

Doigt artificiel pour frottement sur surfaces pileuses

B. CAMILLIERI ^a, M-A. BUENO ^b

Laboratoire de Physique et de Mécanique Textiles – Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs
Sud Alsace – Université de Haute Alsace - 11 rue Alfred Werner 68093 Mulhouse, France

a. brigitte.camillieri@uha.fr

b. marie-ange.bueno@uha.fr

Résumé :

Le but est de concevoir un doigt artificiel pour remplacer l'humain lors d'essais de frottement sur des surfaces textiles. Pour cela, des essais de frottement alternatifs ont été réalisés et l'évolution du coefficient de frottement sur un cycle entre des étoffes et les doigts (humain ou artificiel) a été comparée. Tout d'abord, le signal de frottement entre la surface pileuse et le doigt humain a été étudié pour dix sujets. Ensuite, le doigt artificiel a été conçu par mimétisme en étudiant l'influence des principaux critères morphologiques et mécaniques du doigt (la forme, le relief, le module d'Young) sur le signal de frottement.

Abstract:

The goal is to design a fake finger to replace the human during friction test on textile surfaces. For this, alternative friction tests were carried out and the evolution of the friction coefficient on a cycle between the fabrics and the fingers (human or artificial) was compared. First, the friction signal between the hairy surface and the human finger was studied for ten subjects. Then the fake finger was designed by mimicry by studying the influence of the main morphological and mechanical criteria of the finger (shape, relief, the Young's modulus) on the friction signal.

Mots clefs : tactile, textile, frottement, poils

1 Introduction

Lors d'un essai tactile sur une surface textile, l'homme procède en général en déplaçant un doigt avec un mouvement alternatif latéral ou longitudinal.

Des chercheurs ont développé des doigts artificiels pour tester des textiles en recherchant des matériaux permettant d'obtenir un coefficient de frottement moyen proche de celui des doigts humains [1]. Or la prise en compte d'une valeur moyenne du coefficient de frottement peut nous faire perdre des informations. Une surface textile (tissu ou tricot) est réalisée à partir de fils qui sont entrecroisés ou entrelacés pour former la structure de base de l'étoffe. Souvent de cette structure sortent des fibres qui forment une pilosité plus ou moins importante. Même si la pilosité est réduite, elle contribue fortement aux propriétés tactiles de l'étoffe. Pour certaines étoffes pileuses, la sensation n'est pas la même si l'on frotte dans le sens poil ou à rebrousse-poil.

Un autre problème est la variabilité des résultats obtenus par différents individus ou par un seul selon les conditions de mesure comme l'humidité du doigt, état de la peau (lavée, enduite de crème...) [2-4]. Kim et al. ont réalisé des expériences avec un seul sujet [5] mais souvent un panel de sujets est utilisé [1-3].

Dans cet article nous allons agir sur la forme du faux doigt pour obtenir un cycle de frottement de forme analogue à celle obtenue par de vrais doigts frottant sur une surface pileuse.

2 Matériels utilisés et procédures

2.1 Surface textile utilisée

Un tissu velours a été testé dont la pilosité de surface est constituée de fibres de longueurs et d'orientations régulières. Une vue transversale de l'étoffe est visible sur la figure 1. Le sens poil correspond au déplacement de la gauche vers la droite. Les principales caractéristiques de la pilosité figurent dans le tableau 1.

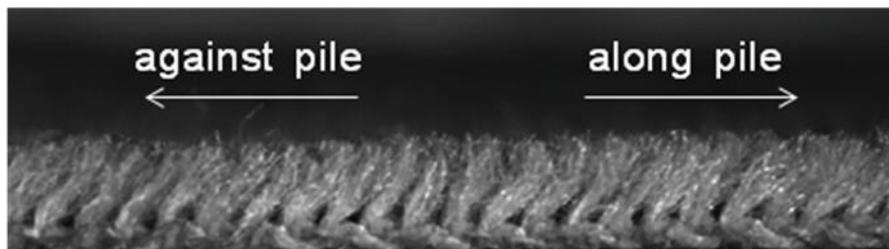


Fig 1 : Vue transversale du velours testé.

Matière :	80% laine, 20% Polyester
Longueur des fibres :	$2,35 \pm 0,01$ mm
Inclinaison des poils / à la verticale :	$42^\circ \pm 2$
Densité de poils / mm^2 :	85 ± 8

Tab 1 : Principales caractéristiques de la pilosité du velours testé.

2.2 Les tribomètres

Deux tribomètres linéaires alternatifs développés au laboratoire ont été utilisés :

- ✓ un tribomètre pour tester les textiles et muni d'un frotteur plan (faux doigt),
- ✓ un tribomètre tactile pour tester les doigts humains.

Dans les deux cas, l'échantillon textile est placé sur une table mobile pilotée par un programme informatique lui donnant un mouvement alternatif horizontal latéral. Les deux tribomètres sont équipés d'un système d'acquisition (Pulse, Brüel & Kjaer).

Le tribomètre pour textiles est un tribomètre à frotteur plan [6]. Le frotteur est monté sur un bras fixé au bâti par une liaison pivot. Un capteur de forces lié au bras permet de mesurer la force de frottement entre le frotteur et l'échantillon et un autre permet de mesurer la force normale.

