

# ANALYSE EXPERIMENTALE ET NUMERIQUE DE L'ANISOTROPIE ET DE LA PLASTICITE CRISTALLINE D'UN POLYCRISTAL DE Ni PAR NANO-INDENTATION

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

1. Département. Mécanique Appliquée, FEMTO-ST, UMR CNRS 6174, Université de Franche Comté, 24 rue de l'Épitaphe, 25000, Besançon

## RESUME

Durant ces dernières décades la nano-indentation instrumentée est devenue une technique majeure éprouvée pour appréhender les propriétés mécaniques des matériaux aux échelles locales, telles que la dureté, le module d'indentation et les paramètres des lois de comportement par analyse inverse. De plus, pour les matériaux cristallins et selon le type d'indenteur (conique, Berkovich, Vickers) l'analyse des remontés de matière (pile-up) le long des faces de l'indenteur peut s'avérer extrêmement prometteuse pour qualifier et quantifier les anisotropies élastique et plastique [1-2].

L'objectif de cette étude est de mettre en lumière l'anisotropie plastique des matériaux de type CFC aux échelles locales. De nombreux résultats numériques (E.F.) et expérimentaux de nano-indentation sont présentés, analysés et comparés. Les essais ont été réalisés sur deux échantillons d'un même nickel poly-cristallin (recuit et écroui à 30%) avec des indenteurs Berkovich et conique. Le modèle structure et les simulations numériques ont été effectuées avec le code E.F. Zébulon associé à un modèle de plasticité cristalline en grande transformation [3].

Quatre directions cristallographiques principales correspondant à quatre grains présentant des directions très proches ont été choisies comme axe d'indentation, à savoir [100], [110], [111] et [123]. Les empreintes résiduelles ont été analysées par microscopie à force atomique (AFM) afin de révéler les différents systèmes de glissement et de quantifier les hauteurs et les largeurs des remontés de matière. Selon le type d'indenteur, l'état du matériau, l'orientation du grain considéré par rapport à la direction d'indentation et l'orientation de l'indenteur par rapport à l'orientation planaire du grain, on observe d'une part les différents systèmes de glissement associés à la direction d'indentation considérée (Fig.1) et d'autre part de très fortes dissymétries et des amplitudes très variables des bourrelets de matière (Fig.1 et 2). En fait, on montre qu'avec une indentation Berkovich qui présente une symétrie planaire d'ordre trois, la topographie résiduelle complète de l'empreinte correspond à la signature (véritable empreinte digitale) de l'orientation du grain considéré. Les observations (dissymétrie et hauteur des bourrelets, lignes de glissement émergentes) et les conclusions émises sont étayées par les calculs numériques qui montrent un bon accord qualitatif avec les résultats expérimentaux (Fig.2). La très forte dépendance des hauteurs avec l'état d'écrouissage et l'orientation des grains est également un paramètre intéressant caractérisant les densités moyennes de dislocations. Pour terminer, on montre par des calculs E.F. directs que les hauteurs respectives des différents bourrelets dépendent de la matrice d'interaction des systèmes de glissement du modèle et donc à terme pourraient permettre d'appréhender certaines informations par analyse inverse. Cependant, cela nécessite une très grosse puissance de calcul même avec parallélisation.

## Références

- [1] D. Holmes, A.H. Heuer, P. Pirouz (1993) « *Dislocation structures around Vickers indents in 9.4 mol% Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> stabilized cubic ZrO<sub>2</sub> single crystals* », Philos. Mag. A, **67**, pp. 325-342.
- [2] Y. Wang, D. Raabe, C. Klüber, F. Roters (2004) « *Orientation dependence of nano-indentation pile-up patterns and of nano-indentation microtextures in copper single crystals* », Acta Mater., **52**, pp. 2229-2238.
- [3] L. Méric, P. Poubanne, G. Cailletaud (1991) « *Single crystal modelling for structural calculations: Part 1 Model presentation* » J. Eng. Mater. Techn., **113**, pp.162-170.

