



Rôle de la rugosité interfaciale dans l'endommagement des barrières thermiques

(revêtements protecteurs des superalliages utilisés dans l'aéronautique)

Martine Poulain (ONERA – Châtillon)



retour sur innovation

Les moteurs d'avion fonctionnent à très haute température.

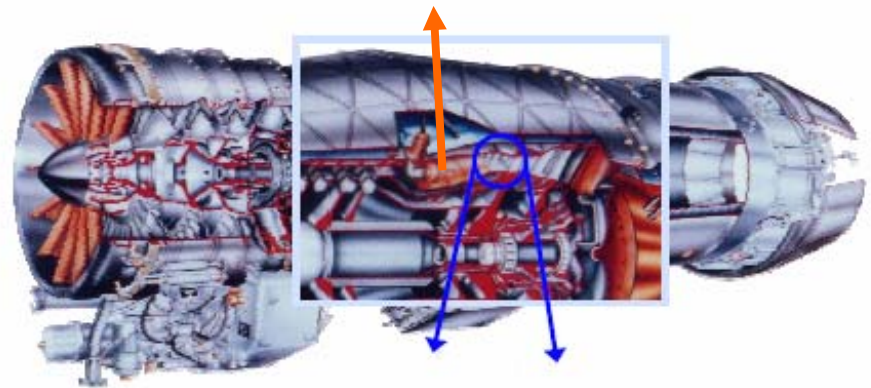


catapultage du Rafale
Marine

aubes de turbine
en superalliage
à base de nickel
T° fusion de l'ordre de 1300°C

⇒ **circulation d'air interne**
pour assurer le refroidissement

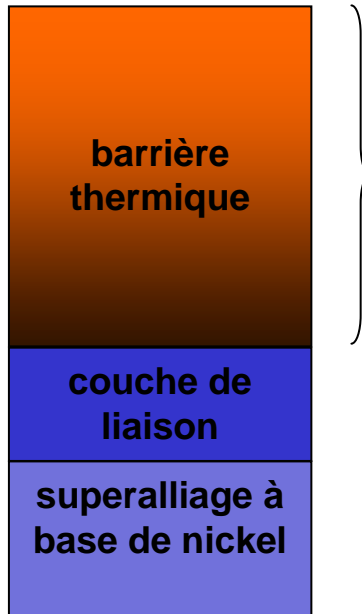
T° des gaz de combustion
~ 1600°C



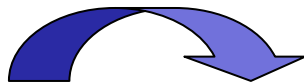
Dessin du moteur M88 et photographie d'aube,
courtoisie de Snecma

Les aubes sont protégées par un revêtement en céramique « barrière thermique ».

T° de surface
1250°C



T° du métal
1100°C



refroidissement interne

**revêtement céramique
de faible conductivité thermique**

150 μm \rightarrow gain de 150°C



- augmentation du rendement**
- prolongation de la durée de vie**

L'expertise d'aube de retour de vol révèle des écaillages de la protection thermique.



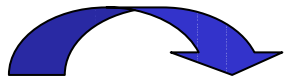
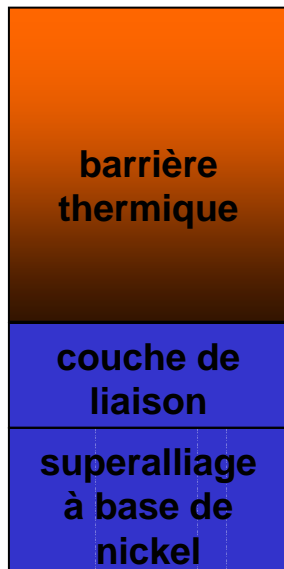
métal mis à nu
au contact direct des gaz chauds
(> 1200°C)



dégradation rapide de l'aube

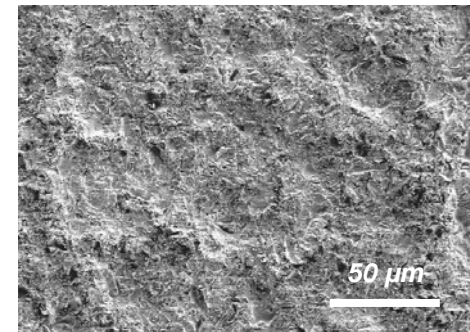
Comment faire adhérer la barrière thermique le plus longtemps possible sur l'aube de turbine ?

