



Analyse statistique du phénomène de crissement

Pierre Grange, David Clair, Michel Fogli

► To cite this version:

Pierre Grange, David Clair, Michel Fogli. Analyse statistique du phénomène de crissement. 8e Colloque national en calcul des structures, CSMA, May 2007, Giens, France. hal-01495615

HAL Id: hal-01495615

<https://hal.science/hal-01495615>

Submitted on 25 Mar 2017

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.

Public Domain

Analyse statistique du phénomène de crissement

Pierre Grange^{*}, David Clair^{*}, Michel Fogli^{*}

^{} Laboratoire de Mécanique et Ingénieries*

Institut Français de Mécanique Avancée et Université Blaise Pascal

Campus des Cézeaux

BP 265

63175 Aubière Cedex France

pierre.grange@ifma.fr, david.clair@univ-bpclermont.fr, fogli@cust.univ-bpclermont.fr

RÉSUMÉ. Les vibrations induites par frottement sont des phénomènes complexes qui peuvent conduire, dans le cas des dispositifs de freins à disque, à l'apparition de bruits de freinage comme le crissement. Nous proposons dans cet article une démarche originale pour l'étude de ce phénomène, basée sur une approche statistique. Cette démarche s'appuie sur la connaissance d'échantillons expérimentaux de trois paramètres (pression acoustique, vitesse, force tangentielle) et sur une analyse statistique de ceux-ci portant sur les lois de probabilité marginales d'ordre un et les densités spectrales de puissance. Elle utilise également une analyse temps-fréquence pour leur caractérisation spectrale. Cette analyse statistique nous permet de définir un nouveau paramètre caractéristique du crissement, plus discriminant que les précédents. Elle constitue le préalable à la modélisation stochastique de ce phénomène, prochaine étape de l'étude.

ABSTRACT. Friction-induced vibrations are complex phenomena which, in the case of disc brakes mechanisms, can lead to the occurrence of braking noise as squeal. In this paper, we propose an original approach to study this phenomenon based on statistical method. This approach leans on knowledge of experimental samples of three parameters (acoustic pressure, speed, tangential force) and on a statistical analysis of them carrying on the marginal probability distributions of order one and power spectral density. It uses also a time-frequency analysis for their spectral characterization. This statistical analysis lets us to define a characteristic parameter of squeal, more discriminatory than the former. It constitutes the preamble to the stochastic modeling of this phenomenon, next step of the study.

MOTS-CLÉS : crissement, analyse statistique, densité spectrale de puissance, fonction de cohérence, analyse temps-fréquence

KEYWORDS: squeal, statistical analysis, power spectral density, coherence function, time-frequency analysis

1. Introduction

Depuis le début du 20^{ème} siècle, le problème du comportement dynamique des freins à disque a fait l'objet d'un grand nombre de travaux (Kinkaid et al., 2003) mais reste malgré tout mal compris. Récemment, des modélisations par éléments finis du contact plaquette/disque (Baillet et al., 2006) ont permis d'analyser l'influence de plusieurs paramètres (imperfections géométriques du disque, vitesse relative de glissement) sur la génération du bruit de crissement. Toutefois, alors que plusieurs auteurs font état de la nature aléatoire de ce phénomène, peu d'entre eux ont abordé le problème sous cet angle (Qiao et al., 1999). Cet article présente une démarche originale pour l'étude du crissement basée sur le traitement statistique de données expérimentales : estimation de densités de probabilité, analyse spectrale et analyse temps-fréquence des signaux. Le but de ce travail est double : il s'agit de mieux comprendre le phénomène de crissement à partir des informations apportées par l'analyse statistique et d'en définir les caractéristiques essentielles en vue de la construction d'un modèle stochastique.

