



**HAL**  
open science

## Modélisation du microbillage par ultrasons

Mehdi Zarwel, Cécile Nougier-Lehon, Guillaume Kermouche, Thierry Hoc

► **To cite this version:**

Mehdi Zarwel, Cécile Nougier-Lehon, Guillaume Kermouche, Thierry Hoc. Modélisation du microbillage par ultrasons. 10e colloque national en calcul des structures, May 2011, Giens, France. pp.Clé USB. hal-00592912

**HAL Id: hal-00592912**

**<https://hal.science/hal-00592912>**

Submitted on 3 May 2011

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Modélisation du microbillage par ultrasons

M. Zarwel<sup>1</sup>, C. Nouguier-Lehon<sup>1</sup>, G. Kermouche<sup>2</sup>, T. Hoc<sup>1</sup>

<sup>1</sup> LTDS, Ecole Centrale de Lyon, France, {cecile.nouguier,thierry.hoc}@ec-lyon.fr

<sup>2</sup> LTDS, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Saint-Etienne, France, guillaume.kermouche@enise.fr

---

**Résumé** — Nous présentons dans cet article une modélisation numérique par éléments discrets du procédé de microbillage par ultrasons. Afin d'optimiser ce procédé et d'améliorer la compréhension des mécanismes de nano structuration provoquée dans la pièce par les impacts répétés des billes, une analyse statistique focalisée sur les impacts a été réalisée : nombre et angle d'impact, énergie cinétique lors des chocs. Notre étude montre que le nombre de billes a un effet sur la distribution des angles d'impact ainsi que sur la vitesse d'impact.

**Mots clefs** — Grenailage, éléments discrets, impacts.

---

## 1 Introduction

Le grenailage est un traitement mécanique à froid qui consiste à projeter des billes d'une dureté élevée sur la surface des pièces à traiter. Les déformations plastiques provoquées par les impacts répétés entraînent un écrouissage, ainsi que l'apparition de contraintes résiduelles de compression sur une fine couche en surface. L'objectif de ce traitement est d'augmenter la durée de vie des pièces mécaniques soumises à un grand nombre de cycles en fonctionnement. Selon la durée du traitement et son intensité, une nano structuration sur quelques dizaines de microns peut survenir. Le microbillage par ultrasons est un procédé de grenailage particulier qui permet de limiter le coût et d'optimiser le traitement pour une zone spécifique. Ce dispositif est constitué d'une chambre fermée et d'un dispositif de vibration ultrasonique (appelé sonotrode) permettant de projeter les billes vers la pièce à traiter avec une fréquence donnée. Ceci présente l'avantage d'utiliser les mêmes billes (plus économique), de permettre un grenailage plus rapide étant donné la hauteur limitée de la chambre (quelques dizaines de millimètres) et de pouvoir traiter des pièces de forme complexe.

Des travaux sur le grenailage [4,8,9] ont relié les caractéristiques d'impact aux contraintes résiduelles de compression induites et à la nano cristallisation de la surface de la pièce. Ces différentes publications mettent en avant principalement l'influence de la vitesse d'impact sur la génération des contraintes résiduelles de compression. Hong [5] a également montré l'effet de la direction d'impact. Micoulaut [10] a montré qualitativement l'influence des paramètres procédés du microbillage par ultrasons à partir de simulations numériques. Ces simulations, utilisant les éléments discrets, se sont focalisées sur l'analyse de la statistique des impacts. Notre étude s'inscrit dans la continuité de cette compréhension du procédé, l'objectif principal étant de quantifier les énergies d'impact, données indispensables à la compréhension des mécanismes de nano structuration induite par les impacts répétés.

## 2 Simulations réalisées

### 2.1 Méthode numérique

La méthode des éléments discrets est une méthode numérique permettant de simuler le comportement d'une collection de solides, rigides ou déformables, en tenant compte de leurs interactions par contact et de leur éventuel frottement. Cette méthode, initialement développée pour des applications quasi-statiques en lien avec le Génie Civil [2], a depuis été largement utilisée car elle présente l'avantage de pouvoir accéder très facilement aux paramètres locaux comme les forces de

contact et les vitesses des particules.

