



**HAL**  
open science

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

Eric Vezzoli, Wael Ben Messaoud, Clément Nadal, Frédéric Giraud, Michel Amberg, Betty Lemaire-Semail, Marie-Ange Bueno

► **To cite this version:**

Eric Vezzoli, Wael Ben Messaoud, Clément Nadal, Frédéric Giraud, Michel Amberg, et al.. Couplage vibration ultrasonique et électro-vibration pour la stimulation tactile. Symposium de Génie Electrique - SGE 2014, Jul 2014, Cachan, France. hal-01065171v2

**HAL Id: hal-01065171**

**<https://inria.hal.science/hal-01065171v2>**

Submitted on 25 Nov 2014 (v2), last revised 18 Sep 2014 (v4)

**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.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

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

Eric VEZZOLI<sup>1</sup>, Wael BEN MESSAOUD<sup>1,2</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>

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

2 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 produits respectivement par un champ électrostatique et 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-clés— Effet squeeze film, électrovibration, écrans tactiles, dispositifs tactiles, force électrostatique.*

## 1. INTRODUCTION

Durant la dernière décennie, une grande attention a été portée sur l'étude du toucher dans l'interaction homme-machine, compte tenu de son rôle important dans notre perception du monde pour 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 types de stimulation tactile du doigt, la stimulation locale et la stimulation globale. Chacune de ces stimulations correspond à différents types de dispositifs à retour tactile. La stimulation locale permet de restituer une sensation physique localisée sous le doigt de l'utilisateur, différenciée à l'échelle des sillons de l'empreinte digitale. Classiquement, pour ce type de stimulation, le doigt est posé de manière statique sur l'interface mise en mouvement. Généralement, cette stimulation est basée sur la programmation d'une matrice de picots vibrant à une fréquence de l'ordre de la centaine de hertz pour un déplacement de quelques micromètres [1]. A contrario, la stimulation globale consiste à produire une stimulation identique sur l'ensemble de la pulpe du doigt. Pour percevoir des changements de stimuli, le doigt doit alors être en mouvement sur le dispositif générant la stimulation. Un tel principe de fonctionnement utilise une surface active à explorer permettant le contrôle du frottement selon la position du doigt de l'utilisateur. Il existe principalement 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 [2]. 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 [3][4]. 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 leurs effets en fonction de la position du doigt durant l'exploration tactile [5].

L'électrovibration a été la première de ces technologies à être mise en œuvre dans les dispositifs à retour tactile [6]. 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 [2]. 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 [7].

L'effet *squeeze film* a quant à lui été introduit par Watanabe et al. [3], et son exploitation a été amplifiée dès lors que l'acquisition de position du doigt et le calcul en temps réel des frottements qui devaient être produits ont été performants [8][9][10].

Dans cet article, c'est le couplage de ces deux phénomènes physiques qui est étudié. Amorcée pour la première fois dans [11], l'étude est ici poursuivie afin de montrer la compatibilité des deux modes opératoires de contrôle du frottement et leur complémentarité. En effet, cette dernière s'opère au niveau du frottement apparent engendré et, par conséquent, en combinant ces deux effets, 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, agissant sur le coefficient de frottement entre le doigt et la surface. Ensuite, une étude tribologique sera utilisée afin de valider les résultats trouvés théoriquement et de montrer la possibilité de les coupler sur un même dispositif à retour tactile. Enfin, une comparaison des deux effets du point de vue énergétique sera présentée.

## 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. Fig. 1). De fait, lors de l'exploration de la plaque 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. Fig. 2): c'est l'effet *squeeze film*.