gaz chauds



refroidissement interne

- couche de liaison intercalée
pour accommoder la liaison entre le métal et la céramique, qui ont des propriétés différentes
- sablage de sa surface avant dépôt de la céramique
pour créer une rugosité favorisant l'accrochage de la barrière thermique

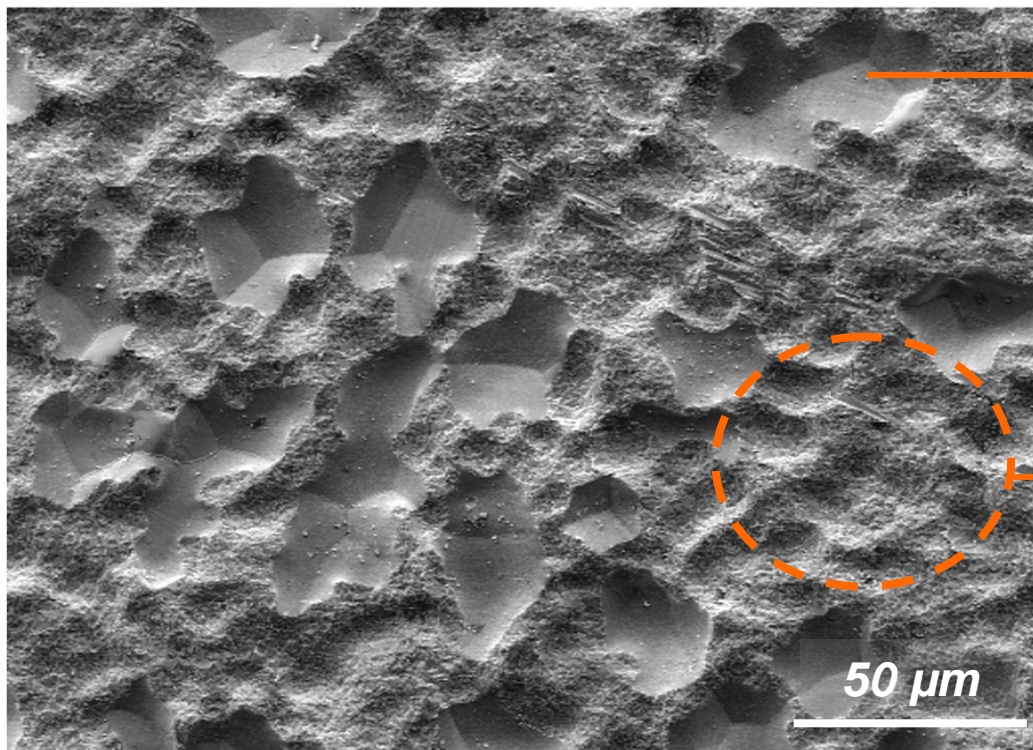


surface sablée

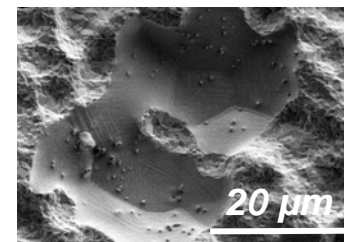
L'expertise d'aube montre que la surface métallique mise à nu est très accidentée.



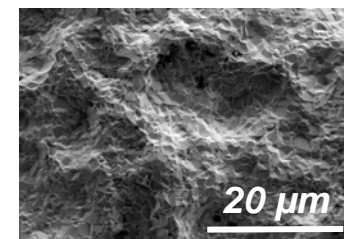
zone écaillée
(décollement local de la barrière thermique)



cavités

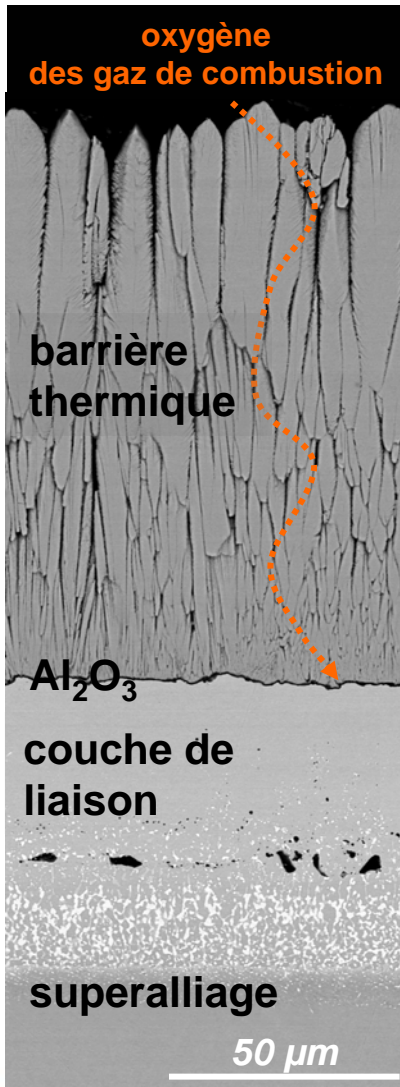


ondulations, rugosité



Quels sont les phénomènes qui fragilisent l'interface céramique/métal et qui conduisent à sa rupture ?

