

## Modélisation des phénomènes de transferts électriques dans un système multi-contacts par la Méthode des Eléments Discrets

K. Bourbatache<sup>1</sup>, A. Tekaya<sup>2,3</sup>, E. Bellenger<sup>1</sup>, R. Bouzerar<sup>3</sup>, M. Guessasma<sup>1</sup>, V. Bourny<sup>2</sup>

<sup>1</sup> LTI, Université de Picardie Jules Verne, France, {khaled.bourbatache,emmanuel.bellenger,mohamed.guessasma}@u-picardie.fr

<sup>2</sup> MIS, Université de Picardie Jules Verne, France, {aymen.tekaya,valery.bourny}@u-picardie.fr

<sup>3</sup> PSC, Université de Picardie Jules Verne, France, robert.bouzerar@u-picardie.fr

Dans ce travail, nous proposons d'étudier le transport électrique dans un milieu granulaire. Les résultats disponibles pour des chaînes 1D de billes métalliques oxydées soumises à une charge statique montrent une transition de l'échantillon d'un état isolant vers un état conducteur lorsque le courant appliqué augmente [1]. Ce phénomène, qualifié d'effet Branly est une instabilité de la conduction électrique qui apparaît au niveau des contacts entre les corps. Ainsi, les caractéristiques tension-courant (U-I) mesurées entre deux billes électrodes sont non linéaires et hystérétiques, saturant à faible tension par contact (Figure 1) :

- A force fixée et à faible courant, la caractéristique tension-courant est réversible et ohmique (flèche 1), la résistance a une valeur constante élevée  $R_0$ . Cette résistance à bas courant dépend d'une façon complexe de la force appliquée  $F$  par le biais de la variation du rayon de contact donnée par la théorie de Hertz et des propriétés du film d'oxyde au niveau des contacts. On a donc un couplage important entre les effets de  $F$  et d'autres propriétés au contact tels que le degré d'oxydation, l'état de surface ou la rugosité.

- Lorsque  $I$  augmente suffisamment, la résistance diminue fortement jusqu'à ce que la tension aux bornes des billes électrodes sature (flèche 2). Les résultats montrent que cette tension de saturation n'est pas liée à  $F$  mais plutôt au nombre de contacts purement métalliques formé entre les billes par un processus électro-thermique qui conduit à une caractéristique non linéaire (flèche 1 jusqu'à flèche 2). Ce processus lié à l'effet Joule doit aller jusqu'à la soudure locale des microcontacts qui percent la couche d'oxyde. On peut estimer que la saturation de la tension pour chaque contact est atteinte pour une valeur de l'ordre de 0,4 V.

- Une fois que cette tension de saturation est atteinte, la caractéristique devient irréversible lorsque le courant diminue (flèche 3). Une fois les microcontacts soudés, en diminuant et en augmentant le courant, la caractéristique devient réversible et la nouvelle résistance à bas courant dépend de l'intensité maximale atteinte avant le retour (flèche 4).

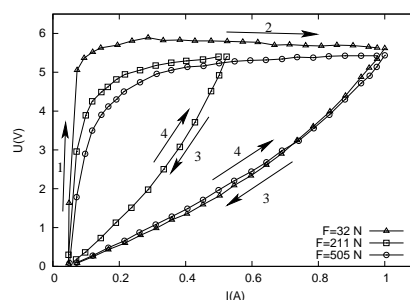


FIG. 1 – Caractéristiques U-I dans une chaîne 1D de billes [1].

Les résultats précédents, obtenus principalement pour des systèmes granulaires 1D peuvent être globalement retrouvés pour des milieux granulaires plus complexes. Dans ce cas, la compréhension de la transition de conduction électrique dans les milieux granulaires métalliques est un problème complexe dans lequel vient s'ajouter aux effets locaux des contacts entre grains, des effets collectifs typiques de ces milieux. Les travaux présentés dans [2] ont permis d'étudier les caractéristiques électriques d'un milieu granulaire dans le cadre de la Méthode des Eléments Discrets (MED) en couplant les effets électrique,

mécanique et en tenant compte du phénomène d'oxydation.

