

# Couplage vibration ultrasonique et électro-vibration pour la stimulation tactile

Eric VEZZOLI<sup>1</sup>, Wael BEN MESSAOUD<sup>1</sup>, Clément NADAL<sup>1</sup>, Frédéric GIRAUD<sup>1</sup>,

Michel AMBERG<sup>1</sup>, Betty LEMAIRE-SEMAIL<sup>1</sup> et Marie-Ange BUENO<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique de Puissance, Université Lille 1, IRCICA, 50 avenue Halley, 59650 Villeneuve d'Ascq, France

<sup>2</sup> Laboratoire de Physique et Mécanique Textiles, Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs Sud Alsace, Université de Haute Alsace, 11 rue Alfred Werner, 68093 Mulhouse, France

**RESUME – L'électrovibration et l'effet *squeeze film*, produit par vibration ultrasonique, sont deux principes de stimulation tactile permettant de modifier la sensation de toucher d'un utilisateur explorant une surface plane. Le présent article s'attache à démontrer leur compatibilité sur un même stimulateur tactile lors d'une utilisation concomitante. Une description du principe physique et des spécificités de chacun des phénomènes sera entreprise et les résultats expérimentaux obtenus lors de leur association seront par ailleurs présentés.**

**MOTS-CLES –*squeeze film*, électrovibration, écrans tactiles, dispositifs tactiles, force électrostatique.**

## 1. Introduction

Durant la dernière décennie, une grande attention a été portée sur le rôle du sens du toucher dans l'interaction homme-machine, compte tenu de son importance dans notre perception du monde par l'identification et la manipulation des objets qui nous entourent. Pour améliorer l'interaction entre l'utilisateur et l'objet communicant, il est maintenant envisagé de restituer au premier des sensations tactiles correspondant aux actions qu'il effectue. En ce sens, le domaine du retour tactile a été marqué par l'émergence de deux technologies assurant un rendu sensoriel pour un utilisateur explorant une surface plane avec son doigt. La première, appelée « électrovibration », permet l'augmentation du coefficient de frottement apparent en attirant le doigt sur le dispositif de stimulation par la création de forces électrostatiques [1]. La seconde met en œuvre l'effet *squeeze film* dont le principe réside dans la réduction du coefficient de frottement apparent par la mise en vibration de la surface à explorer [2][3]. Ces deux phénomènes physiques engendrent une modification globale du frottement entre une surface et le doigt. Il est par conséquent loisible de simuler de fines textures en modulant les effets par la connaissance de la position du doigt durant l'exploration tactile [4].

L'électrovibration a été la première de ces technologies à être mise en œuvre dans les dispositifs à retour tactile [5]. L'idée originelle était de simuler des textures dont la finesse nécessitait la conception de motifs de plus en plus complexes de surfaces conductrices, indépendamment contrôlées en fonction de la position du doigt et de l'image tactile à simuler. L'acquisition précise de la position du doigt revêt alors une grande importance. Cette difficulté technologique a pu être contournée par les améliorations sans cesse apportées aux capteurs de position du doigt basés sur des solutions optiques ou résistives [1]. Avec cette transformation spatio-temporelle ajoutée aux dispositifs, les stimulateurs deviennent plus aisés à concevoir jusqu'à voir l'introduction du rendu tactile sur des surfaces transparentes [6].

L'effet *squeeze film* a quant à lui été introduit par Watanabe et al.[2], et son exploitation a été amplifiée dès lors que l'acquisition de position et le calcul en temps réel des frottements qui devaient être produits ont été performants [7][8].

Dans cet article, c'est le couplage de ces deux phénomènes physiques qui est étudié. Amorcée pour la première fois dans [9], l'étude est ici poursuivie afin de montrer la compatibilité des deux modes opératoires de contrôle du frottement et leur complémentarité. Effectivement, les effets sont antagonistes au niveau du frottement apparent engendré, par conséquent, en les combinant, il sera possible d'obtenir une large plage de variation du frottement, facilitant ainsi la simulation de frontières physiques. L'article s'attachera dans un premier temps à rappeler les conditions d'utilisation de l'électrovibration et de l'effet *squeeze film* ainsi que le principe de simulation de textures. Puis le dispositif expérimental utilisé et les résultats obtenus seront présentés. L'analyse de ces résultats sera ensuite

effectuée à partir d'une modélisation des deux phénomènes, l'un agissant sur le coefficient de frottement, l'autre sur la force normale entre le doigt et la surface.

