



Etude des mécanismes d'adhésion et de déformation à l'origine du frottement de surfaces textiles

Romain Bocquet

► **To cite this version:**

Romain Bocquet. Etude des mécanismes d'adhésion et de déformation à l'origine du frottement de surfaces textiles. Autre. Université de Haute Alsace - Mulhouse, 2013. Français. <NNT : 2013MULH4391>. <tel-01276032>

HAL Id: tel-01276032

<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01276032>

Submitted on 18 Feb 2016

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.

UNIVERSITE DE MULHOUSE – HAUTE ALSACE

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'INGENIEURS SUD ALSACE

N° attribué par la bibliothèque. |2|0|1|3|M|U|L|H|4|3|9|1|

THESE

pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE HAUTE ALSACE

**Discipline : Sciences Pour l'Ingénieur
Spécialité : Mécanique**

Soutenance publique prévue le 28 novembre 2013

Par

Romain BOCQUET

Titre :

Etude des mécanismes d'adhésion et de déformation à l'origine du frottement de surfaces textiles

Rapporteur	Pr. Damien SOULAT	Ecole Nationale Supérieure des Arts et Industries Textiles
Rapporteur	Pr. Francesco MASSI	Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Aerospaziale Università "La Sapienza" Roma
Examineur	Pr. Yannick DESPLANQUES	Ecole Centrale de Lille
Co-encadrant	Dr. René ROSSI	EMPA Saint Gall, Suisse
Co-encadrant	Dr. Siegfried DERLER	EMPA Saint Gall, Suisse
Co-encadrant	Dr. Michel TOURLONIAS	Université de Haute Alsace
Directeur de thèse	Pr. Marie-Ange BUENO	Université de Haute Alsace

Remerciements

Le travail exposé dans ce manuscrit a été réalisé en collaboration entre le Laboratoire de Physique et Mécanique Textiles à Mulhouse et le laboratoire de protection et physiologie de l'EMPA St Gall en suisse.

Mes premiers remerciements vont naturellement vers Marie-Ange Bueno, pour avoir dirigé ma thèse et avoir fait preuve d'une patience exemplaire et d'une disponibilité à toute heure. Ses connaissances et sa rigueur scientifique m'ont beaucoup apporté. Je souhaite à tous les thésards d'être aussi chanceux de pouvoir travailler avec son équipe.

Je suis très reconnaissant à messieurs Yannick Desplanques, Francesco Massi et Damien Soulat d'avoir accepté de rapporter ou d'examiner ce travail.

Je souhaite également témoigner ma gratitude à René Rossi et Siegfried Derler pour les nombreuses discussions scientifiques que nous avons eues et l'accueil chaleureux qu'ils nous ont témoigné à chacune de nos rencontres.

Un grand merci à Michel Turlonias pour avoir toujours eu du temps à m'accorder pour les nombreuses fois où j'ai eu besoin de son aide.

J'ai énormément appris aux côtés des nombreuses personnes que j'ai côtoyées, je leur en suis sincèrement reconnaissant. Merci également à tous les collègues pour la bonne humeur ambiante et pour les pauses café animées.

Je tiens également à remercier Brigitte Camillieri et Florence Biguenet pour leurs confiances quelles m'ont accordé afin de m'essayer à l'enseignement.

Merci à Jean-Christophe Lejeune pour avoir passé autant de temps à m'aider à fabriquer les différents éléments indispensable au tribomètre.

Et je souhaite enfin remercier ma femme pour son soutien sans faille tout au long de la thèse et mes filles pour leur amour et les nuits blanches que j'ai pu passer afin de corser les choses.

Table des matières

Introduction :	14
1 Chapitre 1 : les surfaces textiles et le frottement	18
1.1 Caractérisation d'une surface textile	18
1.1.1 Fibres et filaments	18
1.1.2 Fils	19
1.1.3 Surfaces textiles	19
1.2 Etat de l'art sur la tribologie	23
1.2.1 Introduction à la tribologie	23
1.2.2 Propriétés importantes des matériaux pour la tribologie	24
1.2.3 Le frottement	29
1.2.4 Etat de l'art sur les phénomènes d'adhésion et de déformation	32
1.3 Etat de l'art sur la tribologie textile	37
1.3.1 Mesure de frottement entre fibres ou fils	37
1.3.2 Mesure sur surface textiles	42
2 Chapitre 2 : Descriptif des méthodes de mesures et matériaux	49
2.1 Surfaces textiles pileuses de référence	49
2.2 Macrosurfaces pileuses - modèles	51
2.2.1 Intérêt de ces surfaces	51
2.2.2 Réalisation de ces surfaces	53
2.2.3 Caractéristiques des filaments utilisés	54
2.2.4 Macrosurfaces pileuses réalisées	57
2.3 Le tribomètre	58
2.3.1 Dispositif expérimental	58

2.3.2	Paramètres expérimentaux	61
2.3.3	Analyse d'une courbe type	65
2.3.4	Influence de la rugosité du frotteur	71
2.3.5	Etude sur la planéité du porte échantillon.....	72
3	Chapitre 3 : Mise en place et validation du modèle de frottement	74
3.1	Modèle mis en place et simplifications préliminaires	74
3.1.1	Influence des effets de bords latéraux sur le frottement	75
3.1.2	Influence de la face arrière sur le frottement	78
3.2	Validation du modèle pour les surfaces textiles pileuses	82
3.2.1	Différences en fonction de la configuration du tribomètre.....	82
3.2.2	Influence de la pression appliquée sur la surface textile	86
3.2.3	Influence de la largeur du frotteur sur la force de frottement.....	87
3.2.4	Influence de l'aire sous le frotteur sur la force de frottement	88
3.2.5	Validité du modèle.....	90
4	Chapitre 4 : Résultats provenant du modèle de frottement et visco-élasticité.....	92
4.1	Influence de la vitesse sur le frottement	92
4.1.1	Etude de la relaxation de la pilosité sous le frotteur	92
4.1.2	Effet de la vitesse sur la face avant du frotteur.....	94
4.1.3	Détermination des contraintes à l'avant et sous le frotteur pour les surfaces étudiées	95
4.2	Origine du comportement visqueux d'une surface pileuse au frottement.....	102
4.2.1	Analyse du signal de frottement d'une boucle unique	102
4.2.2	Influence de la vitesse du frotteur sur un élément unitaire de pilosité. ..	105
4.2.3	Analyse du signal de frottement d'un tapis de boucles	107

