

Modèle de contact doigt-surface pour une interface haptique piézoélectrique

Kaoutar Laklaoui, Diana Angelica Torres Guzman, Betty Lemaire-Semail, Christophe Giraud-Audine

Univ. Lille, Arts et Métiers Institute of Technology, Centrale Lille, Junia, L2EP – ULR 2697, F-59000 Lille, France

RESUME - La perception des stimuli haptiques à ultrasons est subjective et varie d'un individu à l'autre en raison des différences de frottement cutané. Pour offrir une expérience utilisateur plus personnalisée, nous proposons un modèle de frottement qui intègre la compliance de la peau, qui est une caractéristique individuelle du doigt. Ce modèle permet de prédire la réduction du frottement et d'adapter en conséquence la commande de la surface haptique.

Mots-clés—ultrasons—réduction de frottement—piézoélectrique—surface haptique—'Human in the loop'

1. INTRODUCTION

Les surfaces haptiques sont des interfaces planes conçues pour fournir un retour tactile à l'utilisateur en modulant l'effort entre le doigt et la surface. Parmi les technologies utilisées [1], on trouve notamment la réduction de frottement par vibrations ultrasonores : grâce à la modification du contact doigt-surface lorsque cette dernière vibre, le frottement entre le doigt et cette surface est réduit. Mais cette réduction de frottement dépend des caractéristiques mécaniques du doigt et donc varie selon chaque utilisateur. De plus, le doigt agit sur la vibration en rétroaction, ce qui nécessite de contrôler la vibration en boucle fermée. Pour mieux comprendre les couplages et l'influence des différents facteurs de cette chaîne de conversion énergétique qui inclut l'Homme, nous avons adopté le formalisme REM (Représentation Énergétique Macroscopique) [2], qui met notamment en évidence l'élément de contact. Plusieurs modèles d'interaction entre le doigt et la surface haptique à ultrason ont été proposés dans la littérature pour prédire et expliquer la réduction de frottement observée [3-4]. Pour les interfaces à ondes longitudinales cependant, la réduction de frottement n'est pas encore complètement théorisée, en particulier lorsque la direction de déplacement du doigt et la direction de l'onde sont différentes. En général, entre deux surfaces de vitesses différentes mais dans le même plan, on distingue des modèles qui supposent que le contact est rigide et ceux qui tiennent compte d'une certaine élasticité. Le premier est adapté par exemple pour l'usinage de pièces métalliques [5]. Cependant, dans le contexte des surfaces haptiques, le contact surface vibrante-doigt est influencé par la forte disparité des propriétés élastiques des deux. Il faut donc que le modèle de frottement prenne en compte cette caractéristique, largement variable d'un individu à l'autre. Le modèle de frottement « Ratchet » [7] prend en considération l'élasticité du doigt, mais est restreint à

des mouvements du doigt dans la direction de l'onde. Le modèle proposé par Tsai [6] permet lui d'expliquer la réduction du frottement dans toutes les directions d'exploration. Il prend également en compte la compliance du contact. Ce modèle a été utilisé avec succès dans la littérature pour prédire la réduction de frottement dans les outils d'usinage utilisant des ondes ultrasonores. L'objectif de ce travail est d'adapter ce modèle au cas particulier des surfaces haptiques. Une meilleure modélisation du contact peut être intégrée dans la stratégie de commande du dispositif. Cela permettrait d'adapter la commande aux propriétés individuelles de chaque utilisateur, uniformisant ainsi la réduction de frottement perçue et standardisant l'expérience haptique. Cet article débute par une modélisation énergétique globale du couplage entre le doigt et la surface haptique (section 2). La section suivante (section 3) est consacrée à la description de la configuration du dispositif haptique utilisé. Nous rappelons ensuite le modèle de frottement « Ratchet » (section 4). Le modèle rigide de Tsai, appliqué aux surfaces haptiques, est présenté en (section 5), suivi par présentation de sa version avec compliance en (section 6). Une analyse comparative des prédictions de frottement issues de ces deux modèles est ensuite proposée (section 7). Enfin, la (section 8) est consacrée aux validations expérimentales du modèle de Tsai.

