

## Sur la caractérisation des interactions entre dislocations dans un cristal CFC de Nickel par analyse de la topographie des empreintes Berkovich

E. Renner<sup>1,2</sup>, Y. Gaillard<sup>1,3</sup>, F. Richard<sup>1,3</sup>, F. Amiot<sup>1,4</sup> et P. Delobelle<sup>1,4</sup>

1 : Institut FEMTO-ST, UBFC/CNRS-UMR6174/ENSMM/UTBM, Département Mécanique Appliquée

2 : ENSMM, Besançon

3 : Université de Franche-Comté (UFC), Besançon

4 : CNRS-UMR6174, Besançon

### Mots clé

Plasticité cristalline, nanoindentation, topographie, Berkovich, identifiabilité, analyse inverse, méthode des éléments finis, dislocations

### INTRODUCTION

Une étude a récemment montré expérimentalement et numériquement que la distribution et les dimensions des bourrelets plastiques autour d'une empreinte Berkovich sont très sensibles à l'orientation indenteur/cristal et aux paramètres d'érouissage [1]. Dans la loi de plasticité cristalline utilisée [2], trois paramètres ( $r_0, q, b$ ) pilotent l'érouissage sur chaque système de glissement et six ( $h_1, h_2, h_3, h_4, h_5, h_6$ ) les interactions entre les dislocations présentes sur les différents systèmes. Ces six paramètres d'interaction, actuellement difficilement accessibles par des mesures expérimentales, définissent une matrice de dimensions 12x12 dont l'effet sur la topographie des empreintes est illustré à la Figure 1 pour 2 cas particuliers.

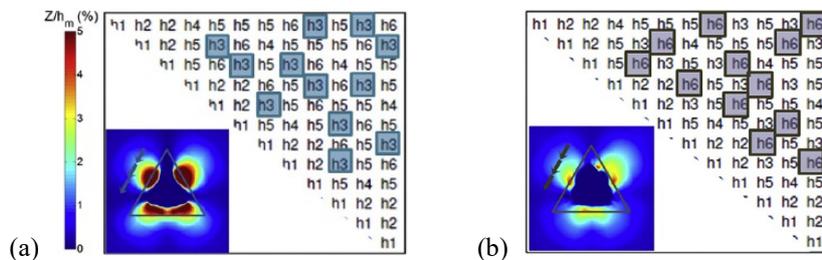


Figure 1 : Topographies numériques pour une direction d'indentation [001] pour deux matrices d'interaction différentes : (a)  $h_3 = 45 ; h_{1,2,4,5,6} = 1$  et (b)  $h_6 = 45 ; h_{1,2,3,4,5} = 1$ . [1]

Afin d'explorer numériquement les possibilités offertes par les données topographiques pour l'identification par méthode inverse de tout ou partie des paramètres pilotant le comportement plastique du cristal, un indice d'identifiabilité est proposé. Il dépend des normes et de la multicollinéarité des vecteurs de sensibilités des topographies aux paramètres plastiques. Il permet de quantifier, pour une combinaison de paramètres, et en fonction des données topographiques expérimentales prises en compte, le caractère plus ou moins bien posé du problème d'identification paramétrique. Deux topographies sont analysées, définies sur une même grille de  $n$  points  $XY_n$  :  $Z_n^1 = Z^1(XY_n)$  (direction d'indentation [101]) et  $Z_n^2 = Z^2(XY_n)$  (direction d'indentation [100]).

## METHODE DE CALCUL DE L'INDICE D'IDENTIFIABILITE

L'information disponible pour l'identification paramétrique des neuf paramètres  $\theta = (r_0, q, b, h_1, h_2, h_3, h_4, h_5, h_6)$  est condensée dans une matrice dont les coefficients sont définis par :

$$\bar{H}_{ij}(\theta) = \frac{1}{2n} \sum_{o=1}^2 \frac{\theta_i \theta_j}{Z_{\max}^o} \left[ \sum_{k=1}^n \frac{\partial Z_n^o(\theta)}{\partial \theta_i} \frac{\partial Z_n^o(\theta)}{\partial \theta_j} \right] \quad i, j = 1, \dots, 9$$

Cette matrice  $\bar{\mathbf{H}}$  est calculée à l'aide du modèle éléments finis de l'essai de nanoindentation élaboré dans le cadre de la plasticité cristalline sous le code ZéBuLoN. L'indice d'identifiabilité  $I = \log_{10}(\lambda_{\max}/\lambda_{\min})$  quantifie le conditionnement de la matrice  $\bar{\mathbf{H}}$  à travers le rapport entre sa plus grande valeur propre ( $\lambda_{\max}$ ) et sa plus petite ( $\lambda_{\min}$ ). La valeur de  $I$  donne une mesure scalaire de la convexité de la fonction coût qui serait élaborée avec les données topographiques choisies lors d'une estimation paramétrique par recalage de modèle utilisant une norme euclidienne :  $I \leq 2$  (bon conditionnement) et  $I \geq 3$  (mauvais conditionnement, paramètres non identifiables).

## RESULTAT

L'information contenue dans les deux topographies permet l'accès à tous les couples de paramètres ( $I \leq 2$  quel que soit le couple). Certaines combinaisons de 3, 4, 5, 6 et 7 paramètres sont identifiables, mais l'indice est systématiquement supérieur à 2 lorsque  $h_2$  (interaction coplanaires) et  $h_3$  (interaction des verrous de Hirth) font partie de la combinaison de paramètres recherchés, ce qui rend ce couple  $(h_2, h_3)$  difficilement identifiable ( $I = 2$ ). Ce résultat rejoint ceux obtenus par dynamique des dislocations, qui montrent que  $h_2$  représente le pouvoir durcissant d'une interaction faible, qui logiquement doit avoir peu d'impact sur les topographies. A l'inverse, les paramètres  $b$  et  $h_3$  affectent grandement les topographies mais la colinéarité des effets rend le couple  $(b, h_3)$  difficilement identifiable avec une seule topographie. Prendre en compte les deux topographies simultanément permet en effet de poser aussi bien (ou aussi mal...  $2 < I < 3$ ) le problème d'identification des neuf paramètres que le problème d'identification du couple  $(b, h_3)$  avec uniquement une topographie.

## CONCLUSION

Les résultats obtenus montrent que l'identification de quatre à cinq paramètres pilotant la plasticité du cristal est envisageable en exploitant deux empreintes. Ces travaux ouvrent la voie à la recherche d'une combinaison de topographies d'empreintes Berkovich permettant l'identification de l'ensemble des paramètres pilotant le comportement plastique du cristal CFC.

## Références

- [1] E. Renner, Y. Gaillard, F. Richard, F. Amiot, P. Delobelle, P., *Sensitivity of the residual topography to single crystal plasticity parameters in Berkovich nanoindentation on FCC nickel*, Int. J. Plast. **77**, pages 118–140, 2016
- [2] L. Méric, G. Cailletaud, *Single crystal modeling for structural calculations: Part 2—finite element implementation*, J. Eng. Mater. Technol. **113**, pages 171–182, 1991