4.2.4	Influence de la vitesse du frotteur sur un tapis de boucles.	109
4.2.5	Influence de la tension superficielle des filaments	120
Conclusion :.....		126
Perspectives :.....		128
Bibliographie :.....		129
Annexe :.....		132

Table des figures :

Figure 1 : Image MEB d'une fibre de coton et d'un filament (polyéthylèneterephtalate)	18
Figure 2 : Image MEB d'un fil	19
Figure 3 : Image MEB du point de fusion d'un non-tissé thermolié	20
Figure 4 : Photo d'un tissu (toile) et d'un tricot (jersey).....	21
Figure 5 : a) tricot trame, b) tricot chaîne	21
Figure 6 : Schéma d'un tressage tubulaire	22
Figure 7 : Image MEB d'une structure d'un tissu non pileux (à gauche) et d'une structure avec fibres émergentes (à droite)	23
Figure 8 : contact tribologique	24
Figure 9 : Illustration d'une topographie de surface	26
Figure 10 : Profil d'une surface	26
Figure 11 : Profils de surfaces ayant la même rugosité moyenne, Ra.....	28
Figure 12 : Fonctions de densité de probabilité de (a) distributions aléatoires d'asymétrie différentes et (b) de distributions symétriques de finesse différentes.	29
Figure 13 : Force tangentielle en fonction du temps ou déplacement.....	31
Figure 14 : Phénomène de Stick-Slip	32
Figure 15 : Schéma de l'adhésion entre deux corps	34
Figure 16 : Schéma de répartition des composantes de la force de frottement sur les différentes faces d'un frotteur	36
Figure 17 : Méthode du cantilever.....	38
Figure 18 : Méthode de Howell.....	39
Figure 19 : Méthode de El Mogahzy et Gupta	40
Figure 20 : Méthode fibres (ou fils) torsadés	40
Figure 21 : Coefficient de frottement en fonction de l'angle de glissement entre deux nappes de fibres ou de fils	41

Figure 22 : Résultat type obtenu avec des fibres de coton dans le cas d'un frottement nappes contre nappes de fibres courtes	41
Figure 23 : Dispositif de mesure de frottement avec une machine de traction	42
Figure 24 : KES-FB4: module de surface de la chaîne Kawabata, ici avec le capteur de frottement	43
Figure 25 : Schéma de principe du tribomètre multi-directionnel	44
Figure 26 : Montage optique du rugosimètre	45
Figure 27 : Pilosimètre optique	46
Figure 28 : Schéma de principe du pilosimètre optique.	47
Figure 29 : Image de la pilosité reçue par la caméra CCD.....	47
Figure 30 : a) Velours V1 et b) V2 (vue de profil).....	50
Figure 31 : Polaire (vue de profil).	50
Figure 32 : Jersey bouclette (vue de profil).....	50
Figure 33 : élastica rectangle, Watzky	52
Figure 34 : Boucles créées à partir de monofilaments de polyester	52
Figure 35 : Photos du dispositif de mise en place des boucles a) vue de dessus, b) vue de dessous.....	53
Figure 36 : échantillons constitués d'une boucle unique (en haut) et comportant 3 colonnes de 7 boucles (en bas).....	55
Figure 37 : Tribomètre pion-plan alternatif à masse morte.....	58
Figure 38 : Configuration du tribomètre : (à gauche) à masse morte, (à droite) à hauteur imposée.....	59
Figure 39 : Tribomètre pion-plan alternatif à déplacement vertical bloqué.....	60
Figure 40 : A gauche frotteur avec chanfrein et surfaces latérales évidées, au milieu frotteur droit, à droite frotteur dit linéique.	61
Figure 41 : Frotteur A-Dc-11	63
Figure 42 : Allure de vitesse trapézoïdale	63

Figure 43 : Image MEB grossies 30 fois du velours V2 : étoffe non usée (à gauche) et étoffe usée (à droite) étoffe usée).....	65
Figure 44 : Image MEB du velours du V2 : étoffe non usée (à gauche) et étoffe usée (à droite).....	65
Figure 45 : Courbe type de frottement avec courbe de vitesse.....	66
Figure 46 : Graphe présentant l'influence de la longueur du frotteur sur les zones 2 (Figure 45) lors du cycle de frottement. A-Do-7 (frotteur de longueur 6,9 mm), A-Do-11 (frotteur de longueur 13,8 mm) et A-Do-22 (frotteur de longueur 21,7 mm).....	67
Figure 47 : Graphique de frottement en fonction du déplacement (en haut) et zoom sur une partie de la courbe (en bas).....	68
Figure 48 : Velours V1 avec échelle montrant l'espacement des touffes de poils.....	69
Figure 49 : Représentation de l'autospectre de la force de frottement.....	69
Figure 50 : Effet de la rugosité du frotteur (cas du frotteur A-Do-11) sur la force de frottement.....	71
Figure 51 : Graphique représentant le déplacement vertical du frotteur lorsque'il se déplace sur le porte-échantillon (origine arbitraire).....	72
Figure 52 : Localisation des forces sur les différentes faces du frotteur.....	75
Figure 53 : Frotteurs A-Dc2la-11, A-Dc-11 et 1-Do-11	76
Figure 54 : Force de frottement dans le sens poil pour les frotteurs A-Dc2la-11, A-Dc-11 et 1-Do-11 à 3 kPa.....	76
Figure 55 : Force de frottement dans le sens poil pour les frotteurs A-Dc2la-11, A-Dc-11 et 1-Do-11 à 15 kPa.....	77
Figure 56 : Photographie du contact surface textile / frotteur vue de face, (a) pour le velours V1 et (b) la polaire.....	78
Figure 57 : frotteur avec et sans chanfrein, vue de profil.....	78
Figure 58 : Effet de la forme de la face avant et/ou arrière du frotteur sur la force de frottement totale lors d'un déplacement dans le sens poil à 3 kPa : frotteur sans chanfrein (A-Do-11), avec chanfrein à l'avant et à l'arrière (A-Dc-11), uniquement à l'avant du glissement (A-Dcatt-11) et à l'arrière (A-Dcarr-11).....	79

