

Mastère DMS

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

Kenza ZOUGAGH

Encadrants industriels : Stéphane GOURDIN, Florent COUDON

Encadrants académiques : Henry PROUDHON, Clément RIBART

Plan

- 1 Nanoindentation instrumentée
- 2 Simulation numérique
- 3 Essais in situ
- 4 Actions

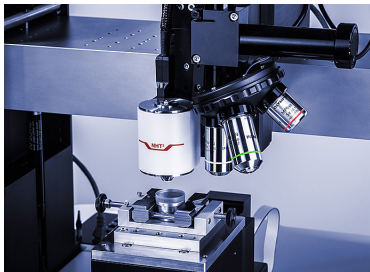
Plan

1 Nanoindentation instrumentée

2 Simulation numérique

3 Essais in situ

4 Actions



Nanoindenteur NHT³ de la marque Anton Paar utilisé à Safran.



Indents au milieu de chaque grain

- Sélection de grains d'orientations cristallographiques différentes ;
- Plusieurs indentations par grain pour répétabilité ;
- Détermination de E_{hkl} et des C_{ij} .



Comportement lors de la décharge décrit par une loi de type puissance :

$$F = B_{OP}(h - h_r)^{m_{OP}} \quad (1)$$

avec F la charge instantanée, h la profondeur d'indentation, h_r la profondeur résiduelle d'indentation, B_{OP} et m les paramètres de fit entre 40% et 98% de la courbe de décharge.

La raideur S est obtenue en dérivant F et en l'évaluant en h_m :

$$S = \left(\frac{dF}{dh} \right)_{h=h_m} = m_{OP} B_{OP} (h_m - h_r)^{m_{OP}-1} \quad (2)$$

Calcul de l'aire de contact :

$$A = \pi a^2 = 2\pi R h_c \quad (3)$$

Et h_c :

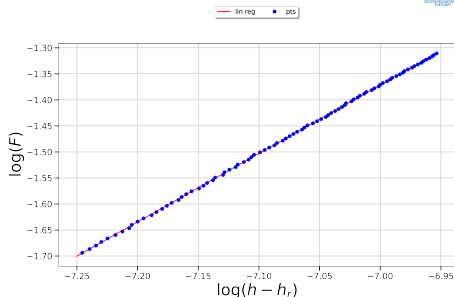
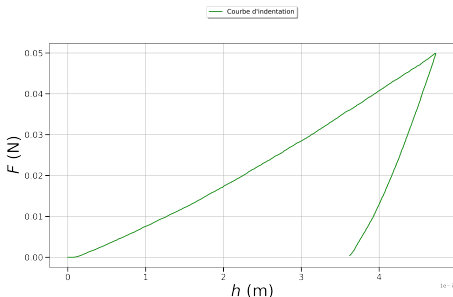
$$h_c = h_m - \varepsilon \frac{F_m}{S} \quad (4)$$

avec ε un terme lié à la géométrie de la pointe (ici $\varepsilon = 0.75$).

La module d'élasticité réduit s'écrit enfin :

$$E_r = \frac{1}{\beta} \frac{\sqrt{\pi}}{2} \frac{S}{A} \quad (5)$$

avec $\beta = 1$ pour un indenteur sphérique.

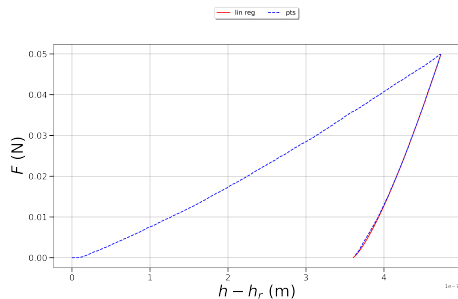


Fit entre 40% et 98% de la courbe de décharge ;

Mettre en log pour linéariser ;

Régression linéaire pour déterminer m_{OP} et B_{OP} ;

$$\frac{1}{E_r} = \frac{1 - \nu_i^2}{E_i} + \frac{1}{E_{hkl}}, \text{ avec } E_{hkl} \text{ le module d'Young directionnel.}$$



