

## Caractérisation d'une distribution de charges au sein d'un élastomère par nanoindentation instrumentée

P. Baral<sup>1,2</sup>, C. Fradet<sup>3,4</sup>, F. Lacroix<sup>3</sup>, E. Le Bourhis<sup>4</sup>,  
G. Guillonnet<sup>2</sup>, G. Kermouche<sup>1</sup> et J.-L. Loubet<sup>2</sup>

1. Univ Lyon, Mines Saint Etienne, CNRS UMR 5307 LGF, Centre SMS, F-42023, Saint Etienne, France

2. Univ Lyon, Ecole Centrale de Lyon, UMR CNRS 5513 LTDS, F-69134, Ecully, France

3. Laboratoire de Mécanique Gabriel Lamé, Université de Tours, Université d'Orléans, INSA Centre Val de Loire, Polytech Tours, 7 Avenue Marcel Dassault BP40, 37004 Tours, France

4. Département Physique et Mécanique des Matériaux, Institut Pprime, CNRS-Université de Poitiers, Boulevard Marie et Pierre Curie, Futuroscope, 86962, France

### MOTS CLES

Nanoindentation, élastomère, charges, agrégats

### INTRODUCTION

La nanoindentation est souvent utilisée pour mesurer les propriétés mécaniques des premières centaines de nanomètres (principalement dureté et module d'élasticité), afin de mieux comprendre le comportement tribologique de deux matériaux en contact. Cette technique peut également permettre de quantifier les hétérogénéités dans le plan de la surface ce qui est d'une grande aide dans la compréhension des mécanismes d'usures (arrachement de particules dures dans un substrat mou, labourage, ...).

Ce travail porte sur une nouvelle utilisation de l'essai de nanoindentation afin de caractériser la distribution de densité surfacique d'agrégats solides dans un élastomère faiblement chargé (Fluoroélastomère FKM). Le principe de la mesure est fondé sur la différence importante de raideur entre les agrégats de noir de carbone et la matrice élastomère (rapport de 100). De ce fait, les particules en contact avec la pointe jouent le rôle d'indenteurs rapportés autour de la pointe et augmentent la raideur de contact mesurée. La surface projetée d'une charge de carbone entrant en contact avec la pointe peut ainsi être mesurée par l'augmentation anormale de raideur (voir figure 1b).

### MODELE POINTE-PARTICULE

Le modèle d'interaction pointe-particule repose sur le fait que la raideur de contact varie linéairement avec l'enfoncement dans un matériau homogène. Les amplitudes de raideur « anormales » sont attribuées à l'augmentation de l'aire de contact entre la pointe et la matrice élastomère. De cette façon, l'aire projetée d'un agrégat de noir de carbone peut être calculée par l'équation :

$$\Delta A_c = \frac{\pi}{2 E_c'^*} S \Delta S$$

Avec  $\Delta A_c$  l'aire projetée d'un agrégat,  $E_c'^*$  le module d'élasticité réduit de contact,  $S$  la raideur de contact avant le saut et  $\Delta S$  l'amplitude d'un saut de raideur. La figure 1a représente les aires de contact équivalentes pour 9 indents virtuels à différents niveaux d'enfoncements, dans l'élastomère chargé. La figure 1b représente l'évolution de la raideur de contact avec la profondeur d'enfoncement mesurée expérimentalement sur l'élastomère faiblement chargé. Chaque saut de raideur est détecté par un couple de points, ainsi la profondeur de détection  $S$  et l'amplitude du saut  $\Delta S$  sont mesurées.

Finalement, en prenant en compte la probabilité de détecter des particules en fonction de leur taille, la distribution de densité surfacique de tailles d'agrégats est extraite. La figure 1c représente les

distributions calculées via le modèle pointe-particule appliqué à l'analyse d'image de la figure 1a (triangles verts) et aux résultats expérimentaux obtenus pour 10 indentations à une profondeur de 2  $\mu\text{m}$  (rond jaunes). Ces résultats sont comparés à une mesure réalisée par analyse d'image de l'observation d'une lame mince à l'aide d'un microscope électronique à transmission (MET) (figure 1a).

Un excellent accord est trouvé entre les 3 procédures, ce qui valide les hypothèses du modèle, de manière numérique et expérimentale.

