

Identification et quantification expérimentale des mécanismes de dissipations d'un amas de matériau granulaire confiné latéralement dans une cavité vibrante

A. Sternberger^{a,b}, J-M. Génevaux^b, A. Pelat^b

a. IRT Jules Verne, Chemin du Chaffault, F-44340 Bouguenais

b. LAUM UMR 6613, Université du Maine, Avenue Olivier Messiaen, F-72085 Le Mans Cedex 9
antoine.sternberger@irt-jules-verne.fr

Résumé

L'utilisation de matériaux granulaires pour l'amortissement vibratoire de structures creuses intéresse l'industrie du transport dans sa recherche de techniques innovantes. L'objectif de ce travail est d'identifier expérimentalement les mécanismes de dissipation liés à la présence d'un matériau granulaire et de les comparer aux solutions existantes afin d'optimiser le traitement pour obtenir un amortisseur efficace et léger. En effet, l'allègement des structures est un enjeu central dans l'industrie du transport pour des raisons écologiques et économiques évidentes. Un matériau granulaire dissipe l'énergie vibratoire d'une structure primaire lorsque les grains qui le composent sont mis en mouvement relatifs les uns par rapport aux autres. Cette dynamique est obtenue lorsque l'accélération de la structure dépasse 1g et que le volume de granulaire présente une surface libre. L'étude de la réponse vibratoire d'une cavité pouvant contenir un matériau granulaire, disposée sur un système résonant à un degré de liberté est présentée. La complexité des mécanismes de dissipation (inter-grains, à l'interface avec les parois rigides, lors de phase de non contact avec la paroi vibrante si l'accélération est supérieure à 1g..) explique l'absence de modèle mathématique simple pouvant décrire physiquement son comportement.

Abstract

The use of granular material to damp the vibrations of hollowed structures concerns the transport industry to find innovative technics. The aim of this work is to identify experimentally the dissipation induced by a granular material and compare them to existing solutions to get a lighter vibration's damper. In fact, the decrease of the structure's mass is a central goal for the transport industry for ecological and economical reason. A granular media can damp the vibration of a primary structure when the grains are in relative motion. This dynamic is obtained when the acceleration of the structure is above 1g and when the granular volume presents a free surface. The study of vibration's response of a cavity linked to a 1 degree of freedom system is presented. The complexity of the dissipative mechanism (grain-grain contact, interaction with the rigid walls, during the particle flight if the acceleration is above 1g..) explains the lack of mathematical models to describe this behavior.

Mots clés : vibrations, matériau granulaire, effet non-linéaire, dissipation d'énergie, expérience.

1 Motivations

L'allègement est un point central dans la conception d'une nouvelle structure de transport car le gain de masse permet d'économiser non seulement du carburant mais aussi des matières premières nécessaires à la construction. Cependant, si cet allègement n'est pas compensé par un système anti-vibratoire, de forts niveaux de vibrations peuvent être mesurés. Ces derniers peuvent entraîner une usure prématurée de la structure jusqu'à sa rupture.

L'utilisation d'un matériau granulaire permet de dissiper de l'énergie du fait des contacts dissipatifs entre les grains, s'ils sont mis en mouvement relatifs via la mise en vibration de la structure [1]. Les résultats de l'interaction de grains dans une cavité résonante [2] montrent que si ceux-ci sont positionnés aux ventres de vibration, il peuvent entraîner l'atténuation des vibrations d'une machine [3].

Deux grandes familles d'études sont menées (avec 1 grain [4], ou un volume de matériau granulaire [5]) mais en mesurant les décroissances des vibrations libres. La non-linéarité de la dissipation, vis-à-vis de l'amplitude telle que mise en évidence par [6] ne peut donc pas être quantifiée dans ces études.

L'identification de l'amortissement d'un système non-linéaire doit être faite via une oscillation forcée. L'observation du signal temporel et l'étude de ses composantes fréquentielles [7] permet de quantifier l'énergie dissipée par le système [8].

L'objectif de ce papier est de faire un lien entre la variation de la Fonction de Réponse en Fréquence (FRF) d'un système résonant et l'énergie dissipée par ce même système en utilisant différentes représentations (fft & courbes de Lissajous), dans différentes configurations de matériau granulaire, d'amplitude et de volume de confinement.