2. MODELISATION ENERGETIQUE DU COUPLAGE ENTRE LE DOIGT ET LA SURFACE HAPTIQUE

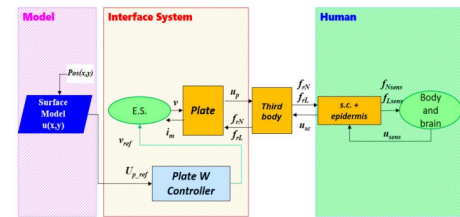


Fig. 1. Modélisation énergétique d'une surface haptique en contact avec un doigt : la partie jaune représente la plaque actionnée par les céramiques piézo-électriques et contrôlée en amplitude d'onde en boucle fermée. Partie verte, représentation du doigt. Entre les deux, le « Third Body », qui représente le contact avec une dominante élastique. Tiré de [7].

Le schéma de la conversion d'énergie entre une plaque vibrante et un doigt qui l'explore est donné fig. 1 [7]. La modélisation montre les interactions au sein de ce système et en particulier la réaction du doigt via un troisième corps « third body » sur la plaque vibrante. Afin d'améliorer le contrôle, voire la conception de l'interface tactile, une modélisation adéquate de

cet intermédiaire qui représente le contact est essentielle. Ce modèle sera implémenté dans la stratégie (bloc bleu foncé) pour adapter l'amplitude de référence à la nature du doigt en contact.

3. CONFIGURATION EXPERIMENTALE DU DISPOSITIF HAPTIQUE A ULTRASONS

Le dispositif haptique étudié est une plaque en aluminium qui est mise en vibration par des céramiques piézoélectriques fixées sous la surface et alimentées par des tensions sinusoïdales à sa fréquence de résonance, dans le domaine ultrasonore (env. 60kHz). Ce système est commandé en boucle fermée (Fig. 2), de manière à maintenir une amplitude vibratoire cible constante, quelles que soient les conditions de contact. Lorsqu'un doigt entre en contact avec la plaque, il absorbe une partie de l'énergie vibratoire, ce qui oblige les éléments piézoélectriques à fournir un effort supplémentaire pour maintenir l'amplitude souhaitée. La différence d'effort entre l'état à vide (sans contact) et l'état en charge (avec doigt) constitue une mesure indirecte de l'interaction mécanique entre la plaque et le doigt. Ce paramètre est au cœur de nos investigations : dans les travaux futurs, nous étudierons comment cette variation est corrélée au frottement réel au niveau du contact, et comment elle pourrait être reliée à la perception haptique ressentie par l'utilisateur.

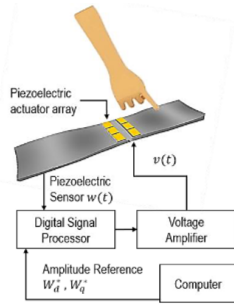


Fig. 2. Surface haptique ultrasonique commandée en boucle fermée, tiré de [7].

4. MODELE DE FROTTEMENT « RATCHET »

Dans le mécanisme de frottement « Ratchet », le doigt est modélisé par une paire de ressorts, caractérisés par les constantes k_{lf} et k_{nf} , qui représentent respectivement l'élasticité normale et latérale du stratum corneum. Dans le cadre du mode de vibration longitudinale, il est supposé que la compression du ressort normal reste constante, et que la déformation du ressort latéral dépende de la vitesse relative entre la pulpe du doigt et la surface explorée. En fonction de la vitesse relative et de la déformation du ressort latéral, durant l'exploration, le doigt peut se trouver dans l'un des trois états définis par la machine à états du mécanisme « Ratchet », comme montré dans la Fig. 3

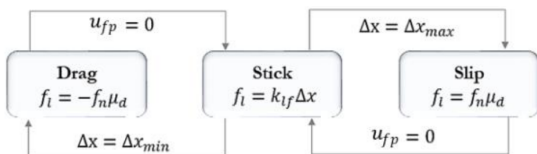


Fig. 3. Machine à états du modèle de frottement « Ratchet », tiré de [7].

Avec f_l la force de frottement latérale, f_n l'effort normal, μ_d le coefficient de frottement dynamique, Δx l'allongement du ressort latéral, Δx_{max} et Δx_{min} l'allongement maximal et minimal respectivement, pour passer d'un état d'adhérence à un état de glissement, u_{fp} la vitesse relative entre le doigt de vitesse (u_f) et la plaque vibrante de vitesse (u_p), définie par (1).

$$u_{fp} = u_f - u_p \quad (1)$$

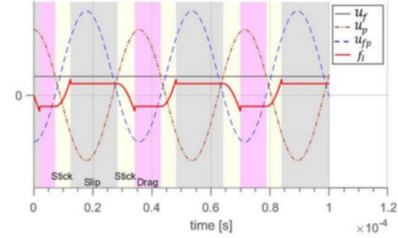


Fig. 4. Evolution temporelle de la force de frottement latérale f_l selon le mécanisme « Ratchet », tiré de [7].

