

CFA/VISHNO 2016

**Dissipation ajoutée expérimentalement à une structure
par un amas de granulaire à surface libre**A. Sternberger^a, J.-M. Génevaux^b et A. Pelat^c^aIRT Jules Verne, Chemin du Chaffault, 44340 Bouguenais, France^bLaboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine, Avenue Olivier Messiaen, Cedex9,
72085 Le Mans, France^cLAUM / ENSIM, Rue Aristote, 72000 Le Mans, France
antoine.sternberger@irt-jules-verne.fr

LE MANS

Les matériaux granulaires dissipent de l'énergie lorsqu'ils sont soumis à des vibrations suffisamment élevées pour mettre les grains en mouvement relatif. Si ces dernières sont dues aux vibrations d'une structure avec laquelle les granulaires sont en contact, alors la dissipation d'énergie est apportée à la structure. Lorsque les grains sont confinés dans des cavités de structures légères creuses, le niveau de dissipation dépend de différents paramètres, tels que l'amplitude d'excitation, la caractéristique physique des grains, les dimensions de la cavité, les propriétés du fluide environnant, les conditions aux limites entre grains et cavité, le taux de remplissage du volume disponible par les grains, etc. Par contre, lorsque les grains ne sont pas confinés dans une cavité et sont suffisamment nombreux pour se regrouper en amas, les mécanismes d'amortissement apportés à la structure sont différents, c'est l'objet de cette présentation. En effet, contrairement à l'expérience de Chladni, qui utilise un faible nombre de grains par unité de surface traitée, ici les grains ne sont pas éjectés mais se regroupent dans les zones où l'accélération est maximale si l'amplitude d'accélération dépasse un premier seuil. L'amas est alors sujet à plusieurs phénomènes : écoulement des grains et ondes de surface à contre-courant de l'écoulement des grains. Si un second seuil d'accélération est dépassé, des geysers localisés intermittents apparaissent. L'influence de certains paramètres de contrôle du traitement anti-vibratoire par ajout de matériau granulaire sont ici étudiés expérimentalement. Autour du premier mode de vibration d'une plaque circulaire encastrée, la fréquence de résonance et le taux d'amortissement modal ajouté par le traitement sont mesurés en fonctions des paramètres de l'expérience.

Mots-clés : amortissement vibratoire, matériau granulaire, surface libre, non-linéaire, expérience.

1 Introduction

L'allègement des structures est un enjeu majeur dans l'industrie du transport. En effet, dans un contexte de réduction de consommation énergétique, la réduction de masse totale est recherchée, mais rend la structure plus vulnérable aux vibrations. Ces vibrations peuvent dans certains cas entraîner un endommagement prématuré.

Une solution originale d'amortissement vibratoire par ajout de matériaux granulaires est ici étudiée. Ce type de traitement tire parti de la dissipation de l'énergie vibratoire via l'interaction entre des billes en mouvement relatif. Outre le fait que leur présence donne une masse ajoutée au système, les contacts Bille-Bille et Bille-Structure sont aussi des facteurs de réduction des amplitudes d'oscillation. [1, 2].

La littérature est cependant peut abondante sur les aspects de modélisation et surtout dans les paramètres à faire varier pour obtenir un amortissement le plus efficace possible. En amont de ce travail de recherche, des mesures préliminaires sont effectuées afin de mettre en évidence la capacité des grains à agir sur le comportement modal d'une structure mais aussi de comparer son efficacité face à d'autres types de traitements (masse indéformable, matériau visco-élastique, etc.).

Nous nous basons ici sur une expérience en surface libre mettant en jeu une plaque circulaire encastrée, au centre de laquelle les matériaux granulaires sont placés. La capacité d'amortissement de matériaux granulaires n'est plus à prouver [3, 4], cependant les observations du comportement modal d'une plaque en surface libre, sur laquelle des grains sont disposés, n'ont pas encore été observées. L'efficacité de ce dispositif à atténuer les vibrations est ainsi étudiée. Les prochaines étapes de l'étude seront de mesurer les effets d'un confinement des grains et de dégager des modèles équivalents (amortissement & raideur) associés aux différentes configurations.

Après avoir présenté le dispositif expérimental, le document restitue les résultats de trois études paramétriques concernant la masse de matériau granulaire appliqué sur la plaque, l'amplitude d'accélération de l'excitation et

l'hygrométrie dans le matériau granulaire.