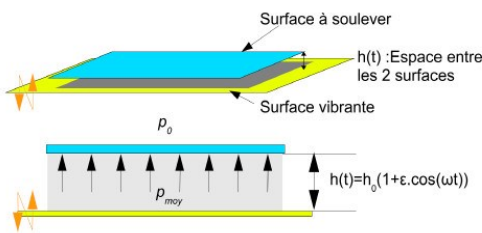


Fig.1 Principe de l'effet *squeeze film*

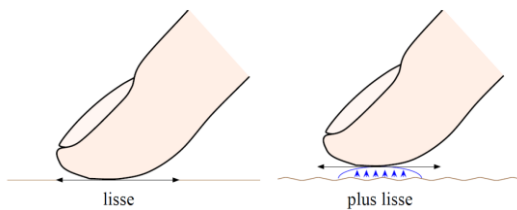


Fig. 2 Influence de l'effet *squeeze film* sur le doigt

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 situent hors de la bande passante des mécanorécepteurs de la peau [12]. 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. Pour mettre en vibration la plaque, des céramiques piézoélectriques sont collées sur l'envers de celle-ci et alimentées par une tension sinusoïdale dont la fréquence est calée sur un mode de résonance en flexion de la plaque. Une cartographie d'un des modes recherchés est présentée sur la Fig. 3.

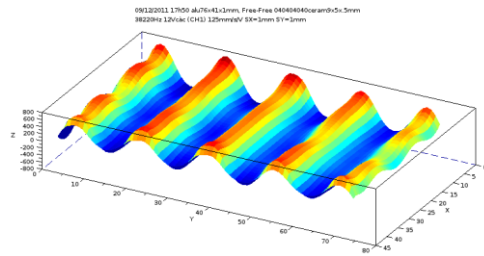


Fig. 3 : Cartographie du mode de vibration recherché ( $f_r = 38220$  Hz)

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. Fig. 4).

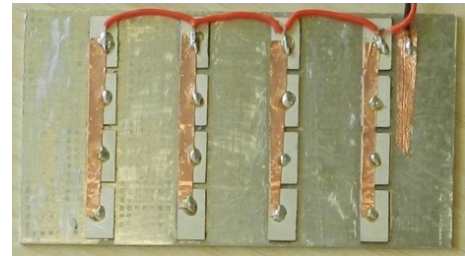


Fig. 4 Disposition des céramiques piézoélectriques collées sur la face inférieure de la plaque à mettre en vibration

## 3. L'ELECTROVIBRATION

Il s'agit ici d'un phénomène tout à fait différent pour créer une stimulation tactile. 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 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 illustré sur la Fig. 5.

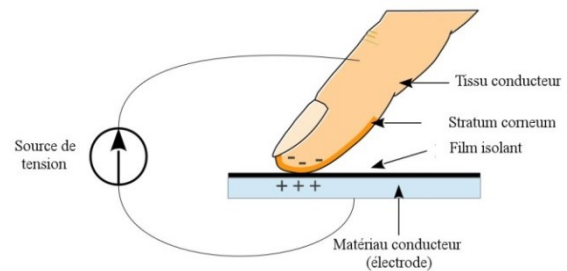


Fig. 5 Principe de l'électrovibration

Il est possible de montrer que la force électrostatique  $f_e$  créée par une différence de potentiel entre un doigt en contact avec une dalle polarisée électriquement et recouverte par un isolant conducteur revêt la forme suivante :

$$f_e(t) = \frac{\epsilon_0 A v_e^2(t)}{2(h_i + h_s) \left( \frac{h_i}{\epsilon_i} + \frac{h_s}{\epsilon_s} \right)} \quad (1)$$

où  $h_i$  et  $h_s$  sont respectivement les épaisseurs du film isolant et de la peau,  $\epsilon_i$  et  $\epsilon_s$  leurs permittivités diélectriques relatives,  $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} F/m$  la permittivité diélectrique du vide et  $A$  l'aire de contact du doigt. 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. Par ailleurs, d'après l'équation (1), la force électrostatique est proportionnelle au carré de la tension effective  $v_e(t)$  dont la détermination tient compte de la dépendance fréquentielle du comportement électrique du doigt. Une modélisation de ce comportement proposée ci-après est détaillée dans l'article [13].

Par cette force d'attraction entre le doigt et la dalle portée à un potentiel élevé, l'utilisateur qui explore la surface de la dalle ressent donc un frottement supérieur à celui de la surface de la dalle non alimentée.

#### 4. RESULTATS EXPERIMENTAUX

L'électrovibration et l'effet *squeeze film* modifient donc l'effort tangentiel induit par frottement lorsque le doigt parcourt la surface à explorer. L'effet *squeeze film* 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 principes, 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 Fig. 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'exploration 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. Le laser est utilisé aussi pour calibrer l'amplitude vibratoire en micromètre en fonction de la tension appliquée en volt.

