



**HAL**  
open science

## Analyse des impacts au cours du microbillage ultrasonore de tubes

Cécile Nouguier-Lehon, Caroline Diviani, Mehdi Zarwel, Dominique Hertz,  
Philippe Gilles, Hassan Zahouani, Thierry Hoc

► **To cite this version:**

Cécile Nouguier-Lehon, Caroline Diviani, Mehdi Zarwel, Dominique Hertz, Philippe Gilles, et al..  
Analyse des impacts au cours du microbillage ultrasonore de tubes. 11e colloque national en calcul  
des structures, CSMA, May 2013, Giens, France. hal-01717837

**HAL Id: hal-01717837**

**<https://hal.science/hal-01717837>**

Submitted on 26 Feb 2018

**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.

Public Domain

## Analyse des impacts au cours du microbillage ultrasonore de tubes

Cécile NOUGUIER-LEHON<sup>1\*</sup>, Caroline DIVIANI<sup>1</sup>, Mehdi ZARWEL<sup>1</sup>, Dominique HERTZ<sup>2</sup>,  
Philippe GILLES<sup>3</sup>, Hassan ZAHOUANI<sup>4</sup>, Thierry HOC<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Université de Lyon, Ecole Centrale de Lyon, LTDS UMR CNRS 5513, cecile.nouguier@ec-lyon.fr

<sup>2</sup> AREVA NP, Lyon, dominique.hertz@areva.com

<sup>3</sup> AREVA NP, Direction de la recherche et de l'innovation, La Defense, philippe.gilles@areva.com

<sup>4</sup> Université de Lyon, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Saint-Etienne, LTDS UMR CNRS 5513, zahouani@enise.fr

\* Auteur correspondant

**Résumé** — La qualité du traitement d'une surface par microbillage ultrasonore, qui consiste à projeter des billes sur la surface à traiter grâce à une sonotrode en vibration à une fréquence supérieure à 20 kHz, dépend fortement des caractéristiques des impacts. Le mouvement des billes à l'intérieur de la chambre de grenailage dépend bien sûr de leur nombre, des paramètres d'excitation de la sonotrode et des matériaux constituant les différentes pièces. Dans cette étude, nous avons mesuré par microscopie confocale la profondeur des empreintes laissées sur un tube de cuivre grenailé dans différentes configurations. Nos mesures montrent que la profondeur moyenne des impacts varie sur la circonférence du tube et qu'elle dépend du matériau constituant les parois de la chambre (acier trempé ou matériau polymère dans notre cas). Des simulations par éléments finis d'un impact normal conduisent à une relation linéaire entre la vitesse incidente et la profondeur plastique résiduelle. L'ensemble du procédé a été simulé par la méthode des éléments discrets pour analyser la statistique des vitesses d'impact sur le tube. Nos résultats montrent que les vitesses d'impact moyennes obtenues par les simulations granulaires sont fortement corrélées avec les profondeurs moyennes mesurées expérimentalement, ce qui permet de valider les simulations pour cette configuration de grenailage.

**Mots clés** — grenailage par ultrasons, analyse de surface, impact, méthode des éléments discrets

## 1 Introduction

Le microbillage ultrasonore est un traitement de surface à froid qui consiste à projeter des billes de quelques millimètres de diamètre sur une pièce par l'intermédiaire d'une sonotrode en vibration à une fréquence au moins égale à 20 kHz. Grâce aux impacts répétés sur la pièce, ce procédé permet de générer des contraintes de compression dans une couche superficielle d'une centaine de micron et de provoquer la nanostructuration de la surface [1, 4, 8, 10]. La qualité du traitement de surface est fortement liée au contact bille-pièce et en particulier à la vitesse et à l'angle d'impact. L'analyse du mouvement des billes dans la chambre de grenailage est donc un élément essentiel dans ce type de procédé. Ce mouvement dépend bien évidemment du nombre de billes, de la source excitatrice ou encore des matériaux constitutifs des différents éléments (sonotrode, chambre et billes) [2, 6, 11, 15].

