

Indentation de matériaux fibreux : origine de l'hystérèse

B. CAMILLIERI, M.-A. BUENO

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

Résumé :

Cette étude porte sur des étoffes pileuses pour lesquelles il existe une hystérèse importante lors des cycles de charge – décharge. Une partie expérimentale couplée à une modélisation par éléments finis met en évidence l'influence sur l'hystérèse du frottement entre poils et du frottement entre l'indenteur et les poils.

Abstract:

Hairy fabrics have a significant hysteresis during a cycle of loading unloading. An experimental part coupled with a finite element model highlights the influence on hysteresis of friction between hairs and of friction between the indenter and hairiness.

Mots clés : indentation, compression, fibre, frottement, hystérèse.

1 Introduction

Une étoffe textile est formée par l'entrelacement d'un ou de plusieurs fils (tricot) ou par l'entrecroisement de fils (tissu). Un fil non filamentaire est obtenu à partir de fibres. Toutes les extrémités des fibres peuvent ne pas être prises dans la structure et il existe alors une pilosité de surface. Pour les étoffes type velours, cette pilosité voulue, joue un rôle fondamental lors du toucher bien que les dimensions des fibres soient petites. Cette pilosité subit des cycles de compressions et décharges multiples au toucher, lors du porter ou plus généralement lors de son usage (revêtement de sièges automobiles). Une telle étoffe présente une hystérèse importante lors d'un cycle de charge-décharge et peut ainsi être rapprochée des matériaux dits à fibres enchevêtrées, matériaux qui ont été étudiés ces dernières années car intervenant notamment comme matériaux d'isolation (type laine minérale), de filtration, comme éléments d'agencement (panneaux de fibres de bois) ou dans les matériaux composites à fibres... Ces matériaux subissent des cycles de charge – décharge pendant leur fabrication ou leur utilisation. L'hystérèse existant lors d'un cycle de charge - décharge pour ces fibres enchevêtrées reste partiellement expliquée comme liée à l'état de surface des fibres et à la morphologie du réseau [1,2,3,4].

Les velours se distinguent des tampons de fibres enchevêtrées par le fait que dans une étoffe, les poils sont maintenus encastrés à l'une de leur extrémité alors que dans un tampon, les fibres sont non liées ou alors par des points de collage répartis aléatoirement. Une autre caractéristique est qu'après quelques cycles de réarrangement des poils du velours, le comportement de l'étoffe est élastique (les cycles ultérieurs sont fermés et se superposent).

A partir de mesures expérimentales d'indentation et d'une modélisation par éléments finis, nous allons chercher à comprendre l'allure (non linéarité et hystérèse) et l'origine de l'hystérèse existant lors d'un cycle de charge - décharge. Dans les deux cas, les influences du frottement entre les poils et du frottement entre l'indenteur et les poils ont été étudiées. La modélisation bien que ne prenant en compte que la compression de quelques poils permet de répondre à ces questions.

2 Essais expérimentaux

2.1 Les étoffes testées

Différentes étoffes pileuses ont été testées mais cette présentation portera essentiellement sur un velours

obtenu par tricotage. La pilosité peut être considérée de longueur constante et orientée régulièrement. La figure 1 regroupe les principales caractéristiques des fibres de ce velours ainsi qu'une photographie.

Matière : Polyester ($E = 8 \text{ GPa}$; $\nu = 0,22$)
 Longueur des fibres : $2,11 \pm 0,01 \text{ mm}$
 Diamètre des fibres : $31 \pm 2 \mu\text{m}$
 Inclinaison des poils / à la verticale : $41^\circ \pm 2$
 Densité de poils / mm^2 : 76 ± 8

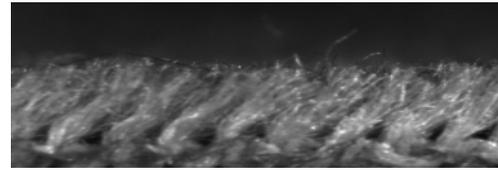


FIG. 1 – Caractéristiques de la pilosité du velours testé et photographie.