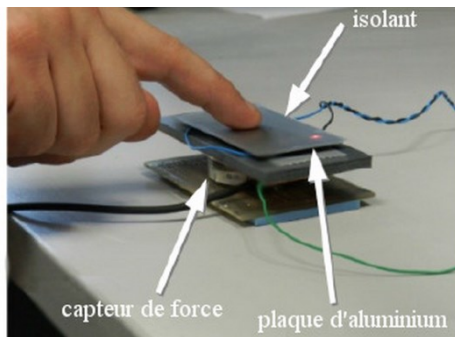


Fig. 6 Dispositif expérimental utilisé

#### 4.2. Résultats

Afin de comparer la théorie à l'expérience, les expérimentations décrites par la suite mettront en œuvre le même isolant et les utilisateurs exécuteront des mouvements latéraux de leur doigt.

L'expérience est réalisée en exploration libre, effectuée par une seule personne. Cette personne a réellement donné un consentement éclairé sur le but de l'expérience. Un entraînement initial est fait pour s'habituer à reconnaître les effets de modulation de frottement. La vitesse d'exploration de la main sur la plaque n'est pas contrôlée mais gardée relativement constante, de l'ordre de 30 mm/s. Une exploration de 30 s est effectuée, suivie par 30 s de pause pour laisser le doigt sécher à l'air, l'humidité du doigt étant un facteur qui peut changer les conditions tribologiques. La force normale appliquée par le doigt est affichée en temps réel avec la force tangentielle afin que l'utilisateur puisse maintenir une force normale constante de l'ordre de 0.2 N.

Pour valider l'hypothèse d'indépendance des deux effets, chacun d'eux a été réglé pour avoir une influence comparable sur la force tangentielle. En outre, dans l'essai illustré Fig. 7, ils ont été activés en quadrature temporelle, occasionnant ainsi quatre situations expérimentales différentes : absence des effets, électrovibration seule, combinaison des deux effets et effet *squeeze film* seul. La durée d'un cycle couvrant ces quatre situations est de 60 ms. La Fig. 7 rend compte des résultats expérimentaux obtenus.

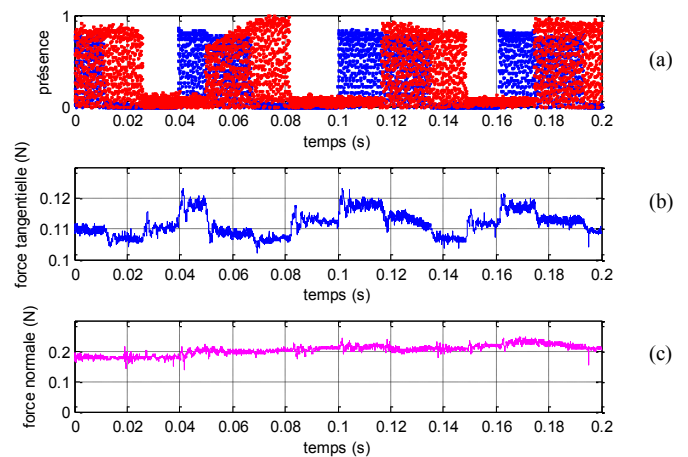


Fig. 7 (a) Présence de l'électrovibration (bleu) et de l'effet *squeeze film* (rouge), (b) effort tangentiel (en N) subi par le doigt, (c) effort normal (en N) appliqué par le doigt sur la dalle.

A force normale constante, pour chaque transition situationnelle, la force tangentielle subit une variation en forme d'échelon. On retrouve bien l'augmentation de la force tangentielle lors de l'application de l'électrovibration, la diminution lors de l'application de l'effet *squeeze film* et l'annihilation des deux effets lorsqu'ils sont créés simultanément. 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. Un essai complémentaire a été

effectué pour valider la complémentarité de ces deux modes opératoires : la Fig. 10 illustre l'évolution de la force tangentielle en fonction de la présence ou l'absence simultanée des deux effets pour une force normale appliquée par le doigt constante (de l'ordre de 0.2 N).