Figure 59 : Effet de la forme de la face avant et/ou arrière du frotteur sur la force de frottement totale lors d'un déplacement dans le sens poil à 15 kPa : frotteur sans chanfrein (A-Do-11), avec chanfrein à l'avant et à l'arrière (A-Dc-11), uniquement à l'avant du glissement (A-Dcatt-11) et à l'arrière (A-Dcarr-11).....	79
Figure 60 : Photographie du contact surface textile / frotteur vue de profil durant le frottement, (a) pour le velours V1 dans le sens poil et (b) la polaire avec le frotteur A-Do-11.	80
Figure 61 : Effet de la forme de la face avant et/ou arrière du frotteur sur la force de frottement totale lors d'un déplacement dans le sens rebrousse-poil à 3 kPa : frotteur sans chanfrein (A-Do-11), avec chanfrein à l'avant et à l'arrière (A-Dc-11), uniquement à l'avant du glissement (A-Dcatt-11) et à l'arrière (A-Dcarr-11).....	81
Figure 62 : Effet de la forme de la face avant et/ou arrière du frotteur sur la force de frottement totale lors d'un déplacement dans le sens rebrousse-poil à 15 kPa : frotteur sans chanfrein (A-Do-11), avec chanfrein à l'avant et à l'arrière (A-Dc-11), uniquement à l'avant du glissement (A-Dcatt-11) et à l'arrière (A-Dcarr-11).....	81
Figure 63 : Graphique représentant la force de frottement en fonction du déplacement horizontal pour les deux configurations du tribomètre : à frotteur mobile verticalement (chargement par masse morte) et à frotteur à altitude fixe (la force normale est alors mesurée).	83
Figure 64 : Graphique représentant la force de frottement (force normale et force tangentielle) en fonction du déplacement horizontal pour la configuration du tribomètre à frotteur à altitude fixe.....	84
Figure 65 : Graphique représentant le déplacement vertical (configuration frotteur mobile) et la force normale (configuration frotteur fixe) en fonction du déplacement horizontal.....	85
Figure 66 : Graphique représentant le coefficient de frottement en fonction du déplacement horizontal pour les deux configurations du tribomètre.	86
Figure 67 : Influence de la force de frottement en fonction de la pression appliquée (mesures réalisées à 20 mm.s^{-1} avec le frotteur parallélépipédique en aluminium de largeur 11 mm, A-Do-11).....	87
Figure 68 : Force de frottement en fonction de la largeur de frotteur.	88

Figure 69 : Force de frottement en fonction de l'aire sous le frotteur.....	89
Figure 70 : Force de frottement en fonction du temps de relaxation pour différentes largeur de frotteur w.....	93
Figure 71 : Forces tangentielles (F_T) et normales (F_N) dans le sens poil et rebrousse- poil en fonction de la vitesse de glissement.	94
Figure 72 : Force de frottement à l'avant du frotteur par unité de largeur dans le sens poil. Méthode 1 avec le frotteur prismatique et méthode 2 avec les frotteurs parallélépipédiques.....	100
Figure 73 : Force de frottement à l'avant du frotteur par unité de largeur dans le sens rebrousse-poil. Méthode 1 avec le frotteur prismatique et méthode 2 avec les frotteurs parallélépipédiques.....	100
Figure 74 : Force de frottement sous le frotteur par unité de largeur lors d'un frottement dans le sens poil et le sens rebrousse-poil.	101
Figure 75 : Frottement d'une boucle dans le plan du déplacement.....	102
Figure 76 : Flexion d'une boucle, vue de face.	103
Figure 77 : Schéma représentant l'évolution de la force totale sur une boucle.....	103
Figure 78 : Fin de flexion, et début de frottement sous le frotteur.....	104
Figure 79 : Frotteur à la fin de la zone de frottement sous le frotteur, avant relâchement de la boucle.....	104
Figure 80 : Force de frottement tangentielle (F_T), normale (F_N) et totale (F_{tot}) d'une boucle unique en fonction du déplacement.	105
Figure 81 : Effet de la vitesse (V indiqué en mm.s^{-1}) sur une boucle unique, force tangentielle (F) en fonction du déplacement.	106
Figure 82 : Effet de la vitesse (V indiqué en mm.s^{-1}) sur une boucle unique, force normale (N) en fonction du déplacement.	106
Figure 83 : Représentations de tapis de boucles.....	107
Figure 84 : Représentation du nombre de boucles en lignes.....	108
Figure 85 : Effet du nombre de boucles, force tangentielle (F) en fonction du déplacement.....	108