2 Dispositif expérimental

Nous utilisons lors de cette étude, une plaque en aluminium (Fig. 1) excitée en son centre par un pot vibrant sur laquelle on dispose en son centre un monticule de granulaires. On se concentre dans ce papier sur la résonance du premier mode de la plaque circulaire encastrée. L'excitation se fait à accélération constante pour chaque essai quelque soit la fréquence étudiée.

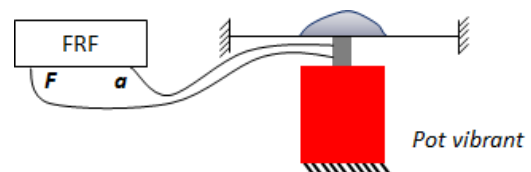
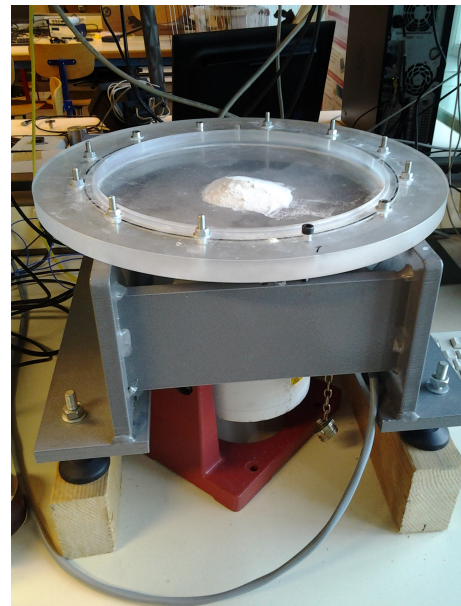


FIGURE 1 – HAUT : Montage de l'expérience de mise en vibration des granulaires / BAS : Schéma de l'expérience de mise en vibration des granulaires

Une tête d'impédance (B&K 8001) fixée entre le centre

de la plaque et le pot vibrant permet de mesurer en ce point force et accélération afin de calculer la fonction de réponse en fréquence de la structure. L'excitation est faite par un sinus pas-à-pas d'une durée de l'ordre de la minute pour l'ensemble des expériences présentées ici. Pour une configuration donnée, deux montées en fréquence sont effectuées. La première large bande pour identifier le pic de résonance et la deuxième à bande plus étroite et pas fréquentiel resserré. Le *facteur d'amortissement modal* est calculé par une méthode à -3dB au pic de résonance de cette deuxième montée en fréquence :

$$\zeta = \frac{\Delta f_{-3dB}}{2 \cdot f_{max}} \quad (1)$$

3 Etudes effectuées

3.1 Ajout de masse

L'ajout de masse, procédé connu pour atténuer les vibrations, présente l'inconvénient que pour être efficace, la masse mise en jeu doit être très importante et localisées sur les ventres de vibration. Utiliser des matériaux granulaires plutôt qu'une masse indéformable permet d'utiliser des mécanismes de dissipations originaux. La masse de la plaque utilisée dans les différentes expériences est $m_{plaque} = 184,9$ gr. On compare ici l'évolution du facteur d'amortissement modal pour un ajout de matériaux granulaire et pour une masse indéformable.

L'ajout de masse $m_{billes} = [0 \text{ gr}; 10 \text{ gr}; 20 \text{ gr}; 30 \text{ gr}; 40 \text{ gr}; 50 \text{ gr}]$ implique classiquement les décroissances de la fréquence et de l'amplitude de la résonance (Fig. 2).

Pour $a = 10 \text{ m.s}^{-2}$, les facteurs d'amortissement modaux sont identiques pour la masse indéformable et la masse de granulaires au sein de laquelle aucun mouvement n'est perceptible à l'œil. A l'inverse, pour $a = 70 \text{ m.s}^{-2}$, on observe des mouvements entre grains, ce qui se traduit par une augmentation significative du facteur d'amortissement modal. On peut donc déduire que plus le matériau granulaire est sollicité, plus il dissipe de l'énergie vibratoire. Cette variation d'accélération à masse constante de granulaires (passage du point A au point B) est étudiée dans la partie suivante.

3.2 Amplitude des oscillations

L'augmentation de l'amplitude des oscillations est donc étudiée à masse de granulaires constant ($m_{billes} = 50$ gr), pour des billes de verre de diamètre $\varnothing = [100; 700 \mu\text{m}]$. La figure 3 met en évidence un comportement non linéaire, par un accroissement de la fréquence de résonance [5] et de la dissipation avec l'accroissement de l'accélération imposée au centre (voir vidéos des expériences [6, 7]). On retrouve les configurations de l'étude précédente (Fig. 2) via les points A et B.