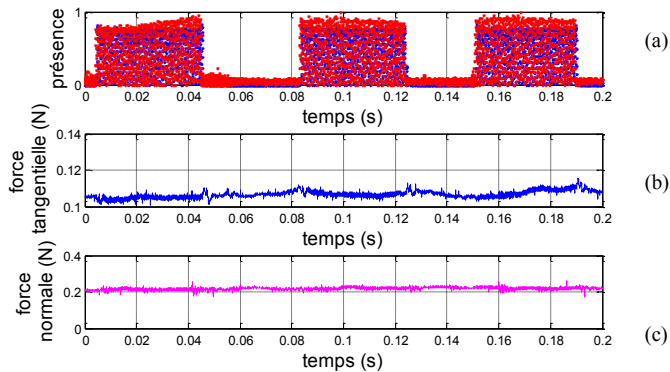


Fig. 10 (a) Présence et absence simultanées de l'électrovibration (bleu) et de l'effet *squeeze film* (rouge), (b) effort tangentiel (en N) subi par le doigt, (c) effort normal (en N) appliqué par le doigt sur la dalle.

L'importance de cette courbe réside dans le fait que les deux effets sont complètement compensables.

Enfin, la Fig. 11 illustre l'évolution de la force tangentielle lorsque les deux effets sont appliqués de façon complémentaire. La force normale est maintenue constante à environ 0.2 N. Cette mesure montre aussi la complémentarité des deux effets et la possibilité d'élargir la gamme de frottement à simuler.

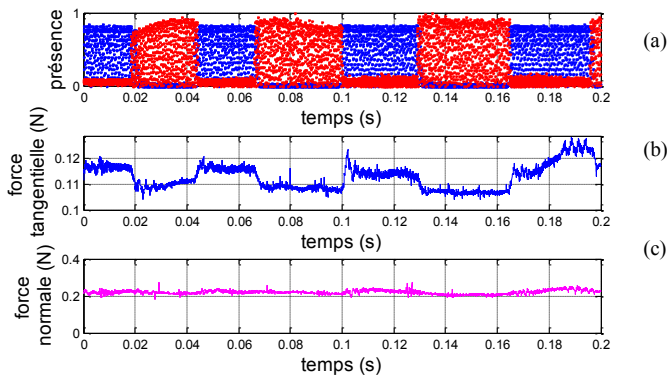


Fig. 11 (a) Présence et absence en alternance de l'électrovibration (bleu) et de l'effet *squeeze film* (rouge), (b) effort tangentiel (en N) subi par le doigt, (c) effort normal (en N) appliqué par le doigt sur la dalle.

#### 4.3. Analyse tribologique

Les mesures des forces tangentielles et normales sont effectuées à partir des données relevées dans les Fig. 7, 10 et 11 lorsque les différents régimes sont établis. La Fig. 12 illustre l'évolution du coefficient de frottement en fonction de l'effet appliqué pour les quatre cas possibles de stimulation (présence seule de l'effet *squeeze film*, présence seule de l'électrovibration, présence et absence simultanées des deux

effets). Le coefficient de friction est calculé par le biais du rapport  $F_t/F_n$ .

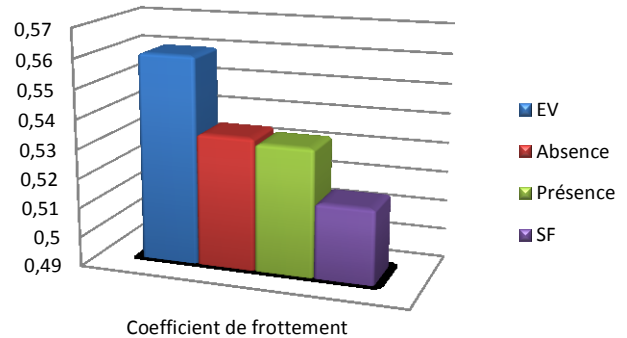


Fig. 12 Évolution du coefficient de frottement pour les quatre cas possibles de modulation de frottement.

Il est clair que le coefficient de frottement obtenu par effet *squeeze film* est toujours inférieur au coefficient de frottement en l'absence des deux effets. L'électrovibration quant à elle entraîne toujours un coefficient de friction supérieur à celui en l'absence de ces effets. Il est également évident que l'évolution du coefficient de frottement lorsque les deux effets sont présents simultanément est confondue avec celle obtenue en absence de ces deux effets.

