

# Influence de la taille de surface, de l'orientation et de la rugosité sur la dynamique des structures en présence de frottement sec

**M.-A. DOUVILLE<sup>a</sup>, B. FAVERJON and G. JACQUET-RICHARDET**

a. LaMCoS, Bâtiment Jean d'Alembert, 18-20, rue des Sciences, F69621 Villeurbanne,  
France

marc-andre.douville@insa-lyon.fr

## Résumé :

*Cette étude s'intéresse au comportement vibratoire d'une poutre associée à plusieurs frotteurs. D'un point de vue expérimental, un grand nombre de configurations a été testé afin de caractériser, in fine, l'influence de la taille de surface, de l'orientation et de la rugosité sur les fonctions de réponse en fréquence (FRF). En parallèle, des calculs numériques aux éléments finis ont été effectués avec plusieurs modèles de frottement afin d'être confrontés aux mesures.*

## Abstract :

*The present study focuses on the dynamic behavior of a steel beam associated with several rubbing devices. A large number of tests has been done in order to assess the influence of apparent contact area size, area orientation and surface roughness on the FRFs. Also, finite elements analysis taking into account different friction models were done and will be compared to the experimental data.*

**Mots clés : vibration, frottement, non linéarité, expérimentation, modélisation**

## 1 Introduction

La modélisation de la réponse vibratoire des structures présentant des liaisons peut devenir une tâche délicate du fait du frottement des interfaces. En effet, la possibilité d'avoir des états de contact qui peuvent être soit complètement bloqué, complètement glissant (macroslip), ou avec du glissement partiel (microslip) peut impacter significativement les fréquences naturelles ainsi que l'amortissement. De plus, du fait de la diversité des configurations de contact possibles et de l'évolution des interfaces dû à l'usure, la bonne prédiction de la dynamique des structures en présence de frottement sec est rendue encore plus difficile.

Ainsi, dans cette présente étude, une campagne d'essais de vibration a été réalisée sur une structure constituée d'une poutre en acier associée à des frotteurs. Deux types de frotteurs ont été testés : ponctuel et surfaciques. Une trentaine d'essais (mesures de fonctions de réponse en fréquences) ont été menés afin de voir, à terme, l'influence de la taille de surface, de l'orientation et de la rugosité sur la réponse de la poutre. En parallèle, des calculs numériques aux éléments finis ont été effectués et confrontés aux mesures expérimentales.

## 2 Réponse vibratoire de la structure

### 2.1 Frotteur ponctuel

La première configuration testée met en jeu la poutre associée à un frotteur ponctuel (fig.1). Des balayages sinus dans la gamme de fréquence [10-130] Hz sont réalisés pour des forces normales de contact  $F_n$  allant de 0.1 N à 40 N. La force d'excitation est maintenue à une valeur constante de 2N au cours de l'excitation.

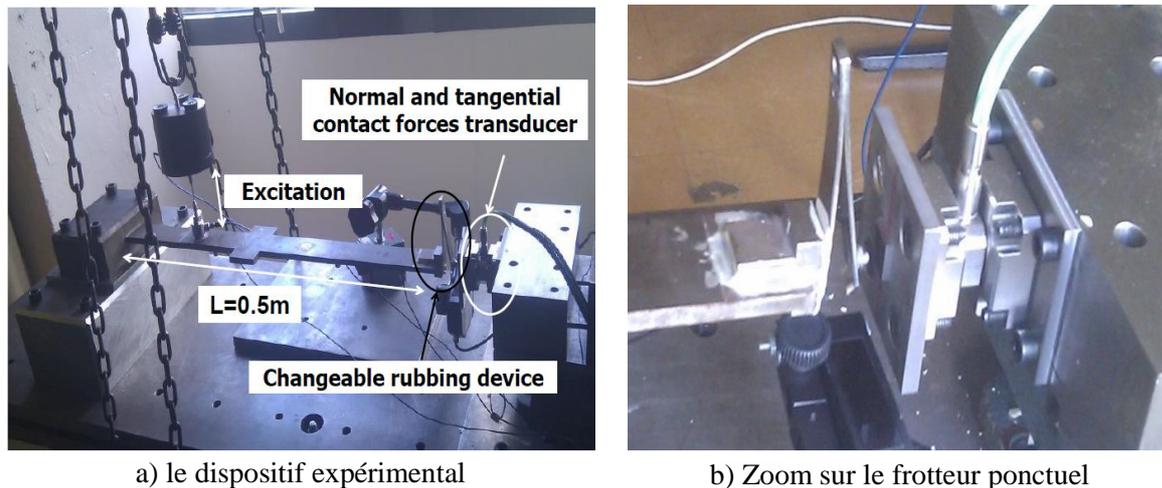
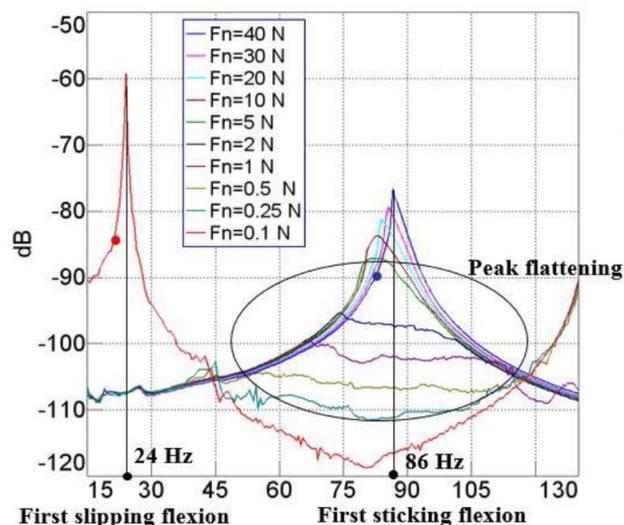