Dans le cadre du projet Régional ACCOST\_UGV, notre équipe dispose de nombreux résultats expérimentaux concernant les caractéristiques courant-tension de systèmes de billes de complexité croissantes : chaîne 1D, réseau carré (Figure 2 (a)) ou système 3D désordonné d'environ 22000 billes. La quantité importante de résultats obtenue nous montre que les systèmes étudiés présentent des comportements électriques similaires à ceux présentés précédemment. Toutefois, pour des systèmes granulaires 3D, les caractéristiques courant-tension présentent des différences telles que par exemple : la non saturation de la tension ou une forme différente de l'hystérésis (Figure 2 (c)). Par conséquent, pour numériquement retrouver ces résultats, il semble nécessaire de fournir un effort important dans la description physique des phénomènes électriques activés à l'interface de contact avant d'envisager la prise en compte des effets collectifs par la MED tel que déjà réalisée dans [2].

Dans ce travail, nous proposons donc d'introduire dans le code MED MULTICOR [3], un modèle physique destiné à rendre compte des différents régimes et de la forme assez complexe des caractéristiques courant-tension observés. L'originalité de notre approche réside dans l'incorporation de phénomènes physiques jusque là ignorés dans les modèles numériques de transport électrique dans les milieux granulaires [4] : l'influence sur la matrice de conductance de l'angle entre les contacts sur une bille (Figure 2 (b)), la relaxation de la tension au cours du temps et la compétition entre le transport électrique par effet tunnel à travers la couche d'oxyde et la formation des microcontacts soudés.

Ainsi, dans le cadre de la MED et en lien avec le réseau de contact généré dans le milieu granulaire, il faudra entre autre, résoudre l'équation différentielle convenablement adimensionnalisée [4] :

$$I = C \frac{dV}{dt} + I_{tunnel}(V) + s(I) \quad (1)$$

Cette équation prend en compte la capacitance  $C$  de la couche d'oxyde,  $I_{tunnel} = \frac{G_L(e^{\sigma V} - 1)}{\sigma}$  avec  $G_L$  la conductance linéaire de la caractéristique U-I en montée. Ce paramètre dépend à la fois de la densité d'états électroniques en surface de la bille mais aussi des probabilités de transition tunnel (franchissement de la couche d'oxyde). Le paramètre  $\sigma$  dépend de la température et des hauteurs de barrières à franchir. Le terme  $s(I)$  rend compte de la formation des microponts, processus irréversible contrôlant l'effet Branly.

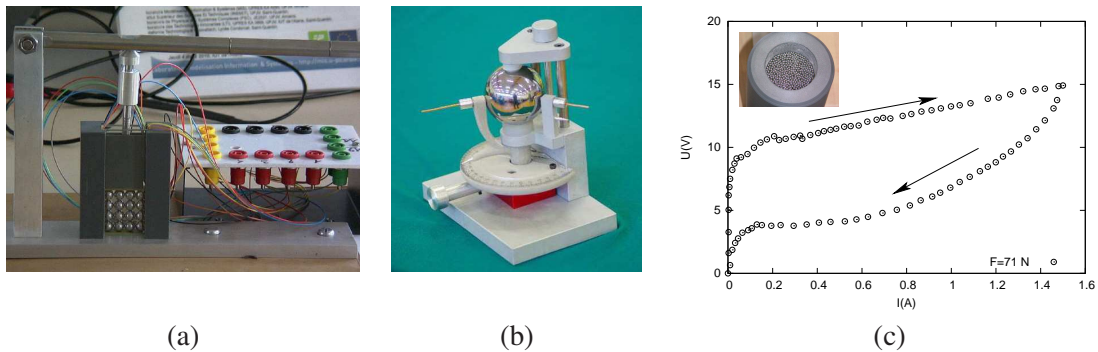


FIG. 2 – (a) Banc de mesure pour un réseau carré - (b) Banc de mesure pour l'influence de l'angle entre les contacts - (c) Caractéristiques U-I d'un système 3D désordonné de 22500 billes de diamètre 2mm [4].

## Références

- [1] E. Falcon, B. Castaing, M. Creyssels. *Nonlinear electrical conductivity in a 1D granular medium*, The European Physical Journal B, 38, 475-483, 2004.
- [2] M. Renouf, N. Fillot. *Coupling Electrical and Mechanical Effects in Discrete Element Simulations*, Int. J. Numer. Meth. Engng., 74, 238-254, 2008.
- [3] I. Sanni, E. Bellenger, J. Fortin, P. Coorevits, *A reliable algorithm to solve 3D frictional multi-contact problems : application to granular media*, Journal of computational and applied mathematics, 234, 1161-1171, 2010.
- [4] R. Bouzerar, A. Tekaya, V. Bourny, I. Tekaya. *Electrical properties of metallic beads systems through AC/DC current voltage*, 18th International Conference on Composites and Nano Engineering, July 4-10 2010.