Figure 86 : Effet du nombre de boucles, force normale (N) en fonction du déplacement.....	109
Figure 87 : Force tangentielle (F) en fonction du déplacement pour différentes vitesses relatives du frotteur (V de 1, 5, 10, 15 et 20 mm.s ⁻¹).	110
Figure 88 : Force normale (N) en fonction du déplacement pour différentes vitesses relatives du frotteur (V de 1, 5, 10, 15 et 20 mm.s ⁻¹). Les zones de maintien sous le frotteur des différentes lignes de boucles sont indiquées (distance de frottement de la ligne sous le frotteur).....	111
Figure 89 : Effet de la vitesse (V de 1 à 20 mm.s ⁻¹) sur la composante tangentielle (F) de la force de flexion des boucles.	112
Figure 90 : Effet de la vitesse (V de 1 à 20 mm.s ⁻¹) sur la composante normale (N) de la force de flexion des boucles.	113
Figure 91 : Effet de la vitesse (V indiqué en mm.s ⁻¹) sur une boucle unique (THI), force tangentielle (F) en fonction du déplacement.....	114
Figure 92 : Effet de la vitesse (V indiqué en mm.s ⁻¹) sur une boucle unique (THI), force normale (N) en fonction du déplacement.....	115
Figure 93 : Effet de la vitesse (V indiqué en mm.s ⁻¹) sur une boucle unique (THO), force tangentielle (F) en fonction du déplacement.....	116
Figure 94 : Effet de la vitesse (V indiqué en mm.s ⁻¹) sur une boucle unique (THO), force normale (N) en fonction du déplacement.....	116
Figure 95 : Effet de la vitesse (V indiqué en mm.s ⁻¹) sur un tapis de boucles (THI), force tangentielle (F) en fonction du déplacement.....	117
Figure 96 : Effet de la vitesse (V indiqué en mm.s ⁻¹) sur un tapis de boucles (THI), force normale (N) en fonction du déplacement.....	118
Figure 97 : Effet de la vitesse (V indiqué en mm.s ⁻¹) sur un tapis de boucles (THO), force tangentielle (F) en fonction du déplacement.....	118
Figure 98 : Effet de la vitesse (V indiqué en mm.s ⁻¹) sur un tapis de boucles (THO), force normale (N) en fonction du déplacement.....	119
Figure 99 : Effet de la tension superficielle sur la force tangentielle (F), cas de la boucle unique	121

Figure 100 : Effet de la tension superficielle sur la force normale (N), cas d'une boucle unique	121
Figure 101 : Effet de la tension superficielle sur la force tangentielle (F), cas d'un tapis de boucles	122
Figure 102 : Effet de la tension superficielle sur la force normale (N), cas d'un tapis de boucles.....	123
Figure 103 : Photo montrant une première série de boucle qui fléchit la suivante....	124
Figure 104 : Courbe type de $\cos\theta$ en fonction de $\sqrt{\gamma_1^d}/\gamma_1$	133

Table des tableaux :

Tableau 1 : Tableau récapitulatif des caractéristiques des surfaces textiles utilisées...	51
Tableau 2 : Caractéristiques des filaments NT, THI et THO	54
Tableau 3 : Caractéristiques des liquides utilisés	55
Tableau 4 : Récapitulatif des angles de contact par filament.	56
Tableau 5 : Tensions superficielles des filaments	56
Tableau 6 : Tableau récapitulatif des échantillons réalisés avec chaque monofilament.	57
Tableau 7 : Tableau de classification des frotteurs	62
Tableau 8 : tableau des fréquences importantes dans le signal de frottement.....	70
Tableau 9 : Temps de relaxation des poils sous le frotteur en fonction de la vitesse et du frotteur.....	93
Tableau 10 : Force de frottement à l'avant du frotteur prismatique par unité de largeur de frotteur, pour les velours V1 et V2.....	98
Tableau 11 : Caractéristiques des composantes de frottement obtenues à partir de frotteurs parallélépipédiques.	99
Tableau 12 : Valeur de la tension superficielle de chacun des filament et de l'angle de contact à l'avancée avec l'eau.....	114

Introduction :

Aujourd'hui et dans un grand nombre de domaines d'application nous utilisons de nombreuses surfaces textiles. Ces dernières, sont souvent en interaction avec une contrepartie et, de ce fait, leurs caractéristiques tribologiques sont essentielles. Il peut s'agir communément :

- du contact peau/textile à l'origine du ressenti tactile d'un vêtement lors d'un frottement léger de quelques secondes, d'irritations cutanées lors d'une activité physique (sportifs, militaires, etc) entraînant des frottements répétés sur plusieurs minutes ou heures ou encore d'ulcères de décubitus de patients alités du fait des frottements répétés sur une très longue durée (quelques heures pendant plusieurs jours),
- du frottement textile/textile : vêtement contre siège (transport, maison), vêtement/vêtement au porter, lors du processus d'élaboration des matériaux composites, etc
- du frottement textile contre un autre type de matériau : textiles utilisés pour le polissage, vêtement contre divers matériaux....

Nous observons que de nombreuses surfaces textiles présentent une pilosité superficielle. La pilosité est la présence d'éléments fibreux, émergeant de la surface textile, dont l'origine peut être contrôlée ou issue d'une usure abrasive. Les éléments fibreux constituant cette pilosité peuvent être des fibres individuelles (poils d'un velours ou d'une polaire par exemple) ou des assemblages de fibres sous forme de fil formant des bouclettes (serviettes éponges, éléments de certaines chaussettes de sport, etc). Les paramètres géométriques de la pilosité varient d'une surface à une autre en termes de densité, de dimensions des éléments de pilosité (longueur et diamètre) ou encore d'orientation par rapport à la surface de l'étoffe (régulière pour un velours ou pseudo-aléatoire pour une polaire).

Etant donné que la pilosité est en surface du matériau textile, elle est un paramètre fondamental à prendre en compte lors du frottement d'une étoffe. L'étude du comportement au frottement de la pilosité seule est un domaine qui a été peu approfondi. En effet, le frottement d'une surface textile pileuse est en général étudié de manière globale, sans prise en compte du rôle joué par la pilosité par rapport à celui de l'assemblage fibreux.

C'est pourquoi, ce travail se situe dans le cadre d'une collaboration entre le Laboratoire de Physique et Mécanique Textiles de l'Université de Haute Alsace et le Laboratoire Protection et Physiologie de l'EMPA (Saint Gall, Suisse). C'est au sein de ces deux laboratoires que des études sont menées depuis plusieurs années sur le frottement faisant

intervenir des surfaces textiles. Au LPMT les recherches sont surtout axées sur le matériau textile (influence des différentes étapes du procédé de fabrication), alors que l'EMPA s'est spécialisé sur le contact peau/textile (réduction des irritations et des lésions cutanées). Ce travail, en amont de toute application particulière, même si certaines conditions expérimentales se rapportent au contact peau/textile, est le fruit de cette collaboration.

