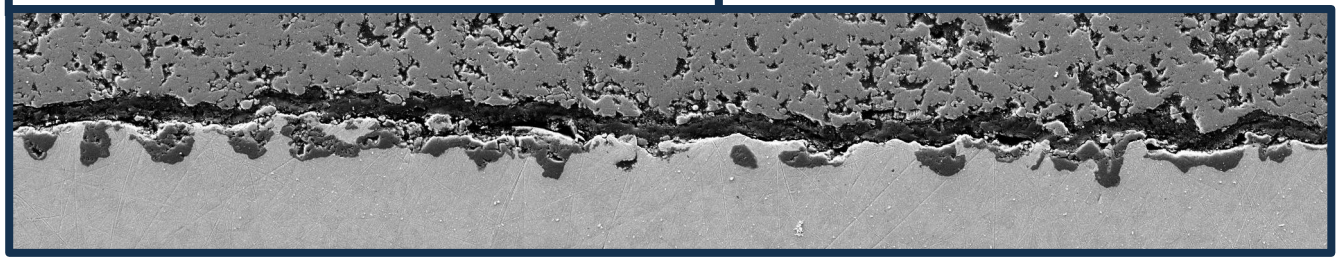
20 µm



Pt Faible ▸ Peu d'oxydes

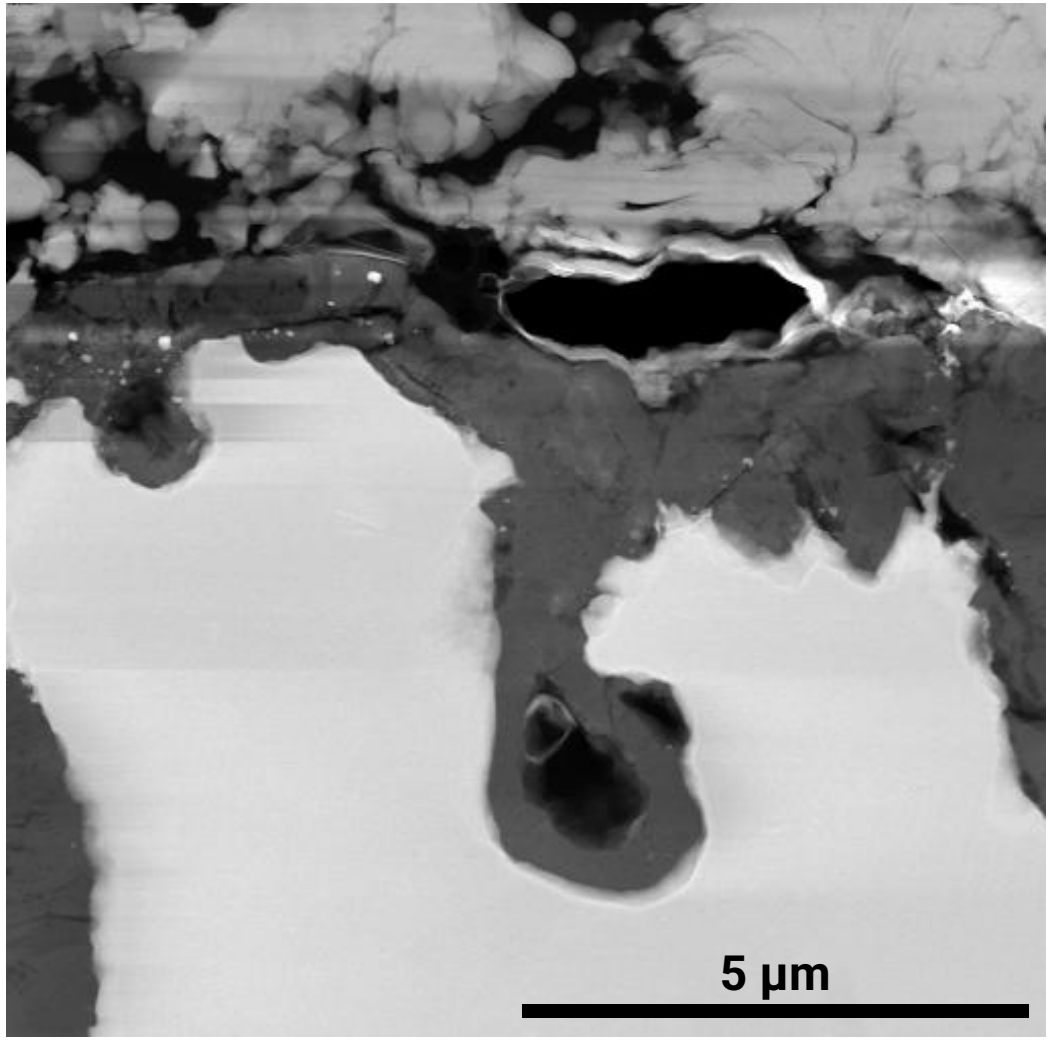


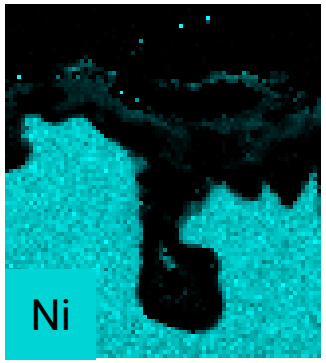
Pt Élevé ▸ Beaucoup d'oxydes

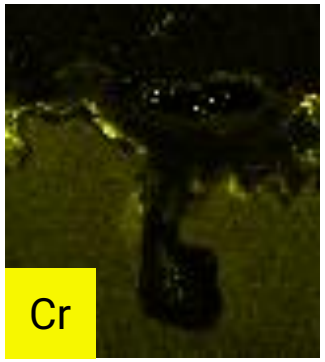


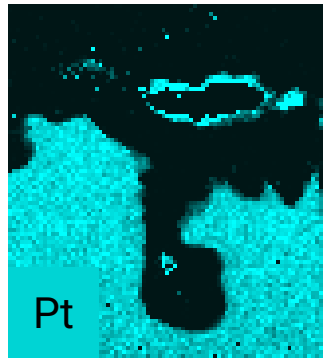
Analyse des oxydes

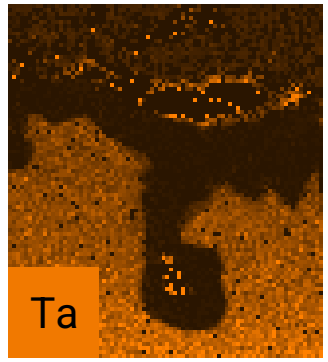
STEM par R. Swadźba @ *Lukasiewicz Research Network (Gliwice, Poland)*