Comment évolue l'interface céramique / métal en service ?



La barrière thermique est perméable à l'oxygène.

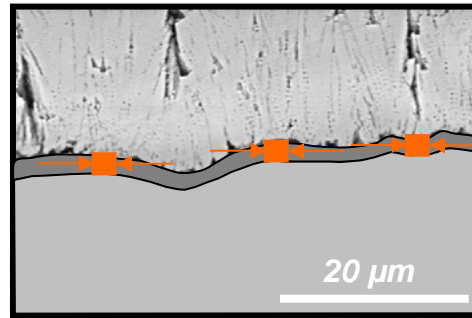
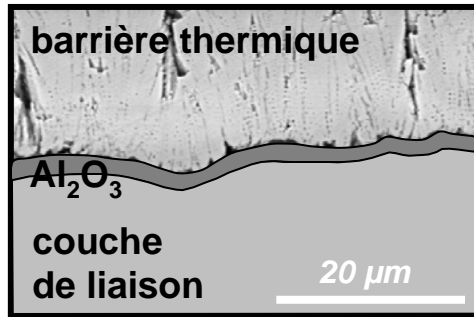


La couche de liaison s'oxyde.
(formation d'alumine)

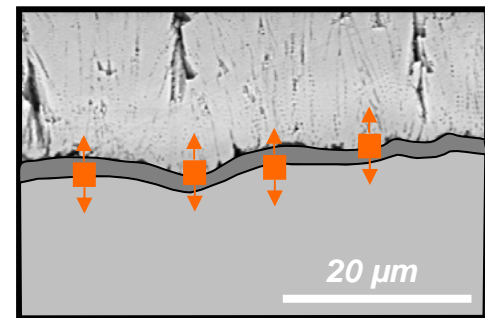
**La zone interfaciale
est fortement contrainte.**

(La couche d'oxyde croît, les différentes couches se dilatent différemment, la couche de liaison subit des transformations de phases...)

Comment s'endommage l'interface en service ?

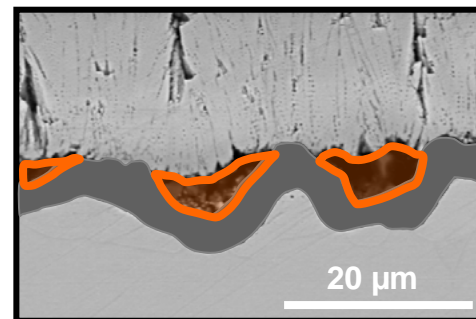
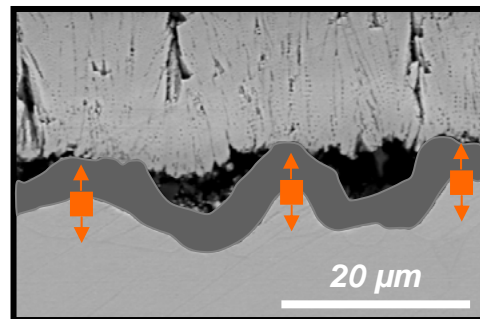