## 2. L'effet *squeeze film*

Pour un stimulateur tactile à effet *squeeze film*, le principe d'interaction entre le doigt et la surface à explorer réside dans la diminution du coefficient de frottement apparent par la création d'un film d'air obtenu par la mise en vibration d'une plaque en regard du doigt (cf. figure 2). De fait, lors de l'exploration de la dalle par ce dernier, le doigt ne ressent pas directement les vibrations de la plaque, mais leur influence sur la tribologie de la liaison doigt/surface vibrante (cf. figure 1) : c'est l'effet *squeeze film*. Ce phénomène est produit pour des vibrations d'une amplitude de quelques micromètres et pour des fréquences ultrasonores ( $> 25$  kHz). Par conséquent, les fréquences de travail se situant hors de la bande passante des mécanorécepteurs de la peau, le stimulateur tactile ne transfère pas d'énergie au doigt mais il modifie la manière dont elle est dissipée dans la zone de contact entre le doigt et la surface vibrante. En pratique, la surface est mise en vibration dans un de ses modes propres, par des céramiques piézo-électriques qui sont collées sur sa face inférieure (cf. figure 4). Pour optimiser la vibration et l'effet *squeeze film* obtenu, le positionnement des céramiques doit être prédéterminé en fonction du mode de vibration recherché (cf. figure 3).

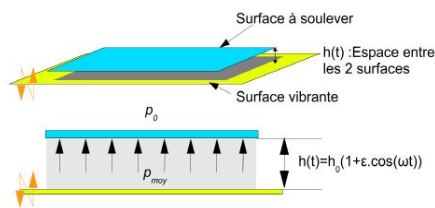


Figure 1 : Principe de l'effet de *squeeze film*

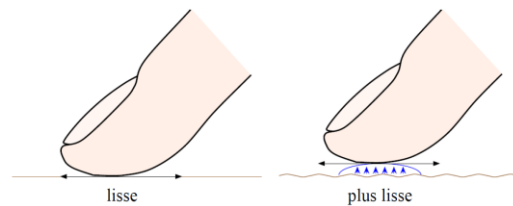


Figure 2 : Effet du *squeeze film* sur le doigt

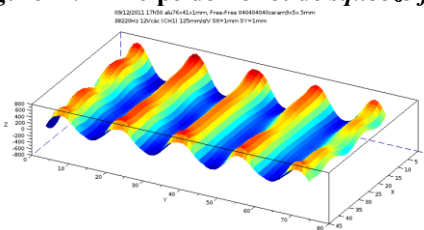


Figure 3 : Cartographie du mode de vibration recherché ( $f_r = 38220$  Hz)

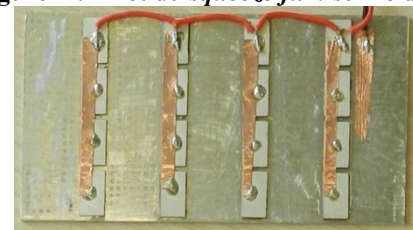


Figure 4 : Disposition des céramiques piézoélectriques collées sur la face inférieure de la plaque vibrante

## 3. L'électrovibration

Lorsqu'un doigt s'avance vers un matériau conducteur préalablement porté à un fort potentiel électrique, un déplacement de charges est induit aussi bien dans le doigt s'approchant que dans le matériau conducteur. Une conséquence de ce phénomène est l'apparition de forces attractives – aussi appelées forces électrostatiques – d'un faible ordre de grandeur, néanmoins comparable aux efforts normaux développés lors de l'exploration d'une dalle tactile. C'est le principe de base de l'électrovibration illustrée sur la figure 5.

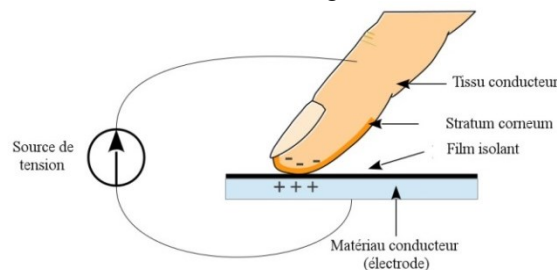


Figure 5 : Principe de l'électrovibration

Il est possible de montrer que la force électrostatique  $f_e$  créée par une différence de potentiel entre deux matériaux conducteurs (en l'occurrence les tissus corporels et l'électrode) séparés par deux couches isolantes (le film plastique et le stratum corneum) s'exprime comme suit [10]:

$$f_e(t) = \frac{A v^2(t)}{2(h_i + h_s) \left( \frac{h_i}{\epsilon_i} + \frac{h_s}{\epsilon_s} \right)} \quad (1)$$

où  $h_i$  et  $h_s$  sont respectivement les épaisseurs du film plastique et de la peau,  $\epsilon_i$  et  $\epsilon_s$  leurs permittivités diélectriques,  $v$  la différence de potentiel et  $A$  l'aire du doigt en contact. Il est possible de se passer de la couche d'isolant, le doigt touchant de ce fait directement la plaque conductrice. L'avantage est de réduire la tension requise pour produire un

stimulus détectable. L'isolation électrique de l'utilisateur est par conséquent liée au stratum corneum qui dépend des caractéristiques de la peau. De fait, les forces électrostatiques peuvent varier d'un utilisateur à un autre. Durant les expérimentations décrites par la suite, l'isolant sera conservé et les utilisateurs exécuteront des mouvements latéraux de leur doigt.