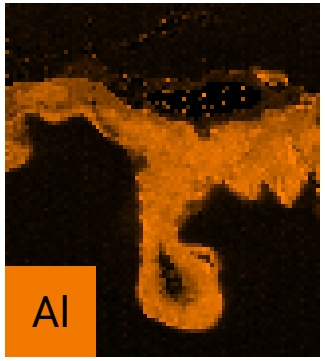


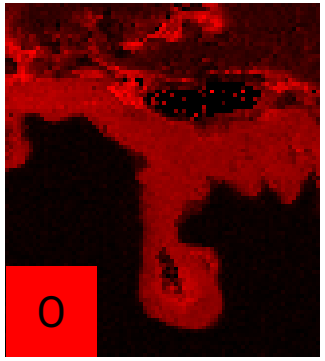




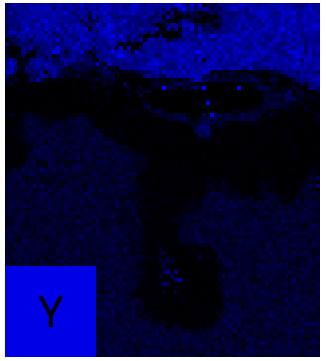












- Groupes d'oxydes discontinues
- Alumine Al_2O_3 habituelle
- Accru par la présence de platine

Conclusions

- Le LASAT a permis de tester l'adhérence de ces nouveaux systèmes
- Le traitement de pré-oxydation (2h sous air à 1100°C) de la sous-couche de diffusion Pt-ɣ/ɣ' améliore significativement l'adhérence de la barrière thermique SPS
- La présence de platine accelerant la diffusion de l'aluminium (et donc la formation du TGO), une quantité de platine importante dans la sous-couche augmente l'effet de la pré-oxidation sur l'adhérence
- Il reste à évaluer le cas d'un TGO continu et uniforme, et observer son effet sur l'adhérence de la barrière thermique

1 Contexte et motivations 2

2 LASAT 7

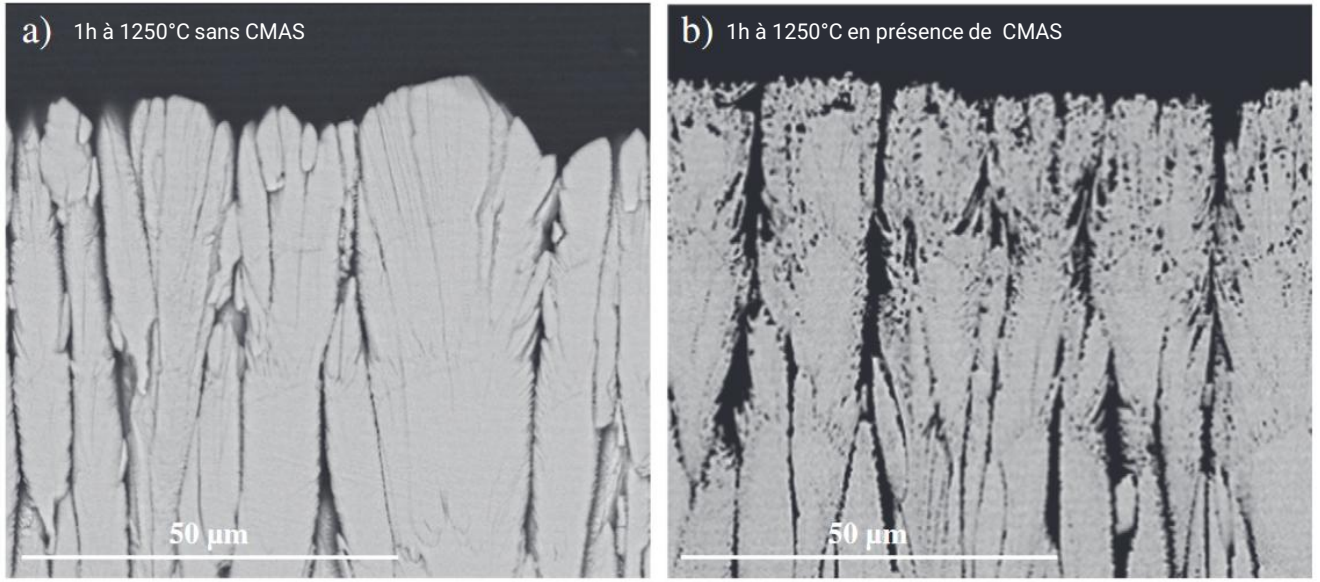
3 Système barrière thermique SPS + Pt-ɣ/ɣ’ 10

4 Effet de la pré-oxydation / du platine 12

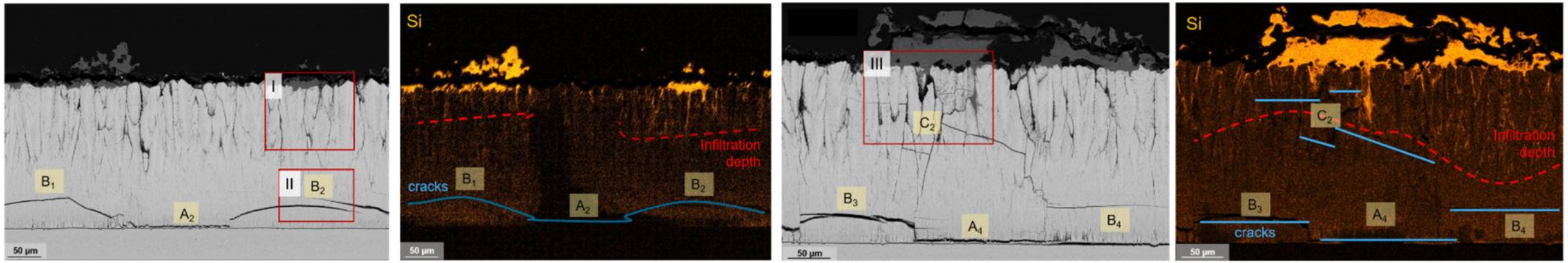
5 Effet du CMAS sur un système EB-PVD 19

