

Modèle de déformation de la pilosité lors du frottement des surfaces textiles

B. CAMILLIERI^a, E. BAUSSAN^a, M.-A. BUENO^a, S. DERLER^b, R. ROSSI^b

a. Université de Haute Alsace, Laboratoire de Physique et Mécanique Textiles (EAC 7189 CNRS/UHA) – Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs Sud Alsace, 11 rue Alfred Werner, 68093 MULHOUSE

b. EMPA Laboratoire Protection et Physiologie, Lerchenfeldstrasse 5, 9014 St.GALLEN(Suisse)

Résumé :

La surface d'un matériau textile est particulière du fait de la présence d'une pilosité. Cette pilosité est importante dans le rendu tactile de l'étoffe ou pendant la pratique d'un sport. Un modèle discret calculant la force de frottement due à la déformation de la pilosité est décrit. Ce modèle doit être utilisable par l'industrie. Chaque donnée d'entrée doit donc être facilement mesurable, en particulier la courbe charge-décharge en indentation est considérée. Différents comportements de la pilosité sont étudiés : plastique, élastique et visco-plastique.

Abstract :

Fibrous material surfaces, like textiles, are specific because of some emergent superficial fibres i.e. hairiness. It is well-known this hairiness is really important in friction behaviour of fabrics for tactile feel or during sports practice. In the present paper, a discrete mechanical model calculating the deformation friction force for hairy fabrics is described. This model has to be suitable for industrial therefore all input data have to be quite easily determined. The model is based on the deformation of hairs during friction supposed equal to the deformation during surface indentation, i.e. in both cases hairiness is laid down. The force requires to lay down a given number of hairs per surface unit is measured by indentation-compression and then calculated for friction. Three cases of hairiness deformation are considered purely plastic, purely elastic and visco-elasto-plastic.

Mots clefs : textile, frottement, indentation, compression, modélisation, toucher.

1 Introduction

Un textile est formé par l'entrelacement d'un fil (tricot) ou par l'entrecroisement de fils (tissu). Un fil est obtenu à partir de fibres. Toutes les extrémités des fibres peuvent ne pas être prises dans la structure et il peut exister une pilosité de surface. Bien que les dimensions des fibres soient petites, cette pilosité joue un rôle fondamental dans le contact peau textile (toucher et porter). Un modèle de frottement sur un textile prenant en compte la déformation de la pilosité serait un outil appréciable lors de la conception de textiles.

Des modèles existent dans la littérature. Certains considèrent globalement le textile en adaptant la loi de Bowden et Young pour les polymères, comme Howell [1] qui a proposé une loi de comportement, pour des tissus mais où deux paramètres sont à déterminer expérimentalement. Dans des domaines voisins du textile (« brush model », brosses à dent)...où la problématique est la même, sauf que les poils se déforment indépendamment les uns des autres) [2], et pour les moquettes [3], des modèles existent mais font intervenir des paramètres qui en textile sont difficiles à obtenir pour le milieu industriel : module d'Young, moment quadratique des fibres (problème de la dispersion des dimensions des fibres dans le cas des matériaux textiles naturels notamment), nombre de fibres par unité de surface ...

2 Modèle discret développé

La force de frottement considérée est uniquement due à la déformation de la pilosité à la surface de l'étoffe. L'adhésion n'est pas prise en compte. Dans ce modèle, la pilosité est représentée par une densité de poils ou de fibres supposée uniformément répartie à la surface de l'étoffe ; chaque élément de pilosité est modélisé par une poutre, initialement à l'angle θ_i , et subit une rotation à l'avant du frotteur, puis frotte sous le frotteur (figure 1).