## 4. Résultats expérimentaux

L'électrovibration et l'effet *squeeze film* modifient l'effort tangentiel induit par frottement lorsque le doigt parcourt la surface à explorer. Ce dernier est connu pour réduire le frottement par la création d'un film d'air tandis que l'électrovibration augmente celui-ci par l'imposition d'une force électrostatique attractive sur le doigt. Le but des expériences présentées par la suite est d'associer ces deux technologies, de montrer leur indépendance et l'intérêt de ce couplage pour accroître la plage de frottement programmable par l'utilisateur.

### 4.1 Dispositif expérimental

Afin de valider le couplage des deux effets, un dispositif expérimental illustré sur la figure 6 a été élaboré. Il se compose d'une plaque en aluminium recouverte d'un film isolant et placée sur un support sur lequel un capteur de force à 6 ddl (ATI nano43) est monté permettant ainsi la mesure des efforts normal et tangentiel induits par l'apposition du doigt sur la dalle. La visualisation de l'électrovibration et de l'effet *squeeze film* est réalisée par une captation directe de la tension appliquée à la plaque et une mesure de l'amplitude vibratoire réalisée par interférométrie laser.

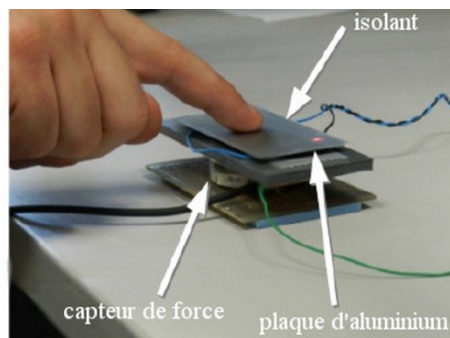


Figure 6 : Dispositif expérimental utilisé

### 4.2 Résultats

Pour valider l'hypothèse d'indépendance des deux effets, chacun des deux a été réglé pour avoir une influence comparable sur la force tangentielle. En outre, ils ont été activés en quadrature, occasionnant quatre situations expérimentales différentes : absence des effets, électrovibration seule, la combinaison des deux et effet *squeeze film* seul. La figure 7 rend compte des résultats expérimentaux obtenus.

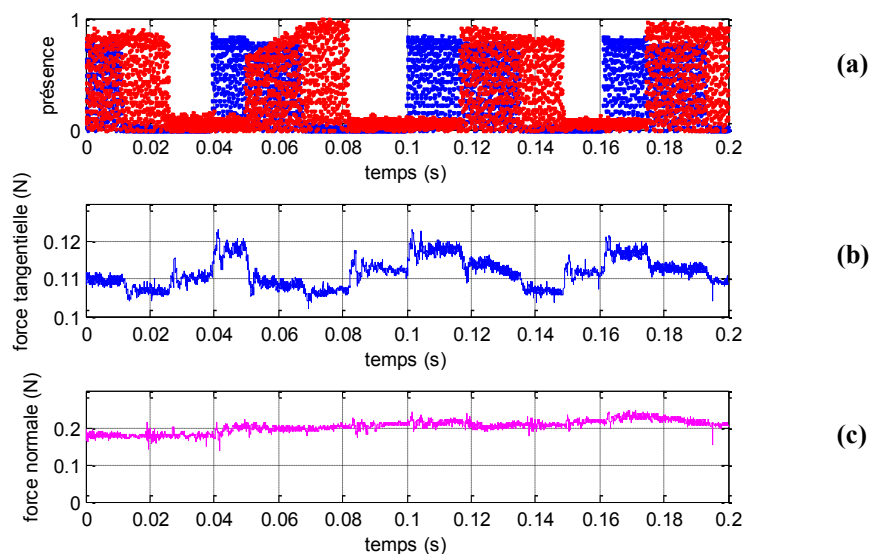


Figure 7 : (a) Présence de l'électrovibration (bleu) et de l'effet *squeeze film* (rouge), (b) effort tangentiel (en N) subi par le doigt (N), (c) effort normal (en N) appliqué par le doigt sur la dalle.