2. Analyse expérimentale

Les essais de crissement ont été réalisés sur le tribomètre plaquette/disque du Laboratoire de Mécanique des Contacts et des Structures (LaMCoS, INSA Lyon). Cet appareil est constitué d'un disque massif de vitesse de rotation variable. Il permet de simuler un freinage par la mise en charge d'une plaquette fixe sur le disque. La force tangentielle, la vitesse de la face avant de la plaquette et la pression acoustique sont mesurées durant les essais (Figures 1 et 2) : ce sont les paramètres de l'étude. Les signaux de pression acoustique et de vitesse sont constitués d'une succession de deux régimes stationnaires, l'un d'amplitude faible (zone non crissante) et l'autre d'amplitude élevée (zone crissante). La force tangentielle présente également deux régimes stationnaires se distinguant par la valeur absolue de leur valeur moyenne, plus faible pour une phase crissante, traduisant ainsi une baisse du coefficient de frottement global.

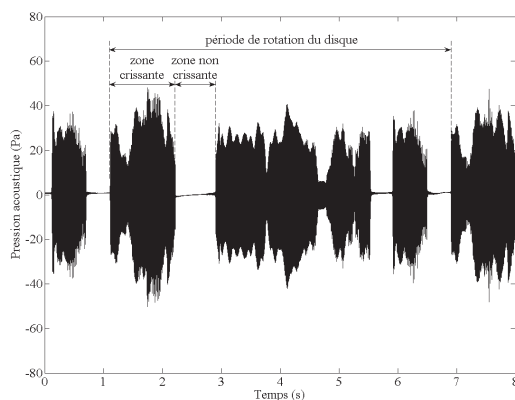


Figure 1. *Pression (10tr/mn)*

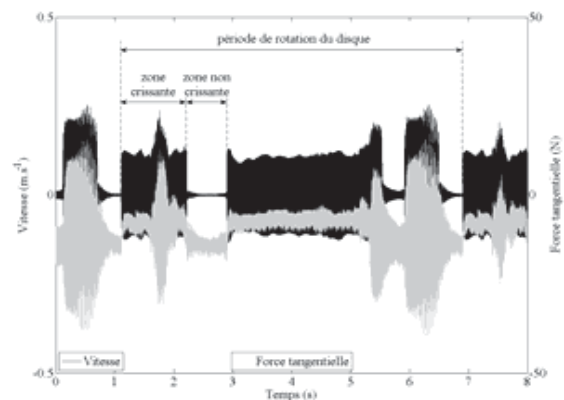


Figure 2. *Vitesse et force (10tr/mn)*

Toutefois, cette première analyse des signaux expérimentaux n'est pas suffisante pour distinguer de manière robuste une phase crissante d'une phase non crissante. La suite de l'article présente plusieurs outils statistiques et leur intérêt pour la caractérisation du crissement et l'étude des liens qui peuvent exister entre les paramètres mesurés.

3. Estimation des densités de probabilité

Les densités de probabilité marginales d'ordre un des trois paramètres considérés (vus comme des processus stochastiques dans ce contexte) sont estimées sur les zones crissantes et non crissantes à partir des signaux expérimentaux disponibles. Il s'agit de recueillir des informations qualitatives sur l'influence du crissement sur la répartition statistique de ces paramètres. Les résultats obtenus (Figure 3) montrent que les distributions statistiques sont effectivement affectées par ce phénomène. En particulier, celle de la vitesse passe d'une allure unimodale en zone non crissante à une allure bimodale en zone crissante. Il apparaît également clairement qu'aucun de ces paramètres n'a une distribution gaussienne, que ce soit en zone crissante ou non crissante. Enfin, nous retrouvons un résultat déjà observé concernant la force tangentielle : sa moyenne diminue, en valeur absolue, lors du passage d'une zone non crissante à une zone crissante.