Dans le but de changer le coefficient de frottement entre les fibres de la pilosité (sans changer la rigidité des poils), deux traitements chimiques ont été appliqués sur ce velours : l'un qui le rend hydrophobe, l'autre qui le rend hydrophile. Ces traitements changent les tensions de surface des fibres. D'après Rabinowitz [5], l'énergie d'adhésion et donc les forces de frottements sont modifiées. Le traitement hydrophobe abaisse la tension superficielle du velours et diminue le coefficient de frottement inter fibres.

2.2 L'essai d'indentation

Les essais d'indentation ont été réalisés avec un rhéomètre MCR500 d'Anton Paar piloté par le logiciel Rheoplus et équipé de deux cylindres concentriques : le cylindre inférieur fixe reçoit l'échantillon d'étoffe à tester, le cylindre supérieur (de diamètre 15 mm) mobile étant l'indenteur.

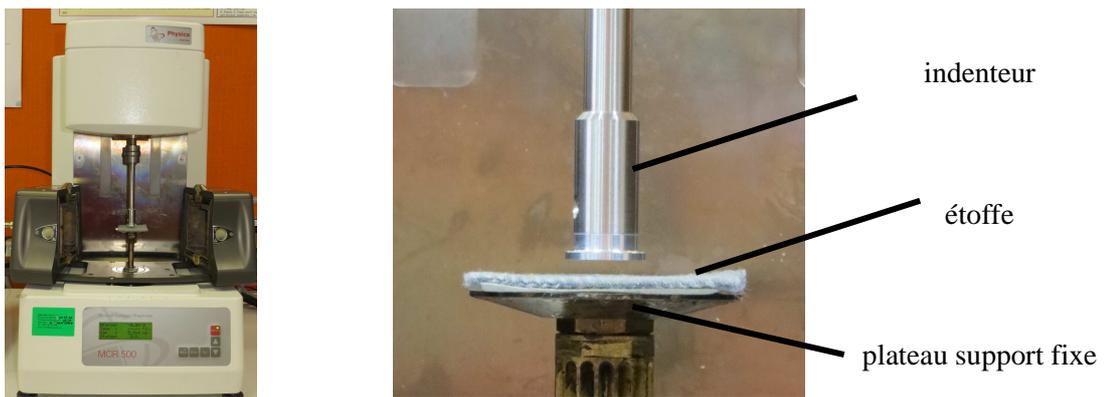


FIG. 2 – Rhéomètre MCR500 (gauche) et vue du système plan-plan (droite)

Une méthodologie [6] a été développée permettant d'obtenir pour chaque étoffe un cycle d'indentation moyen à partir de plusieurs mesures (6 au minimum). Le résultat est la courbe : force normale en fonction de la profondeur de pénétration de l'indenteur dans l'étoffe.

Des indenteurs dans différents matériaux ont été utilisés dans le but de changer le coefficient de frottement entre l'indenteur et les poils. Ces coefficients sont liés aux tensions superficielles des matériaux [5] obtenues par la littérature. La figure 5 montre l'influence d'un autre paramètre lié à l'état de surface de l'indenteur : la rugosité. Le tableau 1 regroupe les tensions de surface des 4 matériaux testés ainsi que la rugosité de 5 des indenteurs utilisés.

	Inox	aluminium	PVC	PTFE
Tension de surface (10^{-3}N/m)	45 [7]	40 [8]	39 [9]	19 [9]
Ra (μm)	$0,54 \pm 0,10$	$0,22 \pm 0,03$	$0,46 \pm 0,15$	$0,62 \pm 0,28$ (lisse) $4,77 \pm 1,29$ (rugueux)

TAB. 1 –Tension de surface des matériaux et rugosité des indenteurs.

2.3 Résultats expérimentaux

La figure 3 regroupe les cycles d'indentation pour le velours hydrophile et le velours hydrophobe avec un indenteur en aluminium. La figure 4 donne les courbes d'indentation obtenues pour le velours hydrophobe et des indenteurs peu rugueux en inox, aluminium, polychlorure de vinyle et polytétrafluoréthylène. La figure 5 montre l'influence de la rugosité du matériau de l'indenteur sur le cycle d'indentation toujours dans le cas du velours hydrophobe.

