

Grenailage ultrason : expériences et simulations

J. BADREDDINE^a, E. ROUHAUD^a, M. MICOULAUT^b, D. RETRAINT^a, S. REMY^a, M. FRANCOIS^a, P. VIOT^b, G. DOUBRE-BABOEUF^c, D. LE SAUNIER^c, V. DESFONTAINE^d

a. *Laboratoire des Systèmes Mécaniques et d'Ingénierie Simultanée (LASMIS), 12 rue Marie Curie, 10000 TROYES*

b. *Laboratoire de Physique Théorique de la Matière Condensée (LPTMC), 4 place Jussieu, 75252 PARIS*

c. *SNECMA Evry-Corbeil, route Henri Auguste Desbrières BP 81, 91003 EVRY*

d. *SONATS SA, 2 rue de la Fonderie BP 40538, 44475 CARQUEFOU CEDEX*

Résumé

Nous avons étudié le procédé de grenailage ultrason sous deux aspects : a) un modèle numérique 3D de la dynamique des billes dans l'enceinte de traitement basé sur la théorie des gaz granulaires, b) un dispositif expérimental développé pour mesurer la distribution des vitesses des billes dans l'enceinte et au niveau de la surface traitée. L'intérêt d'une telle étude est de proposer une méthode expérimentale qui donne accès aux trajectoires de billes et de valider le modèle numérique pour optimiser les paramètres de ce procédé, utilisé par exemple en aéronautique.

Abstract

The process of ultrasonic shot peening has been studied from two aspects: a) a 3D numerical model of the shot motion in the peening chamber based on the theory of granular gases, b) an experimental setup developed for measuring the shot velocity distribution in the chamber and impact locations on the peened surface. The aim of such study is to propose an experimental method providing shot trajectories in order to validate the 3D model for the process parameter optimization, used for example in the aeronautic industry.

Mots clés : grenailage ultrason, expérience, simulation

1 Introduction

Le grenailage ultrason est un procédé de traitement de surface mécanique qui consiste à bombarder une pièce (TOP) à l'aide de billes sphériques (SHOT). Les billes sont placées dans une enceinte de traitement étanche constituée des parois (WALL), de la sonotrode (BOT) et de la pièce à traiter. Un générateur produit un signal électrique sinusoïdal à 20 kHz qui est transmis aux bornes d'un convertisseur piézo-électrique qui lui-même met en vibration la sonotrode. Cette vibration est utilisée pour propulser les billes à grande vitesse vers la pièce. La multitude d'impacts créée à la surface de celle-ci induit des contraintes résiduelles de compression dans le matériau, ayant pour effet l'amélioration de ses caractéristiques mécaniques ainsi que la tenue en fatigue de la pièce. Ces contraintes résiduelles dépendent fortement des paramètres du procédé comme la vitesse des billes, leurs angles d'impact et le recouvrement de la surface [1,2,3,4].

Le modèle présenté ici simule la dynamique de sphères rigides placées dans une enceinte rectangulaire et propulsées vers une surface plane par une membrane vibrante, comme le montre la figure 1. Ces sphères représentent les billes. Une dynamique moléculaire utilisant un algorithme par évènements [5] permet de suivre la trajectoire des sphères. En simulant des milliers d'impacts sur la surface à traiter, on est capable de réaliser des études statistiques sur les vitesses et les angles d'impact, ainsi que sur la fréquence et la distribution des impacts.

Le modèle détecte les impacts « bille-bille » (SHOT) et ceux entre les billes et les différentes parois (WALL, BOT et TOP), et prend en compte la dissipation d'énergie pendant l'impact à l'aide de coefficients de restitution normaux (C_{SHOT} , C_{WALL} , C_{BOT} , C_{TOP}) et tangentiel (μ). Le coefficient tangentiel est considéré constant et de valeur $\mu = 5/7$ [6,7]. Les coefficients normaux (C_i , $i = \{\text{SHOT}, \text{WALL}, \text{BOT}, \text{TOP}\}$) suivent en revanche une loi de puissance (1) avec vitesse seuil, conformément à des modèles phénoménologiques [7] et des expériences [8] :

$$C_i(v) = \begin{cases} C_0^i & \text{si } v < v_0^{shot} \\ C_0^i (v/v_0^{shot})^{-1/4} & \text{si } v > v_0^{shot} \end{cases}, \text{ où } v \text{ est la vitesse d'une bille} \quad (1)$$

