



HAL
open science

Grenailage ultrasonore hétérogène

Matthieu Micoulaut, Delphine Retraint, Pascal Viot, Manuel François

► **To cite this version:**

Matthieu Micoulaut, Delphine Retraint, Pascal Viot, Manuel François. Grenailage ultrasonore hétérogène. 17e congrès français de mécanique, Aug 2005, Troyes, France. hal-02615050

HAL Id: hal-02615050

<https://utt.hal.science/hal-02615050>

Submitted on 2 Nov 2023

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.

Grenaillage ultrasonore hétérogène

Matthieu Micoulaut[‡], Delphine Reira[†], Pascal Viot[‡] et Manuel François[†]

[‡]Laboratoire de Physique Théorique des Liquides, Université Pierre et Marie Curie,
Boîte 121, 4, place Jussieu 75252 Paris Cedex 05

[†]Laboratoire des Systèmes Mécaniques et d'Ingénierie Simultanée,
Université de Technologie de Troyes, BP 2060, 10010 Troyes Cedex
mmi@lptl.jussieu.fr

Résumé :

Nous étudions un modèle de sphères dures inélastiques dans une enceinte à grenaillage dont la géométrie et les paramètres (fréquence, amplitude de la sonotrode, grenaille) sont identiques à ceux de notre montage expérimental. La distribution des impacts observés sur l'échantillon est hétérogène; cet effet est particulièrement sensible à la nature élastique ou inélastique des chocs sur la paroi latérale, caractérisée par le coefficient de restitution normal des collisions entre les billes et la paroi latérale. Plusieurs grandeurs microscopiques sont calculées et discutées en fonction des expériences de grenaillage.

Abstract :

The behaviour of an ultrasonic shot peening process is observed and analyzed by using a model of inelastic hard spheres that are fluidized by a vibrating bottom wall (sonotrode) in a cylindrical chamber. A marked heterogeneous distribution of impacts appears when the collision between the shot and the side wall becomes inelastic. Several microscopic quantities are computed and compared to experiment.

Mots-clefs :

Modèle de sphères dures, grenaillage ultrasonore, coefficient de restitution, gaz de billes.

1 Introduction

Pour modifier le comportement mécanique d'une pièce soumise à des contraintes, un traitement de surface est généralement très efficace. Le grenaillage de précontrainte est un moyen courant de réaliser un tel traitement en projetant à grande vitesse de petites billes d'acier sur la surface de la pièce à traiter. On introduit, grâce aux impacts, des déformations plastiques-superficielles pour produire simultanément un durcissement par écrouissage et des contraintes superficielles de compression susceptibles de s'opposer aux efforts de la pièce en fonctionnement et d'améliorer ainsi sa résistance à la fatigue et à la corrosion [1].

Une technique de projection de billes appelée *grenaillage ultrasonore* consiste à soumettre le fond d'une enceinte de grenaillage à une vibration de 20 *kHz* par l'intermédiaire d'une sonotrode [2]. Ceci permet de projeter les billes vers le couvercle de l'enceinte qui constitue l'échantillon à grenailler. Ce mode de grenaillage dépend nécessairement des paramètres du dispositif comme le nombre de billes, leur diamètre, l'amplitude de vibration ou encore la fréquence. Mais il dépend aussi de paramètres physiques plus difficilement accessibles comme la dissipation d'énergie du système induite par la plastification des parois, l'angle d'impact ou la vitesse d'impact, autant de paramètres liés aux précédents mais qu'il est difficile de mesurer en temps réel. L'objet de cette communication est précisément de comprendre comment certains de ces paramètres physiques affectent de manière très significative le grenaillage. Pour décrire le phénomène de grenaillage, nous utilisons un modèle de sphères dures inélastiques,

dont on réalise une simulation numérique de dynamique moléculaire, dans une géométrie aussi proche que possible de celle du montage expérimental. En dernier lieu, nous confrontons nos résultats numériques avec les mesures effectuées.

2 Modèle de sphères dures

Nous considérons un système monodisperse composé de 200 billes dures inélastiques de diamètre 3 mm dans une enceinte cylindrique de rayon 35 mm et de hauteur 40 mm. L'enceinte de simulation est identique au montage expérimental. L'énergie est apportée au système par la vibration du fond de l'enceinte (la sonotrode) dont l'amplitude est de 25 μm et la fréquence de 20 kHz.

