

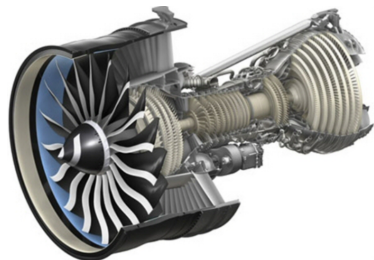
## Mastère DMS

# Identification de lois de comportement en plasticité cristalline à l'aide de méthodes de caractérisation locale avancées

**Kenza ZOUAGH**

**Encadrants industriels** : Stéphane GOURDIN, Florent COUDON

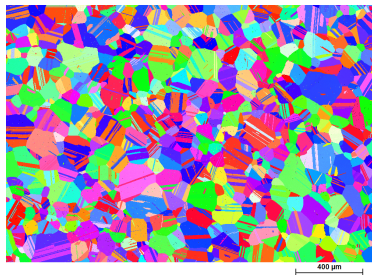
**Encadrants académiques** : Henry PROUDHON, Clément RIBART



Turbine [Duval, 2017]



Fixations [Duval, 2017]



Microstructure René 65 (proche AD730) [Safran]

- Méthodes de caractérisation classiques :

- Traction
- Compression
- ...

- Limites :

- Précision des modèles macroscopiques
- Loi de comportement en plasticité cristalline difficile à identifier avec des essais macroscopiques



Machine de traction/compression [Prodidac]



Méthodes de caractérisation locale

- Méthodes de caractérisation classiques :

- Traction
- Compression
- ...

- Limites :

- Précision des modèles macroscopiques
- Loi de comportement en plasticité cristalline difficile à identifier avec des essais macroscopiques



Machine de traction/compression [Prodidac]



Méthodes de caractérisation locale

- Méthodes de caractérisation classiques :

- Traction
- Compression
- ...

- Limites :

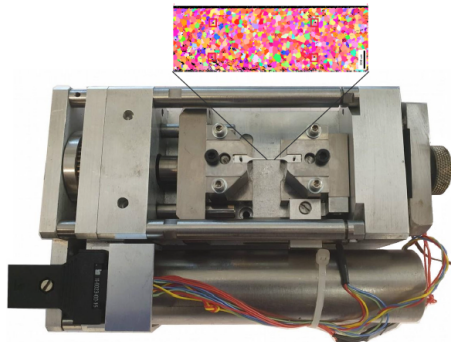
- Précision des modèles macroscopiques
- Loi de comportement en plasticité cristalline difficile à identifier avec des essais macroscopiques



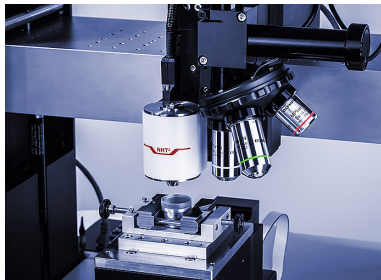
Machine de traction/compression [Prodidac]



Méthodes de caractérisation locale



Traction in situ sous MEB au Centre  
des Matériaux



Nano-indentation instrumentée  
à SafranTech

Matériaux : T40 (modèle), AD730 (base Nickel avec des macles)

# Plan

- 1 Méthodes de caractérisation locale
- 2 Plan de travail pour le second semestre
- 3 Premiers résultats

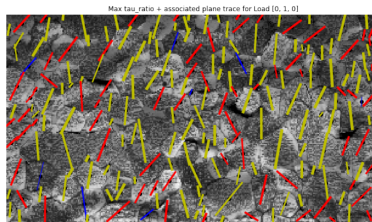
# Plan

- 1 Méthodes de caractérisation locale
- 2 Plan de travail pour le second semestre
- 3 Premiers résultats



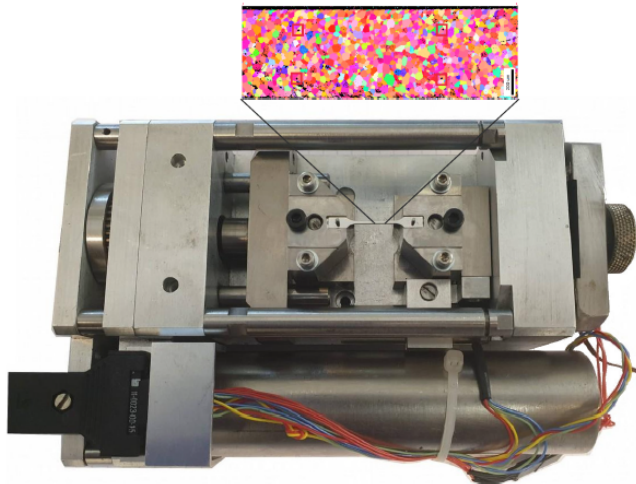


Figure de pole inverse du T40 [travaux C. RIBART au CDM].