Figure 1 : système poutre + frotteur ponctuel

Les résultats obtenus sont présentés dans la figure 2. On observe notamment l'aplatissement du pic de résonance caractéristique du contact bloqué (86 Hz) qui augmente avec la diminution de  $F_n$  entre 0.25N et 40 N. Ceci s'explique par l'apparition de l'alternance de contact glissant-bloqué. Pour  $F_n=0.1$  N le contact devient purement glissement, la raideur de contact ne s'ajoute plus à la raideur de la poutre ce qui entraîne une diminution de la fréquence de résonance à 24 Hz.



Pour ce qui est de la modélisation, des éléments poutres et un élément de contact macroslip de type Masing ont été employés. Ce modèle de frottement associe un ressort au frotteur de coulomb (fig.3) et permet de rendre du contact bloqué.

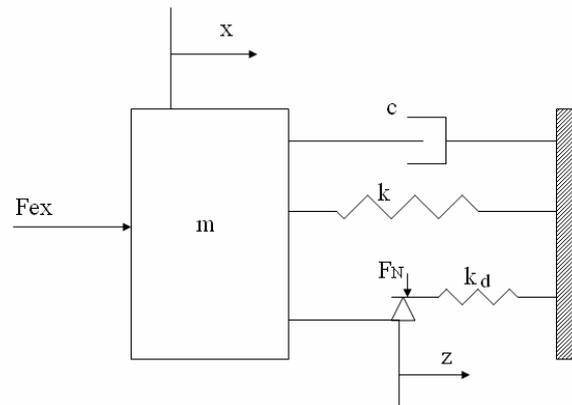


Figure 3 : schématisation du contact selon Masing appliquée a système 1 ddl

L'expression de la force de frottement  $F_t$  est donnée par :

$$F_t = \text{sgn}(\dot{x})\mu F_n \text{ pour un etat glissant}$$

$$F_t = -\text{sgn}(\dot{x})\mu F_n + k_d(x - z) \text{ pour un etat adhérent}$$

Avec,

- $\mu$  : le coefficient de frottement
- $F_n$  : la force normale au contact
- $k_d$  : la raideur de contact
- $x$  : le déplacement relatif
- $\dot{x}$  : la vitesse relative

La comparaison entre le modèle et les mesures est montrée ci-après (fig. 4) pour  $F_n=2$  N et  $F_n=10$  N. Les paramètres  $k_d$  et  $\mu$  ont été recalés via l'analyse de la force tangentielle qui en phase adhérente permet d'obtenir  $k_d$  (fig.5.a) et  $\mu$  en phase bloquée-glissante (fig.5.b). Pour les calculs, les valeurs utilisées sont  $k_d=2.6^5$  N/m et  $\mu=0.75$ . On observe une très bonne correspondance entre les calculs et essais.