L'interaction de type sphère dure étant instantanée, la dynamique de ce système consiste en une succession de collisions binaires, entre lesquelles les particules suivent des trajectoires paraboliques, résultant de la force de gravité à laquelle sont soumises les particules. L'algorithme de la dynamique moléculaire consiste à rechercher les collisions successives qui vont intervenir soit entre billes, soit entre une bille et la sonotrode, ou encore une bille et l'échantillon à grenailier. Pour rechercher la prochaine collision, on doit connaître pour chaque bille le partenaire (s'il existe) parmi toutes les collisions binaires possibles de la collision correspondant au temps de collision le plus court, le temps de collision entre chaque bille et la sonotrode, ainsi que celui entre chaque bille et l'échantillon. La collision correspondant au temps le plus court est retenu, on réactualise alors les positions de toutes les billes, on recalcule leurs vitesses en suivant une dynamique de bille soumise à une force de gravité. On fait aussi avancer le compteur du temps correspondant au temps de vol correspondant à l'obtention de la collision.

Les règles de collision sont comme suit. Pour une collision entre billes, on modifie les vitesses des deux billes concernées de la manière suivante:

$$\mathbf{v}'_{i,j} = \mathbf{v}_{i,j} \pm \frac{1+c}{2} [(\mathbf{v}_j - \mathbf{v}_i) \cdot \hat{\mathbf{n}}] \hat{\mathbf{n}} \quad (1)$$

où $\mathbf{v}_{i,j}$ représentent les vitesses respectives de la particule i et de la particule j avant la collision et $\mathbf{v}'_{i,j}$ celles après la collision; c est le coefficient de restitution normal des vitesses et $\hat{\mathbf{n}}$ est un vecteur unitaire dont la direction est portée par la droite passant les centres des sphères i et j . Le signe \pm est lié au choix de la bille i ou j dans l'équation.

Pour une collisions entre une bille et la paroi latérale de l'enceinte, la règle de collision est donnée par

$$\mathbf{v}'_{i,r} = \mathbf{v}_{i,r} - (1+c_w)(\mathbf{v}_{i,r} \cdot \hat{\mathbf{r}}_i) \hat{\mathbf{r}}_i \quad (2)$$

où $\mathbf{v}_{i,r}$ est respectivement la vitesse de la bille i dans le plan (x,y) avant collision (la vitesse primée est la vitesse après collision), $\hat{\mathbf{r}}_i$ est le vecteur unitaire radial de la particule i , et c_w le coefficient de restitution entre la bille et la paroi latérale.

Pour les collisions entre une bille et la sonotrode et une bille et l'échantillon à grenailier, on a respectivement:

$$v'_{i,z} = v_S - v_{i,z} \quad v'_{i,z} = -(1+c_t)v_{i,z} \quad (3)$$

où $v_{i,z}$ est la composante verticale de la vitesse de la particule i et v_S la vitesse de la sonotrode, supposée ne comprendre qu'une vitesse verticale. Le coefficient de restitution bille-sonotrode est ici pris égal à 1 ce qui revient à renormaliser l'amplitude de vibration de la sonotrode. c_t est le coefficient de restitution normal de collision entre une bille i et l'échantillon.

Notons que les vitesses tangentielles de collisions sont supposées être conservées durant la collision, ce qui revient à négliger la friction des particules au moment de leur choc.

Nous nous sommes principalement intéressés à mettre en évidence les effets induits par les collisions inélastiques sur les parois latérales du cylindre (appelées par la suite “*chocs latéraux*”), c_w devient alors un paramètre ajustable, alors que les autres coefficients de restitution sont gardés constants et égaux à 0.91 qui est la valeur typique pour les vitesses mises en jeu entre billes [3] et une valeur raisonnable pour les collisions entre l'échantillon et les vitesses.

3 Résultats

La plupart de nos résultats ont été obtenus pour des simulations de 5×10^6 collisions correspondant à un temps écoulé de 26 secondes. Avant de procéder à une analyse quantitative du régime stationnaire de grenailage montrant l'influence importante des collisions billes-paroi latérale, nous allons nous intéresser au régime transitoire qui porte aussi la signature de ce phénomène. Nous avons réalisé une simulation préliminaire de 5000 collisions correspondant au régime transitoire du grenailage qu'il est également intéressant de caractériser [4].

3.1 Régime transitoire

A l'instant initial, les particules sont placées aléatoirement juste au dessus de la sonotrode avec de faibles vitesses initiales. Ces conditions initiales diffèrent des conditions initiales expérimentales où les billes sont déposées sur la surface de la sonotrode et supposées au repos, mais cela permet de lever la dégénérescence du temps de collision initial qui serait importante en début de simulation si l'on prenait des conditions identiques aux conditions expérimentales. Après un temps correspondant à quelques collisions, nous avons vérifié que l'évolution temporelle des grandeurs telles que la densité d'impacts était indépendante de la condition initiale.