#### 5. ANALYSE DES RESULTATS

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 moyenne créée par l'électrovibration,  $\mu$  le coefficient de frottement dynamique entre le doigt et la surface à explorer et  $\Delta\mu$  la variation du coefficient de frottement due à l'effet *squeeze film*. Ces grandeurs sont toujours positives.

##### 5.1. Calcul théorique de la force électrostatique moyenne

A partir de l'équation (1), il est possible d'évaluer la force électrostatique moyenne créée par électrovibration. Ce calcul nécessite la détermination de la tension effective  $v_e(t)$  dont l'expression, en fonction de la tension  $v(t)$  appliquée entre le doigt et l'électrode conductrice est donnée d'après [13], en notation complexe, par la relation suivante :

$$\underline{v_e}(j\omega) = \frac{j\omega\tau}{1 + j\omega\tau} \underline{v}(j\omega) \quad (3)$$

où  $\tau = R_s C_s = \varepsilon_0 \varepsilon_s \rho_s$  avec  $\rho_s$  la résistivité électrique du stratum corneum. Pour se persuader de la véracité de l'expression précédente, il suffit, dans une première approche, de schématiser le comportement électrique du doigt parcourant

une électrode conductrice recouverte d'un isolant comme l'association en série d'un circuit RC parallèle caractérisé par le couple  $(R_s, C_s)$ , image du comportement électrique du stratum corneum, et d'une capacité  $C_i \ll C_s$  symbolisant l'isolant. Il est à noter [14] que les caractéristiques électriques du stratum corneum, symbolisées par les quantités  $\varepsilon_s$  et  $\rho_s$ , varient d'un individu à l'autre et dépendent de la fréquence de la tension d'excitation. L'expression temporelle générale de la tension effective  $v_e(t)$  n'est de fait pas immédiate. Toutefois, dans le cas présent, la tension appliquée est supposée de forme sinusoïdale telle que  $v(t) = V_m \cos(\omega t)$  où  $\omega = 2\pi f$  avec  $f$  la fréquence du signal imposé. La tension effective  $v_e(t)$  revêt alors la forme suivante :

$$v_e(t) = V_m \frac{\omega\tau}{\sqrt{1 + (\omega\tau)^2}} \cos\left[\omega t + \frac{\pi}{2} - \arctan(\omega\tau)\right] \quad (4)$$

Par conséquent, la valeur moyenne de la force électrostatique créée par électrovibration a pour expression :

$$F_e = \frac{\varepsilon_0 A V_m^2}{4(h_i + h_s) \left(\frac{h_i}{\varepsilon_i} + \frac{h_s}{\varepsilon_s}\right)} \times \frac{(\omega\tau)^2}{1 + (\omega\tau)^2} \quad (5)$$

Tableau 1. Caractéristiques géométriques et structurelles du dispositif mettant en œuvre l'électrovibration

	Définition	Valeur	Unité
$h_i$	Épaisseur du film plastique	90	$\mu\text{m}$
$h_s$	Épaisseur moyenne du stratum corneum [15]	350	$\mu\text{m}$
$A$	Surface du doigt en contact	1	$\text{cm}^2$
$\varepsilon_i$	Permittivité diélectrique relative du film plastique	3.35	
$\varepsilon_s$	Permittivité diélectrique relative du stratum corneum à 440 Hz [14]	2340	
$\rho_s$	Résistivité du stratum corneum à 440 Hz [14]	$3.0 \times 10^9$	$\Omega \cdot \text{m}$
$V_m$	Amplitude de la tension d'alimentation	2000	V
$f$	Fréquence de la tension sinusoïdale appliquée	440	Hz

A partir des données référencées dans le tableau 1, correspondant aux caractéristiques du dispositif expérimental utilisé pour valider l'approche, la force électrostatique moyenne générée par électrovibration vaut  $F_e = 0.056 \text{ N}$ .