Les coefficients de restitution normaux constants à de faibles vitesses seront fixés comme ceci : $C_0^{SHOT} = 0.91$ (bille en Acier 100C6), $C_0^{BOT} = 0.91$ (sonotrode en Titane), $C_0^{TOP} = 0.6$ (échantillon en Aluminium) et $C_0^{WALL} = 0.6$ (Enceinte en Aluminium). [8,9]

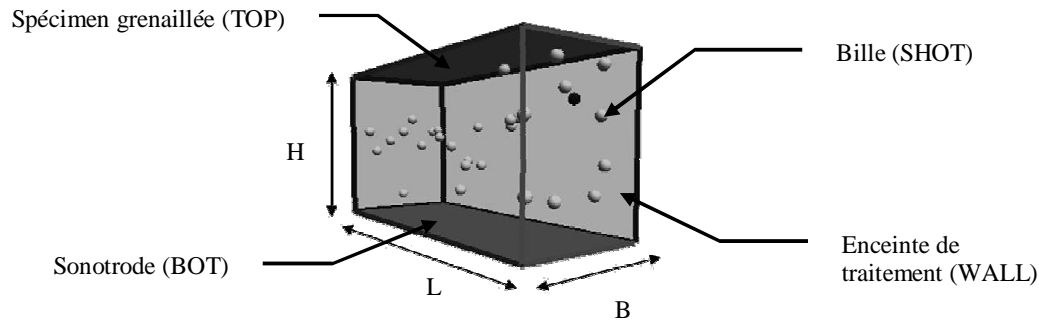


FIG. 1: Illustration du modèle de grenailage ultrason pour une enceinte de traitement parallélépipédique.

D'un point de vue expérimental, plusieurs méthodes existent pour mesurer la vitesse de projectiles [10,11,12]. Certaines de ces méthodes comme [12], qui utilisent le déphasage entre les signaux obtenus par deux microphones distants l'un de l'autre et qui enregistrent les temps d'impact, peuvent être utilisées dans le cas du grenailage classique où les trajectoires des particules sont généralement connues. En revanche, il n'est pas de même pour le grenailage ultrason pour lequel les particules utilisées possèdent des trajectoires aléatoires. Cela rend la mesure des vitesses des billes au cours du traitement très difficile et explique en partie le peu de données disponibles. Le dispositif expérimental développé combine à la fois un moyen de mesure optique qui donne accès aux trajectoires des billes au cours du traitement, ainsi qu'un moyen de mesure électromécanique qui donne accès aux vitesses normales d'impact sur l'échantillon grenailé.

2 Simulations

Le grenailage ultrason produit des trajectoires de billes aléatoires durant le traitement qui génèrent un recouvrement et un état de contraintes homogènes. Dans cette section, on illustrera les capacités du modèle en étudiant l'effet du nombre de billes sur la distribution des vitesses normales et angles d'impact. On testera 3 quantités de billes : 5g (45 billes), 10g (90 billes) et 20g (181 billes). Une enceinte à base rectangulaire ($L = 85$ mm, $B = 35$ mm, $H = 45$ mm) et des billes de diamètre $\varnothing = 3$ mm seront utilisés dans les calculs du §2. La sonotrode quant à elle vibrera avec une amplitude de $50\mu\text{m}$ crête-à-crête. Les données extraites de chaque calcul correspondent à une durée de grenailage de 30 secondes et qui correspond respectivement, en termes d'impacts sur la pièce, à 17434, 35088 et 67812 impacts pour les quantités de billes citées ci-dessus.