Le facteur d'amortissement modal est aussi influencé par cette variation d'amplitude d'accélération. En deçà d'un premier seuil $a = 10 \text{ m.s}^{-2}$, correspondant à l'accélération de la pesanteur, les billes rassemblées en amas au centre de la plaque n'ont pas de mouvements relatifs les unes par rapport aux autres. On a un comportement de masse indéformable. De plus aucune différence de comportement n'est observée entre les deux tailles de bille.

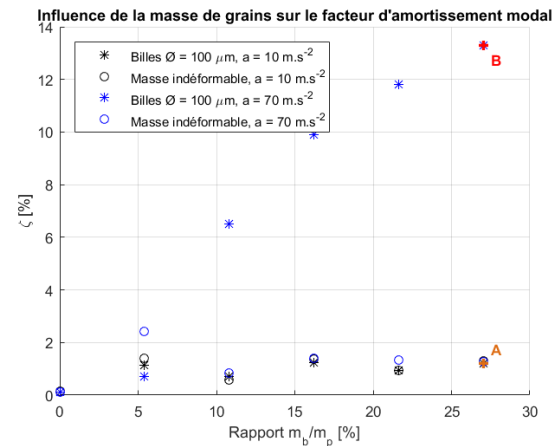
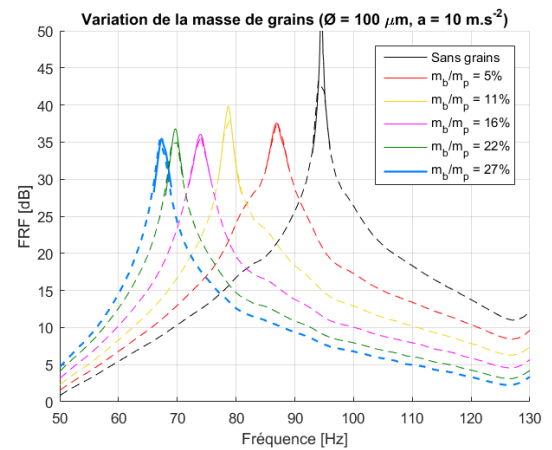


FIGURE 2 – HAUT : Variation de la fonction de réponse en fréquence accélération/force au centre de la plaque en fonction de la masse des granulaires, pour différentes accélérations (en tiret : grand pas fréquentiel, en ligne continue : petit pas fréquentiel) / BAS : Variation du facteur d'amortissement modal en fonction de la masse des granulaires, pour différentes accélérations.

Pour des billes de diamètre $\varnothing = 100 \mu\text{m}$, entre $a = 10 \text{ m.s}^{-2}$ et $a = 15 \text{ m.s}^{-2}$, il existe un seuil à partir duquel des ondes de surfaces convectives apparaissent à contre-courant de l'écoulement des billes qui descendent de l'amas. L'amas est alimenté en son centre par des billes qui remontent depuis le contact plaque-billes. Cet amas reste au centre de la plaque, contrairement à l'expérience de Chladni [8] où les grains se positionnent sur les nœuds de vibration d'une plaque. Plus l'amplitude d'accélération augmente, plus le facteur d'amortissement modal augmente lui aussi. A un second seuil, vers $a = 70 \text{ m.s}^{-2}$, des instabilités de surface apparaissent, signalées par des émissions intermittentes de geysers dont les positions sont aléatoires. A partir de cette valeur, le facteur d'amortissement modal diminue, car on a un étalement des grains sur la surface de la plaque encadrée.

Pour des billes de diamètre $\varnothing = 700 \mu\text{m}$ le seuil de déclenchement des mouvements inter-grains reste compris entre les deux valeurs $a = 10 \text{ m.s}^{-2}$ et $a = 15 \text{ m.s}^{-2}$. Par contre pour les accélérations comprises entre $a = 15 \text{ m.s}^{-2}$ et $a = 25 \text{ m.s}^{-2}$, le facteur d'amortissement modal est plus important que pour les petites billes. Un effet d'échelle est présent (ratio entre diamètre des billes et aire de la structure) entraînant une variation du seuil de déclenchement des mouvements inter-bille. Au delà d'un second seuil, entre $a = 25 \text{ m.s}^{-2}$ et $a = 30 \text{ m.s}^{-2}$, les billes sont éjectées du centre

