

Interactions « tribologie – vibrations » entre une lamelle vibrante et la surface en contact avec celle-ci.

Cyril Marsiquet, Stéphane Fontaine , Marc Renner

Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs Sud Alsace – Université de Mulhouse
Laboratoire de Physique et Mécanique Textiles – CNRS UMR 7189
11 rue Alfred Werner
68093 Mulhouse Cedex
cyril.marsiquet@uha.fr

Résumé :

Dans différentes applications techniques, il est nécessaire de déterminer l'état de surface des matériaux. Différentes méthodes de mesure d'état de surface existent mais il est parfois difficile de comparer différentes structures. Afin de pouvoir réaliser cela, un nouveau capteur, développé dans notre laboratoire, permet de mesurer n'importe quelle surface périodique ou non, ayant des aspérités de hauteurs comprises entre 10 µm à 2 mm. Il s'agit d'une fine lamelle d'acier frottant sur la surface et vibrant selon ses fréquences propres de vibration. Dans cette étude, les paramètres d'état de surface (rugosité, frottement et compressibilité) de différentes surfaces ont été mesurés et comparés aux valeurs des énergies et de fréquences de la lamelle. Il y est montré que cette méthode est capable de lier ces paramètres tribologiques avec les valeurs des énergies et des fréquences. Cependant, la représentation 2D actuelle est parfois insuffisante pour discriminer les classes de surfaces. Le principal résultat de ce travail est une nouvelle représentation 3D incluant la compressibilité des surfaces et capable de discriminer les classes de surfaces.

Abstract :

In several technical applications, it is necessary to accurately determine the surface state of materials. Different methods of investigation of surface state measurement exist but it is sometimes difficult too compare different structures. To do that, a new sensor, developed in our laboratory, allows to measure every surfaces periodic or not with asperities heights between 10 µm and 2 mm . It is a thin steel blade rubbing on the tested surface and vibrating according its eigen frequencies of vibration. In this study, the parameters of surface state (roughness, friction and compressibility) of different surfaces have been measured and compared to the energies and frequencies of the blade. It is shown that the method is able to link these tribological parameters with the values of the energies and the frequencies. However, the actual 2D representation is sometimes insufficient to discriminate surfaces classes. The principal result of this work is a new 3D representation including the surfaces compressibility and able to discriminate surface categories.

Mots-clefs :

vibration ; capteur ; tribologie.

1 Introduction

Il est important de déterminer de manière de plus en plus fine l'état de surface d'un matériau ou les modifications d'une telle surface. L'étude de ces surfaces se fait souvent à l'échelle micro ou nanoscopique. A l'heure actuelle, plusieurs méthodes peuvent mesurer des topographies par des moyens mécaniques, optiques ou par analyse d'images (Zahouani *et al.* (1998). Le profil de la surface est ensuite étudiée selon plusieurs techniques. Parmi celles-ci, on retrouve les méthodes

statistiques pour lesquelles le profil est considéré comme une population finie d'éléments de deux ou trois coordonnées (Normes ISO (1998)), les méthodes utilisées dans le traitement du signal et les méthodes chaotiques telles que l'analyse fractale (Zahouani *et al.* (1998)).

Ces différentes méthodes ont des inconvénients. Soit l'information est prise en compte dans son ensemble et des différences importantes peuvent être noyées dans l'information rendant l'analyse peu discriminante, soit elles sont inadaptées aux surfaces périodiques comme cela peut être le cas pour les méthodes du traitement du signal.

Dans le contexte du développement technique d'un nouveau capteur, ce travail présente l'étude du comportement à la résonance d'une fine lamelle d'acier. Cette méthode est assez sensible pour mesurer des différences d'état de surface sur de grandes aires où différents paramètres tels que la rugosité et le frottement interviennent à différentes échelles (de 10 μm à 2 mm). Elle permet d'analyser des surfaces périodiques ou non et de caractériser et comparer des surfaces totalement différentes par leur structure, les matériaux les composant ainsi que les traitements de surface subis.

2 Partie expérimentale

2.1 Dispositifs de mesure

Un banc de mesure (Fig 1) a été développé. Pendant la mesure, l'échantillon est positionné sur un disque rotatif (1) et une lamelle précontrainte (2) (50 μm d'épaisseur) frotte sur la surface à tester (Bueno *et al.* (2000)). Pendant le contact, la lamelle vibre dans ses modes propres de vibration. Des jauges de déformation sont collées sur la lamelle et mesurent ainsi les vibrations.