Dans l'objectif d'analyser l'homogénéité du grenailage, nous nous sommes intéressés au microbillage ultrasonore d'un tube en cuivre de 10 mm de diamètre, placé parallèlement à la sonotrode. Pour quantifier l'influence du matériau constitutif de la chambre, deux chambres de grenailage parallélépipédiques ont été utilisées. Elles ont les mêmes dimensions mais l'une est en acier trempé et l'autre en matériau polymère. Dans chaque cas, le grenailage a été effectué pendant une durée suffisamment courte pour assurer un taux de recouvrement inférieur à 100 %. La profondeur moyenne des empreintes sur le tube a ensuite été mesurée expérimentalement par microscopie confocale. Pour relier la profondeur des impacts à la vitesse d'impact, des simulations d'un impact normal sur un plan ont été réalisées avec ABAQUS V6.12-1, module explicit. Enfin, l'ensemble du procédé a été simulé grâce à un code aux éléments discrets pour analyser les caractéristiques de l'impact bille/tube.

La première partie de cet article présente les différentes techniques expérimentales et méthodes numériques utilisées. Les résultats expérimentaux et numériques sont ensuite présentés. Enfin, l'effet du

matériau constitutif de la chambre de grenailage est discuté dans la dernière partie.

## 2 Matériels et méthodes

### 2.1 Microbillage ultrasonore du tube

Le microbillage ultrasonore des tubes a été réalisé dans une chambre de grenailage parallélépipédique, avec une sonotrode en alliage de titane (TA6V) vibrant à une fréquence de 20 kHz et fournissant une vitesse maximum de  $5,03 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Le tube de cuivre (type Cu-b1) de 10 mm de diamètre est placé parallèlement à la sonotrode et situé à 30 mm de celle-ci (voir figure 1). Pour quantifier l'influence du matériau constitutif de la chambre, deux chambres de grenailage ont été utilisées. Elles ont les mêmes dimensions mais l'une est en acier trempé et l'autre en matériau polymère (polyoxyméthylène ou POM). Dans chaque cas, le grenailage a été effectué avec 13 g de billes en zircone de 2 mm de diamètre (type ZY Premium, SiLibeads<sup>®</sup>) pendant 8 à 10 s.

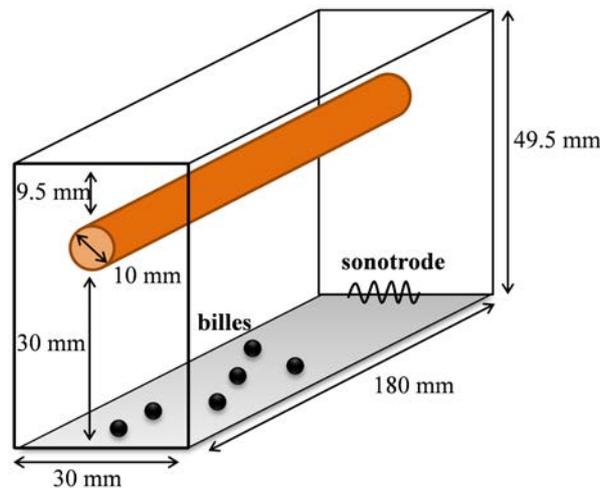


Fig. 1 – Géométrie de la chambre de grenailage.

### 2.2 Microscopie confocale

La topographie de la surface du tube grenailé a été analysée grâce à un microscope confocal en lumière blanche, basé sur le principe de l'aberration chromatique (AltiSurf<sup>®</sup> 500), permettant ensuite de mesurer la profondeur moyenne des impacts [14]. La topographie a été mesurée sur des zones carrées de  $2,5 \text{ mm} \times 2,5 \text{ mm}$  avec un pas d'échantillonnage de  $5 \mu\text{m}$  en X et Y.