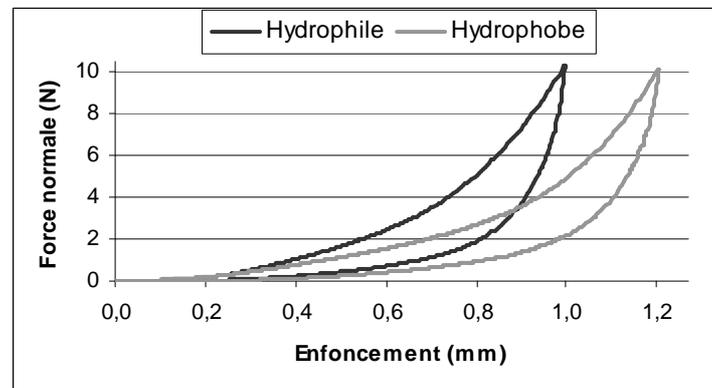


FIG. 3 – Courbe moyenne d'indentation des velours traités hydrophile et hydrophobe.

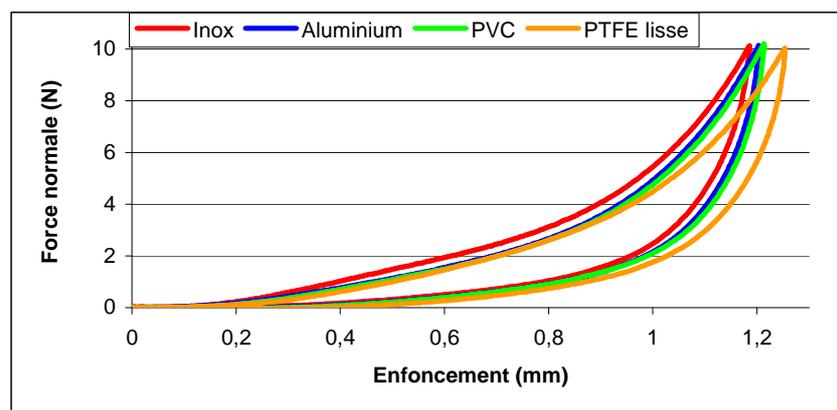


FIG. 4 – Influence du coefficient de frottement indenteur/poil lors de l'indentation du velours hydrophobe.

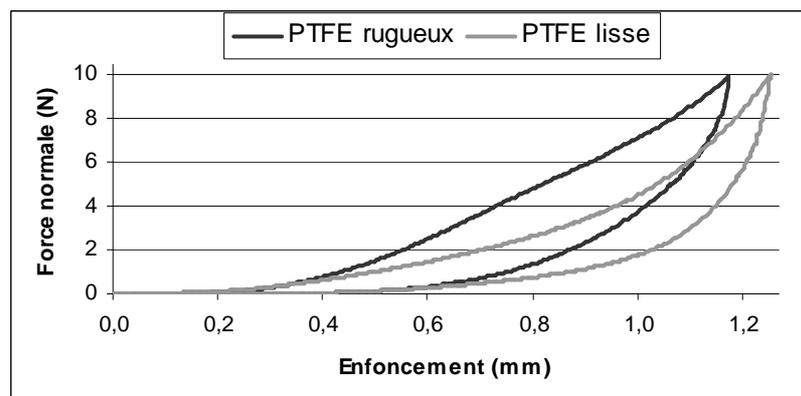


FIG. 5 – Influence de la rugosité du matériau de l'indenteur sur le cycle d'indentation du velours hydrophobe.

On constate que pour un même enfoncement de l'indenteur dans l'étoffe, la force normale sur l'indenteur diminue (déplacement des cycles vers la droite):

- lorsque le coefficient de frottement entre poils diminue (figure 3, cas du velours hydrophobe par rapport

au velours hydrophile),

- lorsque le coefficient de frottement entre l'indenteur et les poils diminue (figure 4),
- lorsque la rugosité de l'indenteur diminue (figure 5).

3 Modélisation par éléments finis

Elle a été réalisée sous Abaqus (Dassault Systemes).

3.1 Hypothèses de départ et choix de modélisation

Les poils sont supposés avoir un comportement élastique et isotrope, l'indenteur être indéformable. Chaque poil a été modélisé comme élément volumique (maillage hexaédrique), les dimensions et caractéristiques du matériau étant proches de celles des fibres de l'étoffe données dans la figure 1. La figure 6 montre par exemple la modélisation de deux poils. L'extrémité libre des poils est terminée par une courbure destinée à faciliter les calculs ; l'indenteur commencera par appuyer sur cette extrémité. L'autre extrémité est encastree.