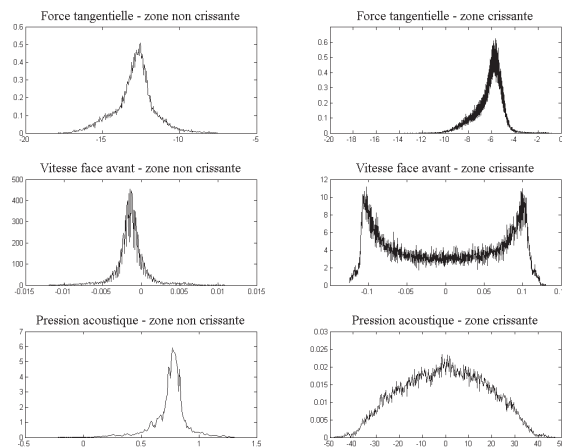


Figure 3. Densités de probabilité en zones non crissante et crissante (10tr/mn)

4. Analyse spectrale

L'objectif est ici d'obtenir des informations qualitatives sur la dynamique du système, et notamment son évolution lors du passage d'une zone non crissante à une zone crissante, à partir d'une analyse du contenu spectral des paramètres mesurés.

Nous notons $Z = (f, v, p)^T$ le processus vectoriel regroupant la force tangentielle f , la vitesse v et la pression acoustique p . C'est un processus multi-états dont la description mathématique rigoureuse reste à trouver. Pour l'instant, nous appuyant

sur l'information statistique disponible, nous nous contentons de le considérer comme un processus ayant deux comportements distincts selon qu'il décrit le triplet (f, v, p) sur une zone non crissante ou crissante. Il est stationnaire sur chacune de ces zones, mais n'est pas centré, sa coordonnée f ne l'étant pas. Nous commençons donc par le centrer et, pour ne pas multiplier les notations, nous notons encore Z le processus centré associé. La densité spectrale de puissance (DSP) de ce processus est notée S_Z et sa fonction de cohérence FC_Z , avec $S_Z = (S_Z^{ij})$ et $FC_Z = (FC_Z^{ij})$ à valeurs dans $\mathbb{C}^{3 \times 3}$ et $\mathbb{R}^{3 \times 3}$ respectivement, telles que, $\forall (i, j) \in \{1, 2, 3\}^2$:

$$S_Z^{ij} = S_{Z_i, Z_j}, FC_Z^{ij} = FC_{Z_i, Z_j} = |S_{Z_i, Z_j}| / \sqrt{S_{Z_i, Z_i} S_{Z_j, Z_j}} \quad [1]$$

où $Z_1 = f$, $Z_2 = v$ et $Z_3 = p$. Ces grandeurs ont été estimées à partir des échantillons expérimentaux des paramètres f , v et p , en utilisant l'estimateur spectral de Welch couplé à la fenêtre filtrante de Hamming (Soize, 2000). Les figures 4 et 5 présentent les DSP des signaux expérimentaux respectivement en zone non crissante et crissante à 10tr/mn. La DSP de la force diffère peu d'une zone non crissante à une zone crissante. Seul un pic de faible amplitude à une fréquence appelée *fréquence de crissement*, notée F_{cr} , égale à environ 19,7kHz apparaît lors du crissement. En zone non crissante, les spectres de la pression acoustique et de la vitesse sont relativement plats et de valeur faible ; en zone crissante, les deux spectres présentent un pic assez large centré sur F_{cr} .