Pour analyser l'homogénéité du grenailage dans la longueur du tube, cinq localisations ont été choisies, équiréparties le long du tube (figure 2a). Pour analyser la répartition des impacts sur la circonférence du tube, six positions ont été choisies : trois sont situées sur la partie inférieure du tube (la zone face à la sonotrode - notée ligne 0 - et les zones situées à  $\pm 45$  degrés de part et d'autre) en bleu sur la figure 2b ; et trois sont situées sur la partie supérieure du tube, respectivement notées ligne 180, ligne 135 et ligne 225 (en vert sur la figure 2b). Pour l'analyse de surface, la topographie mesurée par microscopie confocale est d'abord rectifiée pour tenir compte de la courbure du tube. Pour chaque tube, la profondeur moyenne des empreintes a été obtenue par une mesure automatique des 30 zones. La figure 3 montre la topographie mesurée sur la zone centrale du tube située face à la sonotrode (en rouge sur la figure 2a) dans les deux chambres.

### 2.3 Simulations d'un impact normal par la méthode des éléments finis (FEM)

Dans l'objectif d'étudier l'effet de la vitesse d'impact des billes sur la profondeur de l'empreinte laissée sur le tube, nous avons modélisé l'impact normal d'une sphère rigide de 2 mm de diamètre sur un domaine plan (figure 4). Cinq vitesses ont été testées :  $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  et  $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

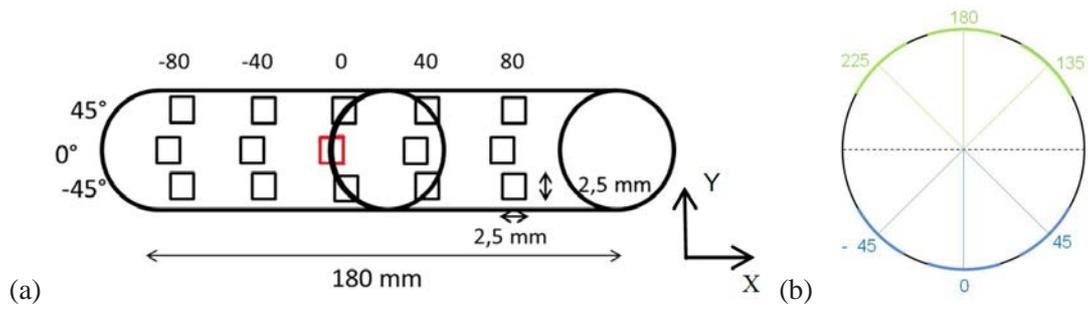


Fig. 2 – Position des zones du tube analysées par microscopie confocale (a) vue latérale (b) vue de face.