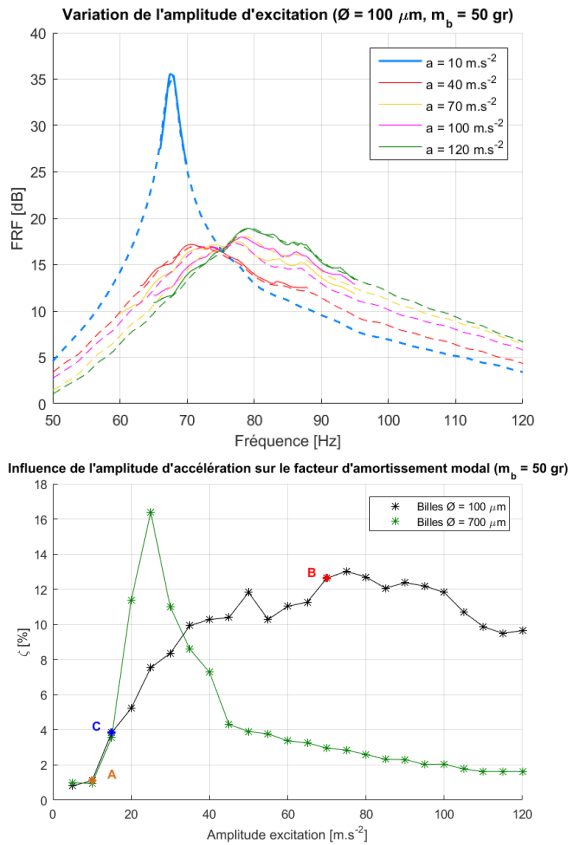


FIGURE 3 – HAUT : Variation de la fonction de réponse en fréquence accélération/force au centre de la plaque en fonction de l'accélération, pour une masse de granulaire de 50 gr (en tiret : grand pas fréquentiel, en ligne continue : petit pas fréquentiel) / BAS : Variation du facteur d'amortissement modal en fonction de l'accélération, pour une masse de granulaire de 50 gr.

de la plaque et logiquement le facteur d'amortissement modal décroît sans tendre néanmoins vers 0 car des billes restent sollicitées du fait de la forme propre de la plaque au premier mode. Ce phénomène d'étalement, plus important qu'avec les billes de diamètre plus petit, apparaît pour une amplitude d'excitation plus faible.

Ce phénomène se démarque ainsi des solutions couramment apportées pour l'atténuation des vibrations, tels que les matériaux visco-élastiques ou les systèmes de masse active (amortissement dynamique).

3.3 Variation de l'hygrométrie

Le taux d'humidité au sein de la masse de granulaires influe aussi sur la fonction de réponse en fréquence mesurée à niveau d'accélération constant (Fig. 4). La procédure suivie consiste en l'ajout d'une petite quantité d'eau, l'homogénéisation de la masse de granulaires par brassage avec une spatule, positionnement de l'amas au centre de la plaque, puis enfin mise en vibration de la plaque à une accélération donnée. Les accélérations ont été volontairement prises faibles pour garder les granulaires au centre de la plaque à chaque configuration et ainsi avoir des positions de grains sensiblement identiques dans toutes les expériences mises en place.