Contraintes de compression



Contraintes hors plan

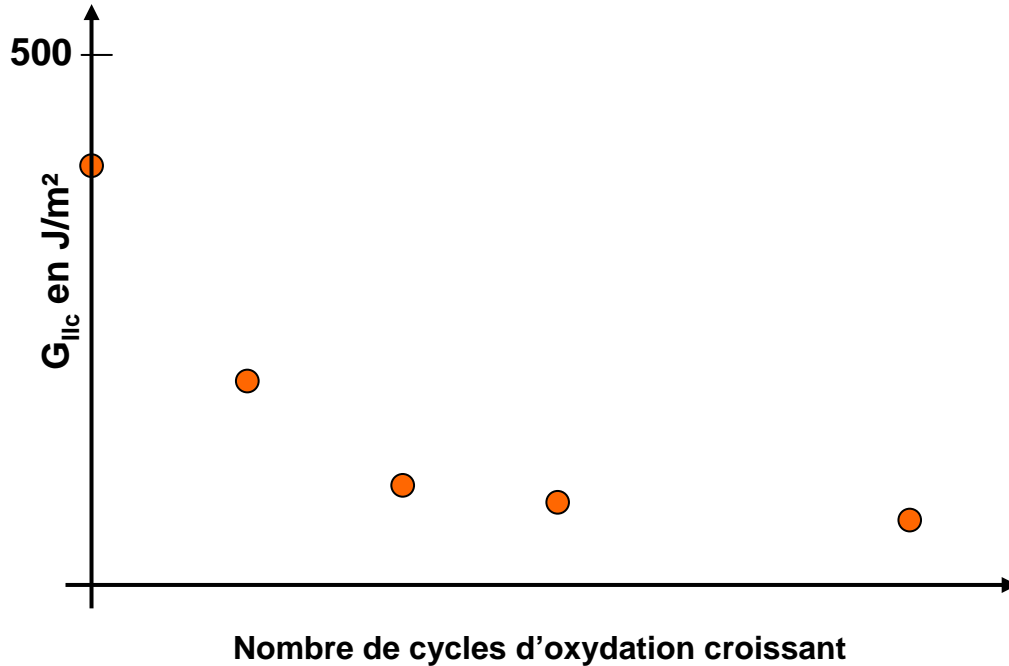
La couche de liaison se déforme superficiellement.
(fluage à haute température)



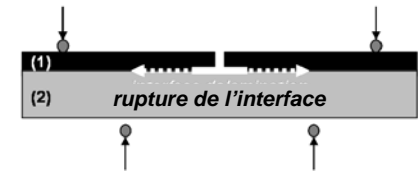
Des cavités apparaissent, des fissures s'amorcent et se propagent, conduisant à une rupture brutale de l'interface.

La perte d'adhérence des barrières thermiques peut être mesurée sur éprouvettes, avant l'écaillage spontané.

Énergie d'adhérence mesurée par flexion 4 points



Flexion 4 points



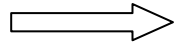
F provoquant le décollement de la barrière thermique

E d'adhérence

Comment caractériser l'évolution topographique de l'interface qui accompagne cette perte d'adhérence ?

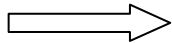
Choix du MEB pour caractériser la topographie de l'interface

Avant l'écaillage spontané, la barrière thermique encore en place empêche d'observer directement l'interface céramique/métal.



**Observation sur coupe polie
(profilométrie 2D)**

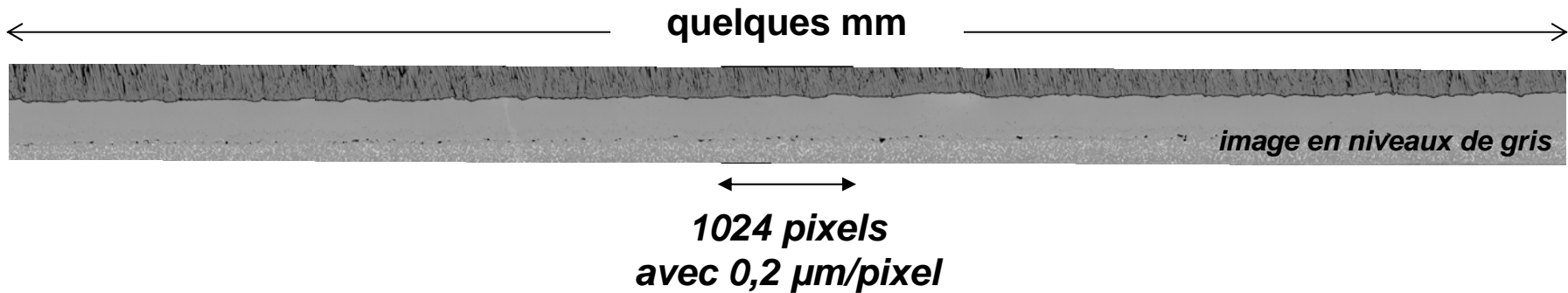
- profils à l'échelle mésoscopique (quelques mm de large)
- ondulations, rugosité à l'échelle microscopique