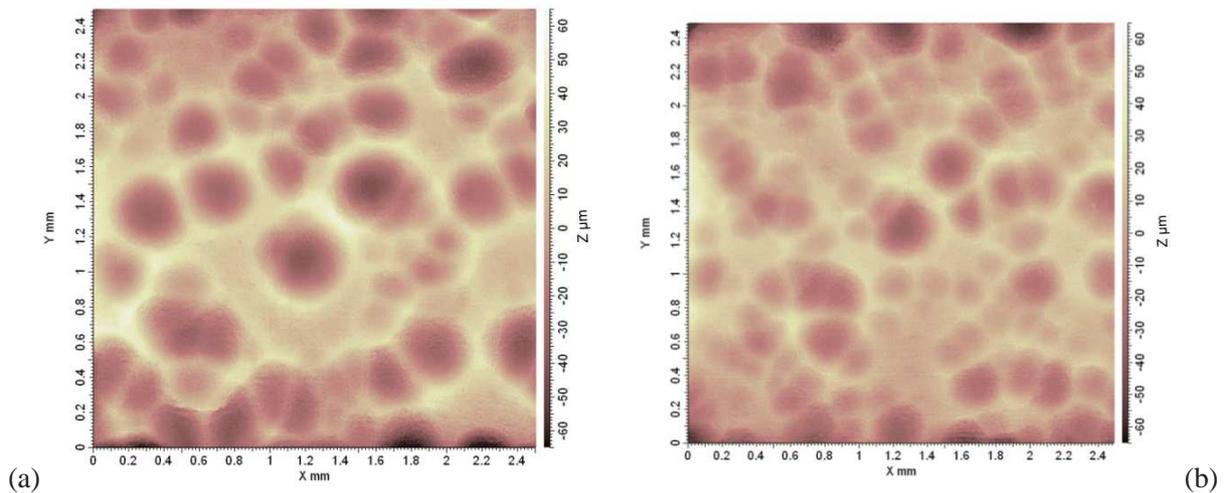


Fig. 3 – Cartographie des impacts sur le tube dans la chambre en acier (a) et en POM (b).

Le logiciel utilisé est ABAQUS V6.12-1, module explicite. Le comportement mécanique du cuivre est supposé parfaitement plastique : masse volumique  $\rho = 8900 \text{ kg/m}^3$ , module d'Young  $E = 120 \text{ GPa}$ , coefficient de Poisson  $\nu = 0,34$ , limite d'élasticité  $\sigma_Y = 100 \text{ MPa}$ . Le domaine parallélépipédique est maillé avec 900 000 éléments hexahédriques à 8 noeuds (C3D8R).

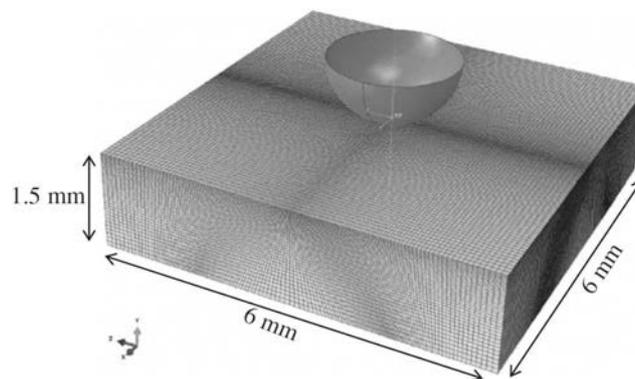


Fig. 4 – Maillage initial des simulations FEM.

## 2.4 Simulations du procédé par la méthode des éléments discrets (DEM)

Pour simuler le grenailage du tube dans une chambre parallélépipédique, nous avons utilisé la méthode *Non Smoth Contact Dynamics* [12, 7, 13] de la plateforme LMG 90 [16]. Cette méthode numérique fait partie des méthodes aux éléments discrets [3] : elle permet de modéliser une collection de solides rigides en contact avec ou sans frottement et de calculer leur mouvement sous sollicitation dynamique. La géométrie et les dimensions de la chambre et des billes sont identiques à celles de l'expérience,

la prise en compte des différents matériaux a été faite par l'intermédiaire des coefficients de restitution. Dans cette étude, l'influence de la vitesse d'impact sur la valeur du coefficient de restitution n'a pas été prise en compte. Comme le matériau polymère dissipe davantage d'énergie au cours des chocs que l'acier, nous avons choisi un coefficient de restitution de 0,8 pour la chambre en acier et de 0,4 pour la chambre en POM. Le mouvement des billes dans la chambre atteignant rapidement un état stationnaire [15], les simulations ont été réalisées pour un temps total de grenailage de 1 s.