2.1 Distribution des vitesses d'impact

L'augmentation de la quantité de billes dans l'enceinte se traduit par une augmentation des interactions Bille-Bille, et donc par une diminution de la vitesse moyenne d'impact et du pourcentage d'impacts lié aux grandes vitesses.

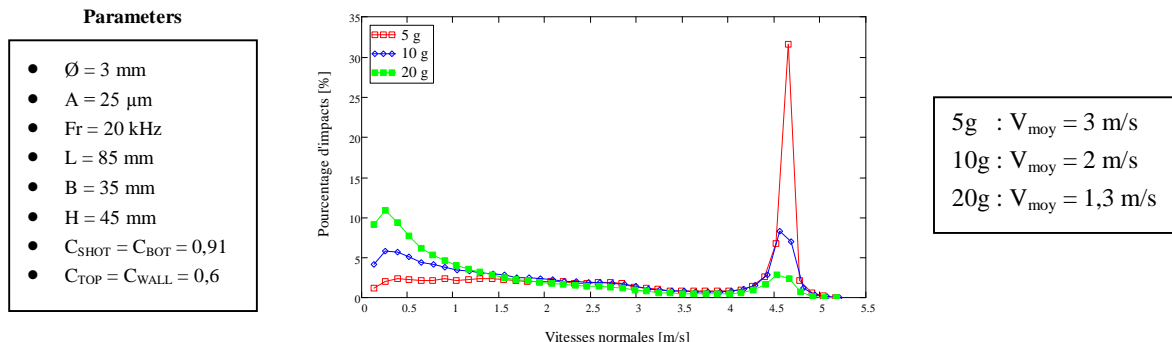


FIG. 2 : Distribution des vitesses normales d'impact au niveau du spécimen grenailé, pour différentes quantités de billes. (□□□) 5g = 45 billes, (◇◇◇) 10g = 90 billes, (■ ■ ■) 20g = 181 billes.

Comme le montre la figure 2, avec 5g de billes (45 billes) 47% des impacts possèdent une vitesse normale supérieure à 4 m/s, tandis qu'avec 20g de billes (181 billes) seuls 10% des impacts en sont concernés. Pour les faibles vitesses ($V_z < 1$ m/s), cela concerne environ 57% des impacts pour 20g de billes contre 16% pour 5g. On retrouve également cette évolution au niveau de la vitesse normale moyenne qui vaut 3m/s lorsqu'on utilise 45 billes et 1,3 m/s pour 181 billes. Cette vitesse moyenne garde quant à elle une valeur constante au cours du traitement.

2.2 Distribution des angles d'impact

Si l'on s'intéresse à présent aux angles d'impact, on s'aperçoit que plus le système est dense (nombre de billes important), et plus la quantité d'impacts normaux diminue. Cela se voit clairement à travers la distribution des angles d'impact dans la figure 3.

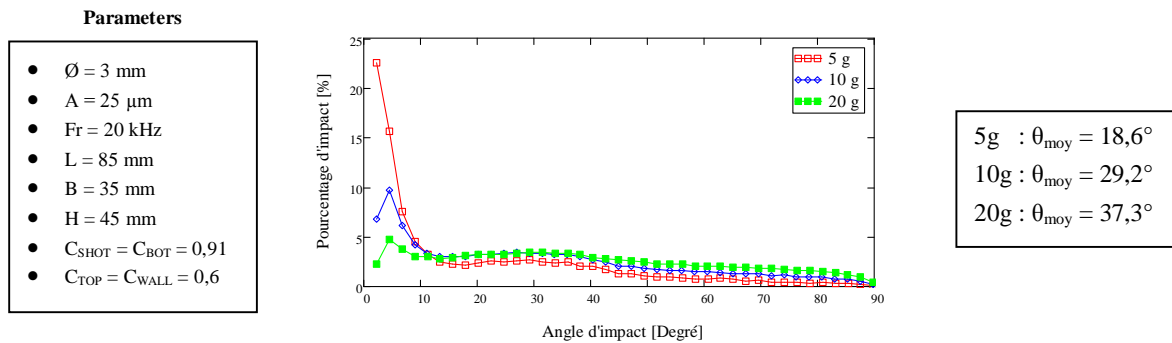


FIG. 3: **a)** Distribution des angles d'impact au niveau du spécimen grenailé, pour trois quantités de billes. (□□□) 5g = 45 billes, (◇◇◇) 10g = 90 billes, (■ ■ ■) 20g = 181 billes.