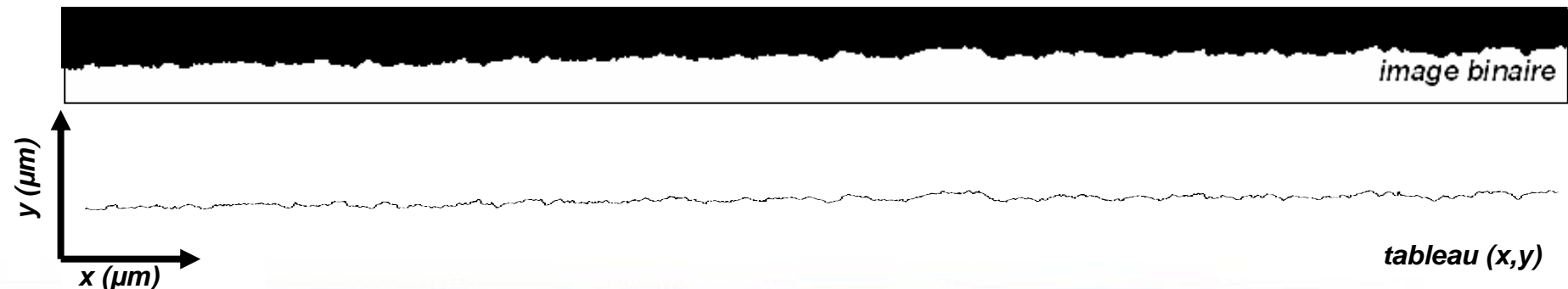
**Observation au MEB,
en mode d'électrons rétrodiffusés
pour bien repérer l'interface**

Protocole d'acquisition et de traitement des profils

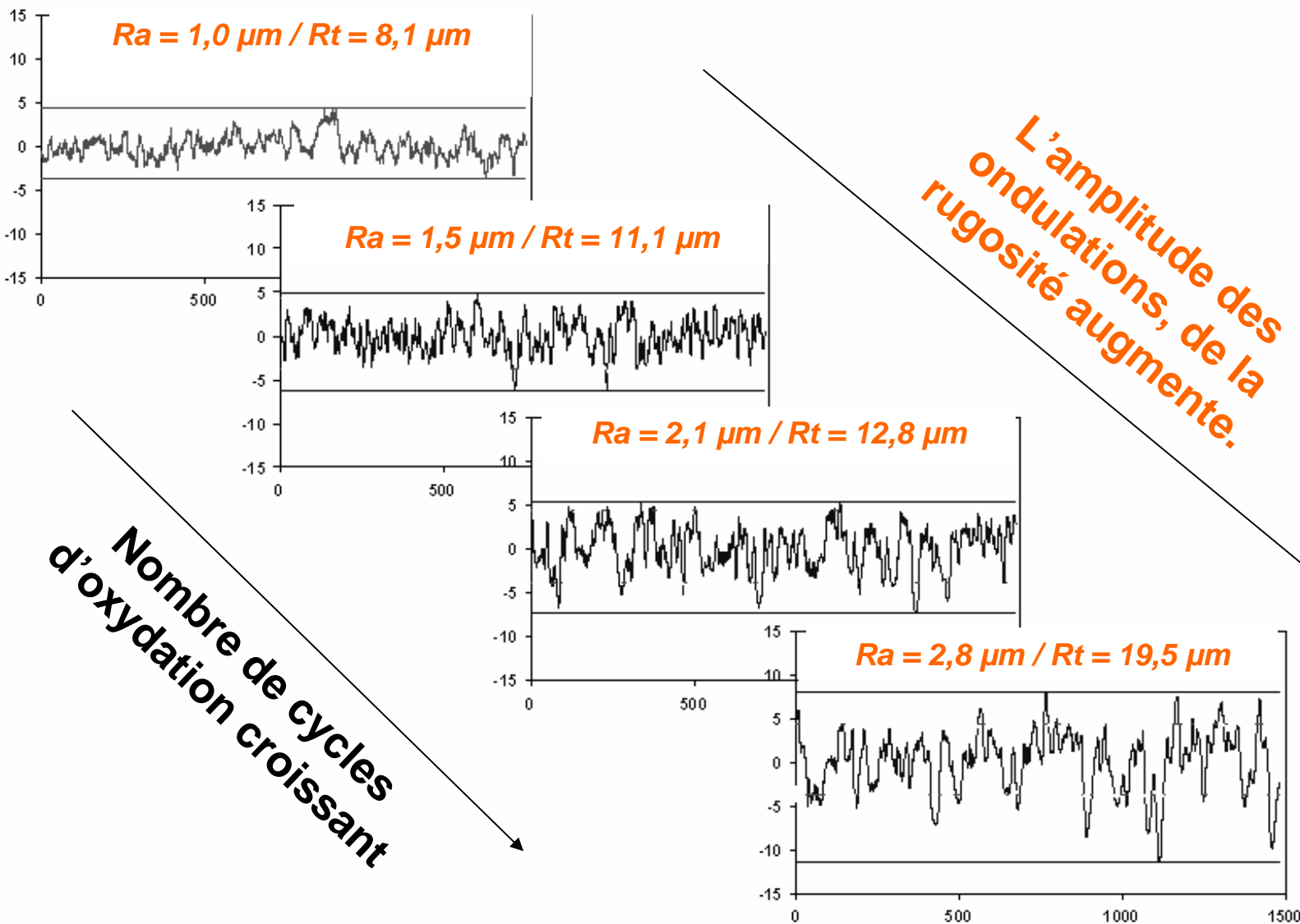
Acquisition d'images centrées sur l'interface,
avec recouvrement latéral (automatisée)
Ajustement préalable du contraste et de la brillance