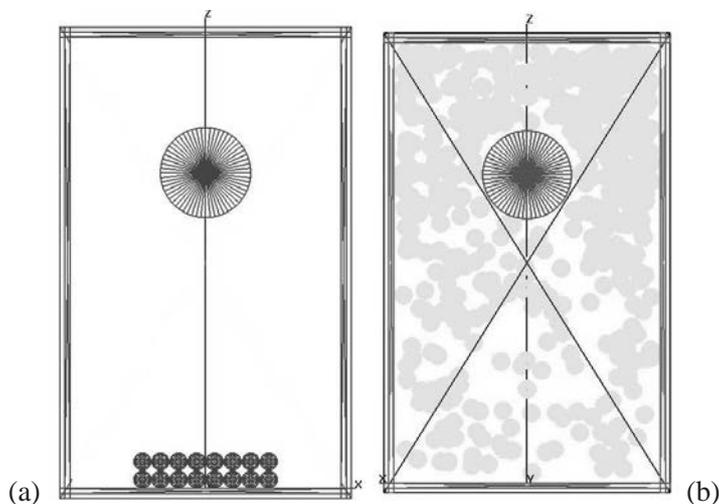


Fig. 5 – Configurations (a) initiale et (b) en cours d'essai des simulations du grenailage du tube par DEM, vue de face.

Nombre de billes	512
Diamètre des billes (mm)	2
Masse volumique des billes ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	6060
Diamètre du tube (mm)	10
Masse volumique du tube ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	8900
Masse volumique de la sonotrode ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	4430
Fréquence de vibration de la sonotrode (kHz)	20
Coefficient de restitution bille/bille	1
Coefficient de restitution (chambre en acier)	0,8
Coefficient de restitution (chambre en POM)	0,4
Coefficient de frottement	0,2
Pas de temps (s)	$1,25 \cdot 10^{-6}$

Tableau 1 – Paramètres utilisés dans les simulations DEM

### 3 Résultats

#### 3.1 Topographie de la surface du tube

La figure 6 présente les résultats obtenus pour le tube grenailé dans la chambre en acier. La profondeur moyenne et l'écart type ont été relevés pour les 5 zones de 3 lignes particulières, définies sur la figure 2b : la ligne située face à la sonotrode (ligne 0), la ligne orientée à  $45^\circ$  et la ligne située au sommet du tube (ligne 180). La variation de la profondeur moyenne mesurée sur chacune des 5 zones réparties dans la longueur du tube est très faible, quelle que soit la position de la ligne considérée. Le résultat étant identique pour le tube grenailé dans la chambre en POM, on en conclut que le grenailage est homogène dans la longueur du tube. Par la suite, la valeur de la profondeur considérée sera la moyenne des valeurs mesurées sur les 5 zones (lignes en pointillés sur la figure 6 et valeurs du tableau 2).

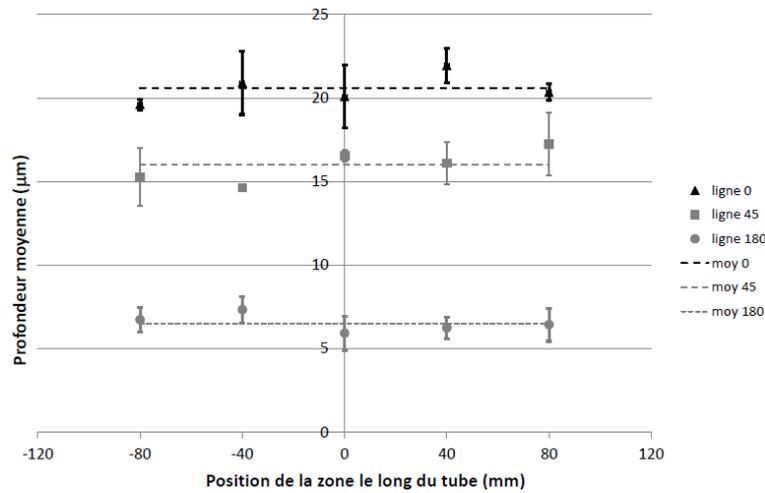


Fig. 6 – Profondeur moyenne des impacts et écart type pour les 5 zones situées face à la sonotrode (ligne 0), sur la ligne à 45° (ligne 45) et sur la ligne à 180° (ligne 180) pour le tube grenailé dans la chambre en acier.

localisation	profondeur moyenne (µm)	
	chambre en acier	chambre en POM
ligne -45	14	9,5
ligne 0	20,6	13,5
ligne 45	16	11,4
ligne 135	7	3,7
ligne 180	6,5	3,8
ligne 225	6,1	3,7

Tableau 2 – Profondeurs moyennes d’impact mesurées par microscopie confocale dans les 2 chambres.