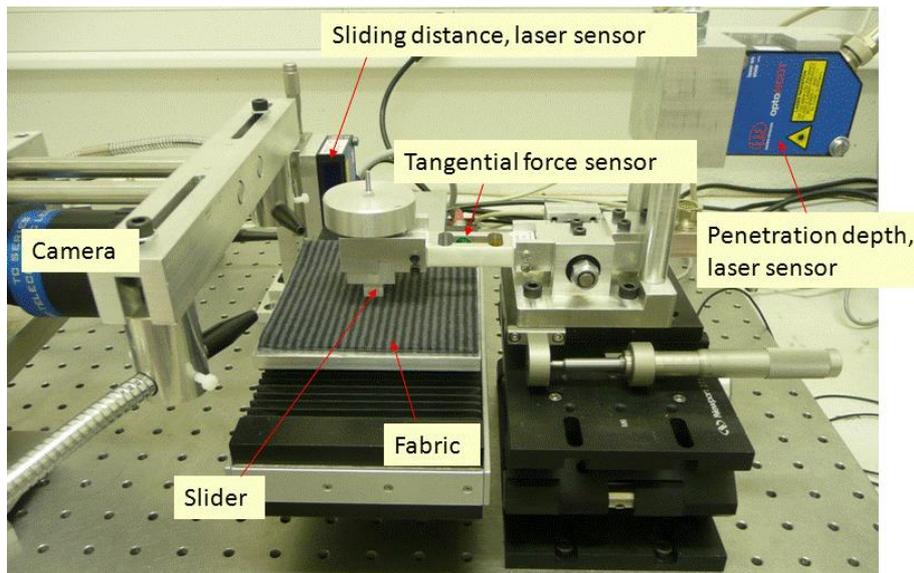


Fig 2 : Le tribomètre textile.

Ce tribomètre peut être utilisé dans deux configurations différentes :

- ✓ à hauteur imposée : le bras et donc le frotteur sont bloqués à une certaine altitude ; la hauteur est choisie en fonction de la force normale désirée.
- ✓ à charge imposée : une masse morte placée sur le bras impose la force normale et le frotteur est libre de se déplacer verticalement.

Le tribomètre tactile est équipé d'une cellule de forces à 3 axes fournissant les composantes normale et tangentielle de la force exercée par le doigt sur l'échantillon. Pour assurer une bonne position du doigt sur l'étoffe et le confort du sujet, le bras est placé dans une gouttière réglable.

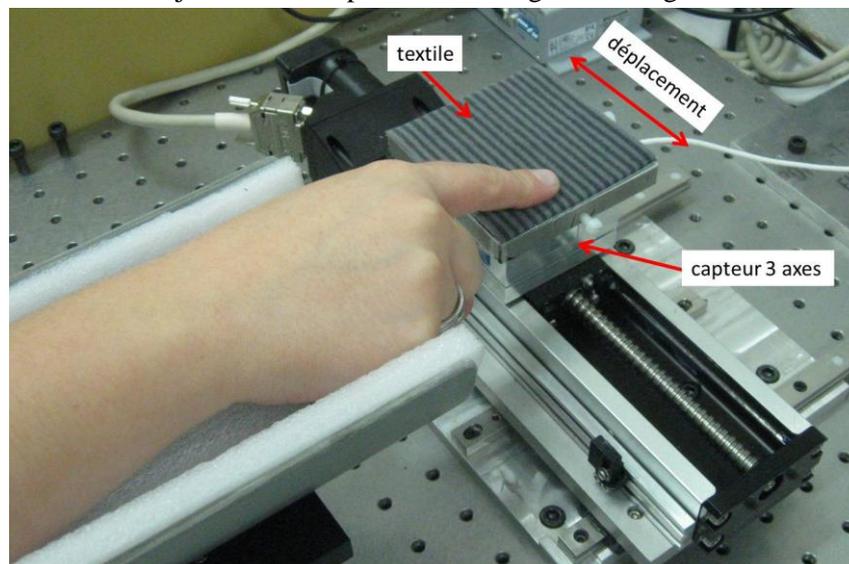


Fig 3 : Le tribomètre tactile.

2.3 Les procédures

Une étude préliminaire a montré que l'exploration tactile de textiles se fait sous une pression de 3 kPa [7]. Pour les deux tribomètres, la distance de frottement retenue est de 50 mm avec une vitesse nominale de glissement de 20 mm/s [7]. C'est l'échantillon qui se déplace latéralement sous le doigt. Cinq cycles sont réalisés ; seul le second cycle est utilisé pour déterminer le coefficient de frottement.

En plus, pour le tribomètre textile:

- ✓ chaque frotteur aura une aire apparente de contact de $1,5 \text{ cm}^2$ qui correspond à la surface du doigt en contact lorsque la pression vaut 3 kPa [7];
- ✓ la configuration retenue est à hauteur fixe du frotteur avec réglage de la hauteur pour obtenir une force normale nominale de $0,5 \text{ N}$. Ce sera la force normale dans le sens poils ;
- ✓ chaque essai est répété sur 6 échantillons différents et le signal moyen est calculé.

Pour le tribomètre tactile, des essais préliminaires ont permis de fixer les conditions de mesure : utilisation de l'index de la main dominante avec un angle d'inclinaison du doigt de 25° environ par rapport à l'horizontale. Dix sujets sont testés.