## 5.2. Calcul théorique de la réduction de frottement par effet squeeze film

A partir de la modélisation proposée dans [4], la réduction du coefficient de frottement due à l'effet *squeeze film* est déterminée à partir de la relation suivante :

$$\frac{\Delta\mu}{\mu} = 1 - \frac{F_s}{F_n} \quad (6)$$

où  $F_n$  et  $F_s$  sont respectivement l'effort normal appliqué par le doigt et la force exercée sur le doigt par l'effet *squeeze film*. Cette dernière est moyennée temporellement sur une période de l'onde de vibration et spatialement sur l'aire de la partie de

doigt en contact avec la plaque. Elle s'exprime de fait comme suit :

$$F_s = \frac{p_0 A}{l_0 T} \int_0^T \int_{-l_0/2}^{l_0/2} [\bar{P}_\infty(x, t) - 1] dx dt \quad (7)$$

où  $\bar{P}_\infty(x, t)$  est la pression de l'air emprisonné entre le doigt et la plaque vibrante normalisée à la pression atmosphérique  $p_0$ . La modélisation proposée dans [4] permet de prendre en considération l'amplitude  $h_v$  de l'onde de flexion, la rugosité de la plaque, symbolisée par une épaisseur moyenne  $h_r$ , et le caractère ondulé du bout du doigt variant, par hypothèse, sinusoidalement sur une période spatiale  $L_e$  avec une amplitude  $h_e$  (cf. Fig. 8).

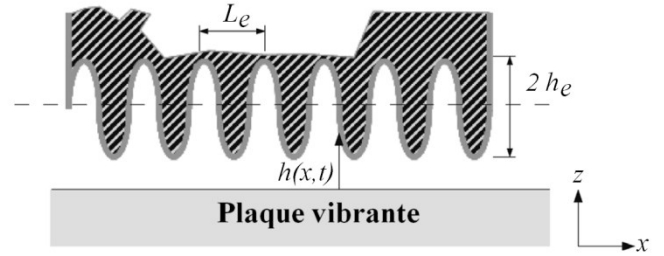


Fig.8 Géométrie du profil du doigt avec prise en compte des empreintes digitales pour la modélisation du squeeze film [4]

D'après ces considérations, l'épaisseur  $h$  du film d'air compris entre le doigt et la plaque a pour expression :

$$h(x, t) = h_r + h_v[1 + \cos(\omega t)] + h_e[1 + \cos(kx)] \quad (8)$$

avec  $k = 2\pi/L_e$ . Par suite, à partir de l'équation de Navier-Stokes, sous couvert d'hypothèses simplificatrices détaillées dans [8], il est possible de montrer que l'épaisseur du film d'air  $h(x, t)$  et la pression associée  $p(x, t)$  vérifient, dans le cas d'une évolution isotherme du gaz, une équation de Reynolds unidimensionnelle comme suit :

$$\frac{\partial}{\partial X} \left[ H^3(X, T) P(X, T) \frac{\partial P}{\partial X}(X, T) \right] = \sigma \frac{\partial}{\partial T} [P(X, T) H(X, T)] \quad (9)$$

où  $H(X, T) = h(x, t)/h_0$  avec  $h_0 = h_r + h_v + h_e$  et  $P(x, t) = p(x, t)/p_0$  sont l'épaisseur adimensionnée du film d'air et la pression normalisée à la pression atmosphérique du fluide. Elles sont fonction des variables sans dimension  $X = x/l_0$  et  $T = \omega t$ . La grandeur  $\sigma$  apparaissant dans l'équation (5) est appelé *squeeze number* et est définie par la relation suivante :

$$\sigma = \frac{12\eta\omega A}{p_0(h_r + h_v + h_e)^2} \quad (10)$$

avec  $\eta$  la viscosité dynamique de l'air. Cette quantité représente une mesure de la compressibilité du fluide piégé entre le doigt et la plaque en vibration. Pour de faibles valeurs de  $\sigma$ , le fluide est considéré comme incompressible, tandis que pour de forts *squeeze number*, l'air est comprimé entre le doigt et la dalle vibrante et se comporte comme un ressort. Par la suite, il est supposé que le fluide comprimé présente un *squeeze number* élevé. Pour la résolution de l'équation (9), il est alors supposé que  $\sigma \rightarrow +\infty$  (en pratique, cette hypothèse