Le tableau 2 montre la répartition des profondeurs moyennes d’impact en fonction de leur position sur la circonférence du tube pour les deux chambres. Les profondeurs relevées sur la partie inférieure du tube sont plus grandes que celles mesurées sur la partie supérieure (2,6 à 3 fois plus grande selon le matériau constitutif de la chambre). Sur la partie inférieure du tube, il y a une dissymétrie entre les profondeurs mesurées sur la ligne située face à la sonotrode et les deux zones latérales. Cette dissymétrie est beaucoup plus faible sur la partie supérieure du tube. Enfin, l’utilisation du matériau polymère pour la chambre a pour conséquence de diminuer les profondeurs des empreintes sur l’ensemble du tube (de 30 à 50 % selon la position considérée).

### 3.2 Simulations d’un impact normal par éléments finis

vitesse $V_n$ ( $m \cdot s^{-1}$ )	2	4	6	8	12
profondeur de l’empreinte $d$ (µm)	5,9	11,6	17,3	23,3	35,4

Tableau 3 – Profondeur des empreintes obtenues par simulations par éléments finis.

Pour chaque vitesse d’impact, nous avons relevé la profondeur de l’empreinte laissée sur le domaine élasto-plastique après le rebond de la sphère (tableau 3). Cette profondeur varie de 5,9 µm pour la vitesse d’impact de 2  $m \cdot s^{-1}$  à 35 µm pour la vitesse d’impact de 12  $m \cdot s^{-1}$ , ce qui est en accord avec les valeurs expérimentales (tableau 2). De plus, une régression linéaire permet d’avoir une bonne approximation de la profondeur  $d$  de l’empreinte suite à un impact normal avec une vitesse  $V_n$  ( $R^2 = 0,9998$ ) :

$$d = 2,9527 V_n - 0,1973. \quad (1)$$

### 3.3 Simulations du procédé par éléments discrets

La méthode des éléments discrets permet d'avoir accès aux statistiques des impacts, en termes de vitesse, d'angle et de position sur le tube. Par analogie avec la partie expérimentale, les paramètres analysés dans cette partie sont les valeurs moyennes obtenues sur des zones réparties sur la circonférence du tube faisant 3 mm de large et toute la longueur du tube.

La figure 7a montre la répartition des vitesses moyennes d'impact sur le tube pour les 6 zones définies à la figure 2b en fonction du matériau constituant la chambre. On observe des vitesses d'impact plus élevées sur la partie inférieure du tube que sur la partie supérieure, quel que soit le coefficient de restitution. Par contre, la figure 7b montre que le nombre d'impacts par  $\text{mm}^2$  est homogène sur la circonférence du tube. Il y a donc globalement le même nombre d'impacts sur les différentes parties du tube, mais ils se produisent avec des vitesses plus faibles sur la partie supérieure. D'autre part, la figure 7c montre la valeur de l'angle d'impact le plus probable en fonction de la zone considérée (un angle nul correspondant à un impact normal au tube). Cet angle varie selon la partie du tube considérée, mais il est intéressant de noter qu'il est essentiellement nul pour la zone située face à la sonotrode (ligne 0), quel que soit le coefficient de restitution. Enfin, l'utilisation d'une chambre avec des parois ayant un coefficient de restitution plus faible a pour effet de réduire le nombre d'impacts sur toute la circonférence du tube (divisé par 2).