Le CMAS et ses effets sur les barrières thermiques





Step-by-step investigation of degradation mechanisms induced by CMAS attack on YSZ materials for TBC applications, Pujol et al, Surface & Coatings Technology, 2013



Localization of embrittlement in CMAS-infiltrated thermal barrier coatings via laser shock experiments, C.Billard et al, 2025

Effet du CMAS sur un système EB-PVD

Étude menée avec le DLR



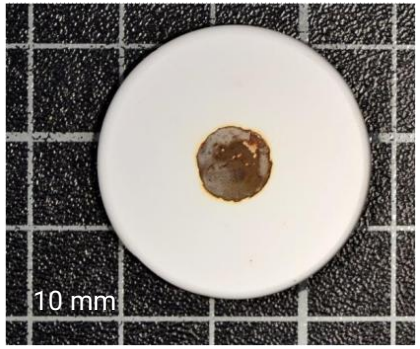


Image Optique

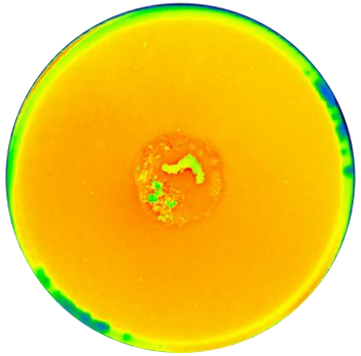
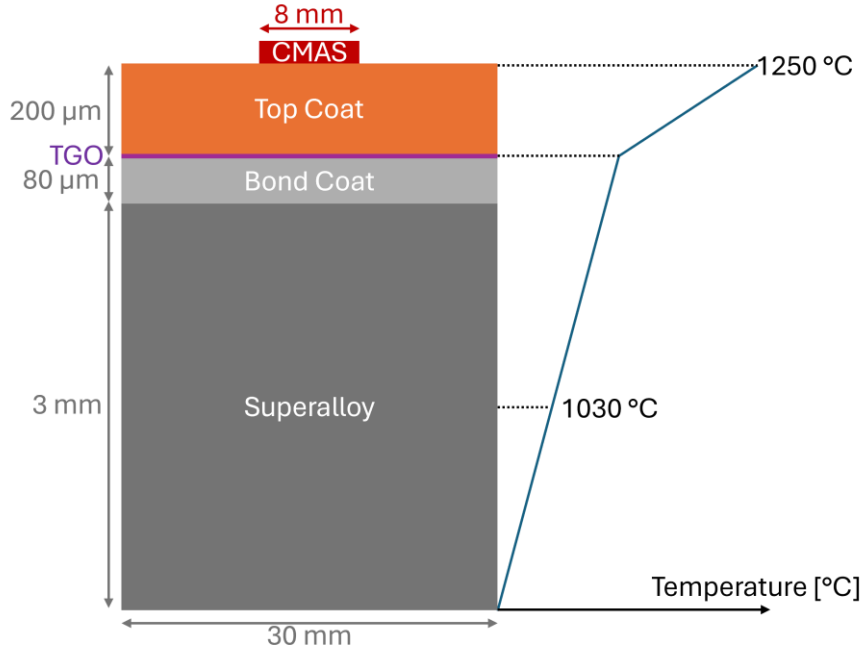
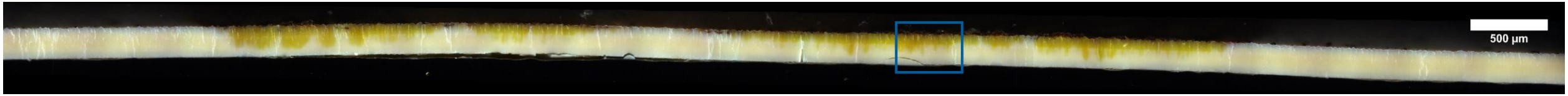
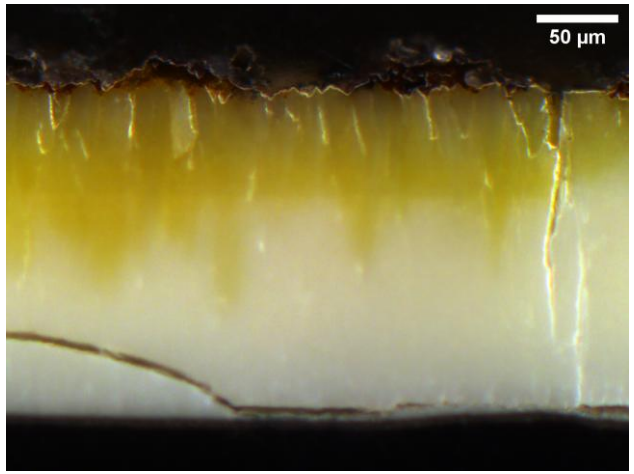