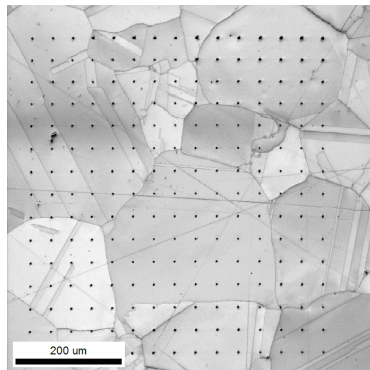
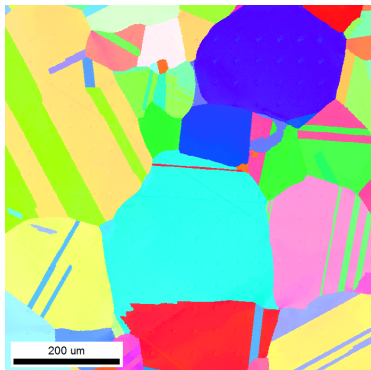
$$F = B_{OP}(h - h_r)^{m_{OP}}$$

$$m_{OP} = 1.31$$

$$B_{OP} = 67 \cdot 10^6$$

$$E_{hkl} = 156.4 \pm 10.33 \text{ GPa}$$

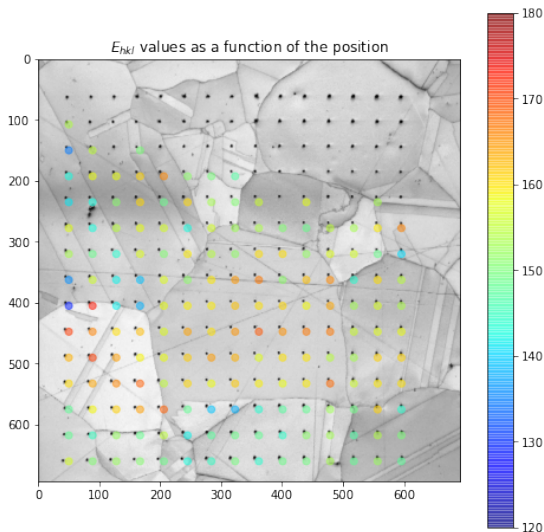
| | h_m | F_m | h_p | A_p | m | B | S | E_{hkl} |
|--------------|--------------|------------|--------------|--------------|------------|--------------|--------------|------------|
| count | 1.820000e+02 | 182.000000 | 1.820000e+02 | 1.820000e+02 | 182.000000 | 1.820000e+02 | 1.820000e+02 | 182.000000 |
| mean | 4.574621e-07 | 50.150514 | 3.462637e-07 | 1.173830e-11 | 1.269418 | 9.963481e+08 | 5.528406e+05 | 155.102866 |
| std | 6.558099e-09 | 2.978991 | 1.339154e-08 | 4.116264e-13 | 0.114871 | 1.235527e+10 | 1.167365e-09 | 10.326910 |
| min | 4.329000e-07 | 49.629600 | 2.100000e-07 | 6.970000e-12 | 0.399069 | 3.488833e+01 | 5.528406e+05 | 95.264806 |
| 25% | 4.539000e-07 | 49.930425 | 3.400000e-07 | 1.167000e-11 | 1.213923 | 1.423711e+07 | 5.528406e+05 | 148.961351 |
| 50% | 4.573500e-07 | 49.934850 | 3.500000e-07 | 1.178500e-11 | 1.264199 | 3.113151e+07 | 5.528406e+05 | 155.684190 |
| 75% | 4.616750e-07 | 49.937675 | 3.500000e-07 | 1.189000e-11 | 1.324715 | 7.669614e+07 | 5.528406e+05 | 160.796619 |
| max | 4.768000e-07 | 90.116600 | 3.900000e-07 | 1.243000e-11 | 1.853276 | 1.667520e+11 | 5.528406e+05 | 203.239191 |



Matrice de nanoindentés 15x15 ;

Paramètres initiaux : $\Delta x = 40 \mu\text{m}$; $\Delta y = 40 \mu\text{m}$; $R_i = 5 \mu\text{m}$; $F_m = 50 \text{ mN}$.

Environ 50 courbes non exploitables.



Points non indexés = données non exploitables ;
Globalement homogène grain par grain.