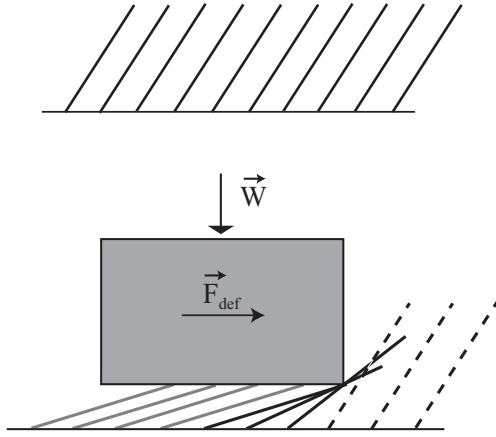


FIG. 1 – pilosité avant frottement (en haut) – actions du frotteur (en bas)

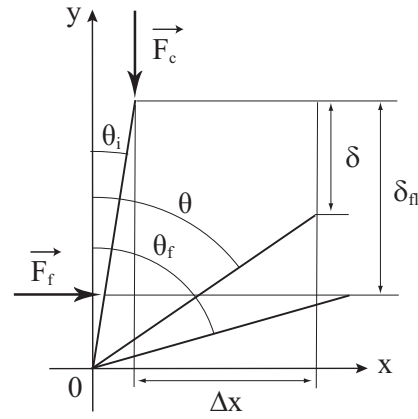


FIG. 2 – Rotation d'un poil

Le premier mécanisme de la déformation de la pilosité est considéré, en première approche, comme une rotation des poils à l'avant du frotteur. On admet que le frotteur reste à la même hauteur (liée à la charge normale W). Les poils atteignent alors un angle final θ_f dépendant de la charge normale appliquée (figure 2). La modélisation admet que le même état de déformation peut être obtenu par un essai d'indentation.

Dans le domaine textile, les essais d'indentation nommés essais de compression sont couramment effectués et sont réalisés grâce à des pieds presseurs de surface faible par rapport aux surfaces des textiles. Des essais de compression sont plus facilement réalisables que des tests de frottement.

La relation considérée entre la force horizontale F_f et la force normale F_c est la suivante (figure 2) :

$$M(\theta) = F_c(\theta) \cdot L \cdot \sin \theta = F_f(\theta) \cdot L \cdot \cos \theta_f \quad (1)$$

avec θ : angle du poil par rapport à la verticale, L : longueur du poil, M : moment pour coucher un poil de la position θ_i à la position θ .

Van Wyk [4] a proposé une loi de compression pour un tampon fibreux, loi qui par la suite a été étendue aux étoffes [5]. La pression P_c nécessaire pour comprimer un textile d'une hauteur δ est :

$$P_c(\delta) = a \cdot \left[(\delta_{\max} - \delta)^{-3} - \delta_{\max}^{-3} \right] \quad (2)$$

a est un coefficient dépendant de la longueur de la pilosité, du module d'Young des fibres, du moment quadratique de la section des poils, de la densité de la pilosité. δ_{\max} est la profondeur de pénétration maximale. Ces deux paramètres sont déterminés à partir des courbes de compression par ajustement à la loi de Van Wyk. La pression P_c est exercée sur tous les poils se trouvant sous le pied presseur.

L'angle θ d'un poil à un instant t , est lié à l'enfoncement δ du pied presseur (figure 2) par la relation :

$$\theta = \arccos \left(\cos \theta_i - \frac{\delta}{L} \right) \quad (3)$$

De (2), on peut déterminer l'enfoncement final δ_f du frotteur (donc l'angle final θ_f) pour une charge normale W donnée. La distance nécessaire au frotteur pour coucher une ligne de poils est alors calculable :

$$\Delta x_f = L \cdot (\sin \theta_f - \sin \theta_i) \quad (4)$$

A partir de la loi (2), de la relation (1), de l'enfoncement δ , la force horizontale $F_f(\theta)$ peut être déterminée et la force de frottement totale pour coucher les poils à l'avant du frotteur est, en notant w la largeur du frotteur :

$$F_{ff} = w \cdot \int_0^{\Delta x_{fl}} P_c(x) \cdot \frac{\sin \theta}{\cos \theta_f} \cdot dx \quad (5)$$

Si la pilosité est considérée comme plastique, une fois les poils couchés, ils restent dans cette position et aucune autre force n'est exercée par le frotteur et donc $F_{def}=F_{ff}$.