Image IR

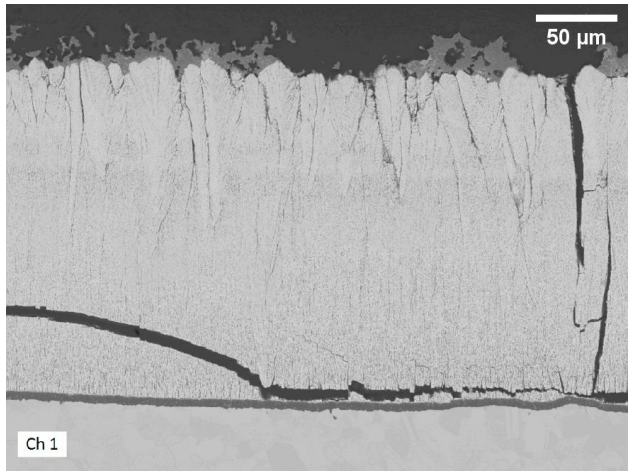


Caractérisation de l’infiltration partielle

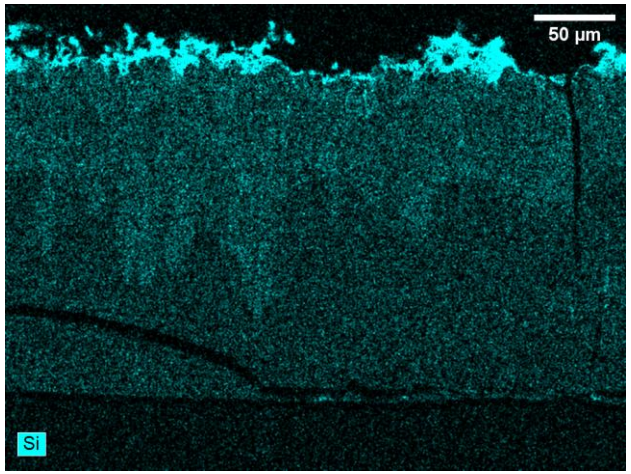




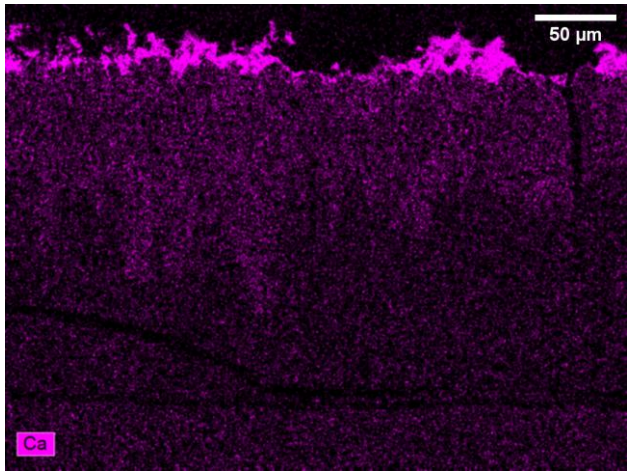
Microscopie optique – Champ sombre



MEB - BSE



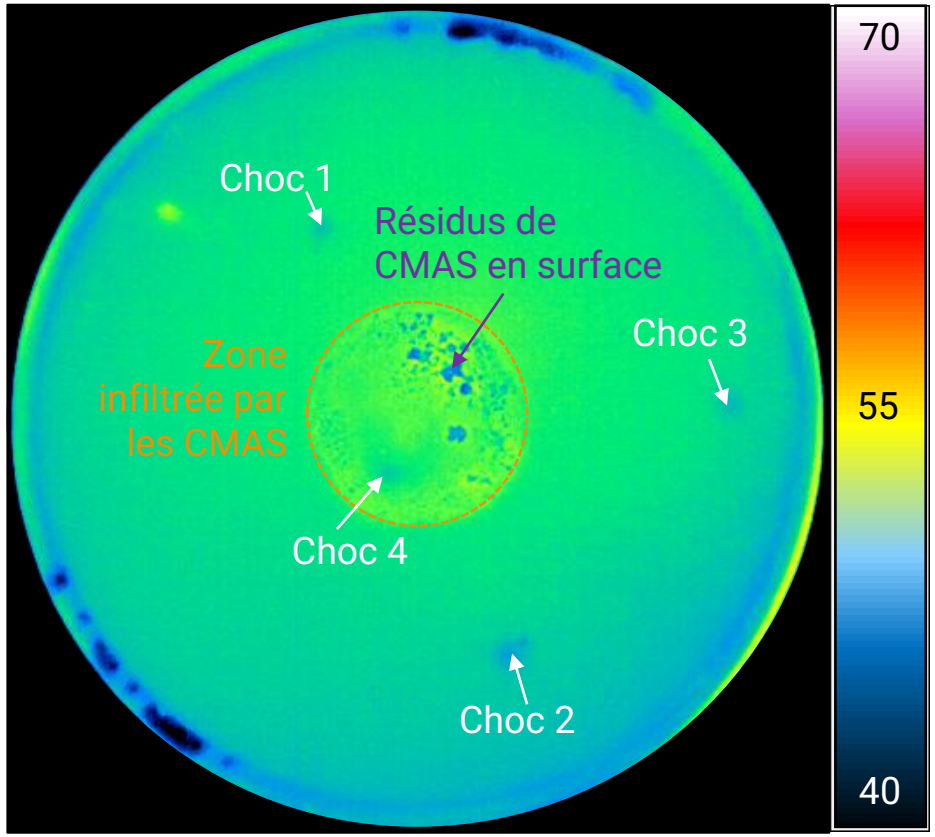
EDS – Si (Kα)



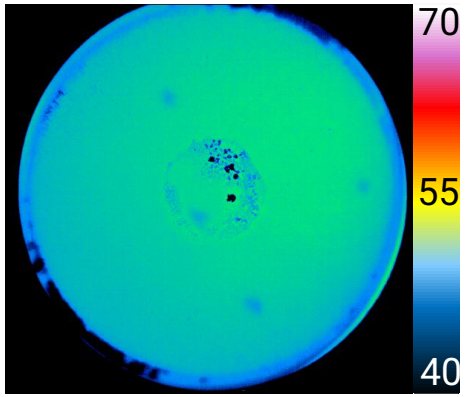
EDS – Ca (Kα)