Traitement d'images et extraction de contours



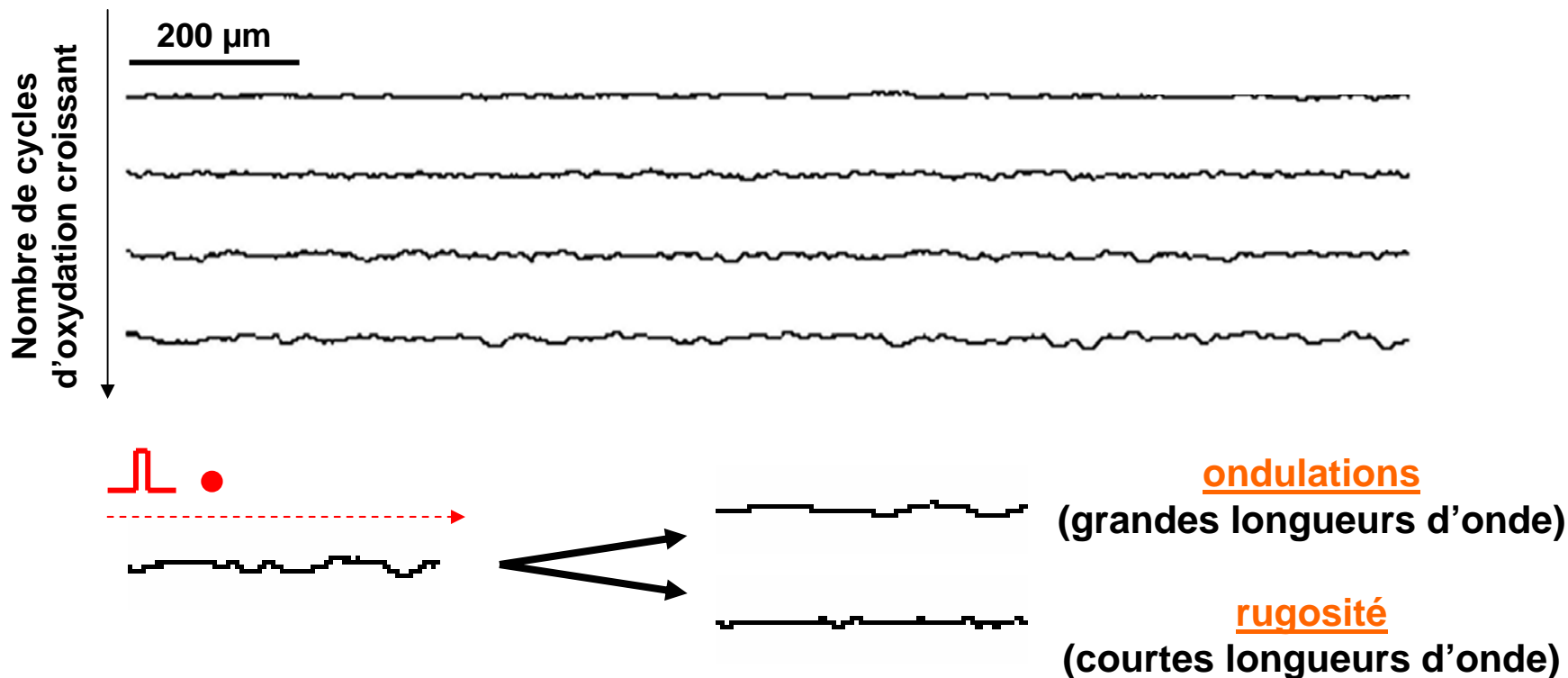
Mise en évidence de l'amplitude de la déformation de l'interface durant le cyclage thermique



L'amplitude des ondulations, de la rugosité augmente.