Nous nous intéressons aux collisions correspondant au régime transitoire du grenailage. Bien que ce régime soit difficilement accessible à l'expérience, nous avons d'abord considéré la période transitoire aux faibles temps durant laquelle le régime permanent de grenailage s'établit. Ce régime permanent est caractérisé par un nombre d'impacts qui croît linéairement avec le temps. On voit ici que ce dernier survient (voir Figure 1 gauche) à un temps de l'ordre de 50 *ms* pour des collisions latérales quasi-élastiques et pour des temps plus courts dans le cas de collisions inélastiques ($c_w = 0.60$). Les effets des chocs latéraux inélastiques ne sont pas visibles aux faibles temps (insert de la figure gauche) lorsque $t < 2$ *ms* puisque l'on a alors principalement des chocs quasi-verticaux entre la sonotrode et l'échantillon. La séparation intervient pour des temps plus grands quand les chocs latéraux en incidence oblique se multiplient.

3.2 Origine de l'hétérogénéité

Un des principaux effets des collisions inélastiques sur les parois est l'apparition d'une hétérogénéité marquée des impacts entre le centre et le bord de l'échantillon (Figure 2) signifiant que le grenailage d'une pièce peut être sous certaines conditions, très inhomogène. Alors que le grenailage est, à première vue, homogène pour un coefficient de restitution $c_w = 0,91$, la distribution devient fortement hétérogène lorsque le coefficient est abaissé à 0,3. Le même résultat est obtenu pour la sonotrode (le fond de l'enceinte, non représenté). Ces observations obtenues par simulation peuvent être précisées en considérant la fréquence d'impacts surfacique N en fonction du rayon de l'échantillon (Figure 1 droite). On voit alors que les régimes de

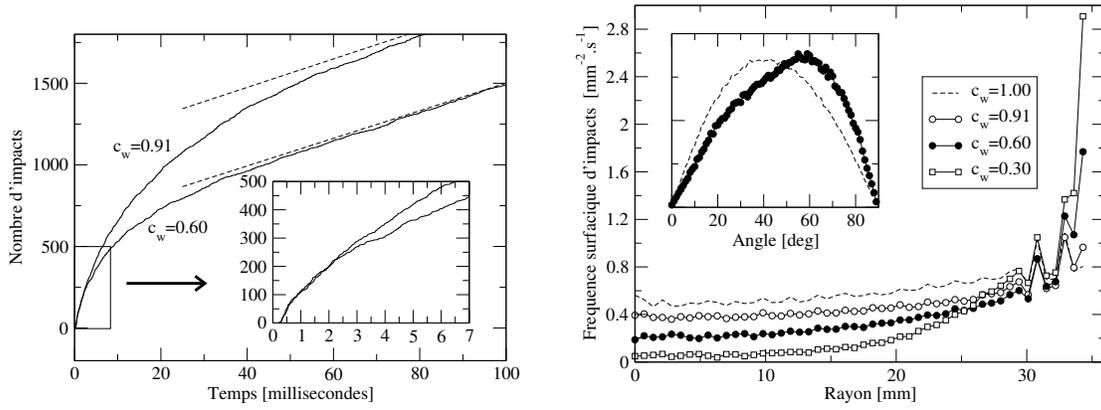


FIG. 1 – A gauche: Régime transitoire de grenailage sur l'échantillon pour deux valeurs de coefficients de restitution du cylindre ($c_w = 0.91$ et $c_w = 0.60$). Les lignes pointillées correspondent au régime stationnaire avec une fréquence de grenailage moyenne respective de 8716 s^{-1} et 8459 s^{-1} . L'insert est un agrandissement de la figure aux temps de l'ordre de la milliseconde. A droite: Fréquence surfacique d'impact sur l'échantillon en fonction du rayon pour différentes valeurs du coefficient de restitution c_w . La ligne brisée correspond à des collisions latérales purement élastiques. L'insert correspond aux angles d'impact sur l'échantillon pour deux valeurs de c_w .