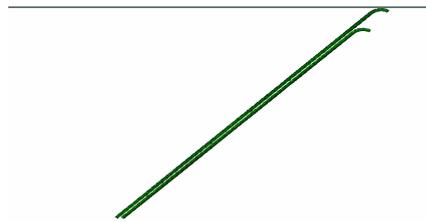


FIG. 6 – Modélisation de 2 poils et de l'indenteur

On impose un déplacement vertical à l'indenteur en descente puis en montée. Abaqus permet la prise en compte du comportement non linéaire des poils ainsi que des frottements entre l'indenteur et les poils et entre les différents poils (frottement surface sur surface). De chaque calcul, on tirera une courbe analogue à la courbe d'indentation expérimentale : force normale exercée sur ou par l'indenteur en fonction de l'enfoncement.

3.2 Indentation d'un poil unique

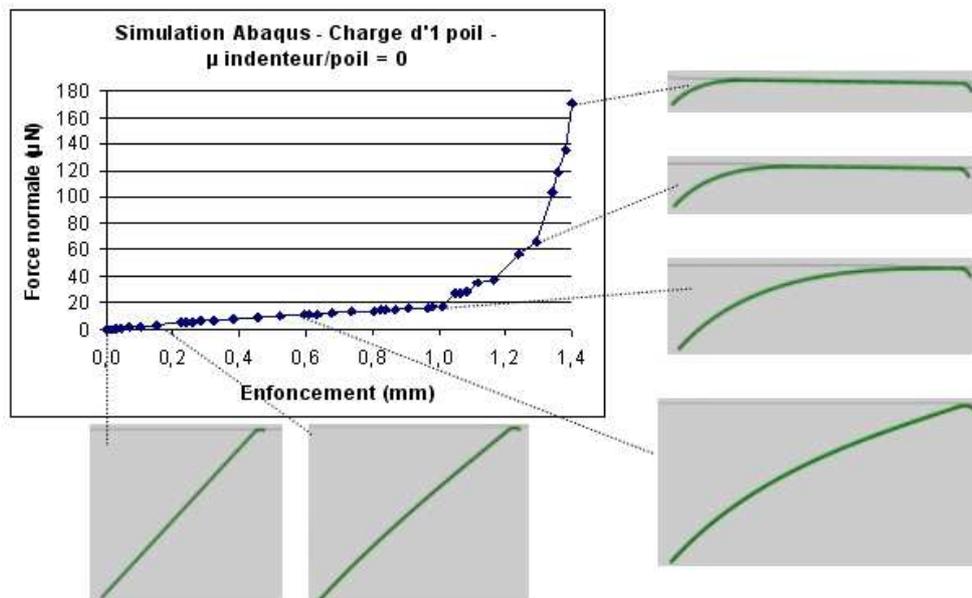


FIG. 7 – Courbe de charge sur un poil avec formes du poil.

La figure 7 montre l'allure de la courbe de charge analogue à la courbe de décharge. On distingue deux zones : une première zone où la linéarité peut être admise et une seconde zone nettement non linéaire. Sur la courbe figurent également les déformées du poil pour certains points (début et fin de zones notamment).

L'influence de la variation du coefficient de frottement μ_i entre l'indenteur et le poil est la même que celle tracée figure 9 pour deux poils.

3.3 Indentation de deux poils proches

L'indentation des deux poils représentés figure 6 a été faite soit en maintenant le coefficient de frottement entre l'indenteur et les poils μ_i égal à 0 et en faisant varier le coefficient de frottement entre poils μ_p (figure 8) soit en maintenant le coefficient de frottement entre poils μ_p égal à 0 et en faisant varier le coefficient de frottement entre l'indenteur et les poils μ_i (figure 9).