Nombre de cycles d'oxydation croissant

Comment séparer les différentes contributions de la topographie de l'interface ?

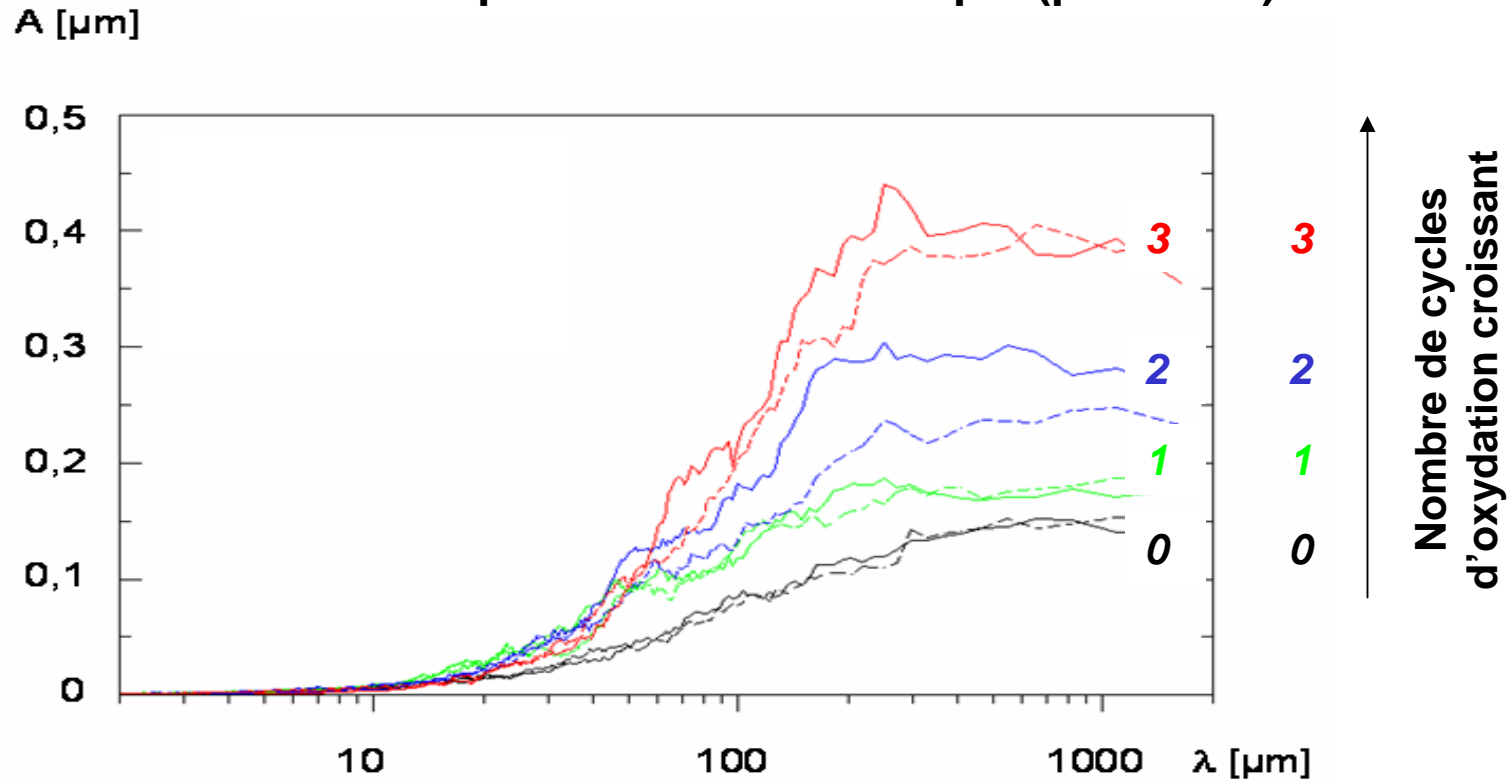


Comment ajuster le largeur du filtre (moyenne glissante) ou le diamètre du disque tournant ?