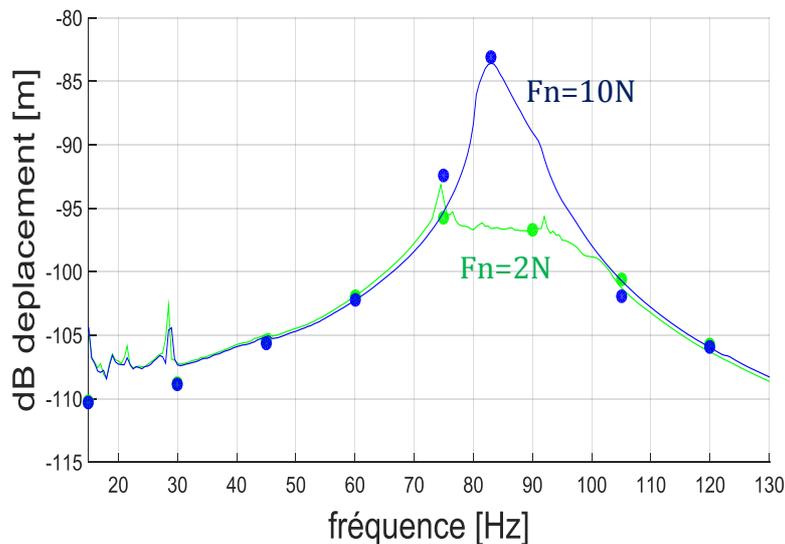


Figure 4 : comparaison calculs (points) – mesures (traits)

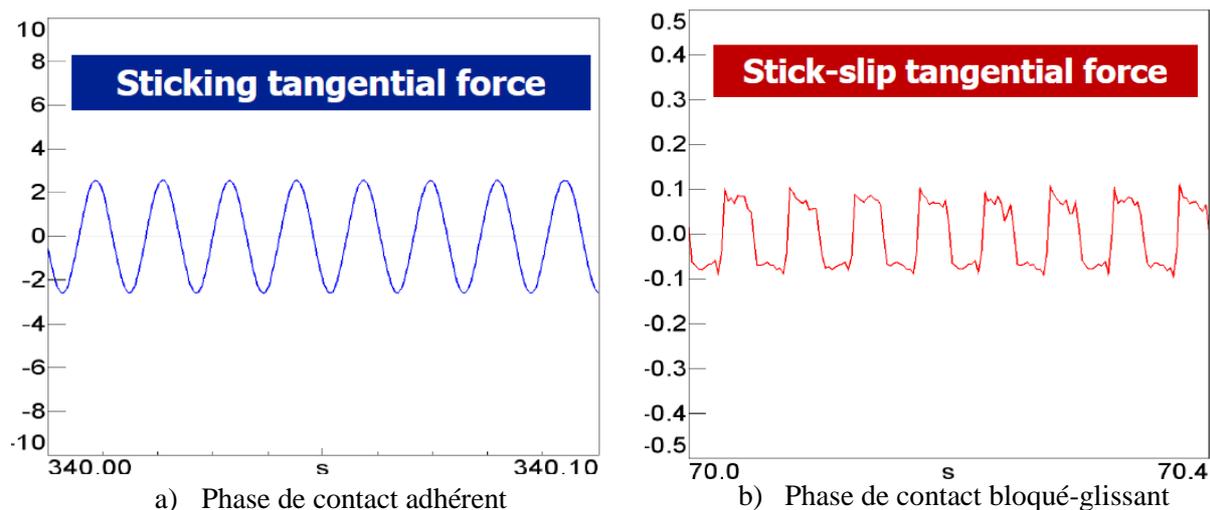


Figure 5 : Force tangentielle mesurée

## 2.2 Frotteurs surfaciques

La deuxième configuration met en jeu des contacts surfaciques (fig.6) en variant les tailles de surface ( $13 \times 13 \text{ mm}^2$ ,  $9 \times 9 \text{ mm}^2$ ,  $13 \times 5 \text{ mm}^2$ ,  $5 \times 5 \text{ mm}^2$ ) la direction de frottement noté  $\alpha$  ( $0^\circ$  ou  $90^\circ$ ) ainsi que les états de surfaces (rectifiées ou rugueuses). La plage de fréquence d'excitation reste inchangée par rapport à la configuration ponctuelle. La force normale varie entre 0.1N et 80N.