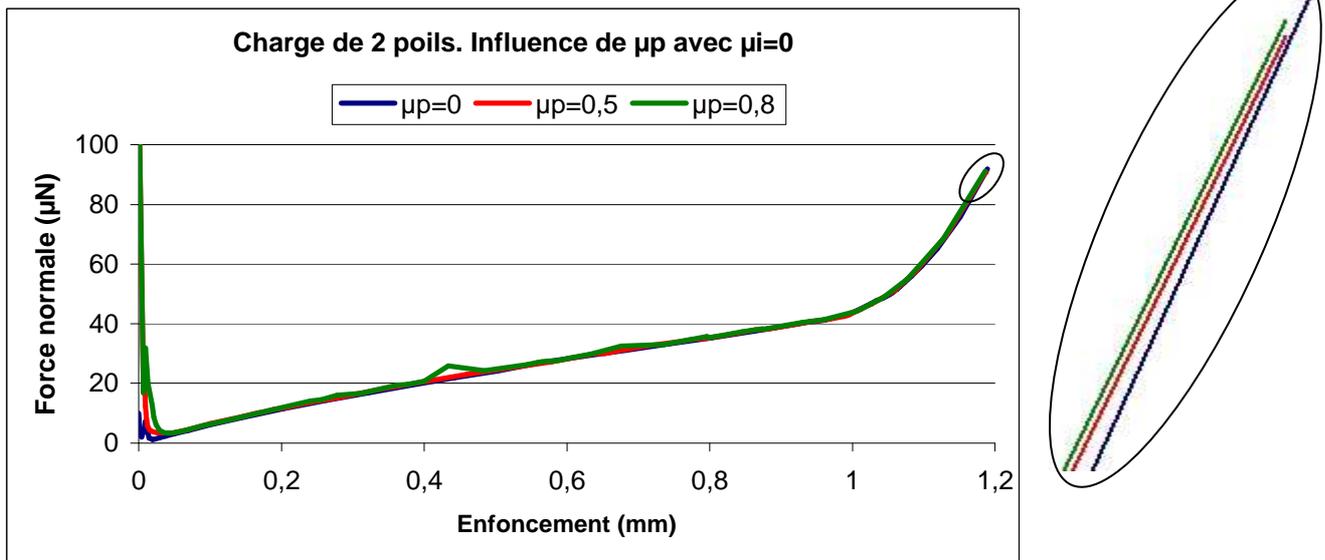


FIG. 8 – Influence du coefficient de frottement entre les poils.

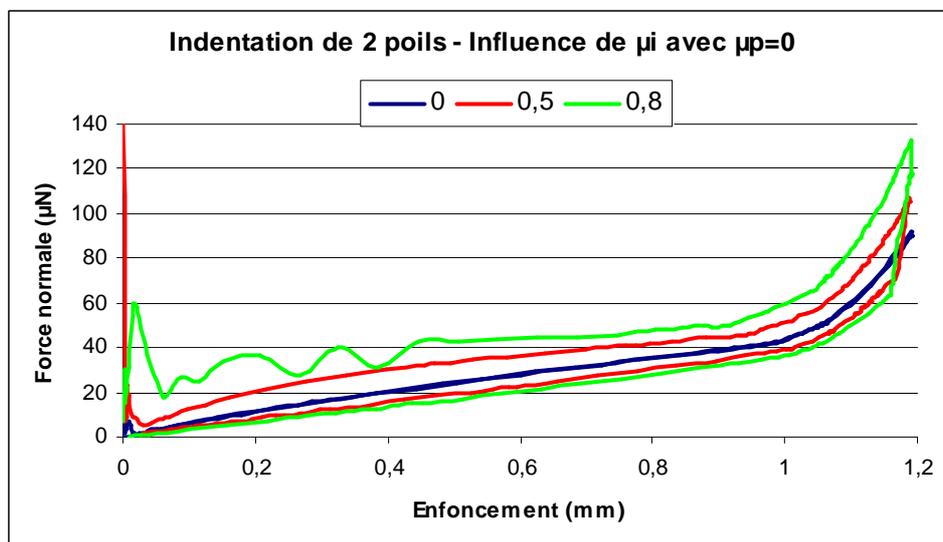


FIG. 9 – Influence du frottement entre l'indenteur et les poils.

On constate que si les frottements sont nuls, il n'existe pas d'hystérèse, les courbes de charge et de décharge sont confondues. En revanche dès qu'un frottement est pris en compte, une hystérèse existe et est d'autant plus large que le frottement croît. De plus, pour un même enfoncement de l'indenteur dans l'étoffe, la force normale sur l'indenteur diminue (déplacement des cycles vers la droite) :

- lorsque le coefficient de frottement entre poils diminue (figure 8),
- lorsque le coefficient de frottement entre l'indenteur et les poils diminue (figure 9).