Lors de l'essai de frottement, il est demandé à chaque sujet d'essayer de maintenir une force normale d'environ $0,5 \text{ N}$; pour cela l'évolution de cette force est visualisée sur l'écran de l'ordinateur en directe pendant la mesure. Chaque sujet réalise deux essais sur deux échantillons différents. Il se lave les mains à l'eau et au savon puis se les sèche juste avant les essais.

3 Résultats sur le velours

Le coefficient de frottement (COF) est obtenu à partir des forces normale et tangentielle enregistrées pendant les mesures. Il est représenté positif dans le sens poil et négatif dans le sens rebrousse-poil.

3.1 Frottement avec de vrais doigts

La figure 4 montre l'évolution courante du coefficient de frottement pour un sujet.

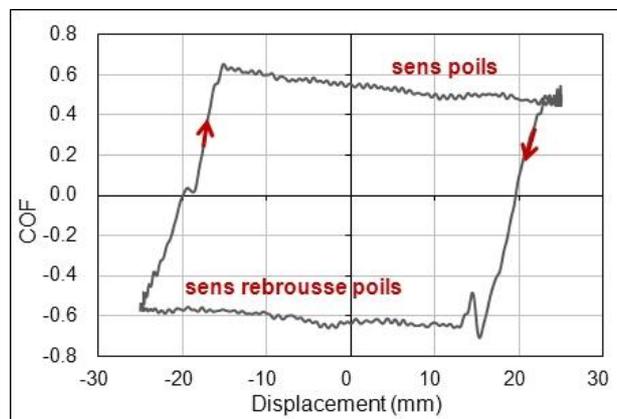


Fig 4 : Evolution du coefficient de frottement d'un vrai doigt sur le velours.

Le cycle de frottement a une forme parallélogramme. Le changement du sens de frottement produit une zone transitoire. Dans le sens poils, le coefficient de frottement décroît régulièrement avec une moyenne de $0,52$ alors que dans le sens rebrousse-poil, le coefficient a une moyenne de $0,61$.

La figure 5 montre l'évolution du coefficient de frottement pour les deux cas les plus extrêmes parmi les dix sujets.

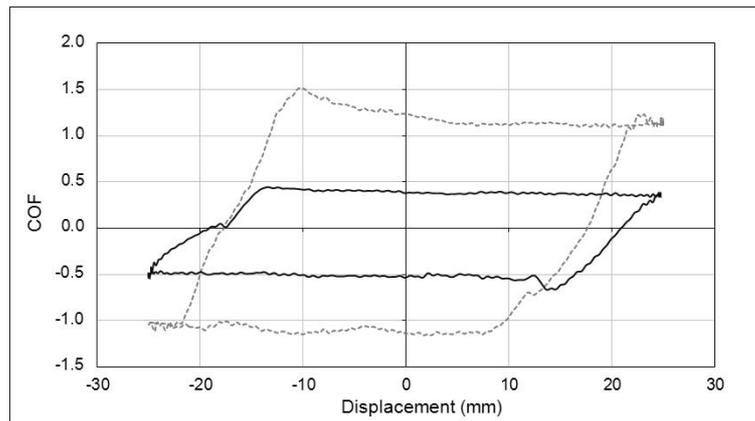


Fig 5 : Evolution du coefficient de frottement sur le velours pour les deux cas les plus extrêmes du panel.

La table 2 regroupe les valeurs moyennes des coefficients de frottements obtenus pour les dix sujets du panel ainsi que leur incertitude estimée par l'écart-type.

	COF sens poil	COF sens rebrousse-poil
sur velours	$0.57 \pm 0,22$	$0.61 \pm 0,16$

Tab 2 : Coefficients de frottement moyens dans le sens poil et rebrousse-poil des doigts des dix sujets du panel sur le velours.

En moyenne, on trouve un coefficient proche dans les deux sens. On constate également, comme cela a été dit dans l'introduction, que l'écart est très important d'un individu à un autre.

3.2 Mesures sur le tribomètre textile

Le tribomètre textile était au départ équipé d'un frotteur (figure 6 a) en aluminium parallélépipédique à bords droits, le bord d'attaque à une largeur de 13,82 mm et la profondeur est de 10,85 mm. La surface du frotteur en contact avec l'échantillon peut être considérée comme lisse ($R_a = 0,20 \pm 0,01 \mu\text{m}$).

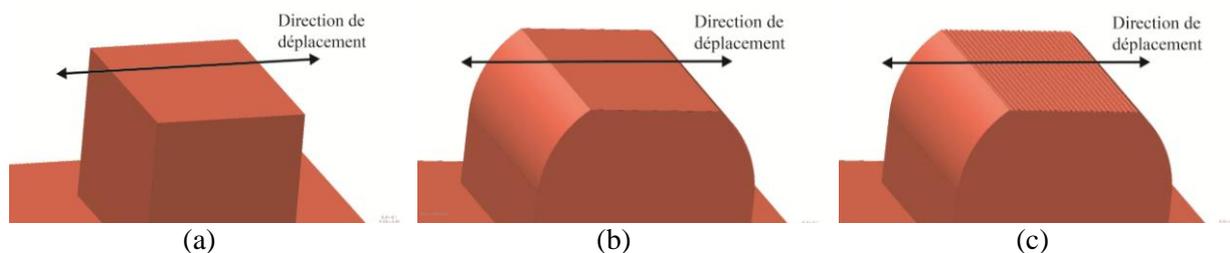


Fig 6 : Formes successives des différents frotteurs (faux doigt) : (a) le frotteur initial, (b) le frotteur avec bords d'attaque arrondis, (c) le frotteur rainuré.