Pour un système dilué (5g de billes), plus de 50% des impacts ont un angle d'incidence inférieur à 10° par rapport à la normale de la surface impactée, contre 17% pour un système dense (20g de billes). De même 6,5% des impacts font un grand angle d'incidence supérieur à 60° avec 5g de billes, contre 22,3% avec 20g. Ces résultats poussent à penser qu'il existe une relation entre la vitesse normale et l'angle d'impact d'une bille.

2.3 Corrélation entre vitesse et angle d'impact

Pour éclaircir ce point, on trace sur un même graphique et pour une même quantité de billes la distribution des vitesses normales d'impact pour : les impacts faisant un angle d'incidence inférieur à 10° , supérieur à 60° et la distribution complète.

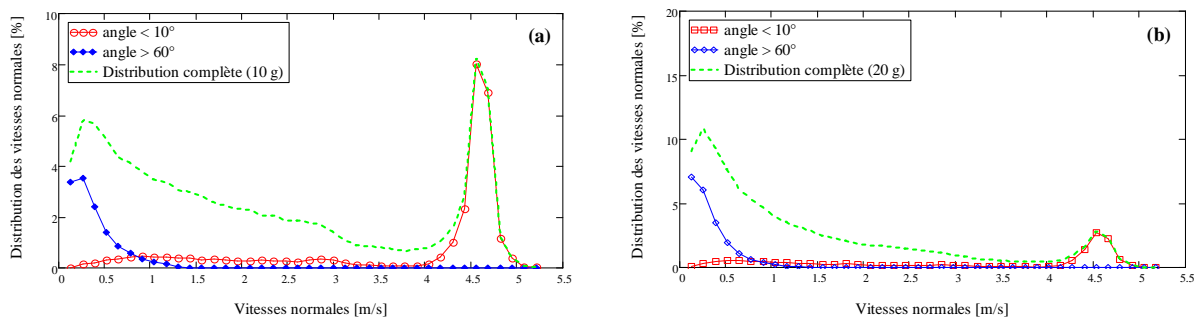


FIG. 4: **a)** Corrélation entre la distribution des vitesses normales d'impact et les angles d'impact pour 10g de billes. (□□□) Distribution pour des angles d'impact inférieurs à 10° , (◇◇◇) Distribution pour des angles d'impact supérieurs à 60° , (- - -) Distribution complète pour 10g de billes. **b)** Corrélation entre la distribution des vitesses normales d'impact et les angles d'impact pour 20g de billes. (□□□) Distribution pour des angles d'impact inférieurs à 10° , (◇◇◇) Distribution pour des angles d'impact supérieurs à 60° , (- - -) Distribution complète pour 20g de billes.

Les figures 4.a et 4.b permettent de mettre en évidence la corrélation entre vitesse normale et angle d'impact pour respectivement 10g et 20g de billes. On obtient dans les deux cas les mêmes conclusions : la grande majorité des impacts normaux (inférieur à 10°) possède une grande vitesse d'impact (ici > 4,0 m/s), contrairement aux impacts quasi-tangentiels (supérieur à 60°) qui possèdent de faibles vitesses d'impact (ici < 1,0 m/s). Cela s'explique par la présence de deux familles de billes. La première correspond aux billes qui effectuent des allers-retours directs entre la pièce et la sonotrode et qui possèdent de grandes vitesses normales ainsi que de faibles angles d'incidence. La seconde famille correspond aux billes qui sont déviées au cours de leur déplacement vers le spécimen, en départ de la sonotrode, et qui atteignent généralement ce dernier avec de faibles vitesses d'impact et des angles d'incidence importants.