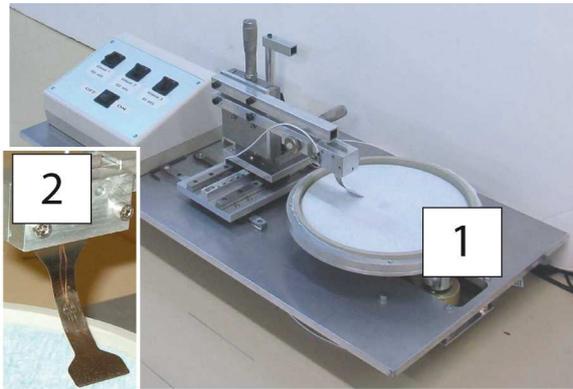


FIG 1 – Dispositif de mesure

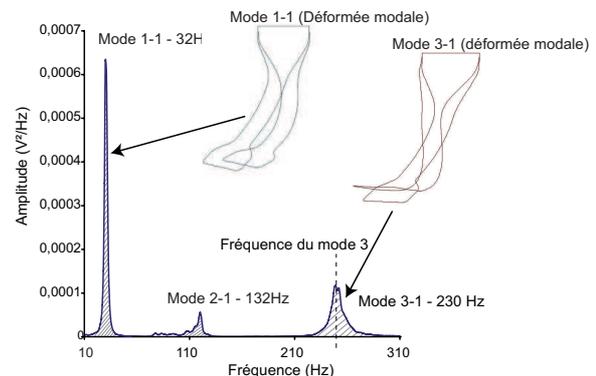


FIG 2 – Spectre moyen (autospectre)

Lors de nos mesures, la vitesse du plateau tournant était de 12 tr/min et le capteur était positionné avec un rayon de 35 mm. Ces réglages correspondent à une vitesse linéaire de 44 mm/s. La contrainte appliquée sur la surface est d'environ 250 Pa.

L'analyse de Fourier du signal temporel provenant des jauges de la lamelle permet le calcul de la puissance spectrale avec l'aide d'un analyseur de spectre. La puissance spectrale est :

$$PS(f) = |X(f)|^2 \quad (1)$$

$$\text{où } X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{-2i\pi f \cdot t} dt \quad (2)$$

où f est la fréquence (Hz) et $X(f)$ est la transformée de Fourier du signal temporel $x(t)$ correspondant au signal sortant du capteur.

Un spectre moyen est calculé (avec 200 spectres instantanés) durant plusieurs tours du porte échantillon et montre plusieurs pics de fréquence (Fig 2). Ces pics de fréquence correspondent

aux modes de vibration du capteur. Les énergies de ces pics sont obtenues (équation 3) par intégration de $PS(f)$ entre 2 fréquences f_1 et f_2 .

$$\text{Energie}[f_1; f_2] = \int_{f_1}^{f_2} |X(f)|^2 df \quad (3)$$

Seul les énergies des modes 1 et 3 sont exploitées ainsi que la fréquence du mode 3. Cette fréquence est relevée au maximum du pic de l'autospectre (Fig 2).

Le changement de la structure de la surface testée provoque une variation des conditions limites du contact lamelle-surface au cours du frottement se caractérisant par des modifications des amplitudes de vibration de la lamelle et une variation de la fréquence du mode 3. Cette variation d'amplitude de vibration de la lamelle se traduit par une variation des énergies des modes 1 et 3.

2.2 Surfaces testées

Plusieurs types de surfaces ont été testés. Elles sont décrites dans le tableau 1. Ces surfaces sont : des non-tissés destinés à l'hygiène bébé (J1, J2, J3, J4), des tissus coton (CP et CT) destinés à la confection de jeans et de chemise et enfin différentes feuilles de papier (P90, P125, P180, P224).

Nom	Description	Composition	Utilisation
J1	Non-tissé Spunlaced – 75 g/m ²	100 % Polyester	Lingettes bébé
J2	Non-tissé Spunlaced – 38 g/m ²	100 % Polyester	Lingettes bébé
J3	Non-tissé Spunlaced – 50 g/m ²	65% Viscose, 35 % Polyester	Lingettes bébé
J4	Non-tissé Spunlaced – 45 g/m ²	100 % Viscose	Lingettes bébé
CP	Toile coton	100 % Coton	Chemise
CT	Sergé coton	100 % Coton	Jeans
P90	Feuille de papier – 90g/m ²	Cellulose	Impression
P125	Feuille de papier – 125g/m ²	Cellulose	Papier à dessin
P180	Feuille de papier – 180g/m ²	Cellulose	Papier à dessin
P224	Feuille de papier – 224g/m ²	Cellulose	Papier à dessin

TAB. 1 – Surfaces mesurées.