L'évolution du coefficient de frottement (figure 7) montre un changement rapide lors des inversions de sens. Le coefficient varie peu en sens poils (voisin de 0,25) alors que le passage en sens rebrousse-poil commence par une forte augmentation (pic à 1,1) puis une décroissance sur une dizaine de mm et ensuite une stabilité relative (avec une moyenne de 0,47). On note aussi une perturbation avant le changement de sens dont la longueur correspond à la longueur du frotteur et qui est matérialisée sur la figure 7 par des ellipses[8]. Il s'agit de la zone de poils qui ne subit pas de frottement dans les deux directions mais uniquement dans une seule.

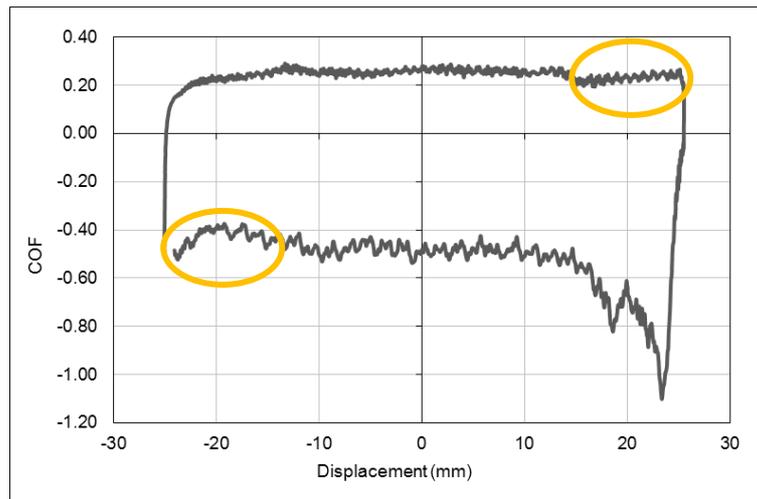


Fig 7 : Courbe de frottement pour le frotteur à bords droits.

En nous inspirant des caractéristiques d'un vrai doigt, nous allons successivement voir l'influence sur le COF du passage à une forme arrondie du bord d'attaque, du rainurage de la surface de frottement et d'un changement de dureté du matériau.

3.2.1. Influence de la forme des bords d'attaque

Un frotteur en aluminium avec la même surface mais avec des bords d'attaque arrondis de rayon égal à 7,5 mm est testé (figure 6 b).

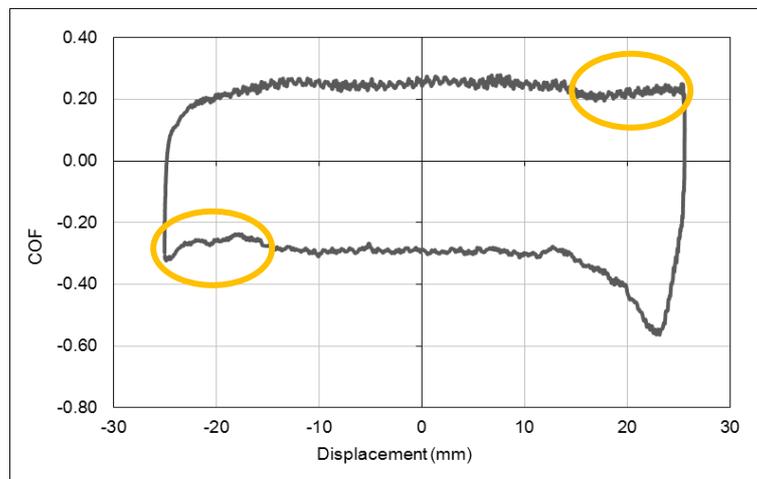


Fig 8 : Courbe de frottement pour un frotteur à bords arrondis.

La largeur du frotteur est toujours visible sur la courbe du COF (figure 8). L'arrondi a une influence essentiellement dans le sens rebrousse-poil : il conduit simultanément à une augmentation de la force normale et à une baisse de la force tangentielle ce qui au niveau du coefficient de frottement produit une baisse aux environs de 0,28. La baisse du COF est très faible dans le sens poil.

3.2.2. Influence des rainures

Par similitude avec les dermatoglyphes présents sur la pulpe des doigts, des rainures ont été réalisées (figure 6 c). Les directions des rainures et du déplacement sont perpendiculaires. Ces stries ont une profondeur de $97 \pm 2 \mu\text{m}$ et un écartement spatial de $500 \pm 2 \mu\text{m}$ pour être proches de celles des empreintes digitales [9, 10].