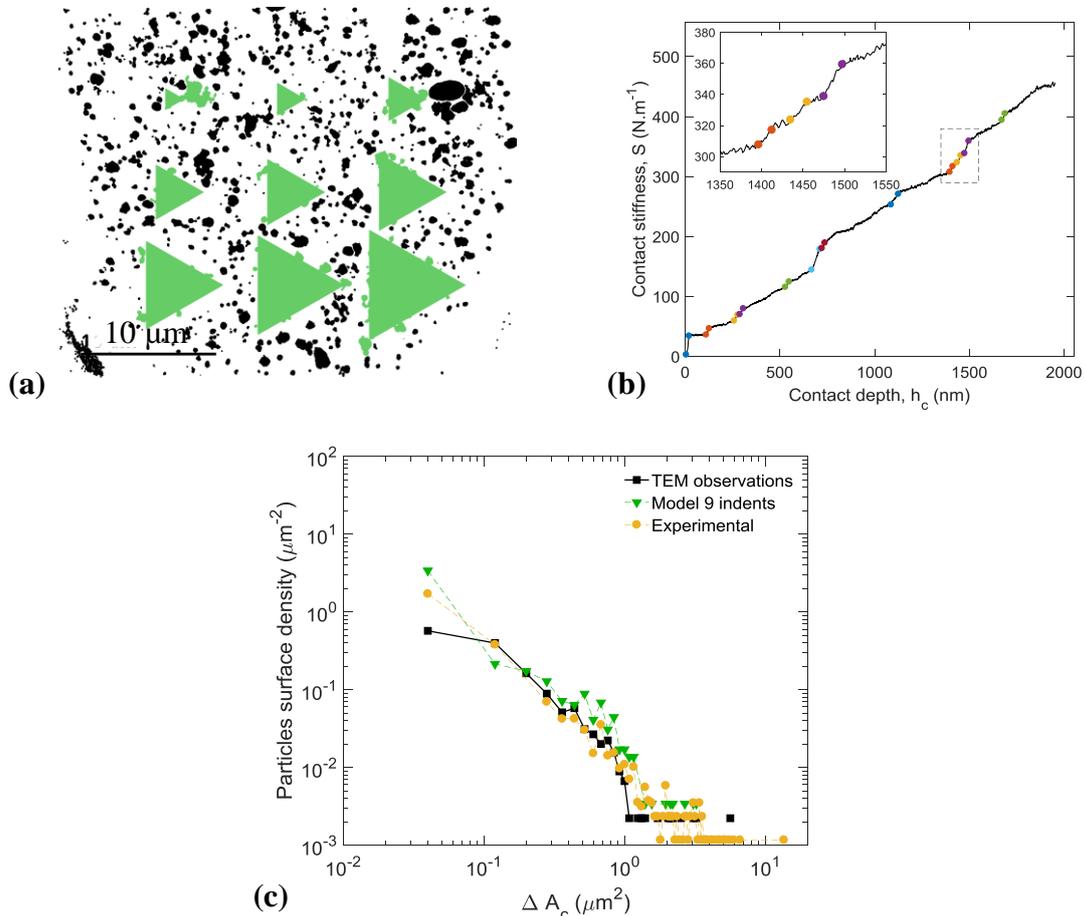


Figure 1: Modèle pointe-particule appliqué à la caractérisation d'une distribution de densité surfacique d'agrégats de noir de carbone dans une matrice fluoroélastomère. (a) Traitement d'image d'une observation MET permettant d'isoler les agrégats de noir de carbone de la matrice élastomère et exemple du modèle pointe-particule. Les aires projetées de contact sont schématisées par des triangles verts, les agrégats en contact avec celles-ci sont indiqués en vert et correspondent à une augmentation de l'aire de contact entre l'indenteur et la matrice. (b) Evolution de la raideur de contact avec la pénétration lors d'un essai d'indentation. Chaque saut de raideur correspond à l'entrée d'un agrégat en contact. (c) Distribution de la densité surfacique des agrégats en fonction de leur aire projetée  $\Delta A_c$ .

## CONCLUSION

Une nouvelle méthode de caractérisation des distributions de tailles de particules raides dans une matrice souple, par nanoindentation, est présentée. Celle-ci repose sur des hypothèses simples, vérifiées par des approches numérique et expérimentale. L'excellent accord trouvé entre les observations d'une lame MET et le modèle pointe-particule est très encourageant. Cette nouvelle méthode requiert beaucoup moins de préparation et pourrait, à terme, remplacer la caractérisation par microscopie et traitement d'images.