Des mesures de compressibilité ont été réalisées avec le module KAWABATA KES-FB3 (Kawabata (1980)). A partir d'un cycle de compression/décompression, la compressibilité C est

$$\text{définie de la manière suivante : } C = \frac{(T_0 - T_m)}{(5000 - 50)} \quad (4)$$

où T_0 (mm) est l'épaisseur de l'échantillon pour une contrainte de 50 Pa et T_m (mm) est l'épaisseur de l'échantillon pour une contrainte de 5000 Pa. Le palpeur est un disque de 2 cm².

Des mesures de rugosité et de frottement ont été faites avec le KES-FB4 (Kawabata (1980)). Le palpeur est un cylindre de 0,5 mm de diamètre et de 5 mm de long et la contrainte appliquée est de 12700 Pa. Le paramètre choisi pour quantifier la rugosité est la déviation moyenne

$$\text{arithmétique du profil } Ra \text{ et est calculé de la manière suivante : } Ra = \frac{1}{l} \int_0^l |Z(x)| dx \quad (5)$$

où l (mm) est la longueur de mesure balayée et $Z(x)$ est la hauteur du relief à une abscisse x (mm).

Le frottement est évalué par le coefficient de frottement moyen MIU : $MIU = \frac{1}{l} \int_0^l \mu \cdot dx$ (6)

où μ est le coefficient de friction instantané et l (mm) est la longueur de mesure balayée. Le palpeur se compose de 10 cylindres juxtaposés de 0,5 mm de diamètre et de 5 mm de long. La force normale appliquée est 50 cN.

Pour chaque échantillon testé et chaque appareil, 15 mesures ont été effectuées afin d'avoir des résultats représentatifs en calculant les moyennes, les écart types et les intervalles de confiance. Autour de chaque point, les barres d'erreurs représentent l'intervalle de confiance pour chaque point.

3 Résultats et discussion

Concernant les résultats des énergies de la lamelle, ces derniers sont représentés sur un graphe en 2 dimensions (Fig 3). Sur ce graphe, l'énergie du mode 1 est représentée en abscisse alors que l'énergie du mode 3 l'est en ordonnée. Ainsi un point représente une surface.

A la droite du graphe (Fig 3), on trouve les lingettes bébé J1, J2, J3 et J4. Ces surfaces ont une énergie du mode 1 élevée et une énergie du mode 3 moyenne.

Seule une surface se situe en bas à gauche : il s'agit de la feuille de papier de grammage 90g/m² (P90). Cette surface a des énergies de modes 1 et 3 faibles. Enfin, en haut à gauche, on retrouve les autres surfaces soit les tissus (CP et CT) et les autres papiers P125, P180, P224 (125g/m², 180g/m² et 224g/m²). Ces surfaces ont une énergie du mode 1 faible et une énergie du mode 3 moyenne.

Lorsqu'on observe les résultats issus de la mesure de la fréquence du mode 3, on peut noter à la figure 4 (courbe grise) que la fréquence du mode 3 varie suivant les surfaces mesurées. Les feuilles de papier (P90, P125, P180 et P224) ont les fréquences du mode 3 les plus élevées alors que celles des non-tissés (lingettes bébé – J1, J2, J3 et J4) sont les plus faibles. Les fréquences du mode 3 des tissus (CP et CT) ont des valeurs intermédiaires.