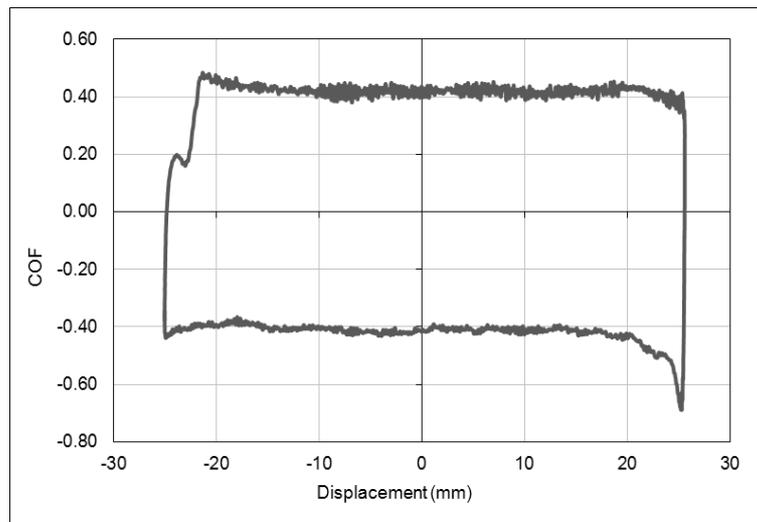


Fig 9 : Courbe de frottement pour un frotteur à bords arrondis et rainuré.

Sur la figure 9, la perturbation liée à la longueur du frotteur n'est plus visible. Le pic de retournement entre le sens poil et le sens rebrousse-poil diminue de largeur mais pas de hauteur. Un pic au moment du sens inverse apparaît. Les valeurs moyennes du coefficient dans les deux sens augmentent, sont proches et voisines de 0,4.

3.2.3. Influence du matériau du frotteur

Pour tenir compte du fait que la pulpe des doigts est un matériau mou, un frotteur identique au précédent a été réalisé en silicone (même surface rainurée avec des bords arrondis). Avec le matériau utilisé, le module de Young du frotteur est alors de $4,9.10^5 \pm 4.10^4$ Pa alors que celui de la peau va de $4,4.10^3$ à $5,7.10^7$ Pa [11] et plus précisément pour la pulpe du doigt de $3,4.10^4$ à $1,3.10^5$ Pa [9].

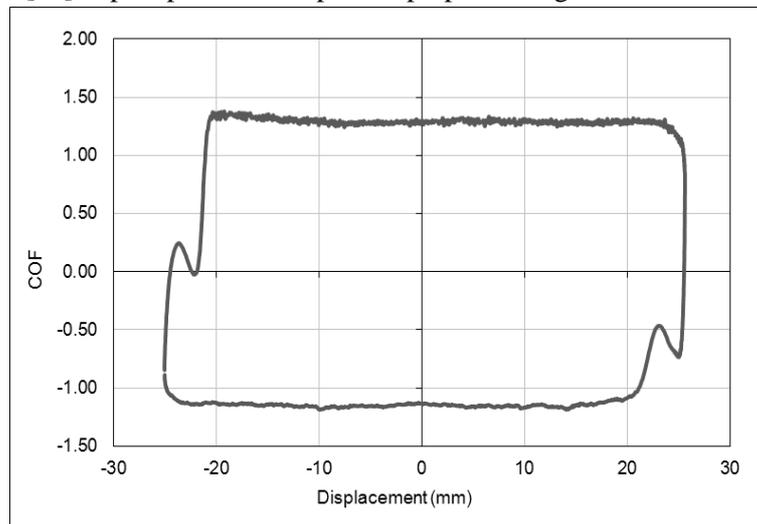


Fig 10 : Courbe de frottement pour un frotteur en silicone à bords arrondis et rainuré.

Sur la figure 10, la manifestation majeure du passage au silicone est une très forte augmentation des valeurs de COF (1,25 en sens poil et 1,15 en sens inverse). En plus, le pic transitoire entre le sens poil et le sens rebrousse-poil est moindre et ressemble un peu à celui existant lors du passage sens rebrousse-poil poil.

3.2.4. Influence d'un revêtement texturé sur un frotteur en silicone

Pour réduire l'adhésion mais conserver la complianse du silicone, le frotteur précédent a été recouvert d'une toile dont la structure a une rugosité ($R_t = 95 \pm 8 \mu\text{m}$) et une période spatiale ($536 \pm 9 \mu\text{m}$) assez proches de celles des empreintes digitales [10, 12].

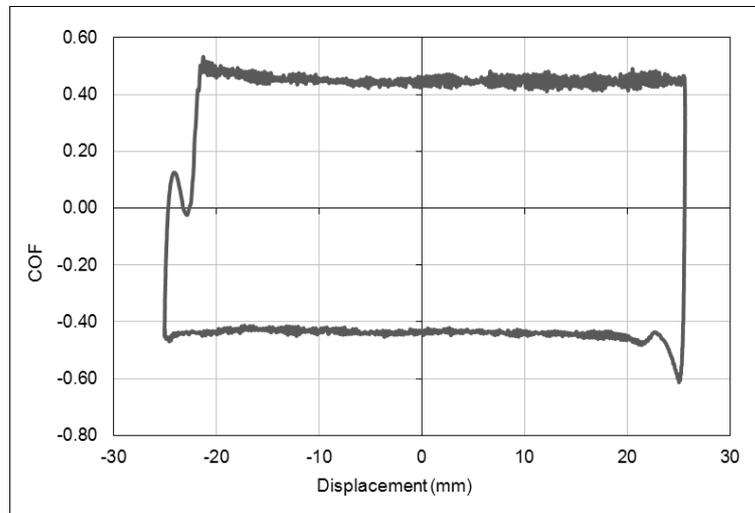


Fig 11 : Courbe de frottement pour le frotteur en silicone à bords arrondis, rainuré et recouvert d'un tissu peau.