2 Analyse expérimentale

2.1 Etude du comportement modal

Cette étude se concentre sur la mise en vibration d'un système à 1 degré de liberté (voir Fig. 1). Il est composé d'une cavité rigide de masse $m_{\text{cavité}} = 3.140$ kg, guidée en translation dans la direction de la gravité et suspendue à deux plaques assimilable à une raideur. Une vibration forcée issue d'un signal sinusoïdal est appliquée à la base de la cavité via un pot vibrant. Une tête d'impédance (B&K 8001) est utilisée pour obtenir les composantes d'accélération et de force au point de chargement. Le matériau granulaire utilisé est composé de grains de verre sphériques de diamètre $\varnothing = 2$ mm.

L'acquisition de FRF est effectuée en faisant varier pas-à-pas la fréquence d'excitation du pot vibrant autour de la fréquence de résonance du système (voir Fig. 2). Pour chaque mesure, une valeur d'accélération est donnée et son amplitude est gardée constante durant toute la durée de l'acquisition. Différentes

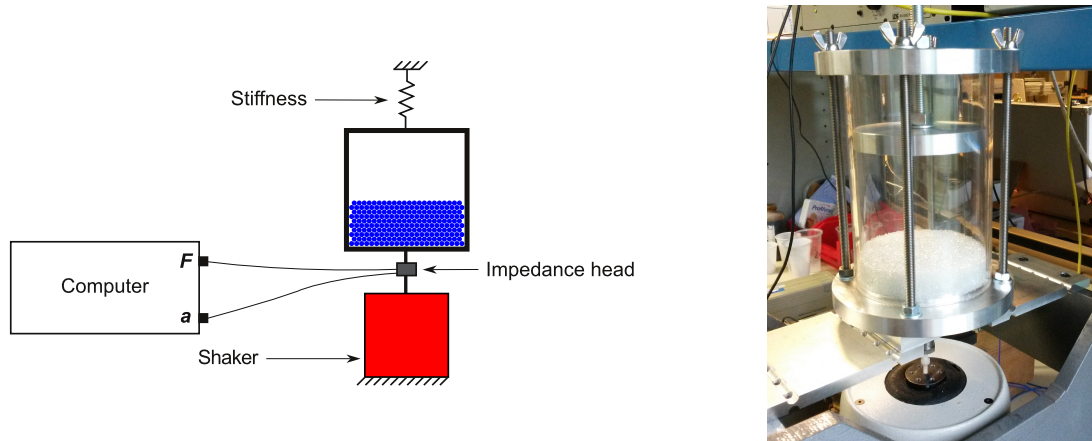
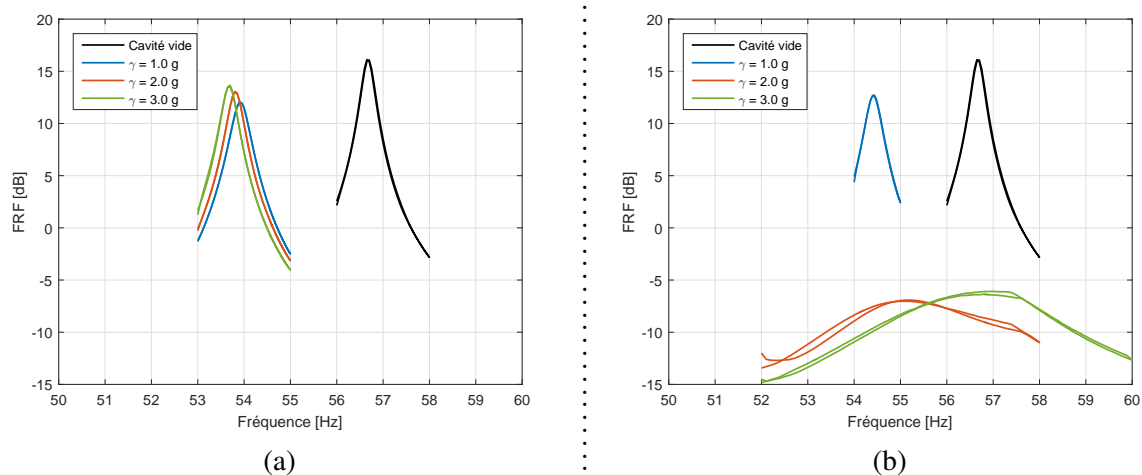


FIGURE 1 – Représentation schématique et photographie et du dispositif expérimental.

configurations sont étudiées permettant de mettre en évidence l'intérêt du matériau granulaire dans l'atténuation des vibrations.