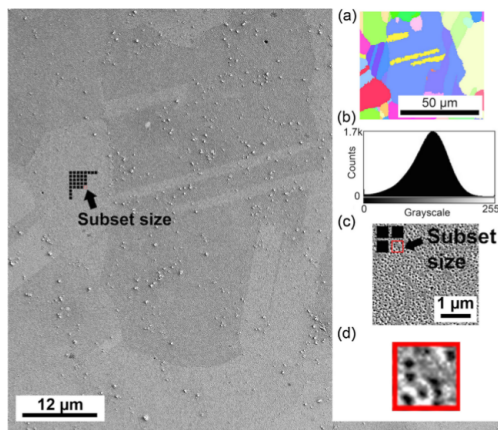


Prédiction des systèmes de glissement activés par la plasticité.

- **Loi de Schmid** :  $\tau = \sigma m_s$ , avec  $m_s = \cos \chi \cos \theta$  le facteur de Schmid ;
- **CRSS** : cission critique résolue =  $\tau_c$  ; si  $\tau \geq \tau_c$  : glissement ;
- **Critère** :  $\max\left(\frac{\tau}{CRSS}\right)$ .

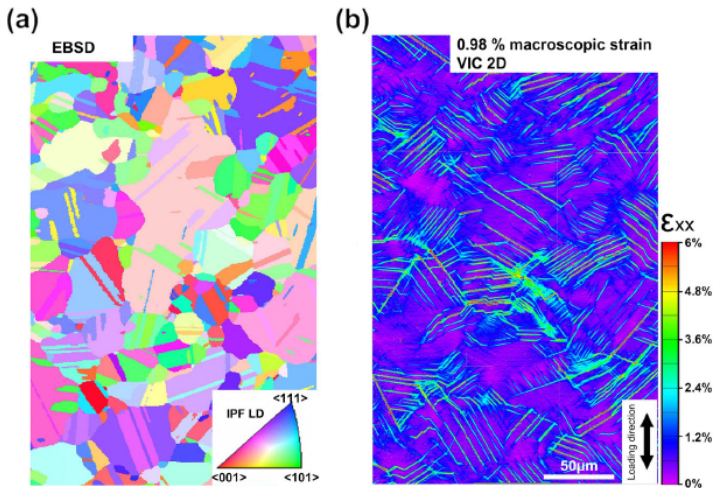


Machine de traction *in situ* pour les essais au Centre des Matériaux.



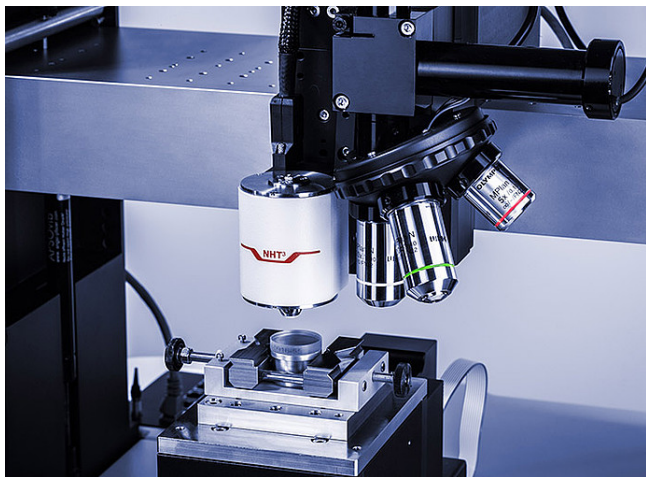
Micrographe MEB d'une région d'intérêt d'une expérience DIC. [Stinville et al., 2016].

- Polissage silice colloïdale 12h + revenu 350°C plusieurs minutes.
- Autre type de mouchetis : synthèse de nanoparticules d'or [Kammers and Daly, 2013].

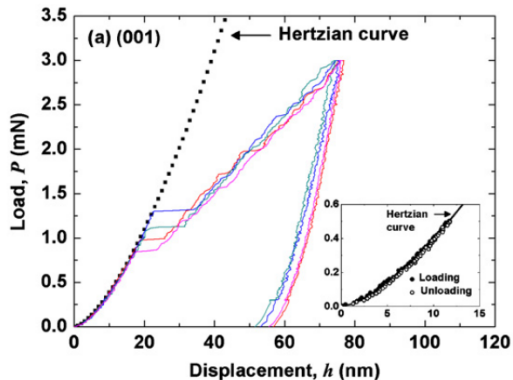


Champ de déformation  $\epsilon_{xx}$  calculé par DIC après 0.98% de déformation après un essai de traction et cartographie EBSD associée. [Stinville et al., 2016].