Sur la figure 11, le COF retombe à des valeurs de l'ordre de 0,44 dans les deux sens. On trouve une allure assez proche de celle de la figure 9, les différences étant surtout dans les transitoires.

4 Discussion et conclusions sur le design du faux doigt

Les résultats obtenus avec les différents frotteurs lisses et rainurés permettent d'amener quelques conclusions :

- ✓ Avec une surface lisse, le cycle de frottement dépend de la longueur du frotteur car la pilosité aux extrémités de la zone de glissement n'est pas sollicitée dans les deux directions.
- ✓ Avec une semelle rainurée, la pilosité est sollicitée dans les deux directions car les poils s'imbriquent dans les rainures.

Les rainures, c'est-à-dire les dermatoglyphes du doigt, jouent donc un rôle important dans le comportement au frottement du doigt contre une surface pileuse.

Les résultats obtenus avec le frotteur rainuré en aluminium (figure 12 b) et celui en silicone recouvert d'un textile adéquat (figure 12 c) sont proches qualitativement et quantitativement. Cependant, le faux doigt réalisé en silicone recouvert d'un tissu structuré donne avec le velours, un cycle de frottement le plus proche de celui obtenu avec un vrai doigt (figure 12 a), en particulier au niveau des zones transitoires de changement de sens. De plus, les coefficients de frottement obtenus avec le vrai doigt et ce frotteur sont du même ordre de grandeur.

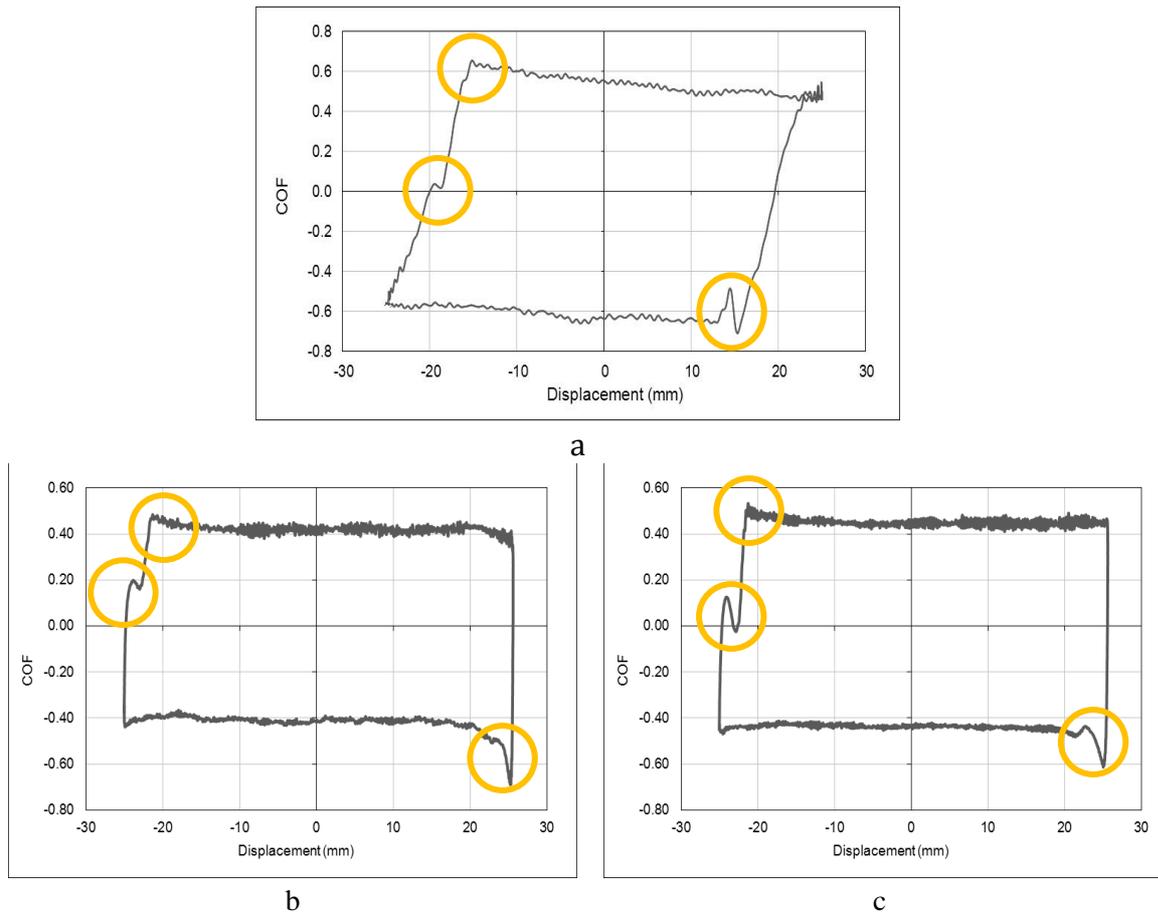


Fig 12 : Courbe de frottement sur le velours pour un vrai doigt (a), le frotteur en aluminium rainuré (b) et le faux doigt final (c). Les zones transitoires correspondant aux changements de sens sont entourées.