Les simulations présentées dans cette étude ont été réalisées grâce à la méthode *Non Smooth Contact Dynamics* (NSCD) en utilisant la plateforme LMGC90 [3]. La méthode NSCD [6,7,11,12,15] est une méthode qualifiée de *non smooth* car elle permet de modéliser la non interpénétration des particules et leur frottement sans introduire d'élasticité aux points de contact. De plus, pour tenir compte des collisions entre particules, on introduit des coefficients de restitution normal  $e_N$  et tangentiel  $e_T$  avec des valeurs comprises entre 0 et 1 (si  $e_N = e_T = 1$  les chocs sont purement élastiques alors qu'avec  $e_N = e_T = 0$  l'énergie est totalement dissipée lors des chocs). Parmi les nombreux champs d'utilisation de la simulation granulaire par la méthode NSCD, on peut citer : la simulation des interactions outil/sol [14], la modélisation du comportement du ballast des voies de chemin fer [16], l'étude de structures maçonnées [1] et des avalanches rocheuses [17], l'analyse de la microstructure du cytosquelette [13].

## 2.2 Configuration étudiée

La chambre de grenailage modélisée est un cylindre de 35 mm de rayon et de 30 mm de haut. Les billes, les parois de la chambre et la sonotrode sont en acier. La paroi inférieure de la chambre (sonotrode) est animée d'un mouvement sinusoïdal  $A \sin(\omega t)$ , voir figure 1. La fréquence de vibration  $f = \omega/2\pi$  est fixée à 20 000 Hz et plusieurs valeurs de l'amplitude  $A$  ont été testées. Nous nous sommes également intéressés à l'effet du nombre de billes et de leur diamètre (tableau 1).

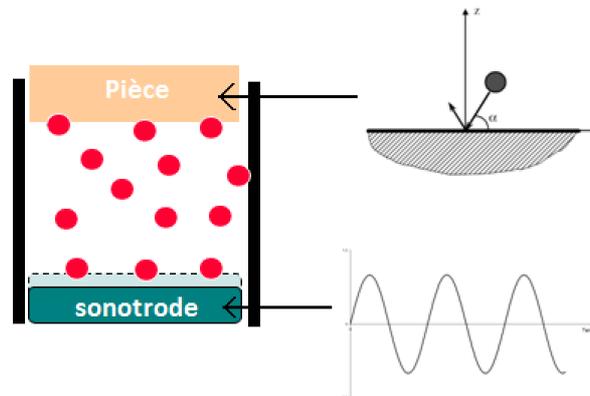


FIG. 1 – Principe de la modélisation granulaire du microbillage par ultrasons. La partie inférieure de la chambre est animée d'un mouvement sinusoïdal de manière à projeter les billes sur la pièce à traiter formant la partie supérieure de la chambre.

A l'instant initial, les billes sont immobiles sur la sonotrode. Elles sont disposées en une première couche régulière, à laquelle quelques billes ont été ajoutées sur une deuxième couche, de manière à désordonner le mouvement purement vertical impulsé par la sonotrode. Les simulations reproduisent une durée de grenailage de 2 s avec différentes amplitudes, ce qui est suffisamment long pour que l'effet de la phase transitoire soit négligeable et que le régime soit stationnaire, quel que soit le nombre de billes utilisé (figure 2).

TAB. 1 – Valeurs des paramètres procédé.

nombre de billes $n$	50, 70, 110, 153
diamètre des billes $d$ (mm)	2, 4, 6, 8
amplitude $A$ ( $\mu\text{m}$ )	30, 50, 90, 120
coefficient de frottement (bille/bille et bille/parois)	0,1
coefficient de restitution normal $e_N$	0,9
coefficient de restitution tangentiel $e_T$	0,5