L'objectif de notre travail est de comprendre les mécanismes survenant lors du frottement de surfaces textiles, et plus particulièrement le comportement de la pilosité superficielle. Il s'agit également de quantifier ces mécanismes de frottement mis en jeu selon les paramètres expérimentaux et les caractéristiques mécaniques et morphologiques des entités pileuses. Ainsi, il serait envisageable de concevoir et de fabriquer des surfaces textiles ayant le comportement tribologique souhaité en fonction de l'application visée. Ce projet se traduit par la mise en place d'un modèle expérimental dont les paramètres sont détaillés et expliqués dans cette thèse.

Ce manuscrit s'articule en quatre chapitres.

Le premier chapitre se veut théorique et bibliographique. En effet, nous définissons dans un premier temps, ce qu'est une surface textile, et plus particulièrement, quels sont les origines et les caractéristiques de la pilosité superficielle. Dans un second temps, nous rappelons les grandes lois de la tribologie, notamment, les paramètres et les phénomènes physiques se produisant lors du frottement entre deux surfaces. Enfin, nous établissons un état de l'art des techniques utilisées jusqu'à présent pour caractériser tribologiquement les matériaux textiles.

Le deuxième chapitre, décrit tout d'abord les surfaces pileuses utilisées. Nous analysons, tout d'abord, les surfaces réelles puis les surfaces modèles, conçues dans le cadre de cette étude. L'observation des surfaces modèles nous a permis de caractériser les phénomènes entrant en jeu lors du frottement d'une surface textile pileuse. Nous présentons ensuite, notre dispositif expérimental de mesure de frottement et les paramètres expérimentaux sur lesquels nous allons nous appuyer. Les courbes caractéristiques de frottement obtenues sont également décrites.

Dans le troisième chapitre, nous présentons le modèle de frottement que nous avons mis en place. En étudiant l'influence de certains paramètres expérimentaux, des simplifications ont pu être apportées au modèle. Les simplifications réalisées sont successivement détaillées et justifiées dans ce travail.

Dans le quatrième chapitre, nous avons affiné le modèle en approfondissant les paramètres qui le définissent. La compréhension des phénomènes présents, lors du frottement, a été facilitée par l'étude du comportement des surfaces modèles conçues et réalisées au LPMT à partir de filaments fabriqués à l'EMPA. L'intérêt de ce travail est de pouvoir œuvrer à une échelle confortable (les filaments ont un diamètre de 200 μm), et de faire varier de façon contrôlée les caractéristiques morphologiques des entités de pilosité générée. L'influence de la vitesse de frottement, et par conséquent des phénomènes visco-élastiques mis en évidence, ont été particulièrement étudiés et leur origine déterminée.

Chapitre 1 :
les surfaces textiles et le frottement

1 Chapitre 1 : les surfaces textiles et le frottement

1.1 Caractérisation d'une surface textile

1.1.1 Fibres et filaments

Les éléments de base d'un matériau textile sont les fibres ou les filaments (Figure 1). La spécificité de ces entités élémentaires est de posséder une dimension prépondérante (la longueur est beaucoup plus importante que l'épaisseur), ce qui leur confère une grande flexibilité. Les fibres ont généralement une longueur de quelques centimètres. On distingue les fibres courtes comme le coton et les fibres longues comme la laine. Les filaments sont en théorie infinis (quelques centaines de mètres à plusieurs kilomètres). Les fibres et filaments peuvent être d'origine naturelle (coton, laine, soie, ...) ou chimique (viscose, polyamide, polyester, ...). On peut caractériser les fibres par leur diamètre si la section est ronde ou par leur titre, c'est-à-dire la masse linéique exprimée en tex (1 tex = 1 g/km).

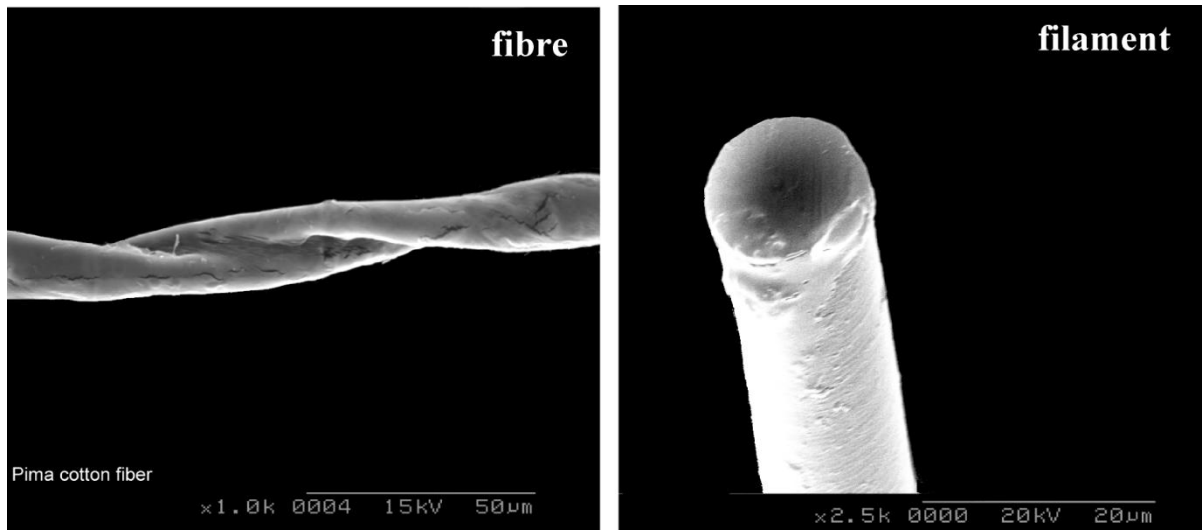


Figure 1 : Image MEB d'une fibre de coton et d'un filament (polyéthylèneterephthalate) ¹

¹ Pac, M. J. (2001). *Les surfaces textiles aux échelles micro-méso et macroscopiques : propriétés thermiques et tribologiques*. Université de Haute Alsace.