Dans le cas d'une déformation élastique de la pilosité, une force est nécessaire pour maintenir les poils sous le frotteur dans la position couchée (pour l'enfoncement δ_{fl}) et sur la longueur du frotteur L_e . Cette force F_{fue} est estimée par :

$$F_{fue} = w \cdot P_c(\Delta x_{fl}) \cdot \tan \theta_f \cdot L_e \quad (6)$$

Dans le cas d'une déformation visco-élasto-plastique de la pilosité, la force nécessaire pour maintenir les poils sous le frotteur dans la position couchée est moindre. Cette force F_{fuv} est estimée par la courbe de décharge.

$$F_{fuv} = w \cdot P_{c_unload}(\Delta x_{fl}) \cdot \tan \theta_f \cdot L_e \quad (7)$$

Nous avons donc estimé la force de frottement due à la déformation de la pilosité F_{def} pour trois types de comportement F_{ff} (plastique) < $F_{ff}+F_{uv}$ (visco-élasto-plastique) < $F_{ff} + F_{ue}$ (élastique).

3 Expérimentation

Des essais de frottement et d'indentation ont été menés sur différentes étoffes pileuses ; les essais d'indentation pour estimer les forces de frottements F_{ff} , les essais de frottement pour mesurer la force de frottement due à la déformation des poils.

3.1 Les étoffes

Trois types d'étoffes possédant une pilosité importante cachant la structure textile sous jacente ont été testés : un velours, une étoffe polaire et un tricot bouclette.

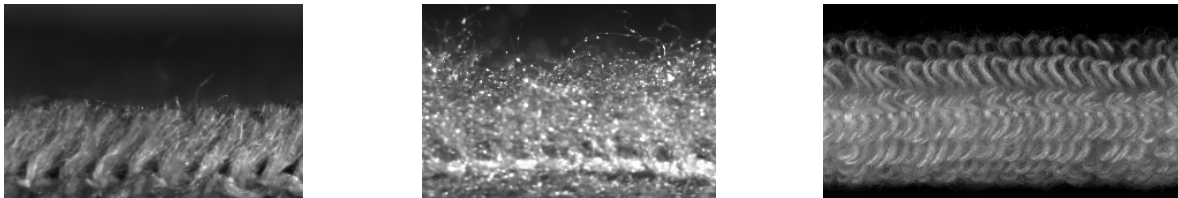


FIG. 3 – Les trois types de textiles étudiés : velours à gauche, polaire au centre, bouclette à droite

Pour un velours, les poils de longueur constante sont orientés régulièrement ; une étoffe polaire possède une pilosité aléatoire en terme de longueur et d'orientation ; la pilosité d'un tricot bouclette est constituée de boucles de fils de longueur fixée, chaque boucle sera considérée comme deux poils. La longueur de la pilosité ainsi que l'angle initial des poils θ_i ont été mesurés par observation. Pour la polaire, les poils étant répartis dans toutes les positions, l'angle θ_i a été pris égal à 0.

3.2 Indentation

Les mesures d'indentation ont été réalisées avec le module de compression FB3 d'un système Kawabata Evaluation System for Fabrics (figure 4).

Le pied presseur est plat d'une surface de 2 cm² et se déplace à vitesse constante ; deux vitesses ont été utilisées 0,02 mm/s et 0,2 mm/s. L'appareil fournit la pression en fonction de la profondeur de pénétration du pied lors de la charge puis de la décharge. Des essais avec trois charges maximales ont été réalisés.

Les résultats dépendant de l'état de la pilosité, un protocole pour les mesures a été fixé. Un état stable est atteint après 2 ou 3 cycles ; c'est le troisième cycle qui a été conservé.