FIGURE 2 – Fonction de réponse en fréquence du système résonant à 1ddl pour différentes configurations | (a) Masse indéformable - (b) Billes de verre $\varnothing = 2$ mm ($\text{ref}_{\text{FRF}} = 1 \text{ kg}^{-1}$).

Ce dispositif expérimental présente une réponse linéaire en fonction de l'amplitude d'excitation quand il est vide ou quand une masse indéformable y est ajoutée. L'ajout d'un ratio de masse $r_2 = \frac{m_{\text{ajout}}}{m_{\text{cavité}}} = 15\%$ présente deux configurations : masse indéformable ou un volume de grains. Nous ne détaillons pas ici le cas de grains compacts, pour lesquels la dissipation induite est sensiblement identique à celle d'une masse indéformable, les grains n'étant pas mis en mouvement relatifs.

Pour une accélération de consigne $\gamma_c = 1g$, la décroissance en fréquence et en amplitude de la résonance sont identiques pour la masse indéformable et le volume de grains (voir Fig. 2). Par contre, pour $\gamma_c > 1g$, une non-linéarité en fonction de l'accélération est mise en exergue, alors que la FRF est quasi-constante pour la masse indéformable. De plus, la largeur des pics montre un accroissement considérable de la dissipation pour le matériau granulaire en fonction de l'accélération.

2.2 Observation des signaux temporels

La source des dissipations peut être comprise par l'observation sur quelques périodes des signaux temporels d'accélération et de force dans les deux cas : masse indéformable et granulaires (Fig. 3).

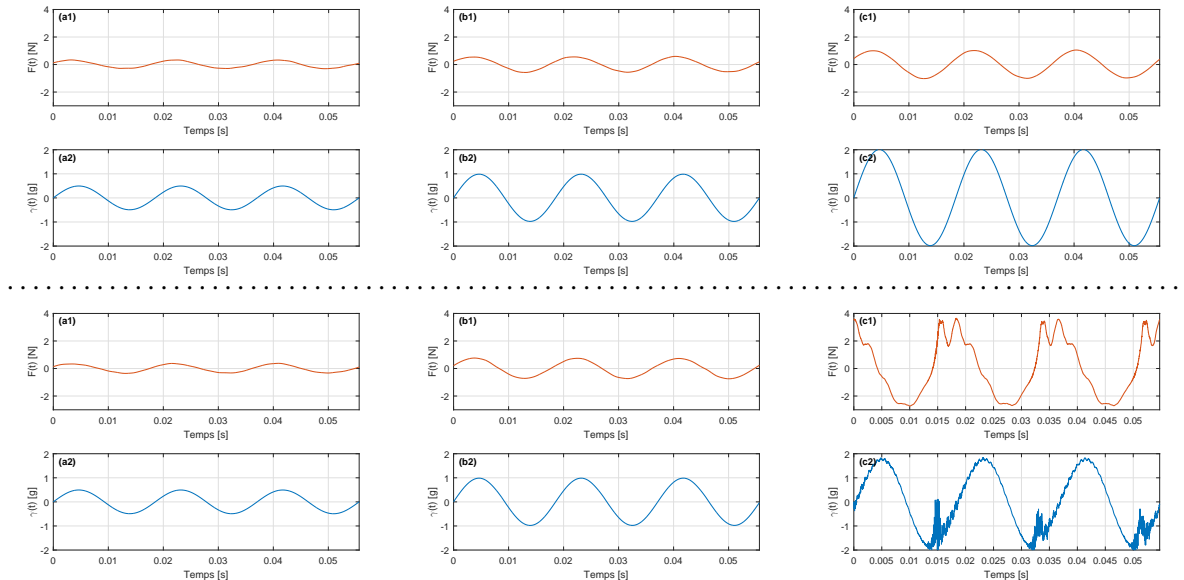


FIGURE 3 – HAUT : Masse indéformable, BAS : Billes de verre $\varnothing = 2$ mm | (a) $\gamma_c = 0.5g$, (b) $\gamma_c = 1.0g$, (c) $\gamma_c = 2.0g$ | (~ 1) Signal de force, (~ 2) Signal d'accélération | Représentation temporelle de signaux à la fréquence de résonance du système pour différents niveaux d'accélération crête γ_c .