1.1.2 Fils

Un fil est un assemblage de fibres ou de filaments. Lors du processus de filature, les fibres sont, le cas échéant, débarrassées de leurs impuretés, alignées et parallélisées afin d'obtenir une structure linéique dont la cohésion est donnée par torsion (Figure 2). Les grandeurs caractéristiques d'un fil sont sa masse linéique (en tex), sa torsion (en tr/m), le sens de torsion, sa régularité et ses propriétés mécaniques (ténacité exprimée en N/tex, notion pour les matériaux textiles se rapprochant d'une contrainte de rupture, module élastique spécifique.

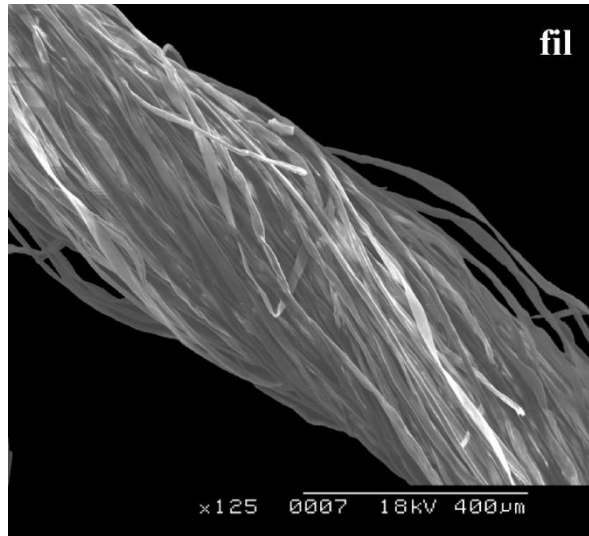


Figure 2 : Image MEB d'un fil ²

1.1.3 Surfaces textiles

A partir des entités élémentaires, plusieurs types de surfaces textiles peuvent être obtenus.

- **Non-tissés**

Les non-tissés sont un enchevêtrement de fibres ou filaments (Figure 3). Le processus de fabrication consiste à former une nappe, un voile ou un matelas de fibres ou filaments enchevêtrés plus ou moins aléatoirement, et d'assurer sa cohésion par des méthodes mécaniques, physiques ou chimiques, ou par combinaison de ces procédés. Ils sont utilisés dans des produits généralement à usage unique comme les lingettes, les couches, les géotextiles.

² Pac, M. J. (2001). *Les surfaces textiles aux échelles micro-méso et macroscopiques : propriétés thermiques et tribologiques*. Université de Haute Alsace.

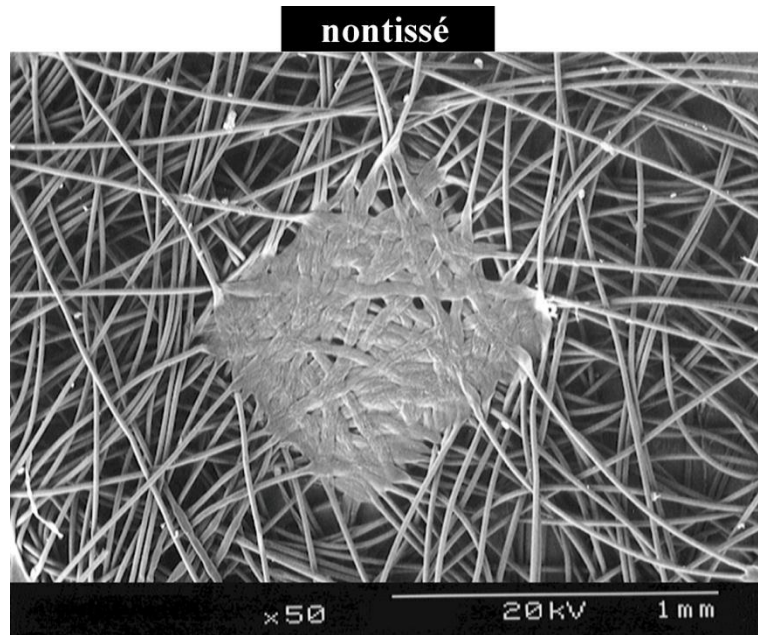


Figure 3 : Image MEB du point de fusion d'un non-tissé thermolié³

- **Etoffes textiles**

Les étoffes sont obtenues par assemblage de fils issus du tissage, du tricotage ou du tressage.

Le tissage consiste à entrecroiser deux nappes de fils perpendiculaires. Le sens chaîne correspond au sens de production et la trame est le fil inséré perpendiculairement. L'armure du tissu obtenu (Figure 4) est le motif élémentaire d'entrecroisement des fils de chaîne et de trame. Les armures les plus courantes sont la toile, les sergés et les satins. Outre les caractéristiques des fils, le tissu est décrit par son armure, sa masse surfacique, ainsi que par le nombre de fils de chaîne et de trame par unité de longueur. Les tissus sont fréquemment utilisés dans l'habillement, comme linge de maison, comme bâches, comme renforts de matériaux composites,...

³ Bueno, M. A. (1995). *Caractérisation tribologique des surfaces textiles : application au contrôle des traitements spécifiques d'ennoblissement*. Université de Haute Alsace.