On observe dans un premier temps que l'ajout d'eau

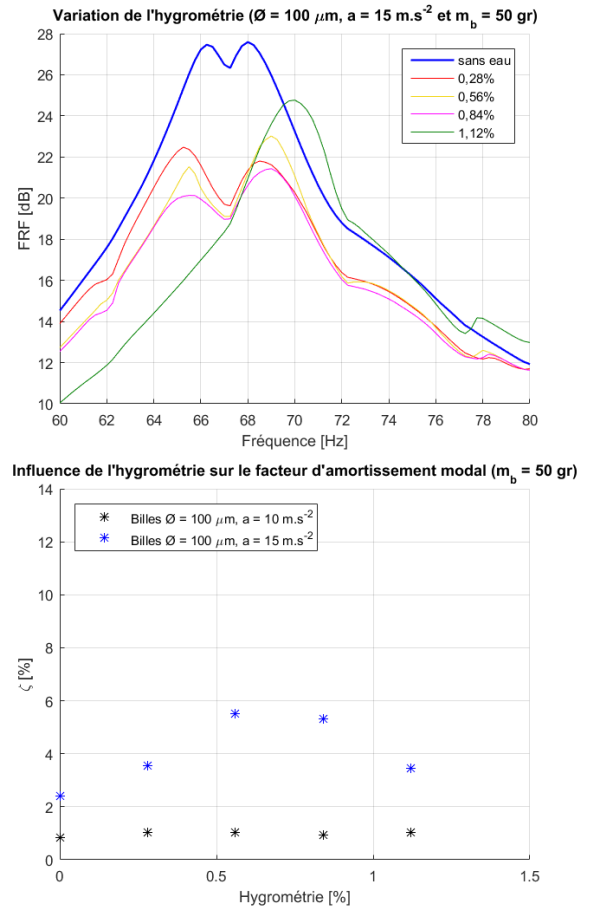


FIGURE 4 – HAUT : Variation de la fonction de réponse en fréquence accélération/force au centre de la plaque en fonction du taux d'hygrométrie, pour une accélération de 5 m.s^{-2} et une masse des granulaires de 50 gr / BAS : Variation du facteur d'amortissement modal en fonction du taux d'hygrométrie, pour une accélération de 5 m.s^{-2} et une masse des granulaires de 50 gr.

pour une amplitude d'accélération $a = 10 \text{ m.s}^{-2}$, n'a pas d'influence sur le facteur d'amortissement modal. En effet, le mouvement relatif entre les grains n'est pas actif à cette faible valeur d'accélération. Le comportement du système et donc semblable à la masse indéformable.

Pour une valeur d'accélération supérieure, $a = 15 \text{ m.s}^{-2}$, le facteur d'amortissement modal est sensible à l'hygrométrie des granulaires. Pour des taux d'humidité compris entre $h \in [0,0,58\%]$, une croissance de facteur d'amortissement est observée et peut être expliquée par la création de ponts hydriques entre les billes. Les mouvements relatifs des grains engendrent des pertes visqueuses au sein de micro-volumes de fluide piégés. Pour $h \in [0,58-1,12\%]$, le facteur d'amortissement modal de la structure diminue et deux hypothèses sont avancées. Soit les ponts hydriques sont tels que la tension superficielle crée des liaisons inter-grains suffisamment fortes pour bloquer les mouvements et entraîne une rigidification du système, qui tend à avoir le comportement de la masse indéformable. Soit l'humidité devient si importante qu'un phénomène de lubrification apparaît incitant les grains à s'écarter de la zone de plus fort déplacement.

4 Conclusion

Cette étude préliminaire permet de mettre en évidence la capacité de matériaux granulaires à agir sur le facteur d'amortissement modal d'une structure. Dans notre cas, on multiplie par un coefficient 10 le facteur d'amortissement modal pour un accroissement de masse de 27%. Le système est non linéaire et présente deux seuils : le premier vers $a = 10 \text{ m.s}^{-2}$, déclenche le mouvement relatif des grains, le second, qui dépend de la taille des grains, provoque l'éjection de ceux-ci par l'apparition d'instabilités localisées.

Une suite de cette étude sera de confiner les grains sur la structure vibrante, étudier d'autres cas ne pouvant pas être effectuée en surface libre (grains de plus grand diamètre, amplitude d'excitation plus importante pour une valeur d'hygrométrie donnée). L'influence des conditions de confinement ainsi que du positionnement du traitement sur la structure pourra aussi être étudié.

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, Alstom Power, Bureau Veritas, CETIM, Daher, DCNS Research, STX et l'Université du Maine.

Références

- [1] Z. Xu, M. Y. Wang, and T. Chen, "A particle damper for vibration and noise reduction," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 270, pp. 1033 – 1040, March 2004.
- [2] 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.
- [3] M. Saeki, "Impact damping with granular materials in a horizontal vibrating system," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 251, pp. 153 – 161, March 2002.
- [4] R. Friend and V. Kinra, "Particle impact damping," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 233, no. 1, pp. 93 – 118, 2000.
- [5] W. Liu, G. Tomlinson, and J. Rongong, "The dynamic characterisation of disk geometry particle dampers," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 280, no. 3-5, pp. 849 – 861, 2005.
- [6] "<http://umotion.univ-lemans.fr/video/0139-mise-en-vibration-dun-volume-de-granulaires-sur-une-plaque/>," Experience billes 100 micro-metre.
- [7] "<http://umotion.univ-lemans.fr/video/0238-mise-en-vibration-dun-volume-de-granulaires-sur-une-plaque/>," Experience billes 700 micro-metre.
- [8] E. Chladni, *Die Akustik*. 1802.