Les signaux temporels dans le cas de la masse indéformable sont proportionnels à l'accélération crête. L'ajout d'une masse indéformable a un effet linéaire sur le système.

Dans le cas d'un matériau granulaire les signaux temporels avec une accélération crête de $\gamma_c = 1.0g$, sont doubles de ceux à $\gamma_c = 0.5g$. Par contre, pour la valeur $\gamma_c = 2.0g$ les signaux ne sont plus sinusoidaux du fait du décollement de la masse de grains lorsque l'accélération instantanée de la cavité est supérieure à $1g$. Ceci provoque des chocs qui sont ressentis sur les signaux de force et d'accélération qui perdent leur aspect sinusoidal. Ainsi, au delà de $\gamma_c = 1.0g$ les grains sont mis en mouvement relatifs entre eux et par rapport à la cavité.

Une étude fréquentielle est alors nécessaire pour caractériser d'éventuels transferts d'énergie à plus haute fréquence.

2.3 Etude fréquentielle

Un matériau granulaire est un milieu fortement non-linéaire. En fonction du type non-linéarité les reports d'énergie sur les harmoniques et sous-harmoniques (voir Fig. 4) sont différents.

Pour la masse indéformable, la présence de quelques harmoniques de rang supérieur sont discernables mais avec des amplitudes de -15 dB par rapport à l'amplitude de la fréquence fondamentale. Ces très faibles non-linéarités montrent que le dispositif expérimental n'est pas encore parfait.

Pour le matériau granulaire, le contenu fréquentiel à $\gamma_c = 1.0g$ est identique à celui de la masse indéformable : leurs comportements sont très proches. Cependant passé ce seuil, un peigne de raies constitué

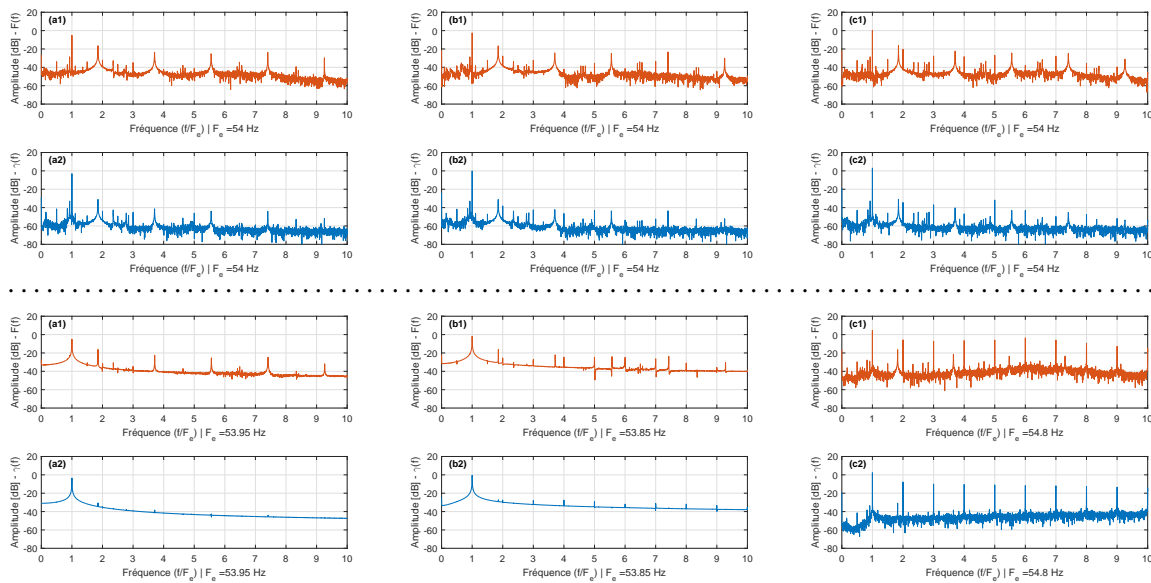


FIGURE 4 – HAUT : Masse indéformable, BAS : Billes de verre $\varnothing = 2$ mm | (a) $\gamma_c = 0.5g$, (b) $\gamma_c = 1.0g$, (c) $\gamma_c = 2.0g$ | (~1) Signal de force, (~2) Signal d'accélération | Représentation des spectres de signaux pour différents niveaux d'accélération crête γ_c .

des harmoniques de la fréquence du signal d'excitation est visible, provoqué par les chocs d'écrasement du tas de granulaire sur la cavité à la fin de leur temps de vol. La dissipation induite par les grains est donc amplifiée par les chocs d'écrasement.