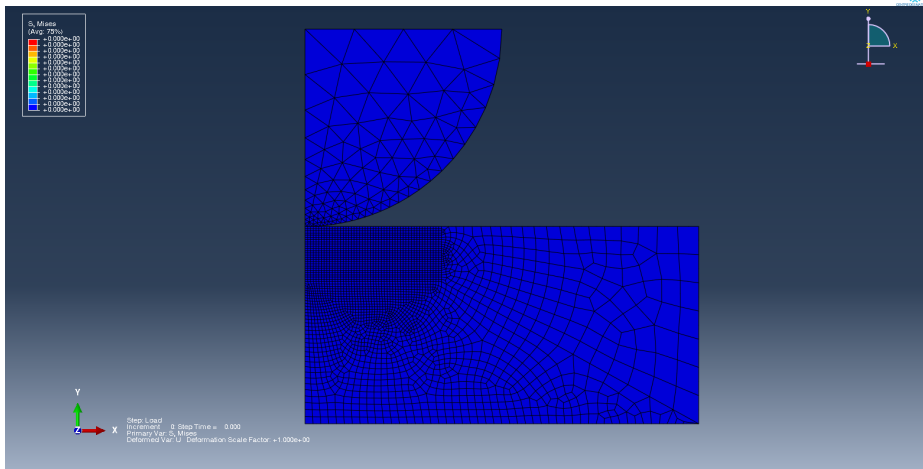
Plan

1 Nanoindentation instrumentée

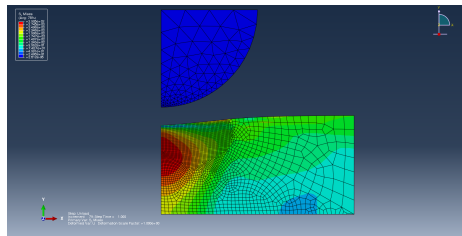
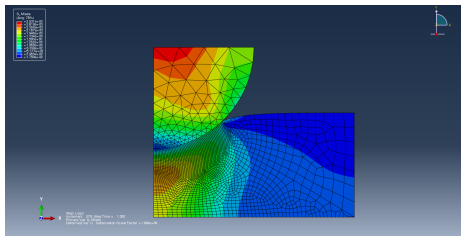
2 Simulation numérique

3 Essais in situ

4 Actions



Simulation de l'essai de nanoindentation en 2D sur Abaqus.



Variation des paramètres de loi de comportement (R_0 , C et D) et comparaison des résultats pour E ;

Dépouillement avec la méthode d'Oliver & Pharr ;

Coefficient de friction à 0.5, si coef = 0 alors pas de convergence ;