Aperçu

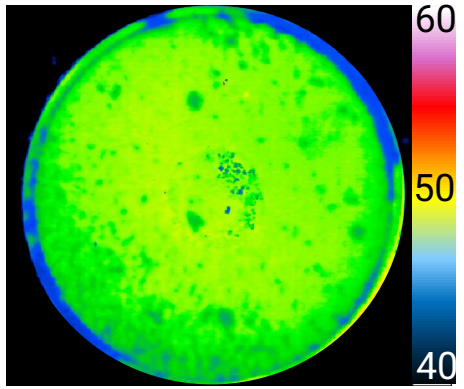
État initial



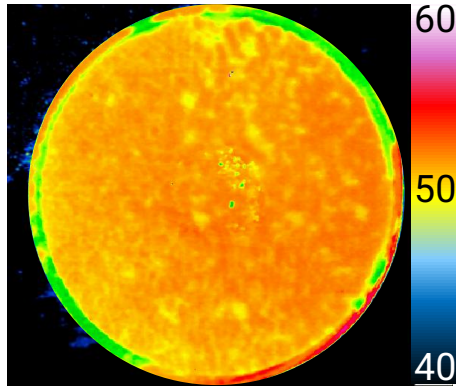
20 cycles



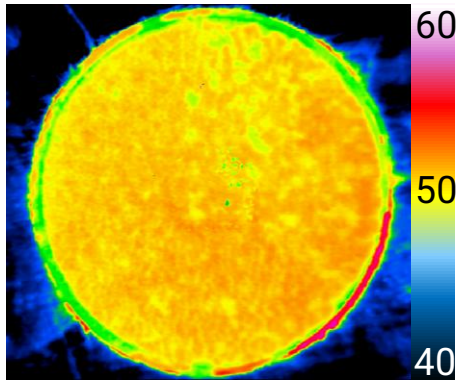
300 cycles



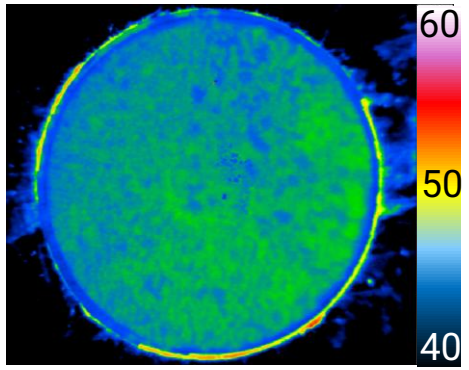
500 cycles



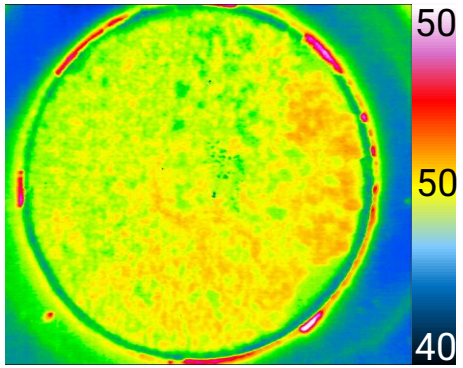
1000 cycles



1500 cycles

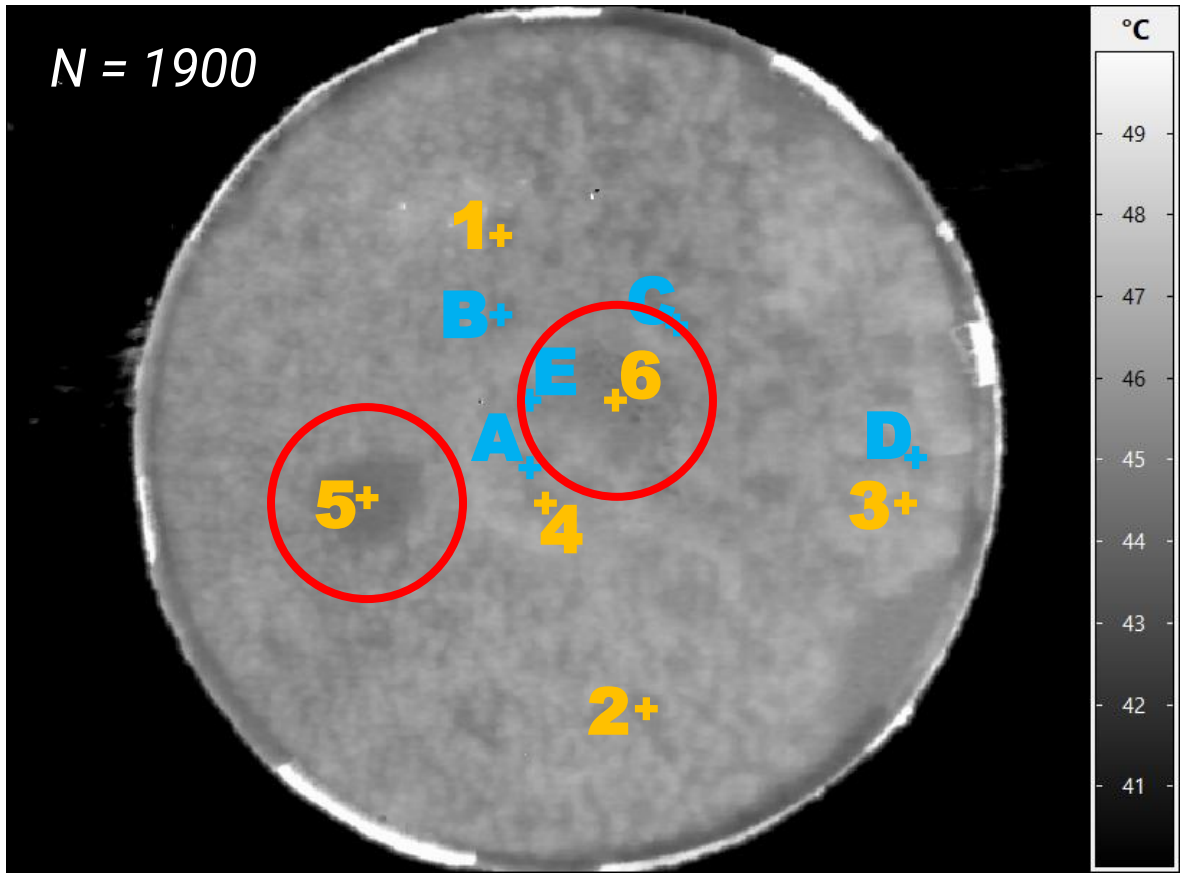


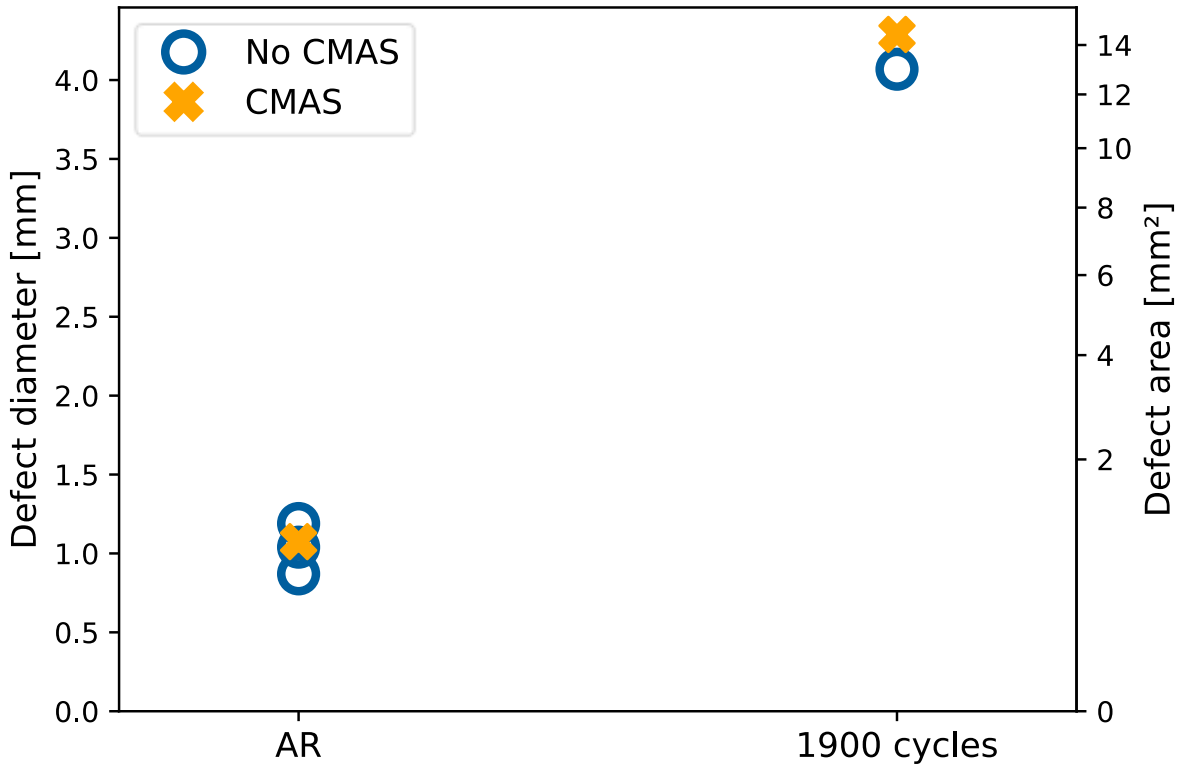