La force de frottement est la moyenne sur une période de vibration. L'effort du frottement est réduit quand la vitesse vibratoire augmente. Ce modèle donne de bons résultats mais il est limité à une exploration du doigt dans la direction de l'onde, alors que la réduction de frottement est ressentie dans toutes les directions d'exploration sur la surface.

5. MODELE DE FROTTEMENT RIGIDE DE TSAI

Le modèle de Tsai repose sur la projection de la force de frottement dans la direction de glissement relative du doigt par rapport à la plaque comme montre la Fig. 5.

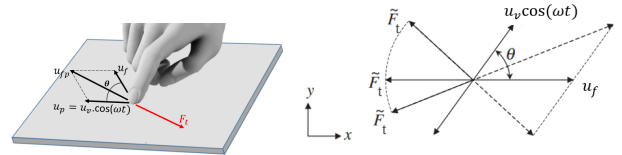


Fig. 5. La force de frottement F_t est opposée à la vitesse relative entre le doigt et la plaque u_{fp} , tiré de [6].

Lorsque le doigt explore la plaque dans une direction qui forme un angle θ avec la direction de l'onde. La vitesse relative entre le doigt et la plaque rigide peut être exprimée sous forme vectorielle comme (2).

$$\vec{u}_{fp} = (u_f + u_v \cos(\omega t) \cos(\theta))\vec{i} + (u_v \cos(\omega t) \sin(\theta))\vec{j} \quad (2)$$

La force de frottement s'oppose au mouvement vibratoire relatif et décrite par l'expression :

$$\vec{F}_t = -\mu_d f_n \frac{\vec{u}_{fp}}{|\vec{u}_{fp}|} \quad (3)$$

En remplaçant (2) dans (3) :

$$\vec{F}_t = \tilde{F}_x(t)\vec{i} + \tilde{F}_y(t)\vec{j} \quad (4)$$

Avec :

$$\tilde{F}_x(t) = \frac{-\frac{u_f}{u_v} - \cos(\theta) \cdot \cos(\omega t)}{\sqrt{\left(\frac{u_f}{u_v}\right)^2 + 2 \cdot \frac{u_f}{u_v} \cdot \cos(\theta) \cdot \cos(\omega t) + \cos^2(\omega t)}} \mu_d f_n \quad (5)$$

$$\tilde{F}_y(t) = \frac{-\sin(\theta) \cdot \cos(\omega t)}{\sqrt{\left(\frac{u_f}{u_v}\right)^2 + 2 \cdot \frac{u_f}{u_v} \cdot \cos(\theta) \cdot \cos(\omega t) + \cos^2(\omega t)}} \mu_d f_n \quad (6)$$

Le modèle suppose que la force de frottement effective à l'échelle macroscopique est la moyenne temporelle de la force instantanée dans la direction de déplacement du doigt (x), définie comme suit :

$$\bar{F}_t = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \tilde{F}_x(t) dt \quad (7)$$

Le taux de réduction relative du frottement est défini comme le rapport entre la force de frottement moyenne en présence de vibrations et la force de frottement sans vibration :

$$\mu_r = \frac{\bar{F}}{\mu_d f_n} \quad (8)$$

$$\mu_r = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \left(\frac{\frac{u_f}{u_v} + \cos(\theta) \cdot \cos(\omega t)}{\sqrt{\left(\frac{u_f}{u_v}\right)^2 + 2 \cdot \frac{u_f}{u_v} \cdot \cos(\theta) \cdot \cos(\omega t) + \cos^2(\omega t)}} \right) dt \quad (9)$$

Pour le cas particulier d'une exploration colinéaire ($\theta = 0$), le rapport de réduction de frottement est donné par :

$$\mu_r = \begin{cases} \frac{2}{\pi} \sin^{-1} \left(\frac{u_f}{u_v} \right) & \text{si } 0 \leq u_f \leq u_v \\ 1 & \text{si } u_f \geq u_v \end{cases} \quad (10)$$

La fig.6 montre l'évolution du rapport de réduction du frottement en fonction du rapport entre la vitesse d'exploration et de vibration pour différents angles d'exploration.