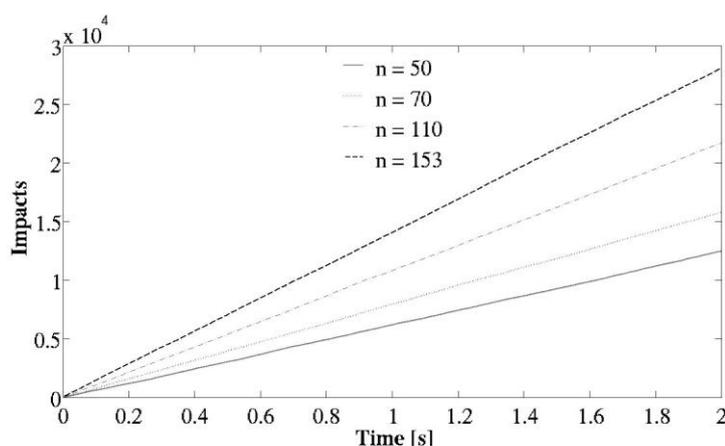


FIG. 2 – Evolution du nombre d'impacts au cours du temps en fonction du nombre de billes  $n$ .

### 3 Résultats

#### 3.1 Effet du nombre de billes

Dans un premier temps, pour une amplitude fixée et un diamètre de billes donné, nous nous sommes intéressés à la distribution des angles d'impact, c'est-à-dire l'angle fait par la trajectoire de la bille avec la normale à la pièce au moment du choc (figure 3). On observe que la proportion d'impacts normaux est plus importante quand le nombre de billes est faible. L'augmentation du nombre de billes rend la distribution gaussienne. Avec un nombre élevé de billes, la majorité des impacts sont obliques : la valeur moyenne de l'angle d'impact est de 41 degrés pour  $n = 153$ .

La figure 4 montre l'influence du nombre de billes sur la vitesse d'impact. Les vitesses d'impact ont été normalisées par la vitesse maximale de la sonotrode  $V_0$ . On observe qu'avec un faible nombre de billes la distribution des vitesses est très étalée et qu'un nombre significatif d'impacts se fait avec des vitesses supérieures à  $V_0$ . Au contraire, avec beaucoup de billes, la distribution se resserre et la majorité des impacts se font avec des vitesses inférieures à  $V_0$ . A titre d'exemple, pour cet essai avec une amplitude  $A = 50 \mu\text{m}$  et des billes de 4 mm de diamètre, la vitesse moyenne d'impact vaut  $13 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  pour  $n = 50$  et  $7,8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  pour  $n = 153$ , soit près de 2 fois moins.

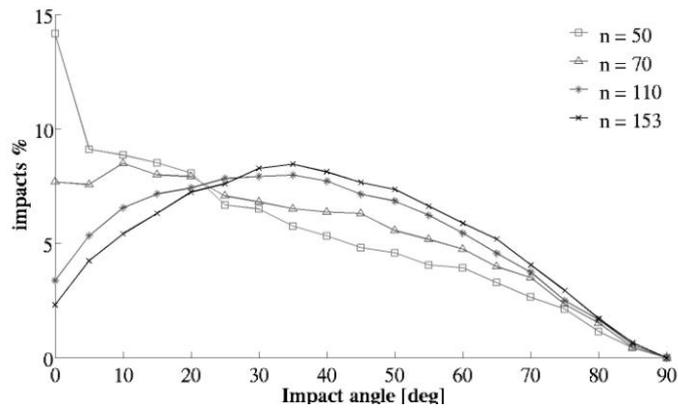


FIG. 3 – Pourcentage des angles d’impact en fonction du nombre de billes pour  $A=50\ \mu\text{m}$  et  $d=4\ \text{mm}$ .