est considérée comme satisfaite pour  $\sigma > 10$  [4]). Dans de telles conditions, l'expression de la pression adimensionnée  $\bar{P}_\infty(x, t)$  peut être déterminée (le détail du calcul est proposé dans [4]) si bien que :

$$\bar{P}_\infty(x, t) = \frac{[1 + \delta \cos(kx)] \sqrt{[1 + \delta \cos(\frac{kL_0}{2})]^2 + \frac{3}{2}\varepsilon^2}}{[1 + \delta \cos(\frac{kL_0}{2})] [1 + \delta \cos(kx) + \varepsilon \cos(\omega t)]} \quad (11)$$

avec  $\delta = h_e/h_0$  et  $\varepsilon = h_v/h_0$ . En injectant la relation précédente dans l'équation (7), l'expression en résultant permet de tracer par le biais de l'équation (6) le coefficient de frottement relatif en fonction de l'amplitude de vibration  $h_v$  pour une rugosité de la plaque donnée et différents efforts normaux imposés. Les courbes représentées sur la Fig. 11 ont été obtenues pour une rugosité moyenne  $h_r = 1.8 \mu\text{m}$  et tracées à l'aide des paramètres consignés dans le tableau 2.

Tableau 2. Caractéristiques géométriques et structurelles pour la modélisation de la réduction du coefficient de frottement par effet *squeeze film*

	Définition	Valeur	Unité
$h_r$	Rugosité moyenne de la plaque	1.8	$\mu\text{m}$
$h_e$	Amplitude des crêtes épidermiques	50	$\mu\text{m}$
$L_e$	Période spatiale des crêtes épidermiques	350	$\mu\text{m}$
$f_r$	Fréquence du mode de flexion sollicité	44700	Hz
$\lambda$	Période spatiale du mode de flexion sollicité	0.8	cm
$F_n$	Effort normal appliqué par le doigt	[0.2, 0.4]	N
$\eta$	Viscosité dynamique de l'air à 20°C et 1 atm	$1.85 \times 10^{-5}$	Pa.s
$p_0$	Pression atmosphérique	$10^5$	Pa

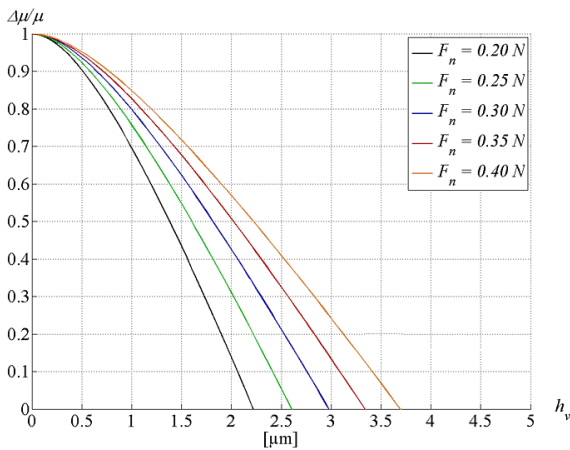


Fig. 9 Évolution du coefficient de frottement relatif par effet *squeeze film* en fonction de l'amplitude de vibration pour différentes forces normales appliquées

Les résultats théoriques affichés sur la Fig. 9 montrent une forte dépendance du coefficient de frottement relatif avec l'effort normal appliqué et l'amplitude de vibration. Par exemple, pour une force normale de 0.2 N (correspondant à l'effort moyen appliqué par l'utilisateur durant les expérimentations), une amplitude de vibration supérieure à

$2 \mu\text{m}$  serait nécessaire pour « annuler » le coefficient de frottement relatif, signifiant par là même que le doigt parcourant la dalle vibrante serait en « lévitation » complète.

### 5.3. Comparaison énergétique des deux effets

Si les deux effets sont comparables d'un point de vue tribologique, il est intéressant de poursuivre leur comparaison du point de vue énergétique. Pour ce faire, la puissance consommée par la création de chacun des deux effets est évaluée à partir d'une mesure en sortie de l'onduleur pour la production de l'effet *squeeze film*, et en sortie de l'association onduleur-amplificateur pour l'électrovibration. Ces mesures sont effectuées dans un premier temps lorsque le dispositif est à vide (sans effort appliqué par le doigt) puis en charge (le doigt est présent et applique un effort) et en présence de l'électrovibration ou de l'effet *squeeze film*. La puissance est calculée par le produit courant-tension. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 3.