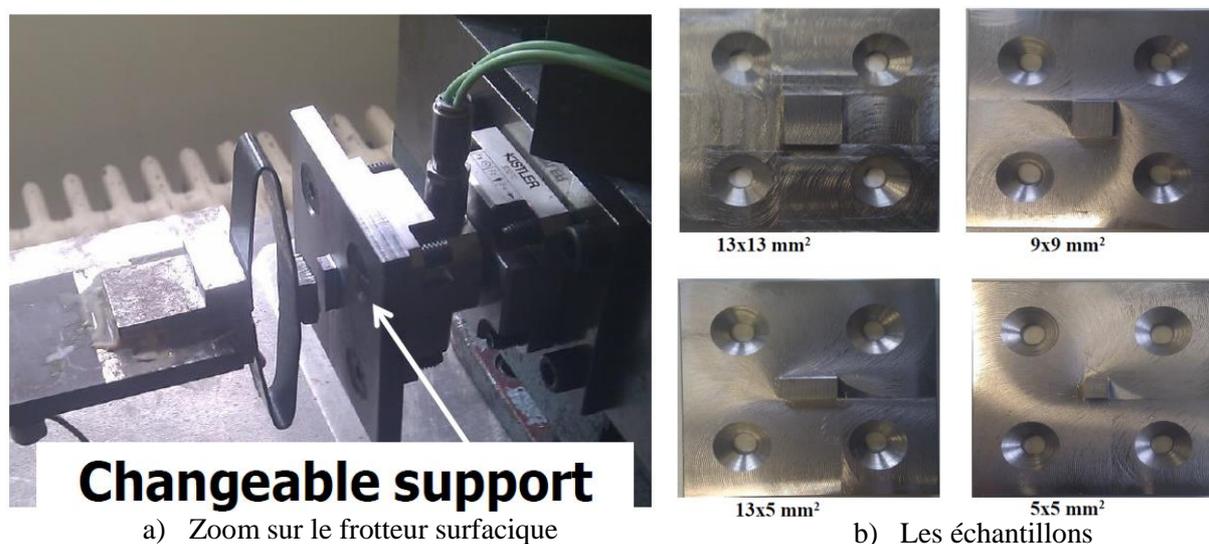


Figure 6 : système poutre + frotteur surfacique

Pour ce qui est des premiers résultats, on observe une variation du coefficient de frottement en fonction de l'orientation de frottement, et de l'état de surface (tab. 1). En figure 7.a, un exemple de FRF pour une taille de surface de  $13 \times 13 \text{ mm}^2$  rectifiée avec une orientation  $\alpha=0^\circ$ .

Surface 13x13	Rectifiée, $\alpha=0^\circ$	Rectifiée, $\alpha=90^\circ$	Rugueux, $\alpha=0^\circ$	Rugueux, $\alpha=90^\circ$
$\mu$	0.445	0.324	0.34	0.42

Tableau 1 : coefficient de frottement en fonction l'orientation de frottement et de l'état de surface

Ici, dans un premier temps le modèle de Masing est aussi employé. En gardant la même procédure d'identification des paramètres  $k_d$  et  $\mu$  utilisée pour le frotteur ponctuel, la comparaison calcul-essais obtenue n'est pas concluante (fig.7b). Cette observation s'explique certainement par la présence de micro-glissements aux interfaces que le modèle de Masing ne peut rendre compte.