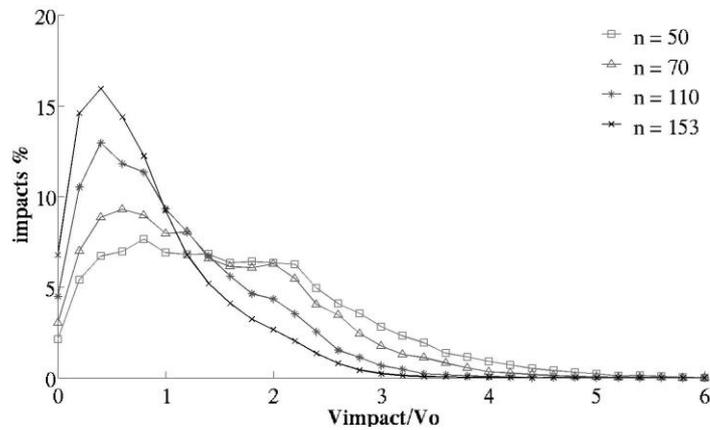


FIG. 4 – Pourcentage des vitesses d’impact en fonction du nombre de billes ( $A=50\ \mu\text{m}$  et  $d=4\ \text{mm}$ ).

### 3.2 Energies d’impact

Les figures 5 et 6 montrent la distribution d’énergie cinétique transmise à la pièce au cours des impacts pour les différentes amplitudes et les différents diamètres de billes testés.

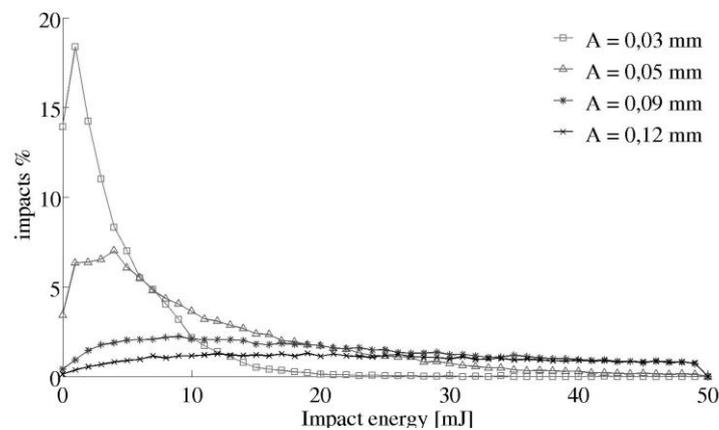


FIG. 5 – Distribution des énergies d’impact en fonction de l’amplitude  $A$  de la sonotrode (pour  $n=110$  et  $d=4\ \text{mm}$ ).

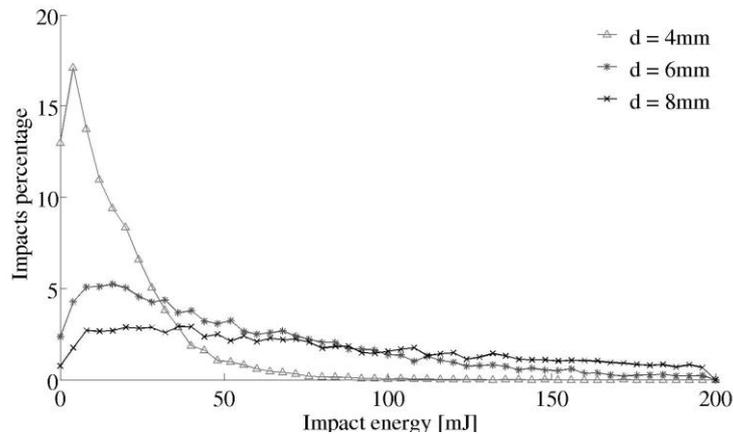


FIG. 6 – Distribution des énergies d’impact en fonction du diamètre des billes ( $A = 50 \mu\text{m}$  et  $n = 110$ ).

L’énergie moyenne est d’autant plus grande que l’amplitude de la sonotrode est élevée et que le diamètre des billes (donc leur masse) est grand.