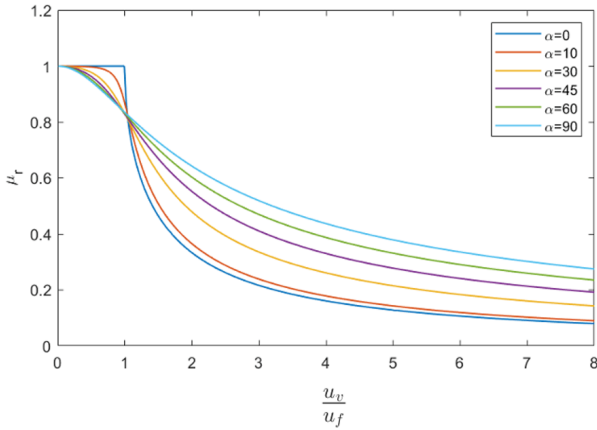


Fig. 6. Rapport de réduction de frottement en fonction du rapport de vitesse pour différents angles d'exploration selon le modèle Tsai.

6. MODELE DE TSAI AVEC COMPLIANCE

Pour ajouter l'effet de la compliance, Tsai propose d'améliorer la version rigide de son modèle avec le modèle de frottement Dahl [8]. Ce dernier prend en compte l'élasticité des aspérités de contact mais il est peu adapté aux hautes fréquences. À l'échelle microscopique, la surface du doigt et celle de la plaque présentent de nombreuses aspérités. Le contact entre les deux se fait donc par un ensemble de microreliefs qui se déforment sous l'effet d'une force tangentielle. Ces aspérités agissent comme des ressorts : lorsqu'une déformation dépasse un certain seuil, le lien local se rompt et un nouveau point de contact se forme.

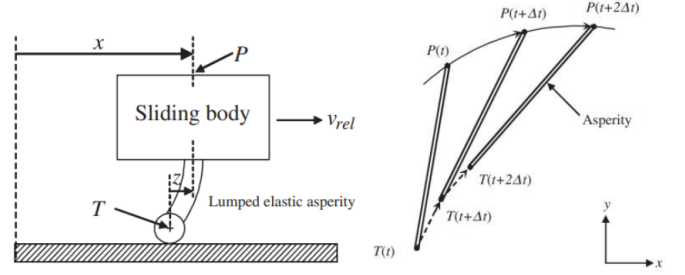


Fig. 7. Le modèle de Dahl modélise le frottement comme la déflexion des aspérités de contact, tiré de [6].

On considère deux points caractéristiques de l'aspérité : le point P, supposé rigide, qui suit uniquement le mouvement relatif global sans se déformer, et le point T, qui subit une déformation locale liée au frottement.

Les coordonnées du point P de l'aspérité, supposée rigide, sont données par :

$$P_x(t) = u_f \cdot t + \frac{u_v}{\omega} \sin(\omega t) \cos(\theta) \quad (11)$$

$$P_y(t) = \frac{u_v}{\omega} \sin(\omega t) \sin(\theta) \quad (12)$$

Les coordonnées du point T de l'aspérité, qui subit une déformation, sont données par :

$$T_x(t + \Delta t) = P_x(t + \Delta t) - \frac{z(t + \Delta t)}{\sqrt{(P_x(t + \Delta t) - T_x(t))^2 + (P_y(t + \Delta t) - T_y(t))^2}} (P_x(t + \Delta t) - T_x(t)) \quad (13)$$

$$T_y(t + \Delta t) = P_y(t + \Delta t) - \frac{z(t + \Delta t)}{\sqrt{(P_x(t + \Delta t) - T_x(t))^2 + (P_y(t + \Delta t) - T_y(t))^2}} (P_y(t + \Delta t) - T_y(t)) \quad (14)$$

Avec z la déflexion de l'aspérité. Son évolution au cours du temps est déduite à l'aide du modèle de Dahl.

$$Z(t + \Delta t) = Z(t) + u_{fp}(t) \left(1 - \frac{\sigma_0}{\mu_d f_n} \text{sign}(u_{fp}(t)) \right) \cdot z(t) \cdot \Delta t \quad (15)$$

Où $u_{fp}(t)$ représente la vitesse relative entre le doigt et la plaque.

$$u_{fp}(t) = \frac{\sqrt{(P_x(t + \Delta t) - T_x(t))^2 + (P_y(t + \Delta t) - T_y(t))^2} - z(t)}{\Delta t} \quad (16)$$

La force de frottement instantanée est exprimée comme le produit de la raideur de contact et de la déflexion de l'aspérité :

$$F_t(t + \Delta t) = F_x(t + \Delta t) = \sigma_0 (P_x(t + \Delta t) - T_x(t + \Delta t)) \quad (17)$$

Avec σ_0 est la raideur du contact.