Simulation initiale

$$E = 113 \text{ GPa}$$

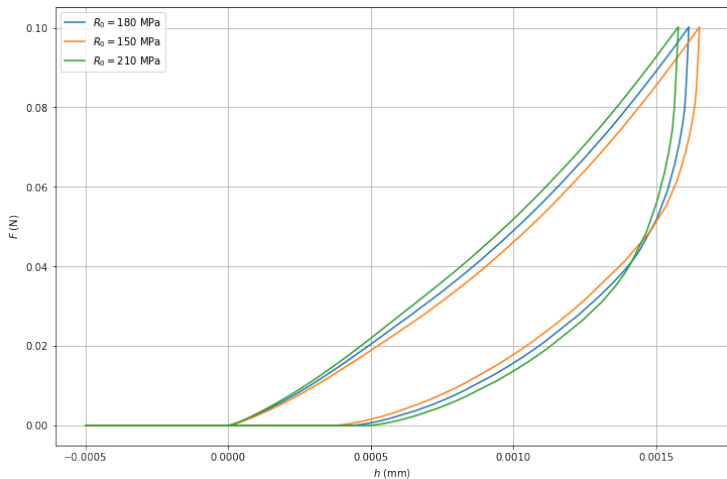
$$\nu = 0.3$$

$$n = 20$$

$$K = 10$$

$$R_0 = 180 \text{ MPa}$$

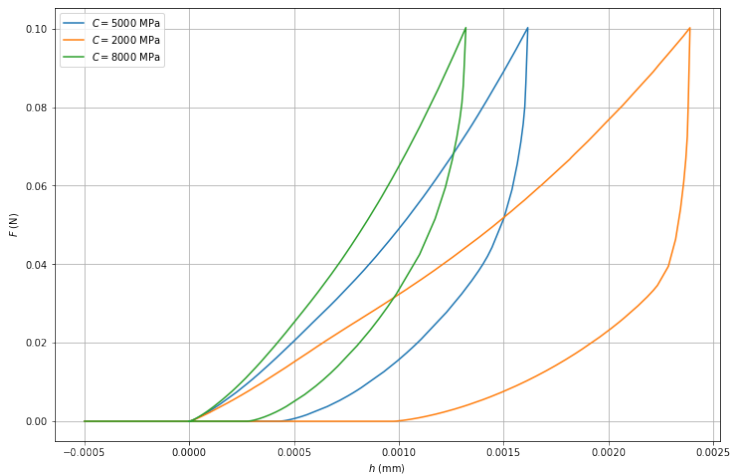
$$C = 5000 \text{ MPa}$$



$$E_{180} = 49.8 \text{ GPa}$$

$$E_{150} = 36.5 \text{ GPa}$$

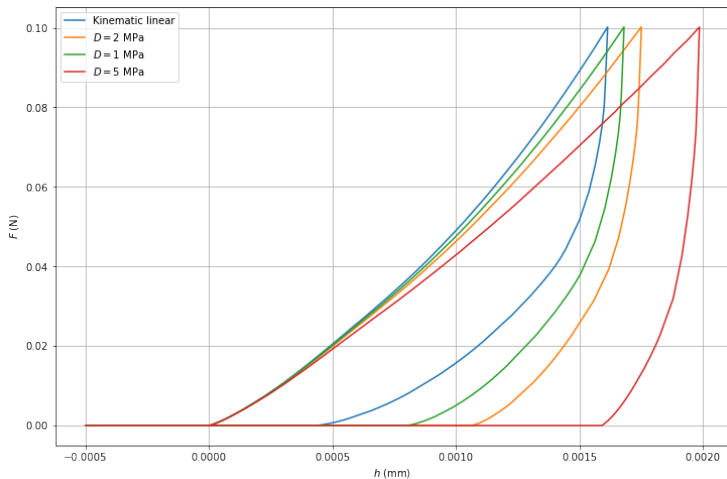
$$E_{210} = 61.4 \text{ GPa}$$



$$E_{5000} = 49.8 \text{ GPa}$$

$$E_{2000} = 125.7 \text{ GPa}$$

$$E_{8000} = 47.6 \text{ GPa}$$



$$E_{lin} = 49.8 \text{ GPa}$$

$$E_2 = 98.6 \text{ GPa}$$

$$E_1 = 77.6 \text{ GPa}$$

$$E_5 = 123.0 \text{ GPa}$$

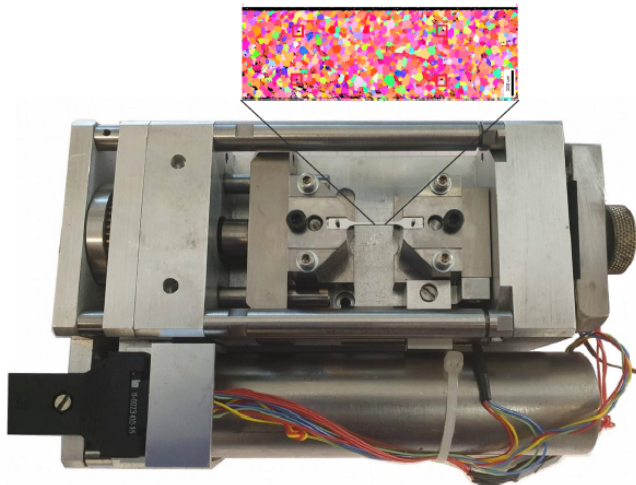
Plan

1 Nanoindentation instrumentée

2 Simulation numérique

3 Essais in situ

4 Actions



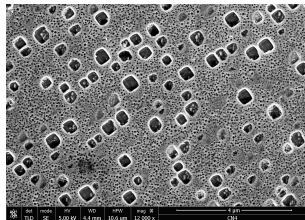
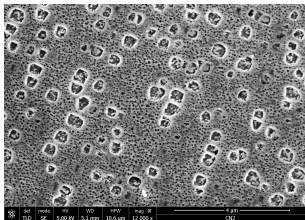
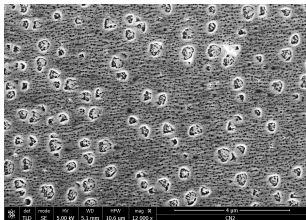
Machine de traction *in situ* pour les essais au Centre des Matériaux.