A force normale constante, pour chaque transition situationnelle, la force tangentielle subit une variation en forme d'échelon. A noter que, par la seule visualisation de la force tangentielle, il est impossible de distinguer les situations expérimentales où les deux effets sont simultanément présents ou absents. C'est un argument notable en faveur de leur indépendance respective. Il est aussi remarquable que l'électrovibration et l'effet *squeeze film* permettent respectivement d'augmenter et de diminuer le coefficient de frottement perçu.

## 5. Analyse des résultats

Les essais expérimentaux prouvent la compatibilité des deux effets électromécaniques et leur complémentarité. Afin d'optimiser leur action en terme de variation du frottement, une modélisation conjointe est nécessaire. La loi de Coulomb qui lie la force tangentielle  $F_t$  à la force normale  $F_n$  appliquée par le doigt, peut être prise comme point de départ de l'analyse. Pour la situation étudiée, elle s'écrirait :

$$F_t = (\mu - \Delta\mu) \cdot (F_n + F_e) \quad (2)$$

où  $F_e$  est la force électrostatique et  $\Delta\mu$  la variation du coefficient de frottement due à l'effet *squeeze film*. Ces deux grandeurs sont toujours positives.

Dans l'article final, la démarche d'identification de cette variation de frottement sera explicitée, à partir d'une analyse tribométrique. La force électrostatique sera également mesurée en fonction des conditions expérimentales.

Enfin, à partir de ces deux identifications distinctes, les résultats décrits au paragraphe 4.2 mettant en jeu les deux phénomènes seront explicités.

## 6. Conclusion

Cet article a permis de mettre en évidence la différence entre deux principes utilisés pour la création de retour tactile : l'électrovibration accroissant la sensation de frottement par génération de forces électrostatiques attractives et l'effet *squeeze film* à l'origine d'une réduction du coefficient de frottement apparent. Dans de précédents travaux, la compatibilité de ces deux effets a pu être mise en lumière attestant d'une augmentation de la gamme des sensations perçues. Le présent article a permis de montrer l'indépendance de ces deux procédés par la réalisation d'un banc expérimental permettant la mesure de l'effort tangentiel subi par le doigt lorsque les deux effets étaient respectivement présents ou absents ou bien agissaient l'un sans l'autre.

## 7. Références

- [1] O. Bau, I. Poupyrev, A. Israr, et C. Harrison, « TeslaTouch: electrovibration for touch surfaces », in *Proceedings of the 23rd annual ACM symposium on User interface software and technology*, New York, NY, USA, 2010, p. 283–292.
- [2] T. Watanabe et S. Fukui, « A method for controlling tactile sensation of surface roughness using ultrasonic vibration », in *1995 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1995. Proceedings*, 1995, vol. 1, p. 1134-1139 vol.1.
- [3] F. G. Mélisande Biet, « Squeeze film effect for the design of an ultrasonic tactile plate. », *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, vol. 54, n° 12, p. 2678-88, 2008.
- [4] M. Biet, G. Casiez, F. Giraud, et B. Lemaire-Semail, « Discrimination of Virtual Square Gratings by Dynamic Touch on Friction Based Tactile Displays », in *symposium on Haptic interfaces for virtual environment and teleoperator systems, 2008. haptics 2008*, 2008, p. 41-48.
- [5] E. Mallinckrodt, A. L. Hughes, et W. Sleator, « Perception by the Skin of Electrically Induced Vibrations », *Science*, vol. 118, n° 3062, p. 277-278, avr. 1953.
- [6] F. Giraud, M. Amberg, B. Lemaire-Semail, et G. Casiez, « Design of a transparent tactile stimulator », in *2012 IEEE Haptics Symposium (HAPTICS)*, 2012, p. 485-489.
- [7] M. Biet, « Conception et contrôle d'actionneurs électro-actifs dédiés à la simulation tactile », Université Lille1, Lille, 2007.
- [8] L. Winfield, J. Glassmire, J. E. Colgate, et M. Peshkin, « T-PaD: Tactile Pattern Display through Variable Friction Reduction », in *EuroHaptics Conference, 2007 and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems. World Haptics 2007. Second Joint*, 2007, p. 421-426.
- [9] F. Giraud, M. Amberg, et B. Lemaire-Semail, « Merging two tactile stimulation principles: electrovibration and squeeze film effect », in *World Haptics Conference (WHC), 2013*, 2013, p. 199-203.
- [10] K. A. Kaczmarek, K. Nammi, A. K. Agarwal, M. E. Tyler, S. J. Haase, et D. J. Beebe, « Polarity effect in electrovibration for tactile display », *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, vol. 53, n° 10, p. 2047-2054, oct. 2006.