3 Expériences

Le montage expérimental que nous avons développé permet d'avoir accès aux trajectoires des billes dans l'enceinte et au recouvrement de la pièce (méthode optique), ainsi qu'aux vitesses normales d'impact au niveau du spécimen (méthode électromécanique). À partir de la multitude des trajectoires capturées, nous pouvons déduire les coordonnées (X,Y,Z) des billes à différents instants, leurs vitesses (V_x, V_y, V_z) avant et après impact, ainsi que les angles d'impact θ mesurés par rapport à la normale de la surface impactée. Dans cette partie nous exposerons les premiers résultats préliminaires de l'étude de faisabilité de la méthode de validation expérimentale. Pour ce faire, nous prendrons le cas d'une enceinte parallélépipédique, de base rectangulaire (85 x 36 mm) et de 360 mm de hauteur en partant de la surface active de la sonotrode, dans laquelle sont placées 50 billes en Acier 100C6 de 2 mm de diamètre.

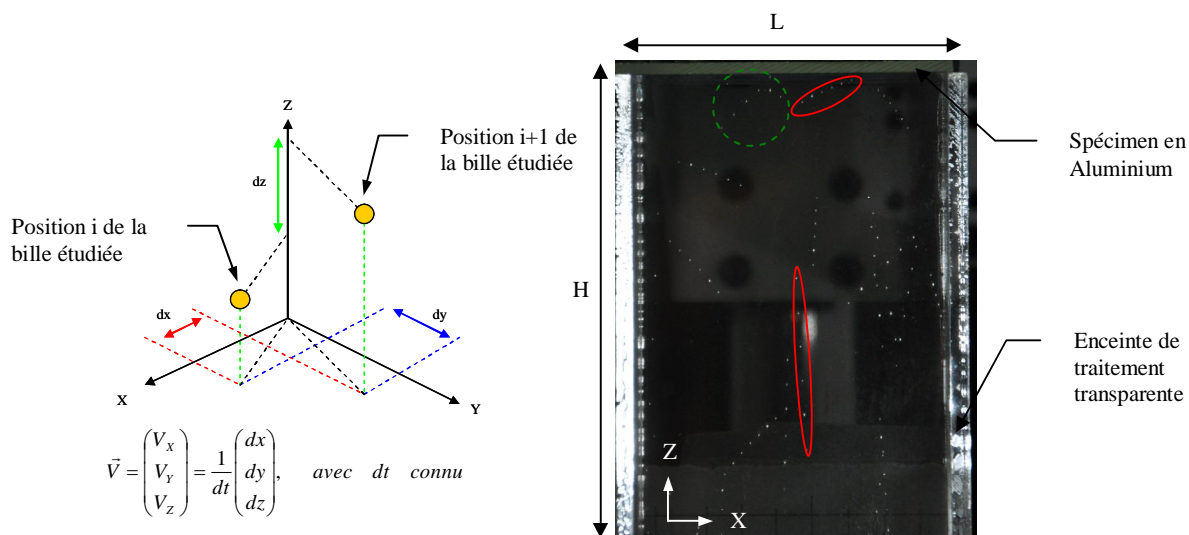




FIG. 5 : Mesure de la vitesse des billes à partir de clichés obtenus avec la méthode expérimentale. Trajectoires de billes en vol libre dans l'enceinte  Trajectoire déviée par un impact avec une paroi 

Dans la figure 5, on aperçoit différentes trajectoires qui nous renseignent sur des grandeurs physiques comme les vitesses et angles d'impact, ainsi que sur des paramètres numériques comme les coefficients de restitution des différentes parois. En parallèle, nous avons utilisé notre modèle afin de reproduire numériquement les conditions expérimentales de cet essai. Les premiers résultats préliminaires de cette comparaison Numérique-Expérimentale sont exposés ci-après.