Cette dissipation d'énergie peut être observée sur des courbes de Lissajous.

2.4 Dissipation d'énergie

Suite aux observations précédentes une analyse de la dissipation d'énergie (en Joules) induite par les grains peut être mise en place. En effet, comme on peut le voir sur les signaux FRF de la figure 2, le matériau granulaire comportant un grand nombre de grains peut être considéré en première approximation comme un amortisseur visqueux.

Les courbes de Lissajous exprimant la force en fonction du déplacement (voir Fig. 5) permettent de calculer l'aire interne qui quantifie l'énergie dissipée du système.

Les cycles présentent un léger biais à chaque oscillation, aussi la moyenne sur ~ 200 cycles est faite (voir Fig. 6). Pour la cavité vide avec ou sans masse indéformable, l'énergie dissipée est proportionnelle à l'accélération crête. Par contre l'ajout d'un matériau granulaire implique un accroissement non linéaire de l'énergie dissipée au delà $\gamma_c = 1.0g$. Pour $\gamma_c = 3.0g$, l'énergie dissipée est 7 fois supérieur à celle de la même masse indéformable.

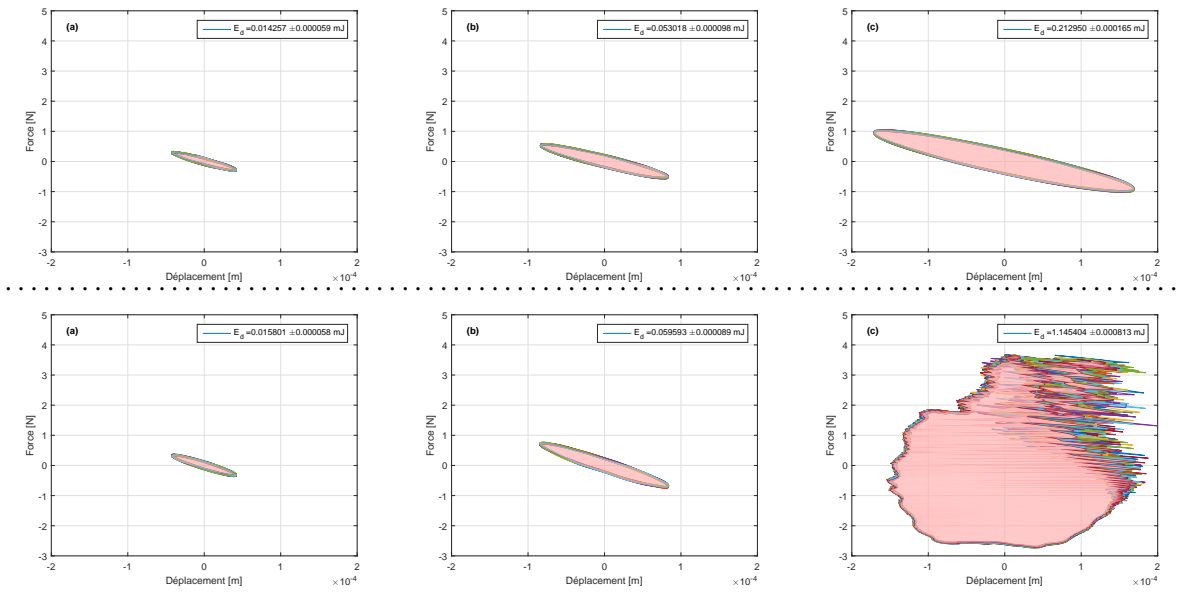


FIGURE 5 – HAUT : Masse indéformable, BAS : Billes de verre $\varnothing = 2$ mm, (a) $\gamma_c = 0.5g$, (b) $\gamma_c = 1.0g$, (c) $\gamma_c = 2.0g$. Représentation de l'énergie dissipée du système donnée directement en Joules pour différents niveaux d'accélération crête γ_c .