4 Discussion et perspectives

La modélisation par éléments finis est en cohérence avec les résultats obtenus expérimentalement. On retrouve une allure du cycle similaire. L'hystérèse existe lors que des frottements existent entre l'indenteur et les poils. La forme du poil lors de la charge et de la décharge pour une même profondeur de l'indenteur n'est alors pas la même, en conséquence de quoi la force exercée par le poil sur l'indenteur diffère. Pour la même raison, cela explique pourquoi l'étoffe a un comportement élastique (superposition des cycles successifs).

La valeur des forces calculées par éléments finis sur un poil permet d'obtenir l'ordre de grandeur des forces obtenues expérimentalement. Pour un enfoncement de l'indenteur de 1,1 mm, le code donne une force normale de l'ordre de 0,2 cN pour un poil de diamètre 30 μm et un module de Young de 8 GPa, avec un coefficient de frottement entre l'indenteur et le poil de 0,5. En tenant compte du nombre de poils réellement sous l'indenteur, on arrive à une force de 2,5 N environ contre 7 N expérimentalement alors que les frottements entre poils ne sont pas pris en compte. De même, du fait de la déformée différente du poil entre la charge et la décharge, pour un écart sur la force normale de l'ordre de 50 μN , la force sur l'indenteur varierait de 0,7 N entre la charge et la décharge. Sur deux poils, la part du frottement entre l'indenteur et les poils est prépondérante par rapport à celle du frottement entre poils. Les différents calculs effectués en changeant les coefficients de frottement μ_p et μ_i confirment les résultats obtenus expérimentalement. Pour μ_p comme pour μ_i , l'évolution est la même, la compression de l'étoffe est plus difficile quand l'un des coefficients augmente.

Il serait intéressant de simuler la rugosité de l'indenteur pour comprendre les phénomènes modifiant la charge comme la décharge. La modélisation actuelle, du fait de la prise en compte de la non linéarité, des grands déplacements, des frottements et avec les éléments hexaédriques utilisés ne permet d'indenter que quelques poils. Le tableau 2 suivant qui regroupe les temps de calcul pour l'indentation de 1 à 4 poils dans des conditions identiques ($\mu_i = 0,5$ $\mu_p = 0,2$ enfoncement de 1,2 mm), montre aussi que le calcul de la décharge est plus difficile que celui de la charge. C'est souvent au tout début de la décharge que les calculs ne convergent pas.

Nombre de poils	charge (min)	décharge (min)	total (min)
1	4	9	13
2	27	31	58
3	49	115	164
4	95		

TAB. 2 –Durée de calcul (temps CPU).

References :

- [1] Pocquillon D., Viguier B., Andrieu E., Compression de fibres enchevêtrées et calibrées en nylon et aluminium. Expériences et modélisation, 18^{ème} Congrès Français de Mécanique, Août 2007
- [2] Haeffelin J.-M., Bos F., Castéra P., Modélisation du comportement d'un matelas de fibres cellulosiques au cours de sa consolidation, Matériaux 2002
- [3] Barbier C., Dendievel R., Rodney D., Role of friction in the mechanics of non bonded fibrous materials, Physical Review E 80, 016115 (2009)
- [4] Janghorban A., Pocquillon D., Viguier B., Andrieu E., Compression de fibres enchevêtrées modèles, Matériaux 2006
- [5] Rabinowitz E., The determination of the compatibility of metals through static friction tests, American Society of Lubrication Engineers (1970) 198-205
- [6] Camillieri B., Torres Merino J., Bueno M.-A., Etude des mécanismes intervenant dans l'indentation des matériaux fibreux, Journées Internationales Francophones de Tribologie 2012.
- [7] Bueno H., The critical surface tension of 316L stainless steel, (2005), Master's Theses. Paper 2728.
- [8] Cognard J., Sciences et technologie du collage, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 2000.
- [9] Jasawant D. Fiche technique référence 22744.0765, Techniques de l'ingénieur, Quels sont les phénomènes en jeu dans un assemblage ?