- Autres travaux [Kammers and Daly, 2013].



Nanoindenteur NHT<sup>3</sup> de la marque Anton Paar utilisé à Safran.



Chargement  $P$  en mN en fonction du déplacement  $h$  en nm appliqué sur un grain d'orientation (001) d'un acier TWIP Fe-18Mn-0.6C-1.5Al à l'aide d'un indenteur sphérique de rayon  $3.3 \mu\text{m}$ . La courbe Hertzienne dans la miniature en bas à droite est la région de déformation élastique [Kang et al., 2011].

- Relation entre  $P$  et  $h$  :

$$P = \frac{4}{3} E_r \sqrt{R} h^3 \quad (1)$$

- *Plain-strain modulus* :

$$\frac{E_s}{1 - \nu_s^2} = \left( \frac{1}{E_r} - \frac{1 - \nu_i^2}{E_i} \right)^{-1} \quad (2)$$

- Pour un grain de direction  $[hkl]$  parallèle à l'axe de chargement :

$$\frac{1}{E_{hkl}} = S_{11} + (2S_{12} - 2S_{11} + S_{44}) A_{hkl} \quad (3)$$

- Facteur d'anisotropie :

$$A_{hkl} = \frac{h^2 k^2 + k^2 l^2 + h^2 l^2}{h^2 + k^2 + l^2} \quad (4)$$

- Contrainte de cisaillement maximale au début de l'excursion :

$$\tau_{max} = 0.31 \left( \frac{6E_r^2}{\pi^3 R^2} \right)^{1/3} \quad (5)$$



Indents au milieu de chaque grain



Plusieurs indents dans un même grain

- $n > 100$  ;
- Programmer la machine ;
- Etude statistique.



# Plan

- 1 Méthodes de caractérisation locale
- 2 Plan de travail pour le second semestre
- 3 Premiers résultats

- Polissage mécanique/électrolytique ;
- Cartographie EBSD ;
- Essais mécaniques :
  - Essais de traction *in situ* sous MEB au CDM (prévus fin mai 2021) ;
  - Essais de nanoindentation à Safran Tech (en cours, 1 fois/semaine).
- Post-traitement :
  - Analyse de l'activité plastique ;
  - Détermination des constantes élastiques.
- Simulation :
  - Maillage de la grain map 2D ;
  - Bibliographie paramètres loi de comportement ;
  - Simulation FEM 2D avec 1ère loi de comportement.

- Polissage mécanique/électrolytique ;
- Cartographie EBSD ;
- Essais mécaniques :
  - Essais de traction *in situ* sous MEB au CDM (prévus fin mai 2021) ;
  - Essais de nanoindentation à Safran Tech (en cours, 1 fois/semaine).
- Post-traitement :
  - Analyse de l'activité plastique ;
  - Détermination des constantes élastiques.
- Simulation :
  - Maillage de la grain map 2D ;
  - Bibliographie paramètres loi de comportement ;
  - Simulation FEM 2D avec 1ère loi de comportement.

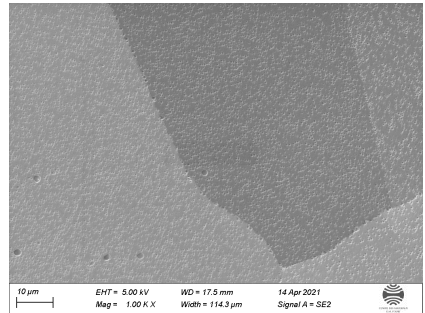
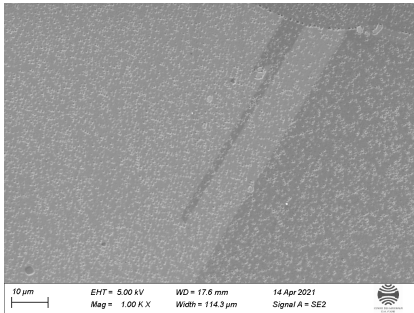
- Polissage mécanique/électrolytique ;
- Cartographie EBSD ;
- Essais mécaniques :
  - Essais de traction *in situ* sous MEB au CDM (prévus fin mai 2021) ;
  - Essais de nanoindentation à Safran Tech (en cours, 1 fois/semaine).
- Post-traitement :
  - Analyse de l'activité plastique ;
  - Détermination des constantes élastiques.
- Simulation :
  - Maillage de la grain map 2D ;
  - Bibliographie paramètres loi de comportement ;
  - Simulation FEM 2D avec 1ère loi de comportement.