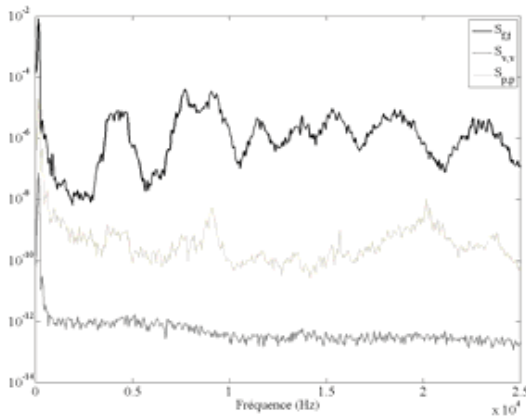


Figure 4. DSP en zone non crissante

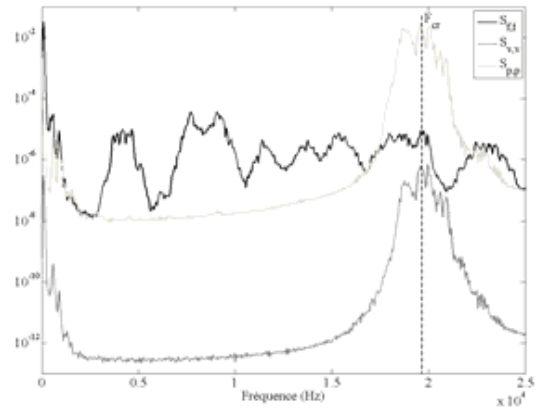


Figure 5. DSP en zone crissante

L'analyse de $FC_{p,f}$ montre que la pression acoustique n'est que très légèrement corrélée à la force, excepté dans une petite bande de fréquence autour de F_{cr} . Le lien entre la vitesse et la pression acoustique, plus complexe, est caractérisé par un niveau moyen de corrélation élevé. De plus, toutes les fonctions de cohérence présentent un contenu spectral très différent de $S_{p,p}$. Afin d'essayer de caractériser le crissement sans utiliser le signal de pression acoustique, nous définissons un paramètre énergétique de crissement, noté d , égal au produit de la force f par la vitesse v . La figure 6 compare la DSP de la pression acoustique $S_{p,p}$ à la DSP du paramètre énergétique de crissement $S_{d,d}$ dans le cas où la vitesse est de 10tr/mn.

Nous constatons que la distribution d'énergie du paramètre d est proche de celle de la pression acoustique mais avec un niveau plus faible dans la plage caractéristique du crissement. Ceci révèle un lien physique très net entre ces deux grandeurs qui n'apparaît pas lorsque nous traitons séparément la force et la vitesse. Le paramètre énergétique de crissement comporte une information spectrale semblable à celle du signal de pression acoustique. Ce paramètre énergétique présente donc un intérêt pour établir un critère robuste dans la détection et la caractérisation du crissement.

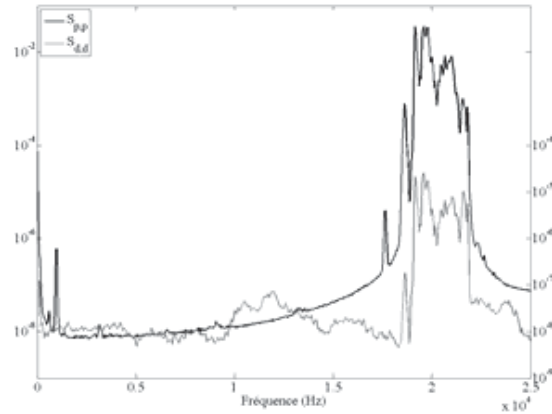


Figure 6. DSP de la pression acoustique $S_{p,p}$ et de la puissance dissipative $S_{d,d}$

Pour compléter l'analyse spectrale, nous réalisons une analyse temps-fréquence. Ce type d'analyse est utilisé dans plusieurs domaines mais n'a été que très récemment appliqué aux vibrations induites par frottement (Chen et al., 2007). Parmi les méthodes existantes (Thirion-Moreau et al., 2002), nous utilisons ici le spectrogramme, correspondant au module carré de la Transformée de Fourier à Court Terme, avec la fenêtre de Hamming comme fenêtre d'analyse à court terme. Les figures 7 et 8 présentent respectivement l'analyse temps-fréquence de la pression acoustique et du paramètre énergétique de crissement avec pour chacun d'eux leur trajectoire expérimentale, leur DSP et leur représentation temps-fréquence.