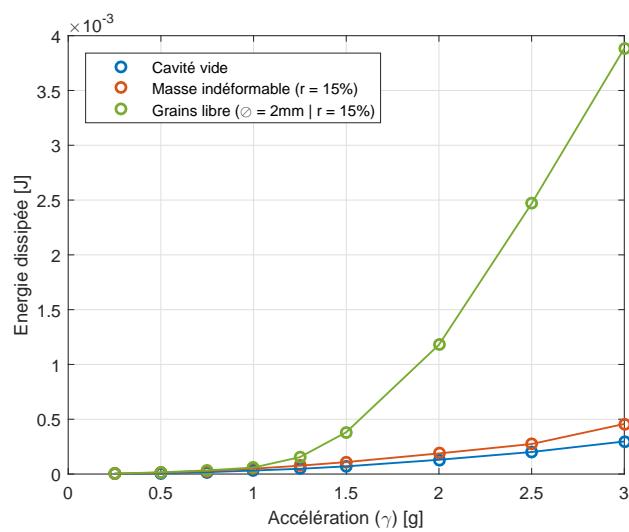


FIGURE 6 – Variation de la valeur d'énergie dissipée en fonction du traitement.

3 Conclusion

Cette étude présente une solution originale d'atténuation des vibrations utilisant un matériau granulaire. L'observation montre que l'efficacité apparaît pour des accélérations crête supérieures à $1g$. Le calcul du coefficient d'amortissement modal met en évidence cette dépendance non linéaire à l'accélération crête. L'observation du contenu spectral indique un report de l'énergie du système sur les harmoniques supérieures. La dissipation d'énergie peut être amplifiée 7 fois pour des accélérations de $3g$.

Lors de la présentation orale, une analyse plus approfondie des courbes de Lissajous permettra d'identifier la part d'énergie de dissipation issue de l'écrasement du tas de grain en fin de vol, de la part de dissipation due aux mouvements intergrains lorsqu'ils sont en contact avec la structure vibrante. De plus, ces résultats seront confrontés à ceux issus d'un modèle numérique basé sur la Discret Element Method (DEM) via le logiciel **LMGC90**. L'objectif de cette confrontation est de dégager les paramètres microscopiques influents.

Remerciements

Cette étude est effectuée dans le cadre de la Chaire VIBROLEG (Vibroacoustique des structures légères), financée par l'IRT Jules Verne (Institut de Recherche Technologique spécialisé dans l'étude des composites, matériaux métalliques et structures hybrides). Les auteurs associent les partenaires industriels et académiques de ce projet : Airbus, Bureau Veritas, CETIM, Daher, DCNS Research, General Electrics, STX France, le Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine et l'Université du Maine.

Références

- [1] A. Sternberger, J.-M. Génevaux, and A. Pelat, "Dissipation ajoutée expérimentalement à une structure par un amas de granulaire à surface libre," (Le Mans, FRANCE), 13^e Congrès Français d'Acoustique, 2016.
- [2] M. Saeki, "Analytical study of multi-particle damping," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 281, no. 3 - 5, pp. 1133 – 1144, 2005.
- [3] M. Heckel, A. Sack, J. E. Kollmer, and T. Pöschel, "Granular dampers for the reduction of vibrations of an oscillatory saw," *Physica A : Statistical Mechanics and its Applications*, vol. 391, no. 19, pp. 4442 – 4447, 2012.
- [4] C. N. Bapat and S. Sankar, "Single unit impact damper in free and forced vibration," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 99, no. 1, pp. 85 – 94, 1985.
- [5] M. Saeki, "Impact damping with granular materials in a horizontal vibrating system," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 251, pp. 153 – 161, March 2002.
- [6] W. Liu, G. R. Tomlinson, and J. A. Rongong, "The dynamic characterisation of disk geometry particle dampers," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 280, no. 3-5, pp. 849 – 861, 2005.
- [7] M. Sanchez and C. M. Carlevaro, "Nonlinear dynamic analysis of an optimal particle damper," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 332, no. 8, pp. 2070 – 2080, 2013.
- [8] M. Masmoudi, S. Job, M. S. Abbas, I. Tawfiq, and M. Haddar, "Experimental and numerical investigations of dissipation mechanisms in particle dampers," *Granular Matter*, vol. 18, no. 3, p. 71, 2016.