En régime permanent, la force de frottement moyenne est donnée par :

$$F_t = \frac{\omega}{2\pi} \sum_{k=1}^n F_x(t + k\Delta t) \cdot \Delta t \quad (18)$$

$$\text{Avec} \quad n = \frac{2\pi}{\omega \cdot \Delta t} \quad (19)$$

L'effet de la réduction du frottement induite par les vibrations peut être quantifié à l'aide du rapport de frottement dans la direction x , la direction de la vitesse macroscopique. Il est défini comme le rapport de frottement avec et sans vibration :

$$\mu_r = \frac{F_t}{\mu_d f_n} = \frac{\omega}{2\pi \mu_d f_n} \sum_{k=1}^n F_x(t + k\Delta t) \cdot \Delta t \quad (20)$$

La raideur du contact peut également être caractérisée par le rapport de déplacement R_d , il représente le rapport entre l'amplitude vibratoire A et Z_{ss} la déflexion maximale de l'aspérité avant de glisser.

$$R_d = \frac{A}{Z_{ss}} \quad (21)$$

La relation entre la raideur du contact σ_0 et le rapport de déplacement est :

$$\sigma_0 = \frac{\mu_d f_n}{Z_{ss}} = \frac{\mu_d f_n R_d}{A} \quad (22)$$

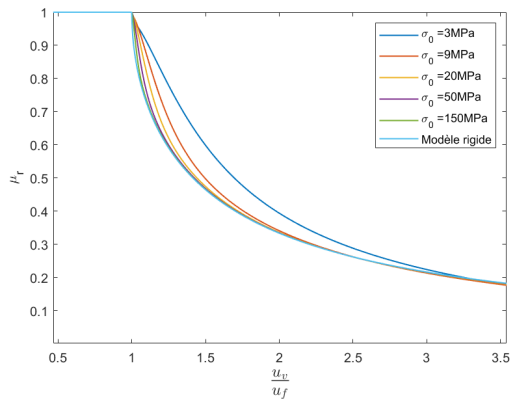


Fig. 8. Rapport de réduction de frottement relatif en fonction du rapport de vitesses pour différentes valeurs de raideur de contact selon le modèle de Tsai.

On observe que le frottement diminue davantage lorsque le contact est rigide, et qu'il diminue moins quand le contact est plus souple. À partir d'une raideur de contact d'environ 150 MPa, le modèle avec compliance donne des résultats très proches de ceux du modèle rigide.

7. COMPARAISON ENTRE LES MODELES DE FROTTEMENT « RATCHET » ET TSAI

Le modèle « Ratchet » permet de prédire la réduction de frottement pour un mouvement colinéaire à la vibration, le modèle de Tsai offre une prédiction plus générale en termes de direction d'exploration. En plus d'être limité à une exploration colinéaire à la direction de la vibration, un autre inconvénient du modèle « Ratchet » réside dans sa représentation uniquement sous forme de machine d'état, ce qui rend indispensable le recours à une simulation numérique pour obtenir des résultats

On compare les résultats des deux modèles dans le cas particulier d'une exploration colinéaire. Pour comparer les deux modèles, on suppose que la raideur longitudinale du modèle de « Ratchet » est équivalente à la raideur des aspérités dans le modèle de Tsai.

$$\sigma_0 = k_{lf} \quad (23)$$

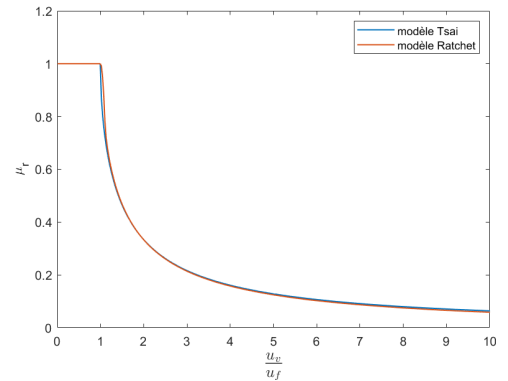


Fig. 9. Comparaison entre les modèles « Ratchet » et Tsai avec compliance pour une exploration colinéaire avec $\sigma_0 = k_{lf} = 150 \text{ MPa}$.