Cependant, les pentes des transitions lors des changements de sens sont différentes mais peuvent s'expliquer par une procédure de frottement différente et des raideurs articulaires de doigts différentes.

En effet, pour le tribomètre textile, la hauteur du frotteur est fixe ce qui explique l'augmentation très importante de la force normale lors du retournement des poils pour les étoffes pileuses et une force normale plus importante dans le sens rebrousse-poil que dans le sens poil (figure 13).

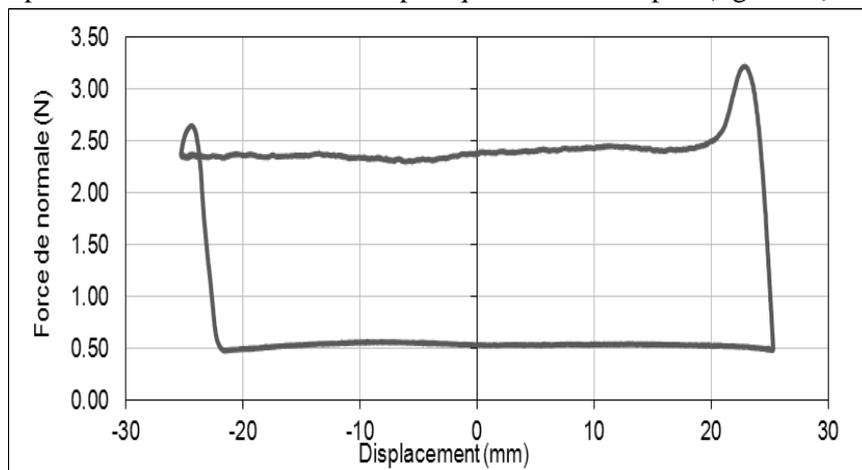


Fig 13 : Evolution de la force normale sur le tribomètre textile (à hauteur fixe).

La force normale vaut bien 0,5 N dans le sens poil mais augmente considérablement dans le sens inverse pour se stabiliser vers 2,4 N. Le frotteur dans le sens rebrousse-poil fait pivoter les poils dans un sens inverse à leur position naturelle (figure 14).

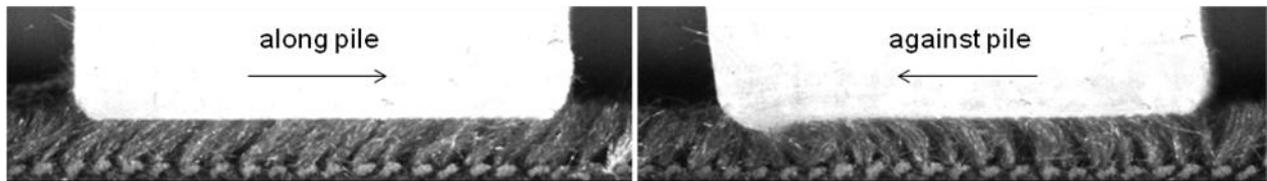


Fig 14 : Position du frotteur dans la pilosité dans le sens poil (à gauche) et dans le sens rebrousse-poil (à droite) dans le cas d'une configuration du tribomètre textile à hauteur fixe. Cas du frotteur silicone non revêtu.

Avec le tribomètre tactile, la consigne était de conserver une force normale ayant un ordre de grandeur de 0,5 N. Même s'il est difficile de maintenir la même force pendant le déplacement de l'étoffe sous le doigt et encore plus lors des changements de sens, les deux courbes extrêmes de la figure 5 ne montrent pas de grosses différences (moyenne de la force normale pour la courbe en trait plein de 0,52 N avec des extrêmes à 0,4 et 0,6 N alors que pour la courbe en pointillés, la moyenne est à 0,41 N et les extrêmes à 0,2 et 0,5 N).

En revanche, seul le bras est maintenu dans la gouttière mais le doigt est libre de se déplacer latéralement ou verticalement.

Un essai a été réalisé avec le tribomètre textile dans la configuration à charge imposée de 0,5 N, par masse morte et avec possibilité de déplacement vertical du frotteur (§2.2). La figure 15 montre l'évolution du COF pendant un cycle avec notre faux doigt sur le velours lors de l'utilisation du tribomètre textile en configuration charge fixe. L'allure de cette courbe n'est plus celle de la figure 12 c et s'éloigne de celle du doigt (figure 12 a). De plus, les coefficients de frottement dans les deux sens sont très différents avec un doublement dans le sens rebrousse-poil par rapport au sens poil.

La hauteur du bras du tribomètre change très rapidement aux changements de sens pour rester à la « surface » de la pilosité.