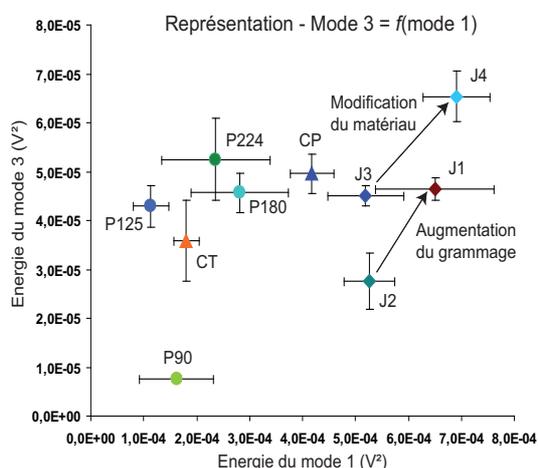


FIG 3 : Résultats des énergies de la lamelle

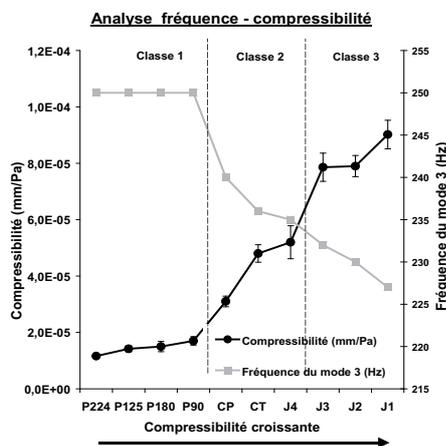


FIG 4 : Résultats fréquentiels du mode 3 et de compressibilité

Concernant les résultats de compressibilité (Fig 4, courbe noire), on distingue 3 classes : la classe 1 contenant les papiers (P90, P125, P180, P224), la classe 2 avec les tissus CP et CT et le non-tissé J4 et enfin la classe 3 avec les autres non-tissés (J1, J2, J3). On constate aussi que la compressibilité C est inversement liée à la fréquence du mode 3.

Les résultats de frottement et de rugosité (fig 5, 6 et 7) sont présentés avec les énergies de la lamelle et les surfaces sont classées par compressibilité croissante (classes de surfaces précédemment définies). L'analyse des figures 5, 6 et 7, pour les classes 1 et 2, montre que le

coefficient de frottement *MIU* est inversement lié à l'énergie du mode 1 et que le *Ra* est aussi relié aux énergies des modes 1 et 3. Mais il n'y a pas de relation évidente entre ces 4 paramètres pour les surfaces de la classe 3. Cela est dû aux aires de contact et aux contraintes appliquées très différentes entre la lamelle et le KES-FB4 (12700 Pa pour le KES contre 250 Pa pour la lamelle).

Cependant, la fréquence du mode 3 et la compressibilité *C* restent clairement liées pour la classe 3 (Fig 4) et par conséquent, on peut supposer que les énergies des modes 1 et 3 sont exploitables pour les surfaces très compressibles ($C > 6 \cdot 10^{-5}$ mm/Pa).

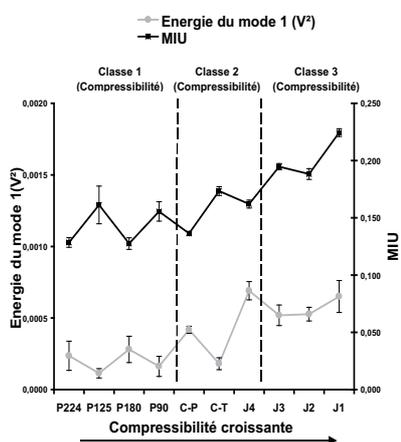


FIG 5 – Energie du mode 1- MIU

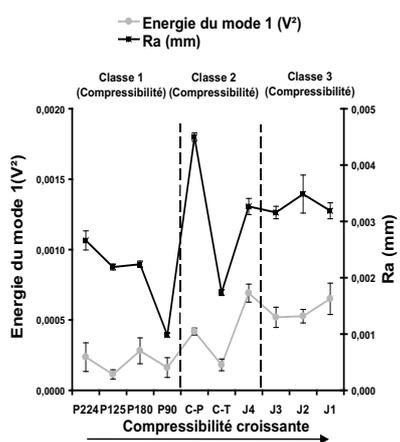


FIG 6 – Energie du mode 1 - Ra

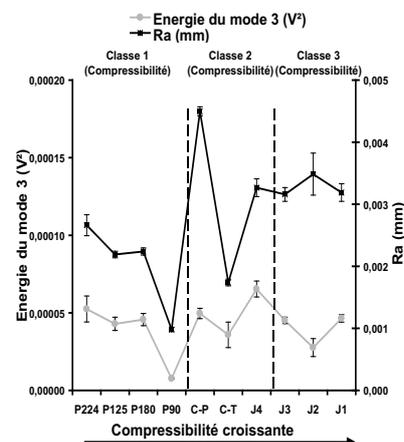


FIG 7 – Energie du mode 3 - Ra

Sur la représentation 2D (Fig 3), les valeurs des énergies des modes 1 et 3 permettent de discriminer les surfaces selon le frottement et la rugosité pour le mode 1 et selon la rugosité pour le mode 3. Cependant, la représentation 2D peut être insuffisante pour discriminer tous les types de surface. Par exemple, les points représentant les feuilles de papier et les tissus (P125, P180, P224, CT et CP) sont superposés. Il est donc nécessaire de trouver un troisième paramètre. Après avoir vu l'évolution de la fréquence du mode 3 (Fig 4), il apparaît que cette fréquence est inversement liée à la compressibilité *C* qui devient un paramètre discriminant les surfaces.

Par conséquent, une représentation incluant la compressibilité est utile. Cette nouvelle représentation est une représentation 3D traçant les énergies des modes 1 et 3 et la fréquence du mode 3 (Fig 8).