### 3.3 Effet des coefficients de restitution

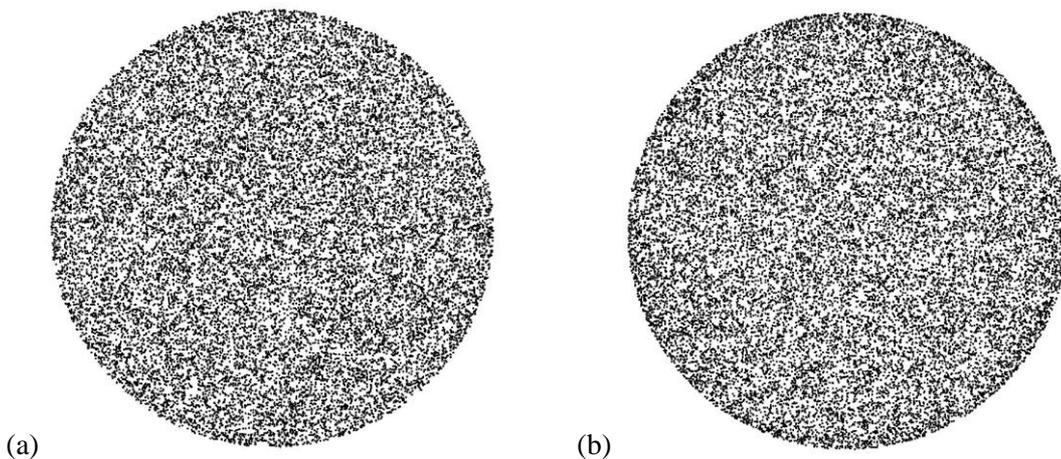


FIG. 7 –Influence du coefficient de restitution sur la position des impacts sur la pièce après 0,5 s de grenaillage pour  $A = 50 \mu\text{m}$ ,  $d = 4 \text{ mm}$  et  $n = 110$  : (a)  $e_N = 0,9$  et  $e_T = 0,5$  (b)  $e_N = 0,75$  et  $e_T = 0,4$ .

Pour analyser l’influence du coefficient de restitution, nous avons réalisé la même simulation de grenaillage avec 110 billes de 4 mm de diamètre et une amplitude de  $50 \mu\text{m}$ , mais avec des coefficients de restitution plus faibles pour les chocs entre les billes et la paroi cylindrique de la chambre :  $e_N = 0,75$  et  $e_T = 0,4$  (figure 7(b)) au lieu des valeurs  $e_N = 0,9$  et  $e_T = 0,5$  utilisées pour les simulations précédentes (figure 7(a)). Sur la figure 7, chaque impact reçu par la pièce a été représenté par un disque de  $200 \mu\text{m}$  de diamètre. On remarque que la périphérie de la pièce est plus impactée quand les coefficients de restitution sont faibles.

## 4 Discussion

La diminution du pourcentage d’impacts normaux et de la vitesse d’impact quand le nombre de billes augmente est un résultat en accord avec les travaux de Micoulaut [10]. Ce phénomène est à relier au nombre de collisions bille-bille, qui est d’autant plus grand qu’il y a beaucoup de billes dans la chambre. En effet, moins il y a de billes, moins leur trajectoire, impulsées par la vibration de la

sonotrode, risquent d'être déviées de la verticale à cause de chocs avec d'autres billes, ce qui permet également aux billes de conserver une vitesse élevée.

La taille des billes utilisées, ainsi que l'énergie injectée dans le système par le mouvement de la sonotrode, ont une grande influence sur l'énergie totale reçue par la pièce. Ce sont donc des paramètres sur lesquels on peut jouer pour régler le niveau de nano structuration provoquée à la surface de la pièce.

Avec des coefficients de restitution plus faibles, le périmètre de la pièce reçoit plus d'impacts que sa partie centrale. Ce phénomène vient de la dissipation plus importante lors des chocs entre les billes et la paroi cylindrique de la chambre dans ce cas. La nature du matériau utilisé pour réaliser les parois de la chambre de grenailage est donc un point important pour assurer un grenailage au cours duquel la pièce est impactée de manière homogène sur toute sa surface.

## 5 Conclusions et perspectives

Dans cette étude, nous avons réalisé des simulations numériques par la méthode des éléments discrets du procédé de microbillage par ultrasons. Nos analyses sur la statistique des impacts montrent :

- l'influence du nombre de billes utilisées sur l'angle et la vitesse d'impact : pour avoir des angles d'impacts majoritairement normaux à la pièce à traiter, il est plus intéressant d'utiliser peu de billes ;
- l'effet de la taille des billes et de l'amplitude de la vibration de la sonotrode sur les vitesses d'impact ;
- l'importance de la valeur des coefficients de restitution lors des chocs entre les billes et la paroi de la chambre sur la répartition des impacts.