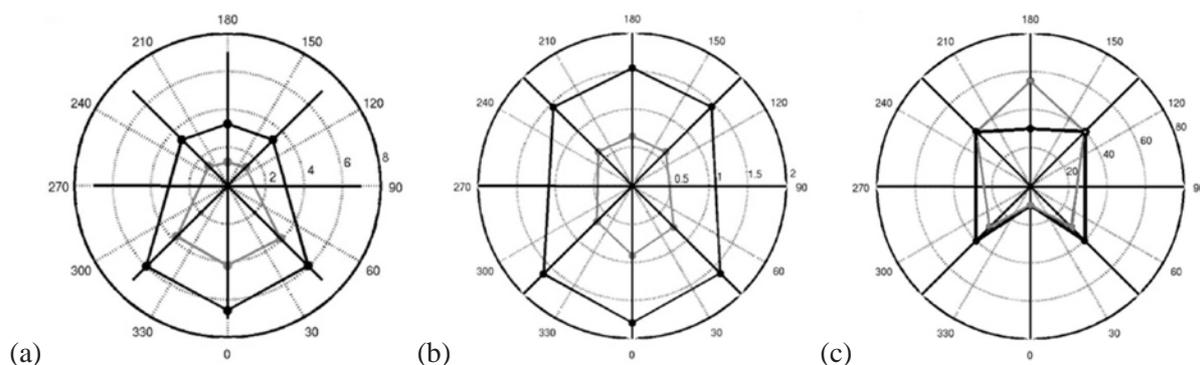


Fig. 7 – Répartition sur la circonférence du tube (a) de la vitesse d'impact en  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  (b) du nombre d'impacts par  $\text{mm}^2$  et (c) de l'angle d'impact le plus probable en degrés, en fonction du coefficient de restitution de la chambre (trait noir :  $e = 0,8$  - trait gris :  $e = 0,4$ ).

## 4 Discussion

Nos résultats numériques et expérimentaux montrent que, pour cette configuration de chambre de grenailage et les matériaux utilisés, la profondeur des impacts est directement liée à la vitesse d'impact. En particulier, si l'on s'intéresse à la ligne située face à la sonotrode, pour laquelle les simulations DEM montrent que les angles d'impact sont majoritairement normaux, nous pouvons utiliser la relation linéaire (1) obtenue par les simulations FEM pour déterminer la profondeur correspondante. On obtient :

- pour la chambre en acier, une profondeur numérique de  $19,2 \mu\text{m}$  pour une vitesse moyenne issue des simulations granulaires de  $6,57 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , ce qui est en accord avec la valeur de  $20,6 \mu\text{m}$  mesurée par microscopie confocale (tableau 2) ;
- pour la chambre en POM, une profondeur numérique de  $12,2 \mu\text{m}$  pour une vitesse moyenne issue des simulations granulaires de  $4,2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , ce qui est en accord avec la valeur de  $13,5 \mu\text{m}$  mesurée par microscopie confocale (tableau 2).

Une modélisation du procédé de grenailage ultrasonore par la méthode des éléments discrets avec des matériaux rigides en utilisant des coefficients de restitution constants avec la vitesse d'impact permet donc de modéliser avec une bonne précision la prise en compte du matériau constituant de la chambre et son effet sur la cinématique des billes. Pour améliorer le modèle discret, il est prévu de réaliser une étude expérimentale permettant de déterminer les coefficients de restitution pour les différents matériaux impliqués (bille/acier, bille/POM, bille/TA6V...). Il serait également intéressant de mesurer l'évolution du coefficient de restitution avec la vitesse d'impact, car on sait que sa valeur diminue quand la vitesse

d'impact augmente [5, 9].