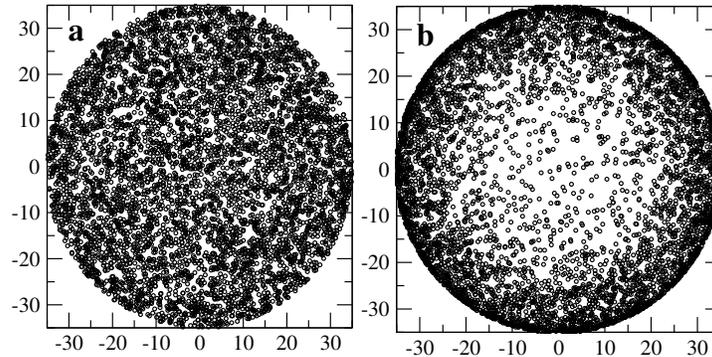


FIG. 2 – Profil d'impact sur l'échantillon pour deux valeurs du coefficient de restitution c_w au bout de 6000 collisions bille-échantillon. a) $c_w = 0.91$, b) $c_w = 0.30$.

grenailage peuvent varier d'une distribution pratiquement homogène dans le cas d'une collision latérale élastique ($c_w = 1.0$), avec une fréquence variant de 0,5 à $0,7 \text{ mm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ entre le centre et le bord, à une distribution très hétérogène donnant lieu à une variation de N d'un ordre de grandeur dans le cas $c_w = 0,30$. Intuitivement, on peut effectivement s'attendre à ce que le nombre d'impacts en périphérie de l'échantillon soit plus élevé en raison des rebonds multiples sur les parois latérales. Cet effet est à l'origine de l'augmentation modérée de la fréquence d'impacts avec le rayon pour $c_w = 1.0$ (Figure 1 droite) mais il ne peut suffire, seul, à expliquer l'augmentation substantielle de N pour des collisions latérales inélastiques. On s'aperçoit en outre que l'angle d'impact sur l'échantillon subit également les effets de la non-élasticité de la paroi latérale, passant d'une distribution centrée autour de 40° à une distribution asymétrique ayant un plus grand nombre d'impacts sous incidence rasante ($\theta > 60^\circ$, voir Figure 1 droite, insert).

3.3 Champ de vitesses

Le champ de vitesses à l'intérieur de l'enceinte peut également être déduit de la simulation. Il montre, lui aussi, un effet provenant des collisions latérales inélastiques. On voit en particulier que sous certaines conditions, il est possible d'obtenir l'apparition de rouleaux convectifs comme l'illustre la Figure 3c avec un mouvement centré approximativement autour du point ($R = 26 \text{ mm}, H = 12 \text{ mm}$). Ce résultat déjà été obtenu dans une simulation d'un gaz granulaire vibré [5] dans des conditions géométriques et de vibration très différentes et provient

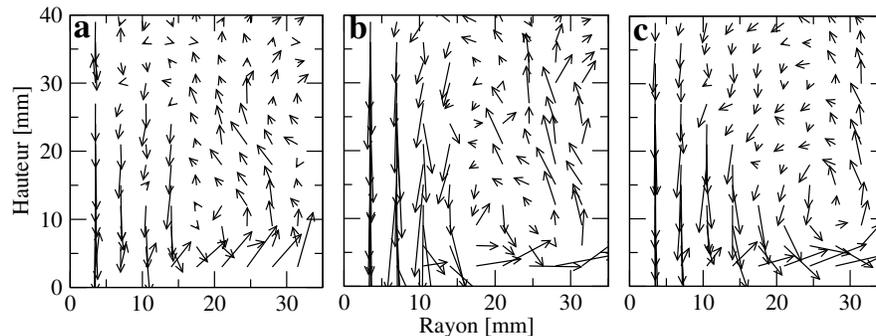


FIG. 3 – Profil du champ de vitesses pour différents coefficients de restitutions c_w . a) $c_w = 0.91$, b) $c_w = 0.60$ et c) $c_w = 0.3$. Profils moyennés sur le temps de la simulation.

de la dissipation de l'énergie sur les parois de l'enceinte. En l'absence d'échantillon, l'énergie cinétique des billes proches des parois latérales est dissipée d'avantage que celle au milieu du cylindre, les billes en rive ont alors tendance à monter plus facilement que les précédentes générant un gradient de densité conjointement à un gradient d'énergie cinétique produit par la dissipation. La présence de l'échantillon modifie sensiblement le profil du champ de vitesse en raison de la deuxième partie de l'équation (3) rajoutée par rapport au modèle de [5], mais pas les rouleaux apparaissant aux dissipations élevées.

4 Expériences de grenailage et caractérisation des impacts

Nous avons comparés ces résultats avec des données expérimentales préliminaires obtenues sur des échantillons en aluminium grenailés par des billes d'acier sous l'effet d'une sonotrode en titane. Pour tenter de reproduire une non-élasticité graduelle des parois, nous avons utilisé des parois latérales en aluminium nu (Al) ou recouvert de ruban adhésif (AIS). Le comptage des impacts sur l'échantillon est fait aux faibles grenailages correspondant à un temps d'exposition de l'ordre de la seconde.