1900 cycles



Cycles courts : palier de 5 min @ 1100°C

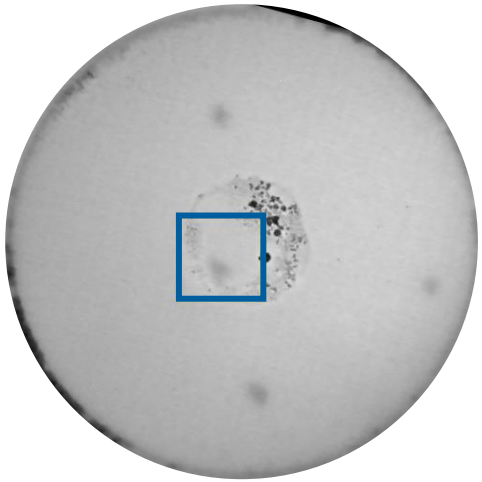
LASAT post-cyclage





Résultat : Diminution de l'adhérence au cours du cyclage thermique
Plus sévère dans la zone infiltrée

Initiation, propagation et coalescence

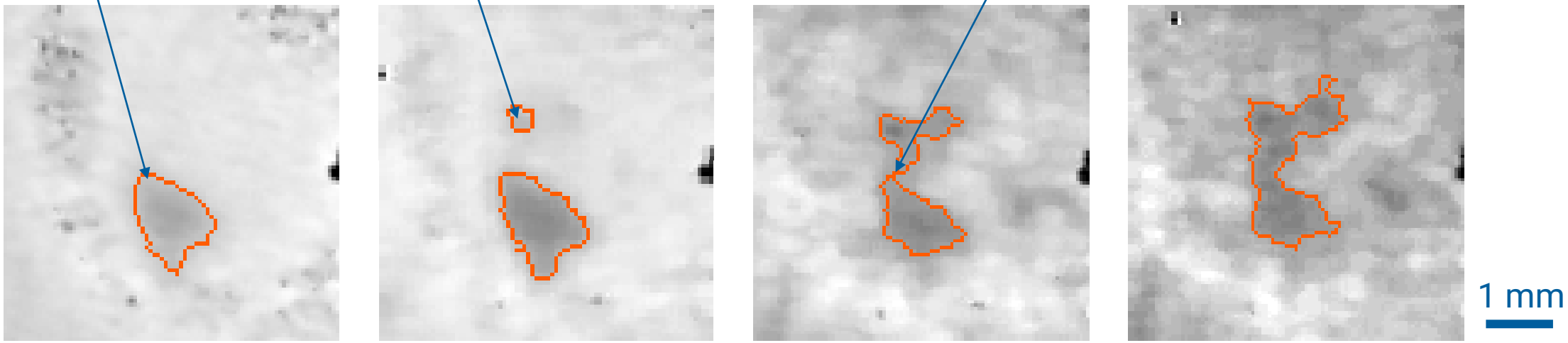


Defect introduced by LASAT (#4)

Natural defect initiation (#A)