Mots Clés

Indentation Berkovich, Anisotropie cristalline, Remonté de matière, Modèle numérique

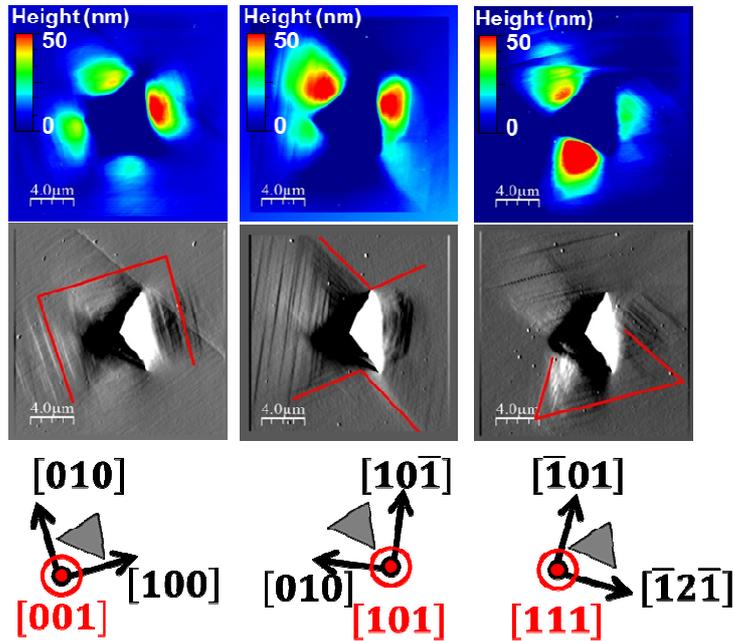


Figure 1: Images AFM des bourrelets et des systèmes de glissement émergents pour trois orientations cristallines. Cas de Ni recuit.

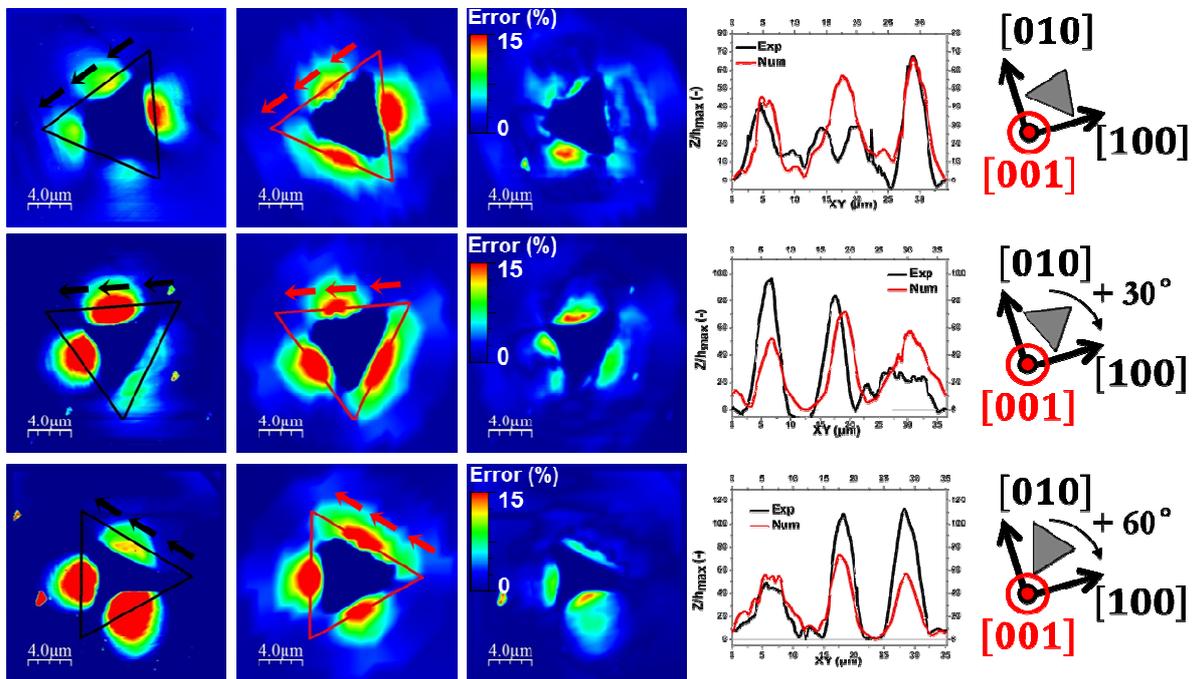


Figure 2: Images topographiques (Ci : Colonne i) des bourrelets pour la direction [001] et pour trois orientations de l'indenteur C5. C1: expérimentales, C2 : numériques, C3 : erreurs entre C1 et C2, C4 hauteurs selon le parcours triangulaire autour de l'empreinte. Cas du Ni recuit.