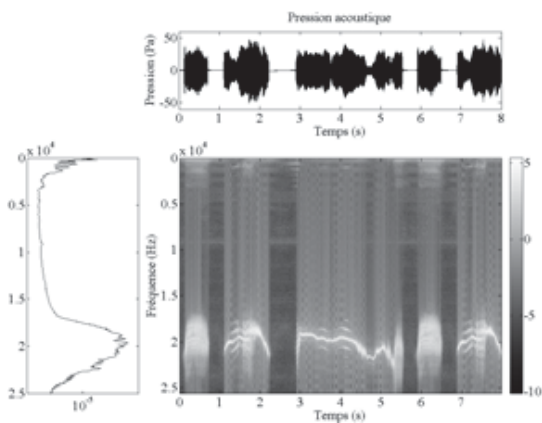


Figure 7. Analyse temps-fréquence de la pression acoustique

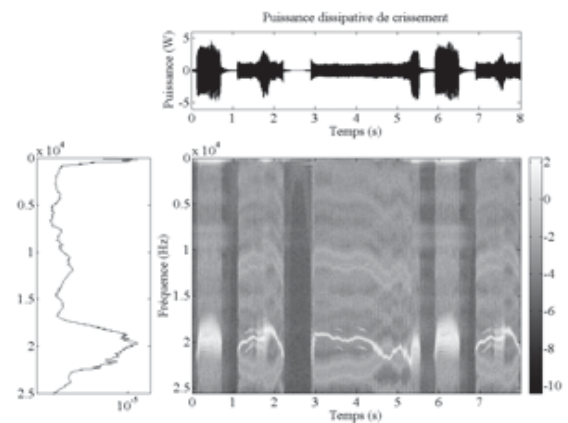


Figure 8. Analyse temps-fréquence de la puissance dissipative

Les zones crissantes sont caractérisées par un contenu spectral localisé autour de la fréquence de crissement F_{cr} dont la variation temporelle traduit la complexité de la dynamique du système et la présence de non-linéarités. Cette analyse nous permet de voir que les contenus spectraux du paramètre énergétique de crissement et de la pression acoustique sont très proches et que leur évolution temporelle est semblable, soulignant la robustesse du paramètre énergétique de crissement comme paramètre caractéristique du crissement.

5. Conclusion

Nous venons de présenter une méthode d'analyse statistique du phénomène de crissement basée sur l'estimation des densités de probabilité marginales d'ordre un et des densités spectrales de puissance de trois paramètres expérimentaux ainsi que sur une analyse temps-fréquence de ceux-ci. Cette étude nous a permis de mettre en évidence la forte incidence du crissement sur les lois de probabilité, le caractère non gaussien de ces lois ainsi que l'évolution des DSP de certains paramètres lors du passage d'une zone non crissante à une zone crissante. Elle nous a également conduit à définir un paramètre de crissement mieux à même que les précédents de détecter les zones crissantes. La prochaine étape sera de construire, sur la base de ces résultats, un modèle probabiliste (i.e. un processus stochastique) capable de décrire la complexité de ce phénomène. L'élaboration d'un tel modèle est à l'étude au LaMI à l'heure actuelle.

Bibliographie

- Baillet L., D'Errico S., Laulagnet B., « Understanding the occurrence of squealing noise using the temporal finite element method », *Journal of Sound and Vibration*, vol. 292, n° 3, 2006, p. 443-460.
- Chen G.X., Zhou Z.R., « Time-frequency analysis of friction-induced vibration under reciprocating sliding conditions », *Wear*, vol. 262, 2007, p. 1-10.
- Clair D., Grange P., Fogli M., Daucher D., Berthier Y., « A stochastic analysis of squeal », *5th European Conference on Braking JEF2006*, Lille (France), 8-9 novembre 2006, p.381-388.
- Kinkaid N.M., O'Reilly O.M., Papadopoulos P., « Automotive disc brake squeal », *Journal of Sound and Vibration*, vol. 267, n° 1, 2003, p. 105-166.
- Qiao S.L., Ibrahim R.A., « Stochastic dynamics of systems with friction-induced vibration », *Journal of Sound and Vibration*, vol. 223, n° 1, 1999, p. 115-140.
- Soize C., *Méthodes mathématiques en analyse du signal*, Paris, 2000.
- Thirion-Moreau N., Arques P-Y., « Analyses temps-fréquence linéaires et quadratiques », *Techniques de l'Ingénieur*, TE 5 240, 2002, 26p.