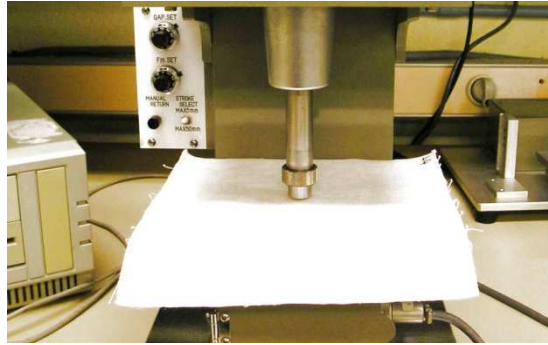


FIG. 4 – Essai d'indentation

Ces mesures ont permis d'estimer la force de frottement en supposant trois comportements rhéologiques différents de la pilosité. Pour le comportement visco-élasto-plastique, c'est la courbe de déchargement qui est utilisée. La figure 5 montre le comportement du velours (mais il est le même pour les autres textiles) lors d'essais à deux charges différentes (jusqu'à des pressions de 25 et 50 kPa). Les courbes de charge sont les mêmes et les courbes de décharge se rejoignent. Pour le calcul de la force de frottement engendrée par les poils sous le frotteur, c'est la courbe de décharge à partir de 50 kPa qui a été utilisée.

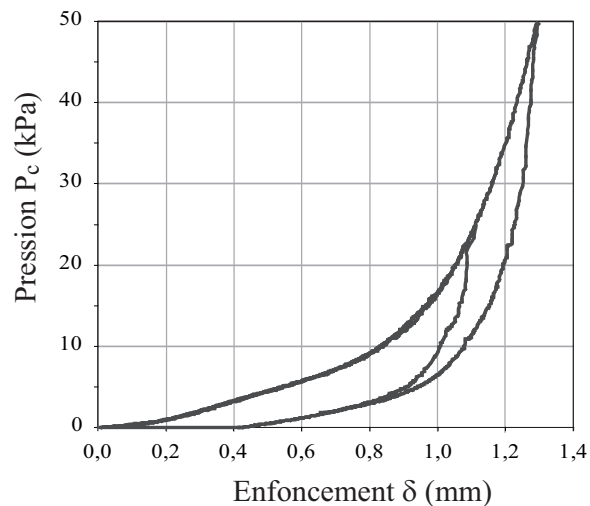


FIG. 5 – Cycles lors de deux chargements différents pour le velours

3.3 Frottement

Les mesures de frottement ont été réalisées avec un tribomètre alternatif frotteur – plan à charge constante, développé au LPMT.

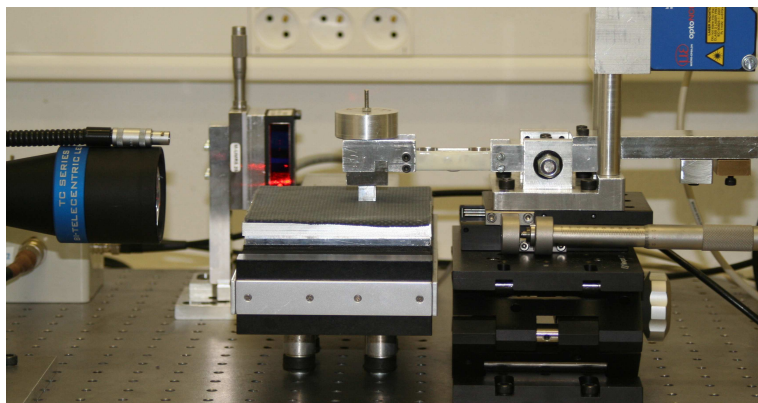


FIG. 6 – Tribomètre développé au LPMT

Ce tribomètre est constitué d'une table oscillante sur laquelle l'étoffe est fixée et d'un bras horizontal support du frotteur équipé d'un capteur de force permettant d'enregistrer la force de frottement. La vitesse de frottement, la charge normale peuvent être modifiées et différents frotteurs sont disponibles (matériau, forme, aire, état de surface ...). Le tribomètre est également équipé d'un système d'acquisition d'images.