Les résultats (Figure 4b) montrent clairement que le coefficient de restitution des vitesses est abaissé dans le cas d'une enceinte (AIS) vers une valeur de c_w de l'ordre de 0,3. Un comptage (par échantillonnage circulaire) de la fréquence surfacique d'impacts montre une tendance à l'augmentation de N à mesure que le rayon augmente, avec des valeurs variant entre 0,65 en moyenne au centre à 0,95 en périphérie. Avec un comptage différent (par une distribution de rectangles), nous obtenons sensiblement les mêmes valeurs (Figure 4a, lignes horizontales), soit respectivement $0,73 \pm 0.16$ et $1,03 \pm 0.25$. Dans le cas d'une paroi en aluminium, le comptage donne $1,25 \pm 0,12$ et $1,66 \pm 0,39$. Nous constatons donc que la fréquence d'impacts sur l'échantillon est globalement diminuée avec l'enceinte (AIS) par rapport à (Al) ce qui est

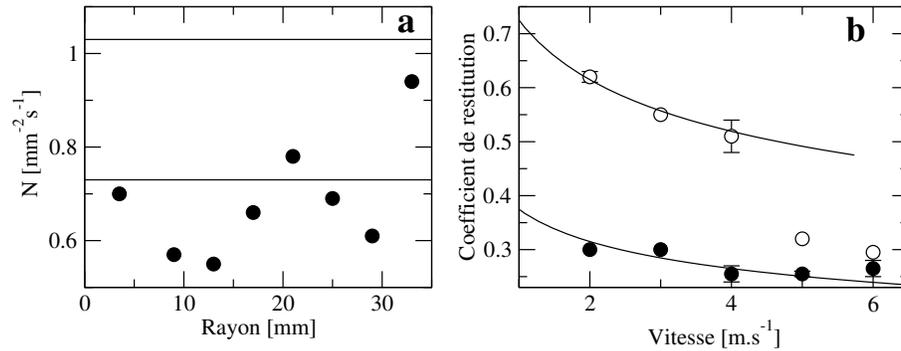


FIG. 4 – a) Fréquence surfacique d'impacts N en fonction du rayon pour un échantillon d'aluminium grenailé dans le cas (AIS). Les lignes horizontales correspondent à un comptage différent (voir texte). b) Coefficients de restitution en fonction de la vitesse pour une enceinte avec paroi latérales en aluminium (\circ) et recouvertes de ruban adhésif (\bullet). Les courbes proviennent du modèle elasto-plastique de Thornton [6].

vérifié par la simulation. Les différences entre la simulation et les expériences peuvent être dues à l'influence du coefficient de restitution (pris constant dans la simulation) et au profil de vibration de la sonotrode (pris constant dans la simulation alors que des mesures ont montré que l'amplitude de vibration de la sonotrode est plus importante en périphérie qu'au centre).

5 Conclusions

Ces résultats montrent que même si la tendance à l'augmentation de la fréquence surfacique d'impacts est clairement observée aux faibles temps de grenailage, des études plus approfondies aux temps longs seront nécessaires pour caractériser l'hétérogénéité du grenailage. Il sera alors préférable de suivre le profil d'usure de l'échantillon en fonction du rayon plutôt que le comptage du nombre d'impacts qui est seulement réalisable en l'absence de leur recouvrement. De même, la prise en compte de coefficients de restitution dépendant de la vitesse (illustré par la Figure 4b) permettra de mieux rapprocher la simulation de l'expérience et d'étudier d'autres effets comme ceux induits par la fréquence ou l'amplitude de vibration de la sonotrode.

Références

- [1] J.P. Chu, J.M. Rigsbee, G. Banas, H.E. Elsayed-Ali, Mater. Sci. Eng. **A260** (1999) 260
- [2] C. Pile, M. François, D. Retraint, E. Rouhaud, J. Lu, *Modelling of ultrasonic shot peening process*, Proceedings of the 7th International Conference on Residual Stresses (2004); H. Chardin, F. N'Guyen, F. Grillon, M. Jeandin, Mater. Manufact. Processes. **10** (1995) 1101.
- [3] S. McNamara, E. Falcon, Lect. Notes Phys. **624** (2003) 347; voir aussi A.H. Kharaz, D.A. Gorham, Phil. Mag. Letters **80** (2000) 549
- [4] La durée de l'impact est de l'ordre de $1\mu\text{s}$, W. Goldsmith *Impact: the theory and physical behaviour of colliding solids*, Dover Publ. 1960.
- [5] J. Talbot, P. Viot, Phys. Rev. Lett. **89** (2002) 064301.
- [6] C. Thornton, J. Appl. Mech. **64** (1997) 383.