D'après la Fig.9, il apparaît que les deux approches produisent des résultats proches, bien que les modèles diffèrent. La première explique la réduction du frottement par l'alternance des trois états de frottement, tandis que la deuxième repose sur la projection de la force de frottement dans la direction relative d'exploration.

8. VALIDATIONS EXPERIMENTALES DU MODELE DE TSAI

8.1. Protocole de Mesure

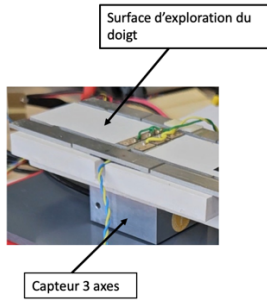


Fig. 10. Dispositif haptique à ultrasons posé sur un capteur 3 axes pour la mesure de l'effort tangentiel lors d'une exploration du doigt de la surface.

Les mesures de l'effort de frottement se font par un capteur 3 axes; pour chaque expérience l'effort tangentiel est mesuré, dans un premier temps, sans vibration, puis avec vibration pour le calcul du rapport relatif de réduction de frottement

8.2. Effet de la vitesse du doigt

D'après le modèle de Tsai, une faible vitesse d'exploration du doigt est associée à une réduction de frottement plus importante (Fig.8), ce qui se traduit par un rapport de réduction plus faible. À l'inverse, lorsque la vitesse du doigt augmente, l'effet de réduction devient moins marqué. Pour étudier ce phénomène, une expérience a été réalisée avec deux vitesses distinctes : une vitesse lente u_{fl} et une vitesse rapide u_{fr} . L'effort tangentiel a été mesuré dans la direction d'exploration.

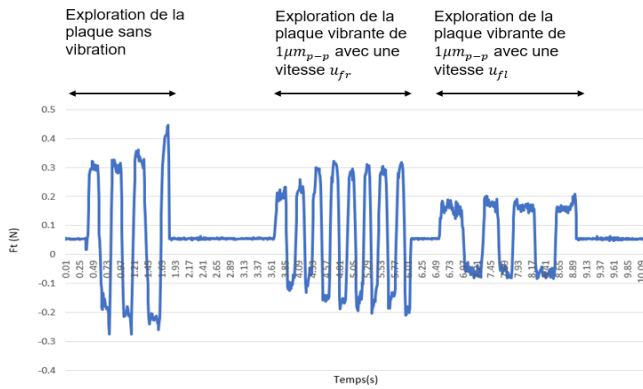


Fig. 11. Mesure expérimentale de l'effort de frottement sans vibration puis en explorant avec deux vitesses d'exploration différente $u_{fr} > u_{fl}$. Les oscillations correspondent à des allers-retours du doigt sur la plaque, seule la valeur moyenne des maxima est à considérer.

Les résultats expérimentaux (Fig. 11) montrent que le frottement est davantage réduit lorsque la vitesse d'exploration est faible, confirmant ainsi la tendance prédite par le modèle.

8.3. Effet de la raideur du doigt

Afin d'analyser l'influence de la compliance du contact entre le doigt et la surface vibrante, on s'intéresse à l'effet de l'angle d'inclinaison du doigt (Fig. 12) sur la réduction de frottement. Lorsque l'angle est important, le doigt est plus incliné vers l'avant : la zone de contact se rapproche de l'os, la couche de tissu mou (graisse, derme) est réduite, et la structure devient ainsi plus rigide. Cela correspond à une compliance plus faible du contact. l'inverse, pour un angle plus faible (le doigt plus "à plat"), la zone de contact s'éloigne de l'os, traverse davantage

de tissus mous et de graisses, et la déformation est plus facilement absorbée. Le contact devient alors plus souple, c'est-à-dire avec une compliance plus élevée. Cette variation de compliance, induite par la géométrie de contact, modifie directement la réponse du doigt aux vibrations.



Fig. 12. L'angle du doigt influence la compliance du contact, pour l'inclinaison α_1 , le doigt est plus rigide que pour α_2 .