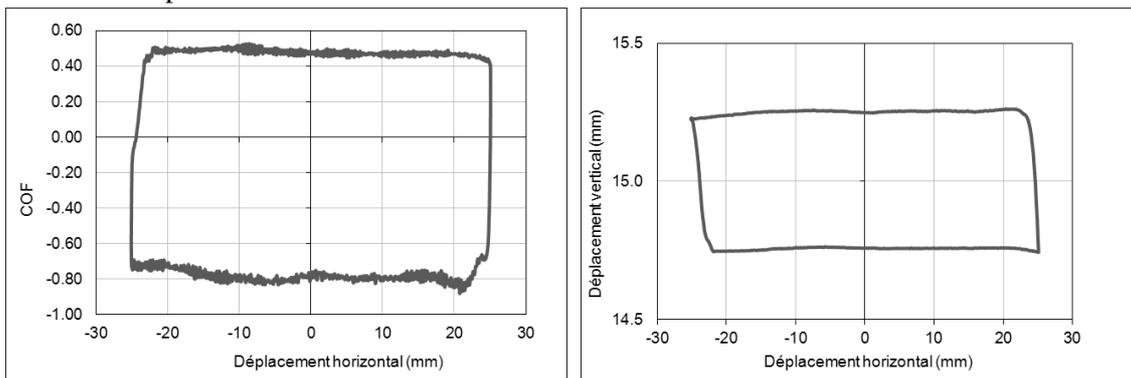


Fig 15 : Tribomètre textile en configuration charge fixe. A gauche : la courbe de frottement ; à droite : l'évolution de la position du frotteur.

Sur le tribomètre tactile, une étude préliminaire a montré que le doigt ne reste pas à hauteur fixe aux changements de sens notamment [13], mais la raideur articulaire du doigt fait que les variations de hauteurs sont moins rapides que dans la configuration du frotteur mobile (chargement avec masse morte).

5. Conclusion

La présente étude a pour objectif de designer un frotteur remplaçant le doigt humain dans le cas de frottement avec une surface pileuse.

Différents frotteurs imitant par modifications successives le doigt humain sont utilisés. Les cycles de frottement obtenus avec la surface pileuse et un vrai doigt humain sont comparés. Tout d'abord un frotteur à bords droits et un autre à bords arrondis ont été utilisés. L'arrondi améliore les résultats mais bien moins que le rainurage de la semelle du frotteur. En effet des rainures présentant des caractéristiques proches des dermatoglyphes du doigt humain ont une influence particulièrement importante. Enfin un frotteur compliant permet de se rapprocher davantage du doigt humain.

Références

- [1] S. Derler, U. Schrade, and L.-C. Gerhardt, "Tribology of human skin and mechanical skin equivalents in contact with textiles," *wear*, vol. 263, pp. 1112-1116, 2007.
- [2] E. Bertaux, M. lewandowski, and S. Derler, "Relationship between friction and tactile properties for woven and knitted fabrics," *Textile Research Journal*, vol. 77, pp. 387-396, 2007.
- [3] P. Kenins, "Influence of Fiber Type and Moisture on Measured Fabric-to-Skin Friction," *Textile Research Journal*, vol. 64, pp. 722-728, 1994.
- [4] R. K. Sivamani and H. I. Maibach, "Tribology of skin," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J_ Journal of Engineering Tribology*, vol. 220, pp. 729-737, 2006.
- [5] M.-S. Kim, I.-Y. Kim, Y.-K. Park, and Y.-Z. Lee, "The friction measurement between finger skin and material surfaces," *Wear*, vol. 301, pp. 338-342, 2013.
- [6] M. Tournalias, M.-A. Bueno, R. Bocquet, and R. Rossi, "Study of the friction mechanisms of pile surfaces: Measurement conditions and pile surface properties," *Wear*, p. 10, 2015.
- [7] C. Breugnot, "Contribution à la caractérisation mécanique du toucher des surfaces textiles à partir de critères neurosensoriels. ," PhD thesis PhD thesis, Université de Haute Alsace, 2005.
- [8] M.-A. Bueno, R. Bocquet, M. Tournalias, R. Rossi, and S. Derler, "Study of Friction Mechanisms of Hairy Textile Fabrics," *Wear*, vol. 303, pp. 343-353, 2013.
- [9] T. Maneo, K. Kobayashi, and N. Yamazaki, "Relationship between the Structure of Human Finger Tissue and the Location of Tactile Receptors," *Bulletin of Japan Society of Mechanical Engineers* vol. 41, pp. 94-100, 1998.
- [10] E. Gutiérrez-Redomero, Á. Sánchez-Andrés, N. Rivaldería, C. Alonso-Rodríguez, J. E. Dipierri, and L. M. Martín, "A comparative study of topological and sex differences in fingerprint ridge density in Argentinian and Spanish population samples," *Journal of Forensic and Legal Medicine*, vol. 20, pp. 419-429, 2013.
- [11] S. Derler and L. C. Gerhardt, "Tribology of skin: Review and analysis of experimental results for the friction coefficient of human skin.," *Tribology Letters*, vol. 45, pp. 1-27, 2012.
- [12] M. A. Acree, "Is there a gender difference in fingerprint ridge density?," *Forensic Science International*, vol. 102, pp. 35-44, 1999.
- [13] M.-A. Bueno, B. Lemaire-Semail, M. Amberg, and F. Giraud, "A simulation from a tactile device to render the touch of textile fabrics: a preliminary study on velvet," *Textile Research Journal*, vol. 84, pp. 1428-1440, 2014.