Pour approfondir cette étude, il est prévu de calculer la surface des empreintes à partir de valeurs expérimentales obtenues lors d'essais de micropercussion.

## Références

- [1] B. Chetouane, F. Dubois, M. Vinches, C. Bohatier. *NSCD discrete element method for modelling masonry structures*, International Journal for Numerical Methods in Engineering **64**, 65-94, 2005.
- [2] P.A. Cundall, O.D.L. Strack. *A discrete numerical model for granular assemblies*, Géotechnique **29**, 47-65, 1979.
- [3] F. Dubois, M. Jean. *LMGC90 une plateforme de développement dédiée à modélisation de problèmes d'interaction*, Actes du 6<sup>ème</sup> Colloque National en Calculs des Structures, Giens, Vol. 1, 111-118, 2003.
- [4] M. Guagliano. *Relating Almen intensity to residual stresses induced by shot peening: a numerical approach*, Journal of Materials Processing Technology **110**, Elsevier, 277-286, 2001.
- [5] T. Hong, J.Y. Ooi, B. Shaw. *A numerical relation to relate the shot peening parameters to the induced residual stresses*. Engineering Failure Analysis **15**, Elsevier, 1097-1110, 2008.
- [6] M. Jean. *Simulation numérique discrète*. Micromécanique des matériaux granulaires, Hermès Science, 2005.
- [7] M. Jean. *The non-smooth contact dynamics method*, Computer Methods for Applied Mechanics and Engineering **177**, Elsevier, 235-257, 1999.
- [8] G.H. Majzoobi, R. Azizi, A. Alavi Nia. *A three-dimensional simulation of shot peening process using multiple shot impacts*, Journal of Materials Processing Technology **164-165**, Elsevier, 1226-1234, 2005.
- [9] S.A. Meguid, G. Shagal, J.C. Stranart, J. Daly. *Three-dimensional dynamic finite element analysis of shot peening induced residual stresses*, Finite Element in Analysis and Design **31**, Elsevier, 179-191, 1999.
- [10] M. Micoulaut, S. Mechkov, D. Retraint, P. Viot, M. François. *Granular Gases in mechanical engineering: on the origin of heterogeneous ultrasonic shot peening*, Granular Matter **9**, Springer-Verlag, 25-33, 2007.

- [11]J.J. Moreau. *Some numerical methods in multidody dynamics: application to granular material*, European Journal Mechanics A/Solids **13** (4-suppl.), 93-114, 1994.
- [12]J.J.Moreau. *Numerical aspects of the sweeping process*, Computer Methods for Applied Mechanics and Engineering **177**, Elsevier, 329-349, 1999.
- [13]B. Maurin, P. Cañadas, H. Baudrillier, P. Montcourrier, N. Bettache. *Mechanical model of cytoskeleton structuration during cell adhesion and spreading*, Journal of Biomechanics **41**, 2036-2041, 2008.
- [14]C. Nougulier, C. Bohatier, F. Radjaï, J.J.Moreau. *Force fluctuations in a pushed granular material*, Granular Matter **2**, Springer Verlag, 171-178, 2000.
- [15]F. Radjaï, V. Richefeu. *Contact Dynamics as a nonsmooth discrete element method*, Mechanics of Materials **41**, Elsevier, 715-728, 2009.
- [16]G. Saussine, C. Cholet, P.E. Gautier, F. Dubois, C. Bohatier, J.J. Moreau. *Modelling ballast behaviour under dynamic loading, Part I: a 2D polygonal discrete element method approach*, Computer Methods for Applied Mechanics and Engineering **195**, Elsevier, 19-22, 2005.
- [17]A. Taboada, N. Estrada. *Rock-soil avalanches: theory and simulation*, Journal of Geophysical Research **114**, F03004, 2009.