Une étude menée par l'équipe (et présentée à ce congrès) a permis de déterminer la part du frottement due à la seule déformation de la pilosité. Ce sont ces frottements qui vont être comparés aux frottements estimés par le modèle.

4 Résultats

4.1 Profondeur de pénétration

Les deux types d'essais menés ont permis de comparer les profondeurs de pénétration dans l'étoffe obtenues lors de l'indentation ou lors du frottement. Pour les essais de frottement, les enfoncements ont été obtenus par traitement d'images enregistrées par le tribomètre lors des mesures. La figure 7 regroupe les profondeurs de pénétration obtenues pour le velours lors de l'indentation et lors du frottement à des vitesses 2 mm/s ou de 20 mm/s pour deux charges différentes (0,5 et 2,2N).

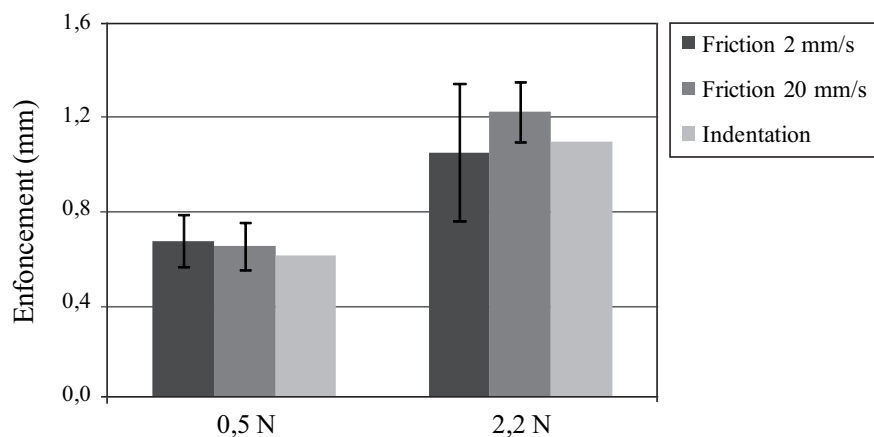


FIG. 7 – Profondeurs de pénétration pour le velours

Les vitesses dans les deux types d'essai ne sont pas les mêmes ; les frottements sont effectués avec des vitesses plus grandes. Des écarts existent (jusqu'à 30% pour la polaire sous forte charge et pour la bouclette sous faible charge) mais l'on considère que l'indentation nous fournit une profondeur de pénétration du palpeur lors du frottement suffisamment précise.

4.2 Force de frottement de déformation

Les résultats obtenus avec le modèle pour des comportements purement plastiques, élastiques et visco-élasto-plastique sont regroupés dans la figure 8 pour le velours. Différents frotteurs ont été utilisés, la caractéristique qui change d'un frotteur à un autre et qui est mentionnée dans cette figure est la largeur (la surface étant la même, la longueur change aussi). Un frotteur DoX a une largeur de X mm.

On constate que, pour les trois types d'étoffes, souvent les valeurs expérimentales du frottement sont proches de celles estimées pour un comportement visco-élasto-plastique. Pour la polaire lorsque le frotteur est étroit et la charge faible, la valeur expérimentale du frottement se rapproche de celle obtenue pour un comportement plastique alors que pour une charge forte elle se rapproche du comportement élastique.

On constate aussi que plus le frotteur devient large, plus le frottement expérimental augmente et se rapproche de la valeur obtenue pour un comportement élastique. Comme les frotteurs ont tous la même surface, lorsque la largeur augmente, la longueur diminue et donc les poils restent moins longtemps sous le frotteur.