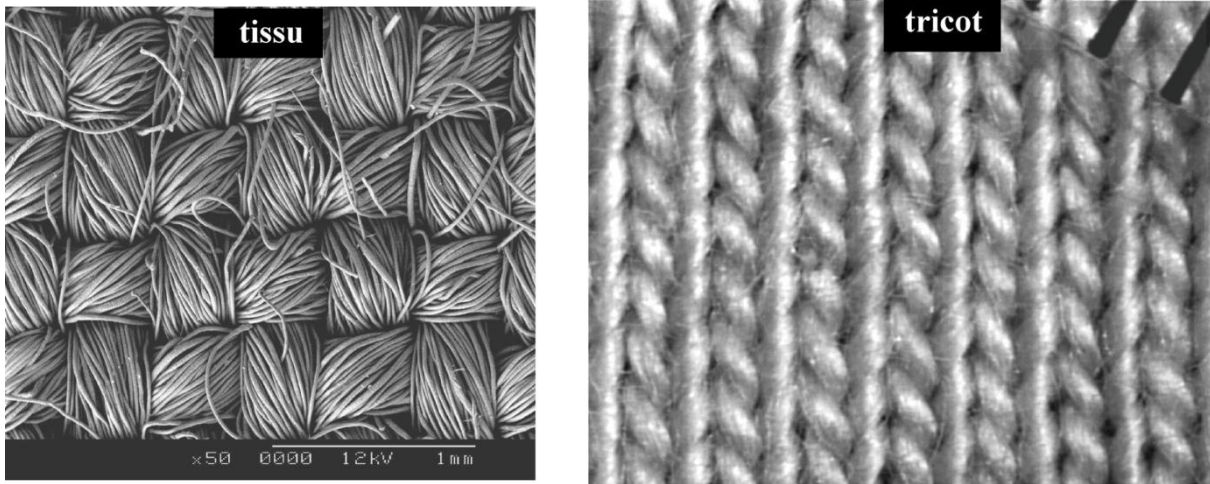


Figure 4 : Photo d'un tissu⁴ (toile) et d'un tricot⁵ (jersey)

Le tricotage consiste à entrelacer un ou plusieurs fils pour former des mailles. Le sens des colonnes correspond au sens de production et le sens des rangées y est perpendiculaire. Le liage d'un tricot (Figure 4) est le motif élémentaire d'entrelacement des fils qui forment une maille. En plus des caractéristiques des fils qui le composent, un tricot est caractérisé par son liage, ainsi que par sa longueur de fil absorbée par maille, la LFA. Il existe deux sortes de tricots, les tricots à mailles cueillies (Figure 5.a) comme les tee-shirts, les chaussettes, les pull-overs, ... et les tricots à mailles jetées (Figure 5.b) pour la dentelle, les prothèses vasculaires, les sacs à pomme de terre, ...

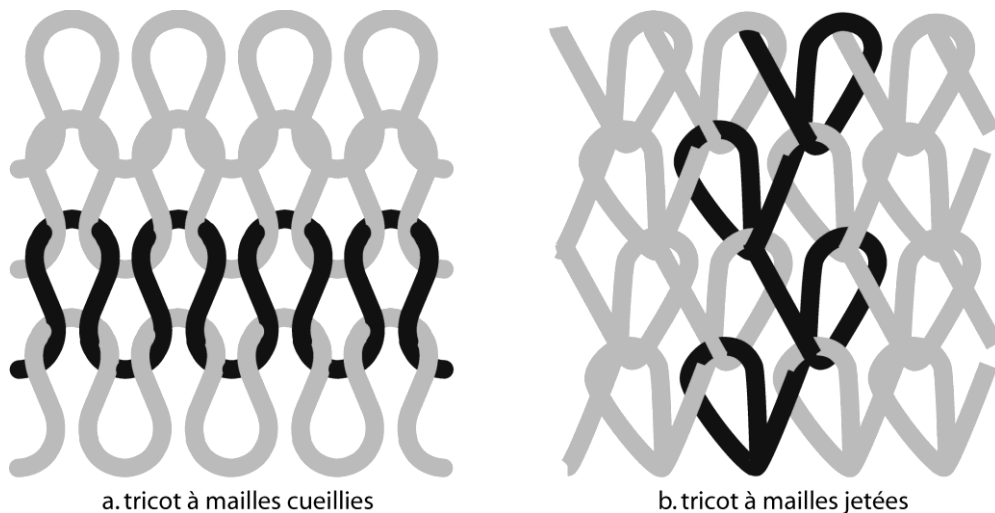


Figure 5 : a) tricot trame, b) tricot chaîne⁶

⁴ Fontaine, S. (2001). *Contribution à la compréhension des mécanismes tribologiques lors d'une usure abrasive ou chimique de structures fibreuses. Applications industrielles aux tissus en PET-laine*. Université de Haute Alsace.

⁵ Pac, M. J. (2001). *Les surfaces textiles aux échelles micro-méso et macroscopiques : propriétés thermiques et tribologiques*. Université de Haute Alsace.

Le tressage⁷ consiste à réaliser une structure textile plate ou tubulaire. La tresse textile est obtenue par l'entrecroisement de fils disposés en diagonale suivant un angle déterminé par rapport au sens longitudinal du produit. Des bobines de fil ou « canettes » sont disposées sur un support circulaire appelé « fuseau » qui entraîne des fils en rotation. Chaque fuseau se déplace à l'intérieur d'un chemin de guidage sinusoïdal usiné sur la table de la machine. On peut produire deux types de tresses :

- la tresse tubulaire, qui est obtenue par un nombre pair de fuseaux qui tournent en sens opposé pour entrecroiser les fils (Figure 6) ;
- la tresse plate, qui est obtenue par une trajectoire en arc de cercle, avec des fuseaux en nombre impair qui tournent alternativement dans un sens puis un autre.

Selon les séquences de fuseaux, on obtient différents types « d'armure ». L'insertion de fils longitudinaux lors du tressage est possible pour renforcer la tresse et accroître ses propriétés mécaniques. Les caractéristiques importantes d'une tresse sont : les titrages des fils, l'angle de tressage, le type d'armure, la masse au mètre carré, le maillage, qui correspond au nombre de croisements de fils par unité de longueur.