3.1 Vitesse des billes

La multitude de clichés prise lors des essais nous donne un accès direct à la composante verticale des vitesses V_z des billes, est donc à la distribution des vitesses normales d'impact au niveau du spécimen. La distribution de vitesse étant le pourcentage d'impact dont la vitesse se trouve dans un intervalle de vitesse défini entre 0 et V_{max} , la vitesse normale maximale enregistrée.

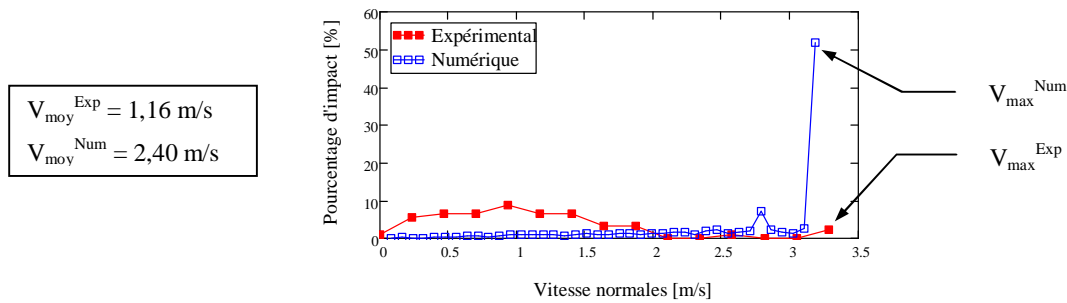


FIG. 6: Distribution des vitesses normales d'impact au niveau de la surface grenillée. (■) Distribution expérimentale obtenue à partir de 46 impacts, (■) Distribution numérique obtenue à partir de 2513 impacts.

Dans la figure 6 on remarque des différences non négligeables entre les distributions de vitesses normales expérimentales et numériques. Expérimentalement, la distribution est maximale pour une vitesse normale de 0,9 m/s, tandis que numériquement elle l'est pour $V_{\max}^{\text{Num}} = 3,2$ m/s. Il est important de préciser que la courbe numérique se base sur 2513 impacts, contrairement à la courbe expérimentale qui ne se base que sur 46 trajectoires extraites d'une dizaine de clichés, donnant lieu à une statistique très pauvre. On note toutefois que les plages des vitesses normales numériques et expérimentales sont similaires.

3.2 Taux de recouvrement

Si l'on s'intéresse aux taux de recouvrement de la pièce obtenus expérimentalement et numériquement après 30 secondes de traitement, on observe des résultats relativement proches.

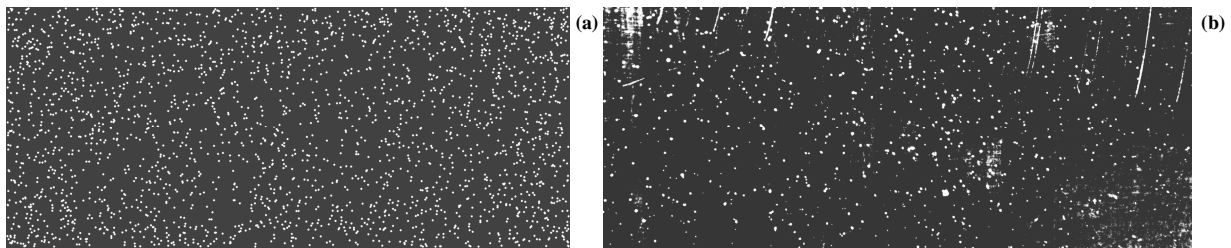


FIG. 7: Distribution des points d'impact sur le spécimen permettant de remonter à son taux de recouvrement R. **a)** Taux de recouvrement numérique du spécimen $R = 7,3$ %. **b)** Taux de recouvrement expérimental du spécimen $R = 4,3$ %.

Les figures 7.a et 7.b correspondent respectivement aux recouvrements des spécimens obtenus numériquement et expérimentalement. On observe des taux de recouvrement relativement proches entre la simulation ($R = 7,3$ %) et l'expérience ($R = 4,3$ %). Même si le modèle semble surestimer légèrement le nombre d'impacts, on note que dans la figure 7.b une fraction des impacts n'y apparaît pas à cause de leurs faibles énergies d'impact.