Tableau 3. Bilan des puissances consommées à vide et en charge pour les deux effets de modulation de frottement

	Puissance à vide	Puissance en charge
Effet <i>Squeeze film</i>	1 W	1.4 W
Effet Électrovibration	5.6 W	6.72 W

En comparant la consommation en charge pour les deux effets, il est évident que la génération de l'effet *squeeze film* nécessite quatre fois moins d'énergie que la promotion de l'électrovibration. La différence entre la puissance en charge et la puissance à vide donne la puissance consommée par l'effet quand le doigt est présent sur la plaque. De fait, la puissance consommée par l'effet *squeeze film* est trois fois plus faible que celle utilisée pour la mise en œuvre de l'électrovibration (0.4 W pour l'effet *squeeze film* contre 1.12 W pour l'électrovibration). Il est à noter que ces puissances mesurées dépendent de l'environnement matériel utilisé tel que l'amplificateur, DSP. De plus, dans le cas de l'électrovibration, l'épaisseur du film isolant est très influent sur la puissance consommée.

Il est également possible de remarquer que l'effet *squeeze film*, compte tenu de sa faible consommation énergétique est un candidat sérieux pour une implémentation dans le domaine des écrans tactiles pour les objets mobiles communicants.

## 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 dans un premier temps de montrer l'indépendance physique de ces deux procédés. Puis, une preuve de leur indépendance a été apportée par la mise en œuvre d'une étude tribologique qui a nécessité 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. Enfin, une analyse énergétique a été opérée pour comparer l'efficacité des deux effets et leur possibilité d'être implémentés dans le domaine des dispositifs portables à écran tactile.

## 7. REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier les régions Nord-Pas-de-Calais et Alsace pour leur soutien financier, ainsi que les institutions IRCICA et INRIA.

## 8. REFERENCES

- [1] M. Shimojo, M. Shinohara, M. Tani, et Y. Shimizu, « An Approach for Direct Manipulation by Tactile Modality for Blind Computer Users: Principle and Practice of Detecting Information Generated by Touch Action », in *Computers Helping People with Special Needs*, K. Miesenberger, J. Klaus, W. L. Zagler, et D. Burger, Éd. Springer Berlin Heidelberg, 2004, p. 753-760.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] M. Biet et F. Giraud, « 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] M. Biet, « Conception et contrôle d'actionneurs électro-actifs dédiés à la simulation tactile », Université Lille1, Lille, 2007.
- [9] 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.
- [10] W. Ben Messaoud, B. Lemaire-Semail, M.-A. Bueno, M. Amberg, et F. Giraud, « Closed-Loop Control for Squeeze Film Effect in Tactile Stimulator », in *Proceedings of the 2014 international Conference and exhibition on new actuators and drives, Actuator 2014*, Bremen, Germany, 2014.
- [11] 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.
- [12] T. Maeno, K. Otokawa, et M. Konyo, « Tactile Display of Surface Texture by use of Amplitude Modulation of Ultrasonic Vibration », in *IEEE Ultrasonics Symposium, 2006*, 2006, p. 62-65.
- [13] E. Vezzoli, M. Amberg, F. Giraud, et B. Lemaire-Semail, « Electro-vibration modelling analysis », in *EuroHaptics Conference, 2007 and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems. World Haptics 2014. Second Joint*, Versailles, France, 2014.
- [14] T. Yamamoto et Y. Yamamoto, « Electrical properties of the epidermal stratum corneum », *Med. Biol. Eng.*, vol. 14, n° 2, p. 151-158, mars 1976.

- [15] H. Fruhstorfer, U. Abel, C. D. Garthe, et A. Knüttel, « Thickness of the stratum corneum of the volar fingertips », *Clin. Anat. N. Y. N.*, vol. 13, n° 6, p. 429-433, 2000.
- [16] M. Biet, F. Giraud, et B. Lemaire-Semail, « Implementation of tactile feedback by modifying the perceived friction », *Eur. Phys. J. - Appl. Phys.*, vol. 43, n° 01, p. 123-135, 2008.