- Polissage mécanique/électrolytique ;
- Cartographie EBSD ;
- Essais mécaniques :
  - Essais de traction *in situ* sous MEB au CDM (prévus fin mai 2021) ;
  - Essais de nanoindentation à Safran Tech (en cours, 1 fois/semaine).
- Post-traitement :
  - Analyse de l'activité plastique ;
  - Détermination des constantes élastiques.
- Simulation :
  - Maillage de la grain map 2D ;
  - Bibliographie paramètres loi de comportement ;
  - Simulation FEM 2D avec 1ère loi de comportement.

- Polissage mécanique/électrolytique ;
- Cartographie EBSD ;
- Essais mécaniques :
  - Essais de traction *in situ* sous MEB au CDM (prévus fin mai 2021) ;
  - Essais de nanoindentation à Safran Tech (en cours, 1 fois/semaine).
- Post-traitement :
  - Analyse de l'activité plastique ;
  - Détermination des constantes élastiques.
- Simulation :
  - Maillage de la grain map 2D ;
  - Bibliographie paramètres loi de comportement ;
  - Simulation FEM 2D avec 1ère loi de comportement.

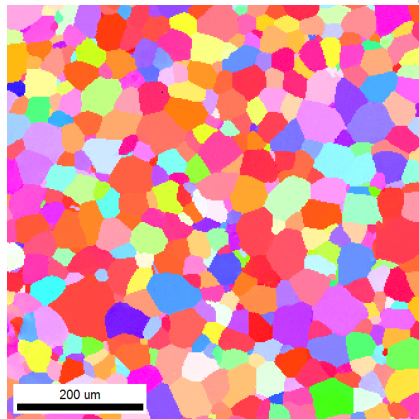
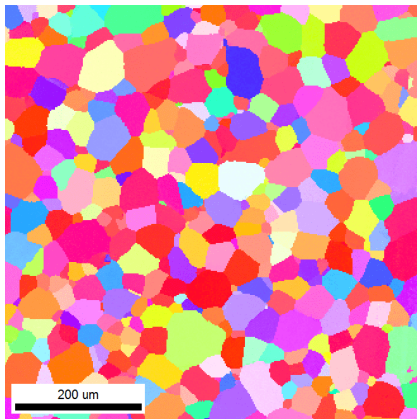
# Plan

- 1 Méthodes de caractérisation locale
- 2 Plan de travail pour le second semestre
- 3 Premiers résultats**

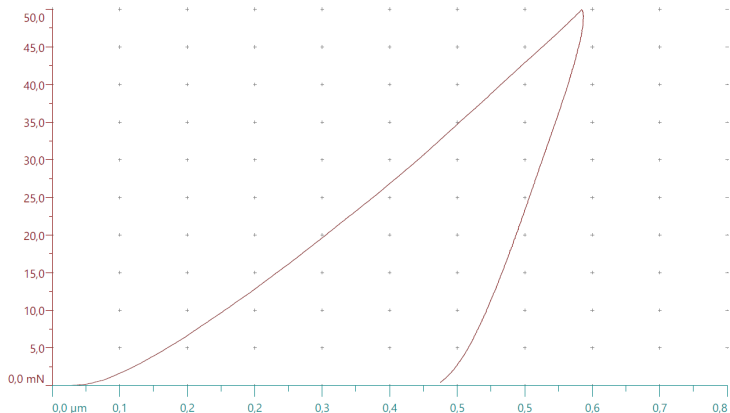


Mouchetis AD730 avec seulement OPS  $\approx$  19h.





Cartographies EBSD des chutes CT12\_1\_ (à gauche) et CT12\_2\_ (à droite).



Courbe d'indentation issue d'un essai effectué avec le nanoindenteur NHT<sup>3</sup>.



---

**MERCI DE VOTRE ATTENTION**



Duval, A. &. (2017).  
*New Ni-based Superalloy for High Temperature Applications.*



Kammers, A. and Daly, S. (2013).  
Self-assembled nanoparticle surface patterning for improved digital image correlation in a scanning electron microscope.  
*Experimental Mechanics*, 53.



Kang, S., Jung, Y.-S., Yoo, B.-G., Jang, J.-i., and Lee, Y.-K. (2011).  
Orientation-dependent indentation modulus and yielding in a high Mn twinning-induced plasticity steel.  
*Materials Science and Engineering A-structural Materials Properties Microstructure and Processing - MATER SCI ENG A-STRUCT MATER*, 532.



Stinville, J.-C., Echlin, M., Texier, D., Bridier, F., Bocher, P., and Pollock, T. M. (2016).  
Sub-grain scale digital image correlation by electron microscopy for polycrystalline materials during elastic and plastic deformation.  
*Experimental Mechanics*, 56 :197–216.