Analyse fréquentielle des profils par transformée de Fourier

spectres de Fourier calculés à partir de profils

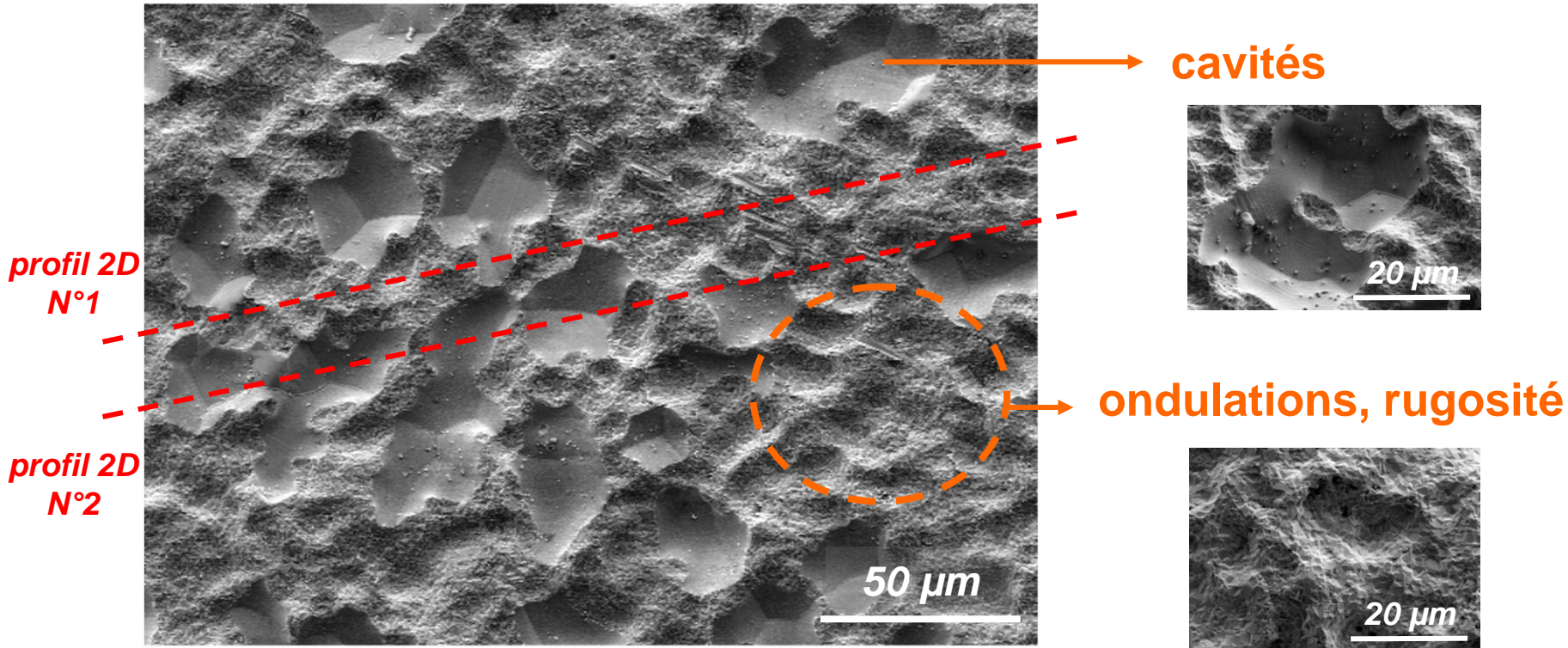
- obtenus par MEB (traits pleins)
- avec un profilomètre mécanique (pointillés)



Aucune longueur caractéristique n'est clairement identifiée.

Influence des aspects tridimensionnels ?

zone écaillée
(décollement local de la barrière thermique)



Représentativité des profils 2D ?

Pour une expertise approfondie des systèmes barrières thermiques... L'objectif étant d'accroître leur robustesse.

barrière
thermique

couche de
liaison

superalliage
à base de
nickel

Identifier et quantifier les modifications microstructurales liées au vieillissement de ces systèmes multicouches

- changements de phase dans la couche de liaison
- épaissement de la couche d'alumine interfaciale
- frittage de la couche céramique, infiltration par des CMAS

Etudier les propriétés mécaniques des différentes couches

- microindentation instrumentée à chaud
- essais de flexion in situ

⇒ **MEB + EDXS**