Coalescence

Growth



1 mm

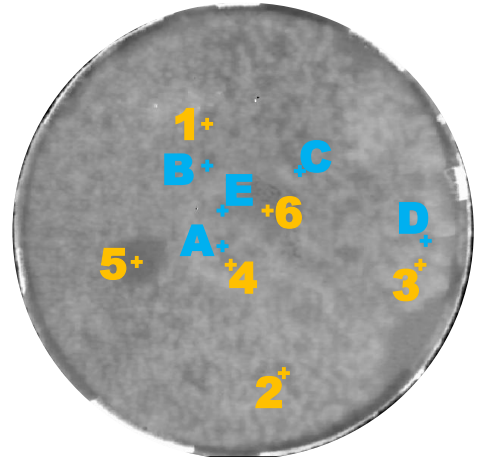
0 cycles

294 cycles

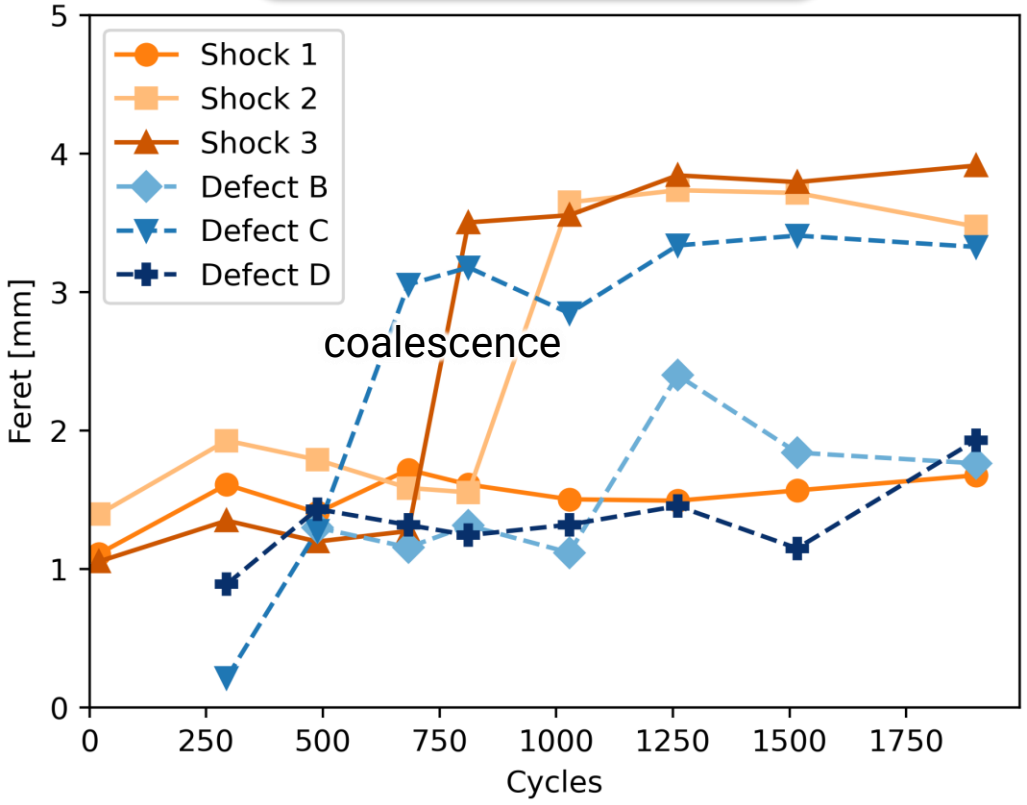
1028 cycles

1900 cycles

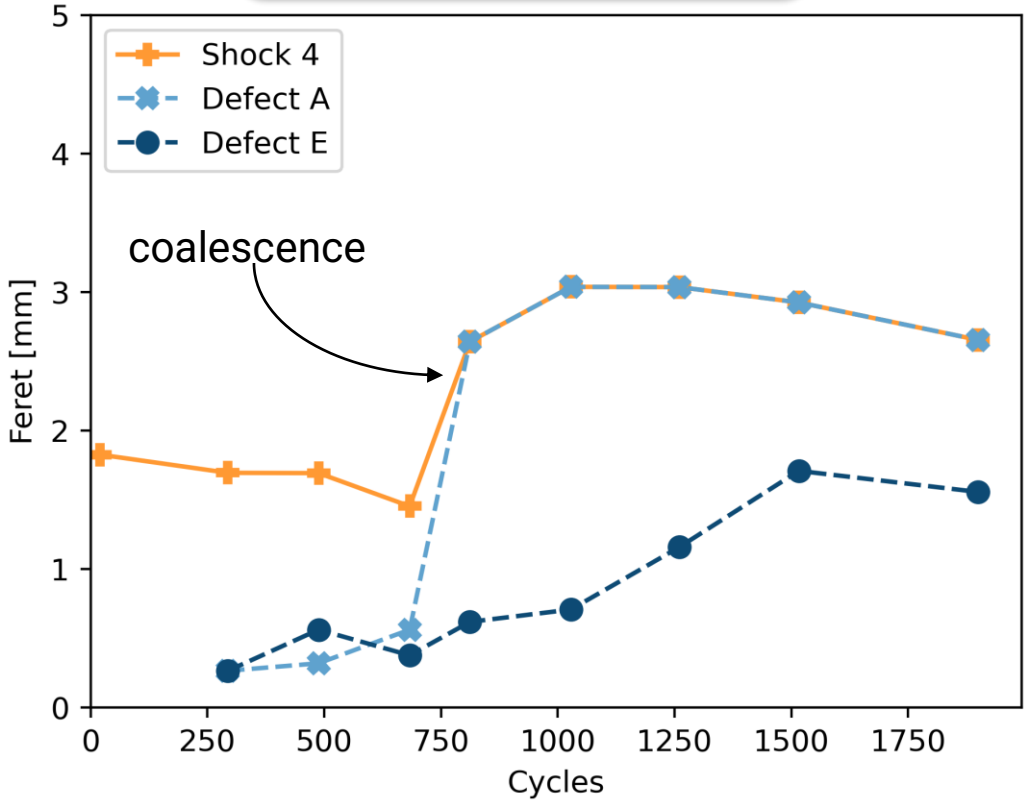
Évolution des défauts



Zones sans CMAS

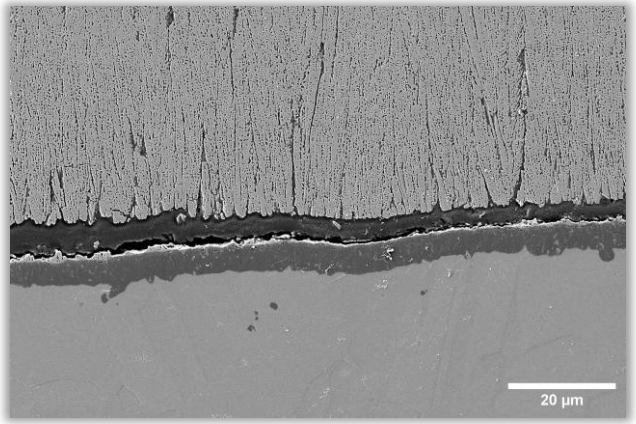


Zones avec CMAS

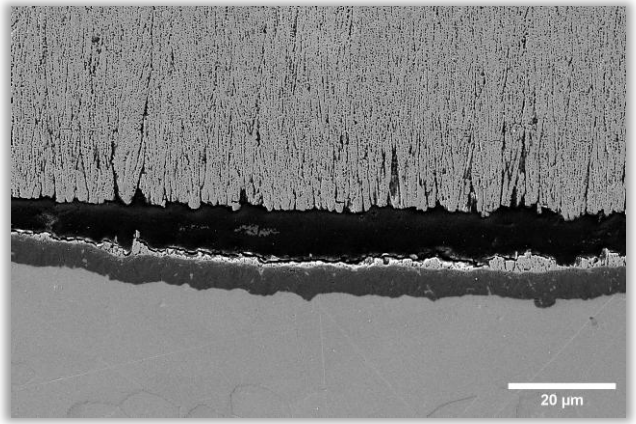


Position des fissures

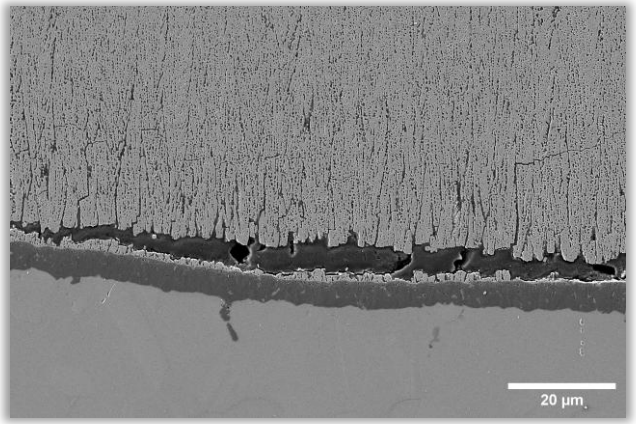
LASAT

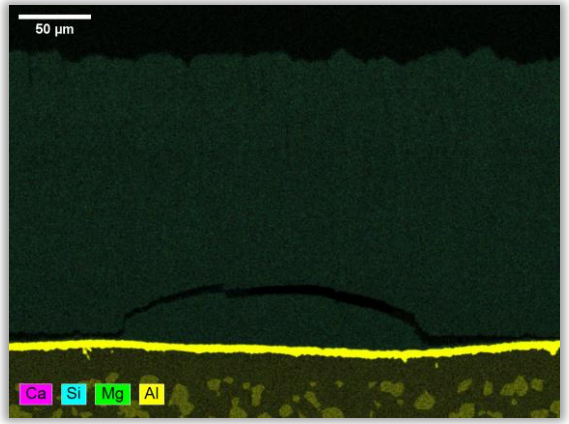


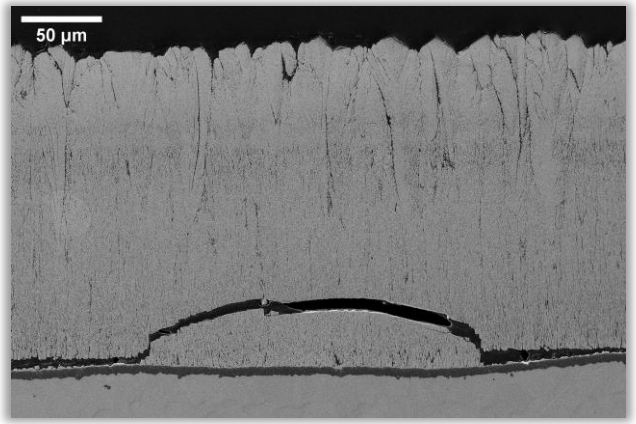
Zone sans CMAS



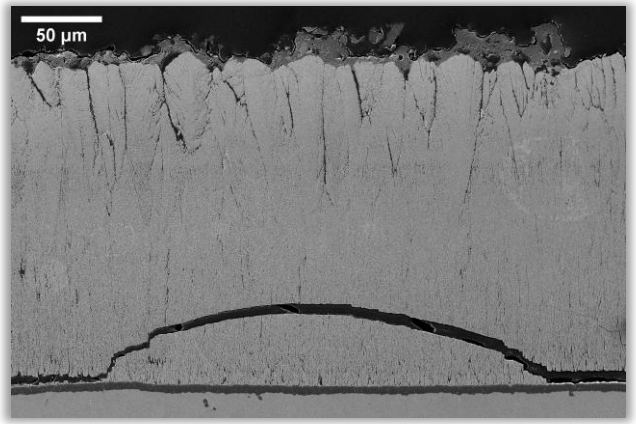
Zone avec CMAS



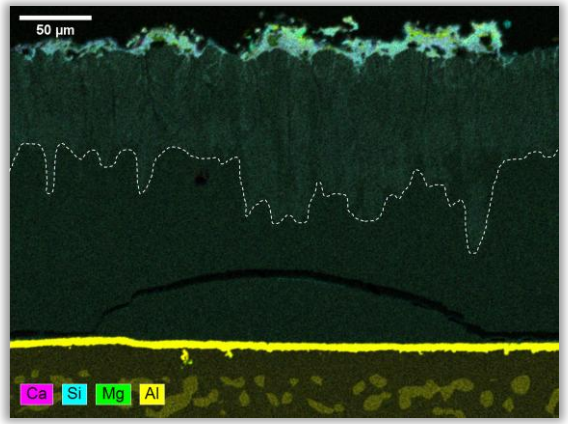




Zone sans CMAS



Zone avec CMAS



Conclusion

- La microscopie optique en champ sombre a permis de caractériser simplement l'infiltration par les CMAS
- Le LASAT à mis en évidence une diminution des propriétés de l'interfaces au cours du vieillissement
- La coalescence a été observée comme le principal mécanisme de propagation de l'endommagement
- Aucun effet majeur du CMAS n'a été mis en évidence sur les mecanismes observes ; les tailles, vitesses et modes d'endommagements sont comparables

Merci pour votre attention !

Des questions ?

eliott.degouilles@minesparis.psl.eu