## 5 Conclusion

Dans cette étude, nous avons analysé les impacts laissés sur un tube en cuivre par grenailage ultrasonore avec des billes en oxyde de zirconium dans une chambre parallépipédique. L'effet du matériau constituant les parois de la chambre a été testé en considérant 2 matériaux différents : de l'acier trempé et un matériau polymère (POM). L'analyse des tubes par microscopie confocale montre que, si cette configuration conduit bien à un grenailage homogène du tube dans sa longueur, les profondeurs moyennes d'impact sont plus faibles sur la partie supérieure du tube quel que soit le matériau utilisé pour la chambre. D'autre part, l'utilisation du POM conduit à des profondeurs moyennes d'impact 30 à 50% plus faibles qu'avec une chambre en acier. Une modélisation FEM avec Abaqus explicite de l'impact normal d'une sphère sur un massif élasto-plastique a permis de montrer que la profondeur d'impact était proportionnelle à la vitesse d'impact. Enfin, une modélisation DEM dans laquelle l'effet du matériau est pris en compte par la valeur des coefficients de restitution a permis de simuler l'ensemble du procédé de grenailage ultrasonore. Les résultats de ces simulations sont quantitativement et qualitativement en accord avec les mesures expérimentales.

Pour aller plus loin dans la compréhension des phénomènes mis en jeu lors du procédé de grenailage ultrasonore, il est important d'être capable de quantifier la nanostructuration de la surface impactée. Pour cela, la voie envisagée dans le futur consistera à utiliser les caractéristiques d'impact obtenues par simulations DEM (vitesse et angle d'impact moyens pour une configuration de grenailage donnée) comme données d'entrée dans un code de plasticité cristalline afin d'étudier le comportement du matériau à l'échelle du grain.

## Références

- [1] V.O. Abramov, O.V. Abramov, F. Sommer, O.M. Gradov, O.M. Smirnov. *Surface hardening of metals by ultrasonically accelerated small metal balls*, Ultrasonics 36, Elsevier, 1013-1019, 1998.
- [2] B. Bhuvanaghan, S. M. Srinivasan, B. Maffeo, R. D. Mclain, Y. Potdar, O. Prakash. *Shot peening simulation using discrete and finite element methods*, Advances in Engineering Software 41, 1266-1276, 2010.
- [3] P.A. Cundall, O.D.L. Strack. *A discrete numerical model for granular assemblies*, Géotechnique 29, 47-65, 1979.
- [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] D. Guban. *Inelastic collision and the Hertz theory of impact*, American Journal of Physics 68, 920-924, 2000.
- [6] T. Hong, J. Y. Ooi, B. Shaw. *A numerical simulation to relate the shot peening parameters to the induced residual stresses*, Engineering Failure Analysis 15, 1097-1110, 2008.
- [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. McNamara, E. Falcon, *Simulations of vibrated granular medium with impact-velocity-dependent restitution coefficient*, Physical Review E 71 031302, 2005.
- [10] 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.
- [11] M. Micoulaut, S. Mechkov, D. Reirant, 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.
- [12] J.J. Moreau. *Some numerical methods in multidody dynamics : application to granular material*, European Journal Mechanics A/Solids 13, Elsevier, 93-114, 1994.
- [13] F. Radjaï, V. Richefeu. *Contact Dynamics as a nonsmooth discrete element method*, Mechanics of Materials 41, Elsevier, 715-728, 2009.
- [14] H. Zahouani, M. Assoul, R. Vargiolu, T. Mathia. *The morphological tree transform of surface motifs. Incidence in tribology*. International Journal of Machine Tools and Manufacture 41, Elsevier, 1961-1979, 2001.

- [15] M. Zarwel, C. Nougier-Lehon, G. Kermouche, T. Hoc. *Modélisation du microbillage par ultrasons*, 10ème Colloque National en Calcul des Structures, CSMA 2011, Giens, 9-13 mai 2011.
- [16] [www.lmgc.univ-montp2.fr/LMGC90](http://www.lmgc.univ-montp2.fr/LMGC90)