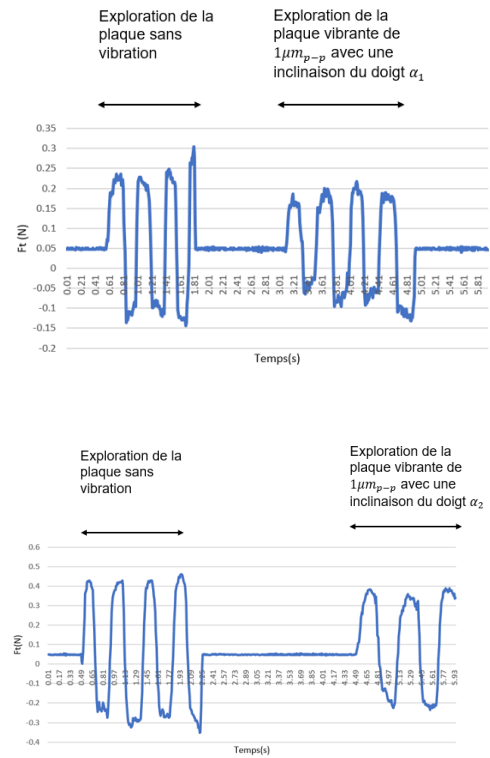


Fig. 13. Mesures expérimentales de l'effort de frottement sans vibration puis avec vibration en explorant avec une vitesse constante pour deux inclinaisons $\alpha_1 > \alpha_2$.

L'augmentation de l'inclinaison du doigt induit une élévation de sa rigidité, ce qui se traduit par une diminution plus marquée du frottement. Cette observation est en accord avec les prédictions du modèle théorique de Tsai, selon lequel une plus grande rigidité du contact favorise la réduction de frottement (Fig. 8). Le rapport de réduction du frottement expérimental a été calculé, il a été évalué à $\mu_r = 0.65$ pour l'inclinaison α_1 et à $\mu_r = 0.82$ pour l'inclinaison α_2 .

9. CONCLUSION

Le modèle de Tsai est capable de prédire la réduction du frottement dans toutes les directions et tenant compte de la compliance du contact, il est compatible avec le modèle « Ratchet » dans le cas spécifique d'une exploration colinéaire avec la direction de vibration. Des expérimentations menées sur l'influence de la vitesse d'exploration et la compliance du contact ont apporté une meilleure correspondance avec les prédictions du modèle théorique.

Ce modèle pourra être inclus dans la REM de la fig.1, à la place de l'élément « Third body » introduit empiriquement. Il permettra de mieux prévoir l'influence du doigt sur l'interface et la dispersion des ressentis selon la caractéristique de compliance des différents doigts et selon le geste d'exploration.

10. REFERENCES

- [1] C. Basdogan, F. Giraud, V. Levesque, and S. Choi, "A review of surface haptics: Enabling tactile effects on touch surfaces," *IEEE Trans. Haptics*, vol. 13, no. 3, pp. 450–470, Jul. 2020.
- [2] A. Bouscayrol, B. Lemaire-Semail, "Energetic Macroscopic Representation and Inversion-Based Control ", *Encyclopedia of electrical and electronic power engineering*, Vol. 3, pp 365-375, Elsevier, 2023.
- [3] E. Vezzoli, Z. Vidrih, V. Giamundo, B. Lemaire-Semail, F. Giraud, T. Rodic, D. Peric, and M. Adams, "Friction reduction through ultrasonic vibration part 1: Modelling intermittent contact," *IEEE Transactions on Haptics*, vol. 10, no. 2, pp. 196–207, April 2017.
- [4] M. Wiertelowski, R. F. Friesen, and J. E. Colgate, "Partial squeeze film levitation modulates fingertip friction," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 113, no. 33, pp. 9210–9215, 2016.
- [5] Kumar VC, Hutchings IM. Reduction of the sliding friction of metals by the application of longitudinal or transverse ultrasonic vibration. *Tribol Int* 2004;37: 833–40.
- [6] Tsai, C. C. and Tseng, C. H., "The Effect of Friction Reduction in the Presence of In-Plane Vibrations," *Archive of Applied Mechanics*, 75, 2006, 164-176.
- [7] D. A. Torres Guzman, *Génération et contrôle de retours tactiles par ondes ultrasoniques*, thèse de doctorat, université de Lille, 2021.
- [8] de Wit, C. C., Olsson, H., Åström, K. J., & Lischinsky, P. (1995). A New Model for Control of Systems with Friction. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 40(3).
- [9] de Wit, C. C., Olsson, H., Åström, K. J., & Lischinsky, P. (1995). A New Model for Control of Systems with Friction. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 40(3).