Attaque chimique à la silice colloïdale + oxydation 350°C pendant 1h ;

Précipités γ' révélés dans la matrice γ ;

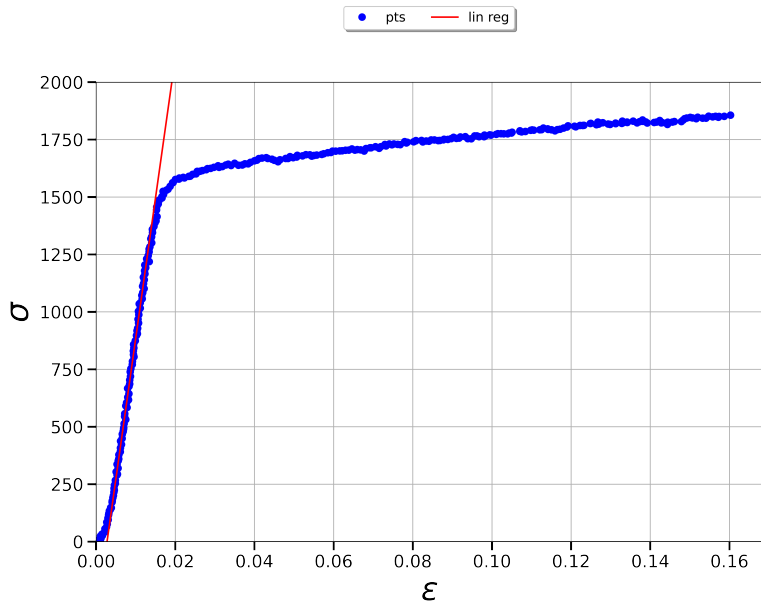
4 chutes utilisés pour la validation du protocole de polissage final pour les éprouvettes de traction ;

| Echantillons | CN1 | CN2 | CN3 | CN4 |
|--------------|-----|-----|-----|-----|
| Temps OPS | 19h | 4h | 7h | 10h |

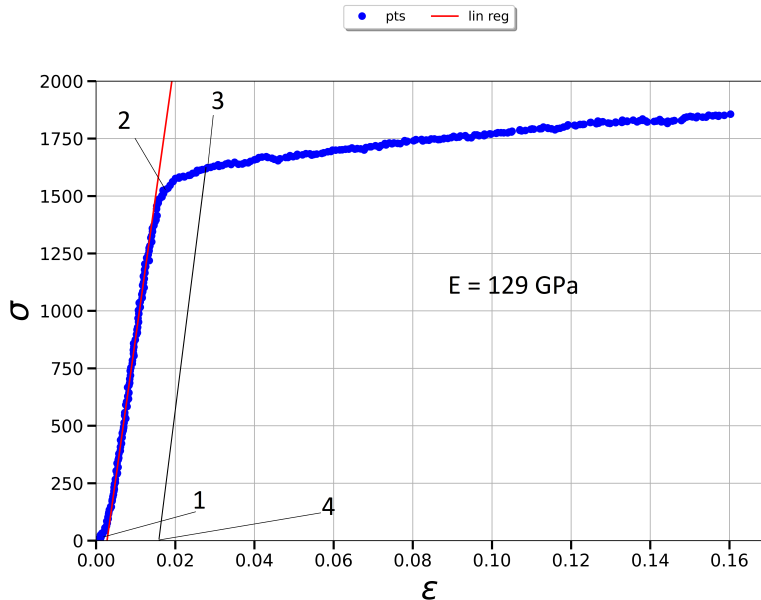


Compromis entre la révélation des précipités nanométriques et l'intensité de l'attaque sur la surface ;

Temps retenu : 7h.



Courbe de traction de référence de l'AD730



Plan

- 1 Nanoindentation instrumentée
- 2 Simulation numérique
- 3 Essais in situ
- 4 Actions**

- Nanoindentation :
 - ✓ Matrice d'indentation 15×15 sur le T40 ;
 - ✓ EBSD AD730 + T40 ;
 - ✓ Analyse O&P ;
 - Identification des constantes élastiques
- Essais in situ :
 - ✓ Essai de référence avant le MEB in situ :
 - Essais du 31/08 au 02/09 ;
 - ✓ Régler le problème du polissage à l'OPS ;
 - Scans paliers de chargement définis à partir de courbe de référence ;
 - Corrélation d'images sur VIC2D
- Simulation :
 - Simulation essai de nanoindentation sur vraie loi matériau : simuler 3 orientations cristallographiques et comparer avec les résultats expérimentaux.
- Rapport final : au plus tard le 16/09 ;
- Soutenance finale le 29/09.



MERCI DE VOTRE ATTENTION