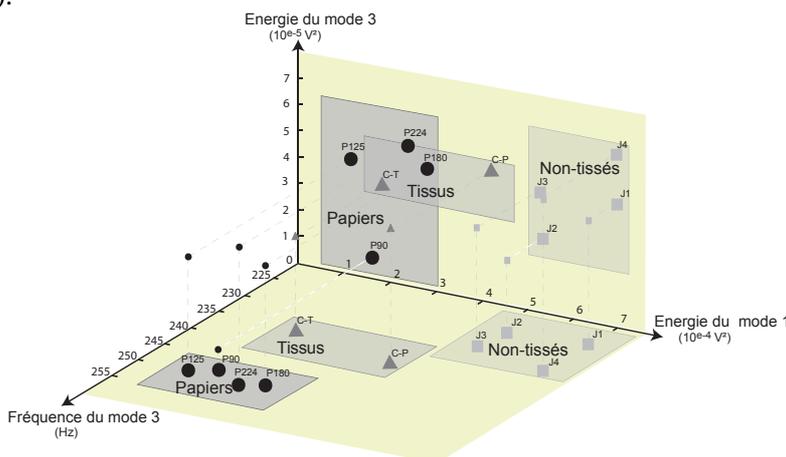


FIG 8 – Représentation 3D

Sur cette nouvelle représentation, les différents points représentant les surfaces sont projetés sur 2 plans. Sur le plan vertical, on retrouve la traditionnelle représentation 2D. Par contre, la projection sur le plan horizontal (énergie du mode 1/fréquence du mode 3) est nouvelle.

Selon les surfaces, on choisit un plan plutôt qu'un autre pour comprendre les différences observées. Cela signifie que certains paramètres (frottement, rugosité ou compressibilité) sont

prédominants les uns par rapport aux autres quand on veut discriminer des surfaces. En reprenant les résultats des papiers, il est clair que pour les différencier, on choisit la projection « énergie du mode 1 – énergie du mode 3 » car l'énergie du mode 3, évaluant la rugosité, discrimine le mieux ces surfaces. Au contraire, si l'on souhaite expliquer les différences entre les papiers et les tissus, on choisit plutôt la projection « énergie du mode 1 – fréquence du mode 3 » car dans ce cas, la fréquence du mode 3, évaluant la compressibilité, est un paramètre discriminant.

4 Conclusions

Cette étude a présenté les interactions entre les paramètres d'état de surface et les énergies et fréquences de la lamelle pour différentes surfaces afin de les lier ensemble.

Les résultats ont montré que la rugosité Ra est reliée aux énergies des modes 1 et 3, que le coefficient de frottement MIU est, quant à lui, inversement lié à l'énergie du mode 1 et la compressibilité C à la fréquence du mode 3.

Ce travail a aussi permis de présenter une nouvelle représentation 3D qui inclut les énergies des modes 1 et 3 ainsi que la fréquence du mode 3 afin d'estimer la compressibilité des surfaces. Les énergies sont projetées dans le plan vertical alors que la fréquence du mode 3 est projetée dans le plan horizontal.

Selon les surfaces, on regarde un plan de projection plutôt qu'un autre afin de choisir le paramètre prédominant pour discriminer les surfaces.

Dans le cas où la rugosité ou le frottement discriminent le mieux les surfaces, on choisit le plan « énergie du mode 1 – énergie du mode 3 » alors qu'on regarde le plan « énergie du mode 1 – fréquence du mode 3 » si la compressibilité est un paramètre prédominant.

Références

Zahouani H., Vargiolu R., Kapsa Ph., Loubet J.L., Mathia T.G. 1998, "Effect of lateral resolution on topographical images and three-dimensionnal fonctionnal parameters", *Wear*, vol. 219, p114-123.

Zahouani H., Spectral and 3D motifs identification of anisotropic topographical components. Analysis and filtering of anisotropic patterns by morphological rose approach", *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, vol 38, N° 5-6, p 615-623.

Normes ISO 4287 1998, Etat de surface : méthode du profil - Termes, définitions et paramètres d'état de surface.

Zahouani H., Vargiolu R., Loubet J.L. 1998, "Fractal Models of Surface Topography and Contact Mechanics", *Math. Comput. Modelling*, vol 28, N°4-5, p 517-534.

Bueno M.A, Fontaine S., Renner M. 2000, "Dispositif pour évaluer l'état de surface d'un matériau et procédé de mise en œuvre dudit dispositif", patent N US 6,810,744 B2.

Kawabata S. July 1980, "The Standardization and Analysis of Hand Evaluation", Second Edition, The Textile Machinery Society of Japan.