On peut considérer que les résultats obtenus par ce modèle sont satisfaisants. Les écarts sont imputés principalement à la modélisation elle-même qui suppose que les poils sont rigides et subissent uniquement une rotation sans flexion. La différence entre les vitesses des essais de frottement et d'indentation peut aussi avoir une influence.

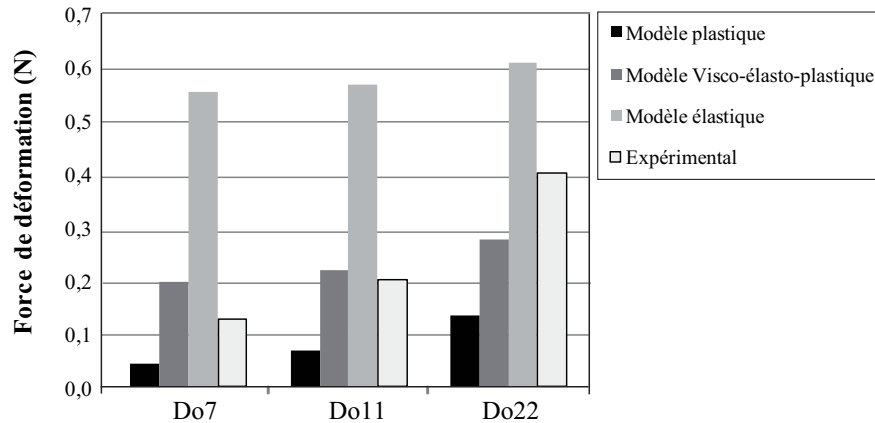


FIG. 8 – Forces de frottement expérimentales et estimées pour le velours, cas de la charge de 2,2 N

5 Conclusion

L'objectif était d'estimer les forces de frottement dues à la déformation de la pilosité pour des textiles pileux à partir du seul essai d'indentation. Pour cela, on a considéré que les poils étaient soumis à une rotation aussi bien en frottement qu'en compression (raideur des poils). Ainsi une force de frottement a pu être estimée en considérant trois types de comportement. Pour une déformation purement plastique, seule la rotation des poils à l'avant du frotteur est prise en compte. Pour les déformations élastique et visco-élasto-plastique, la force nécessaire au maintien des poils dans leur position couchée sous le frotteur a été rajoutée. Pour le calcul de la déformation élastique, c'est la courbe de charge qui est utilisée alors que pour la déformation visco-élasto-plastique c'est la courbe de décharge qui est exploitée.

Les résultats obtenus par le modèle sont proches des résultats expérimentaux ou du même ordre de grandeur. Ils sont obtenus à partir d'essais d'indentation couramment utilisés dans l'industrie textile. Une étude plus approfondie de l'indentation des matériaux textiles et notamment du cycle d'hystérésis comme on le voit sur la figure 5, pourrait permettre d'affiner le modèle. De même, la prise en compte de la flexion des poils est envisagée [6].

Références

- [1] Howell H. G., Mieszkis K. W., Tabor D., Friction in Textiles, London, 1959.
- [2] Spiegelberg C., Björklung S., Andersson S., Simulation of transient friction of a cylinder between two planes, *Wear*, 254, 1170-1179, 2003.
- [3] Dayiari M., Shaikhzadeh Najar S., Shamsi M., A new theoretical approach to cut-pile carpet compression based on elastic-stored bending energy, *J. Text. Inst.*, 100, 688-694, 2009.
- [4] Van Wyk C. M., Note on the compressibility of wool, *The Journal of the Textile Institute*, T285-T292, 1946.
- [5] Dupuis D., Popov G., Viallier P., Compression of greystate fabrics as a function of yarn structure, *Textile Res. J.*, 65, 309-316, 1995.
- [6] Watzky A., Bueno M.-A., L'elastica revisitée sous l'angle des efforts, 20^{ème} Congrès Français de Mécanique, Besançon (France), 2011.