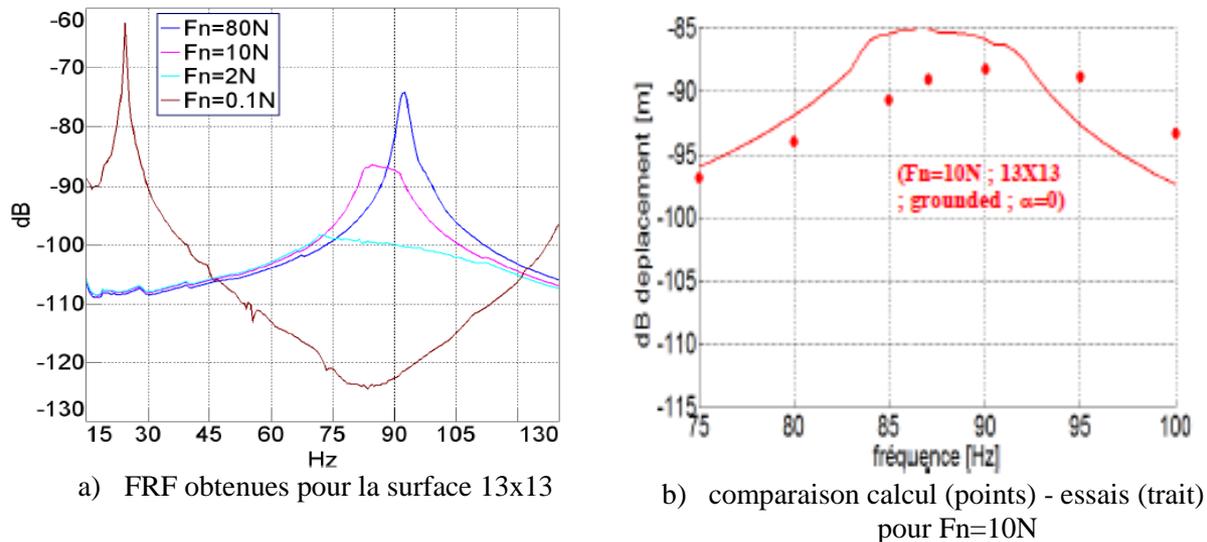


Figure 7 : FRF pour la surface 13x13 et comparaison avec le modèle de Masing

Au vue de ce résultat, une modélisation plus fine basée sur un élément de joint d'épaisseur nulle prenant en compte les paramètres matériaux, géométriques ainsi que la rugosité [1-3] a donc été envisagée et sera confrontée aux mesures. La pression normale à l'interface de contact s'obtient avec la théorie de Greenwood et Williamson [4] pour les contacts rugueux (fig. 8). En considérant les aspérités sphériques et en appliquant la théorie de Hertz combinée à une intégration statistique, il est possible de calculer cette pression. Son expression est :

$$P_N = a(g_N)^b \quad \text{si } g_N \leq 0$$

$$P_N = 0 \quad \text{si } g_N > 0$$

Avec,

- $g_N$  : déplacement relatif dans la direction normale
- $a$  et  $b$  sont des paramètres à recalculer

Pour ce qui est du frottement, c'est le modèle microslip de Mindlin qui permettra de rendre de ce comportement. En phase de glissement partiel, la pression tangentielle de frottement s'exprime par :

$$|P_T| = \mu P_N \left[ 1 - \left( 1 - \frac{|g_T|}{g_{T0}} \right)^{3/2} \right], \quad \text{où } g_{T0} = \frac{3\mu P_N}{2k_{T0}}$$

Avec,

- $\mu$  : le coefficient de frottement
- $k_{T0}$  : la raideur de contact
- $g_T$  : le déplacement relatif

Une fois le modèle implémenté, les résultats issus des calculs seront comparés aux données mesurées.

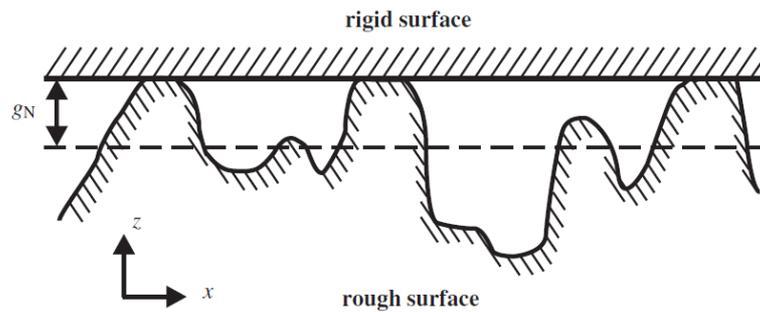


Figure 8 : schématisation d'un contact rugueux [3]

### 3 Conclusion

Cette étude était dédiée à la réponse vibratoire d'une poutre en acier associée à plusieurs frotteurs. Le but étant, à terme, de caractériser l'influence de la taille de surface, de l'orientation et de la rugosité sur la réponse de la poutre.

Dans cette optique, des essais et calculs ont été réalisés pour deux types de frotteur, à savoir ponctuel et surfacique. Les premiers résultats ont montrés que le modèle de Masing pouvait rendre compte d'un contact frottant ponctuel mais n'était pas capable de faire de même avec un contact surfacique du à la présence de micro-glissements. Une modélisation plus fine est donc en cours d'élaboration afin d'être comparée aux données expérimentales.

### Références

- [1] M. Eriten, A.A. Polycarpou, L.A. Bergman, Physics-based modeling for partial slip behavior of spherical contacts, *International Journal of Solids and Structures* 47 (2010) 2554–2567.
- [2] G. Beer, An isoparametric joint/interface element for finite element analysis, *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 21 (1985) 585–600.
- [3] S. Bograd, P.Reuss, A.Schmidt, L.Gaul, M.Mayer b, Modeling the dynamics of mechanical joints, *Mechanical Systems and Signal Processing* 25 (2011) 2801–2826
- [4] J.A. Greenwood, J.B.P. Williamson, Contact of nominally flat surfaces, *Proceedings of the Royal Society of London, Series A* 295 (1966) 300–319.