4 Conclusions

Grâce au modèle, il est maintenant possible d'étudier en détail la dynamique des billes lors d'une opération de grenailage ultrason et d'en extraire des informations clés sur les vitesses et angles d'impact, ou encore le recouvrement de la pièce grenillée. En se basant sur les résultats de l'étude du §2, on observe une relation direct entre la densité du système (volume occupé par les billes dans l'enceinte) et les différentes distributions présentées. On s'aperçoit donc que la dynamique des billes est complexe et dépend fortement des paramètres procédés, mais aussi que les vitesses et angles d'impact sont loin d'avoir une répartition équivalente et homogène.

D'un point de vue expérimental, le dispositif développé permet d'accéder en temps réel aux grandeurs physiques caractéristiques du grenailage ultrason et qui ont une influence directe sur la répartition des contraintes résiduelles introduites dans le matériau traité. Les premiers résultats préliminaires sont riches en information et facilement exploitables, ce qui rend ce dispositif très prometteur. D'un point de vue numérique, on s'aperçoit que notre modèle permet d'obtenir des résultats relativement proches et du même ordre de grandeur que ceux obtenus expérimentalement. Les différences obtenues peuvent être liées à plusieurs

facteurs comme la différence de statistique qui existe entre le modèle et la méthode optique. L'utilisation de capteurs piézoélectriques devrait nous permettre de résoudre ce problème.

Remerciements

Nous souhaitons exprimer nos remerciements les plus sincères à SNECMA pour leur support financier de ces travaux, qui s'inscrivent dans le projet MAIA.

Références

- [1] H.Y. Miao, S. Larose, C. Perron, M. Lévesque, *On the potential applications of a 3D random finite element model for the simulation of shot peening*, Advances in Engineering Software 40 (2009), pp.1023–1038
- [2] Y.M. Xing, J. Lu, *An experimental study of residual stress induced by ultrasonic shot peening*, Journal of Materials Processing Technology 152 (2004), pp. 56-61
- [3] B.N. Mordyuk, G.I. Prokopenko, *Ultrasonic impact peening for the surface properties' management*, Journal of Sound and Vibration 308 (2007), pp. 855-866
- [4] B.L. Boyce, X. Chen, J.W. Hutchinson, R.O. Ritchie, *The residual stress state due to a spherical hard-body impact*, Mechanics of Materials 33 (2001), pp. 441-454
- [5] N.V. Brilliantov, F. Spahn, J.M. Hertzsch et T. Pöschel, *Model for collisions in granular gases*, Physical Review (1996) E 53, 5382
- [6] R.M. Brach, *Impact dynamics with applications to solid particle erosion*, Int. J. Impact Engineering (1998) vol. 7, pp. 37-53
- [7] S. McNamara, E. Falcon. *Simulations of vibrated granular medium with impact-velocity-dependent restitution coefficient*, Physical Review (2005) E 71, 031302
- [8] M. Micoulaut, S. Mechkov, D. Restraint, P. Viot, M. François, *Granular gases in mechanical engineering: on the origin of heterogeneous ultrasonic shot peening*, Granular Matter (2007) 9, pp. 25-33
- [9] M. Micoulaut, D. Restraint, P. Viot, M. François, *Heterogeneous ultrasonic shot peening: experiment and simulation*, ICSP9 (2005), Marne la Vallée, France, pp. 119-124
- [10] Y. Jiyan, W. Xiaoming, L. Yongxin, *Velocity and position measurement for projectile using double optical detectors and reflectors*, Symposium on Photonics and Optoelectronics (2009)
- [11] M. Sommerfeld, N. Huber, *Experimental analysis and modelling of particle-wall collisions*, Int. J. Multiphase Flow 25 (1999), pp. 1457-1489
- [12] A. Hribernik, G. Bombek, *Improved method for shot particle velocity measurement within a shotblasting chamber*, Flow Measurement and Instrumentation 17 (2006), pp. 99-105