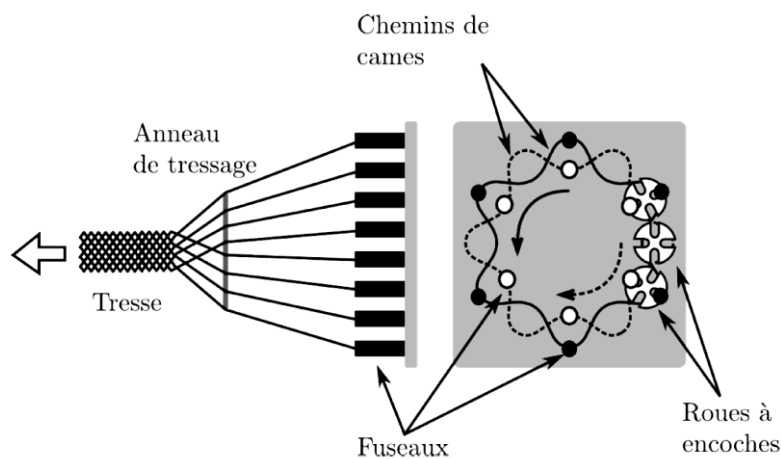


Figure 6 : Schéma d'un tressage tubulaire⁸

A la surface de ces différentes structures textiles peuvent émerger des fibres. Ces fibres constituent une pilosité superficielle dont l'importance varie d'une surface à l'autre

⁶ Bueno, M. A. (2008). Structure and mechanics of knitted fabrics. In *Structure and mechanics of fibre assemblies*. The Textile Institute and Woodhead Publishing Limited (pp.84-115). CRC Press.

⁷ Weidman, D. (2010). *Aide-mémoire : Textiles techniques*. Dunod.

⁸ Cours Tressage Jean-François Osselin ENSISA

(Figure 7). L'usure naturelle d'un vêtement peut se traduire par une augmentation de la pilosité. Cependant cette pilosité peut être une caractéristique recherchée (et amplifiée) afin de procurer à la surface un aspect et un ressenti tactile particulier. L'émerisage, processus au cours duquel la surface est abrasée au moyen d'un émeri pour obtenir des tissus au toucher « peau de pêche » ou le grattage qui consiste à faire passer sur la surface considérée des rouleaux recouverts de pointes métalliques afin d'en extraire des fibres (processus d'obtention des polaires), permettent d'obtenir des surfaces dont la pilosité est désordonnée et parfois importante.

Les velours présentent également une pilosité importante à la surface. La surface textile considérée est obtenue en coupant des fils prévus à cet effet dès l'armure de base, donnant un rendu régulier et périodique à la structure pileuse obtenue. C'est le cas pour les velours à base d'étoffes tricotées comme tissées.

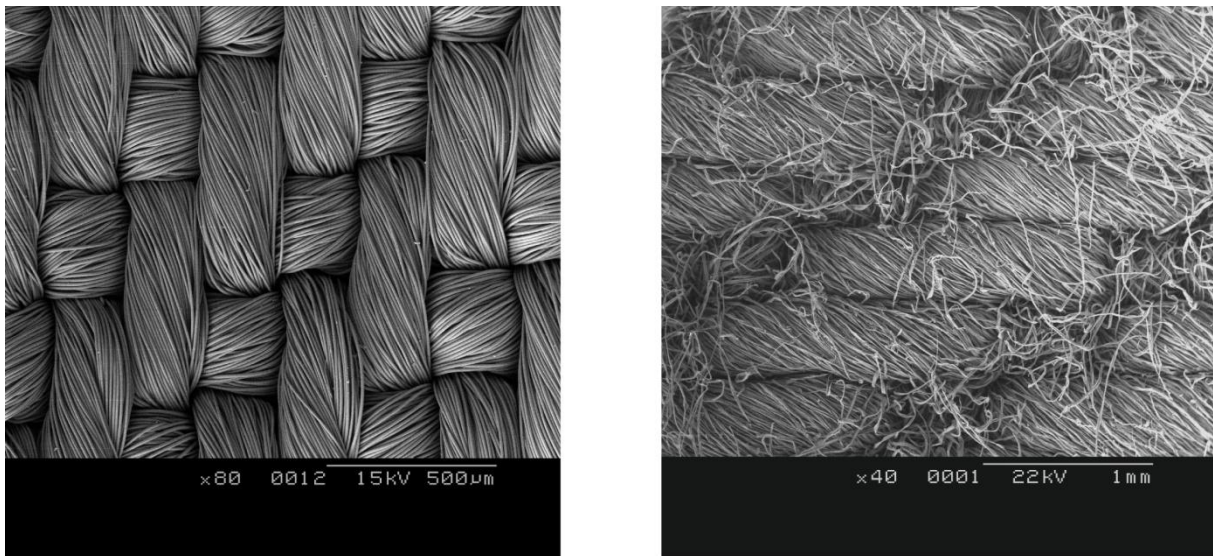


Figure 7 : Image MEB d'une structure d'un tissu non pileux (à gauche) et d'une structure avec fibres émergentes (à droite)⁹

1.2 Etat de l'art sur la tribologie

1.2.1 Introduction à la tribologie

La tribologie est la science des frottements de l'usure et de la lubrification. Lorsqu'un corps glisse sur un autre, il se produit une résistance au mouvement communément appelée

⁹ Breugnot, C. (2005). *Contribution à la caractérisation mécanique du toucher des surfaces textiles à partir de critères neurosensoriels*. Université de Haute Alsace.

frottement : les forces dues aux frottements entraînent une résistance au mouvement relatif des solides en contact.

La tribologie implique des contacts. On peut séparer différents facteurs qui influencent le contact (Figure 8) :

- les caractéristiques des matériaux des deux corps en contact, leurs propriétés mécaniques, leurs états de surface,...
- un 3^{ème} corps à l'interface du contact entre les deux premiers corps (lubrifiant, débris d'usure, poussières, ...)
- la micro-géométrie des surfaces
- l'environnement (température, humidité, ...)
- le système mécanique (charge, vitesse, géométrie du contact, ...)

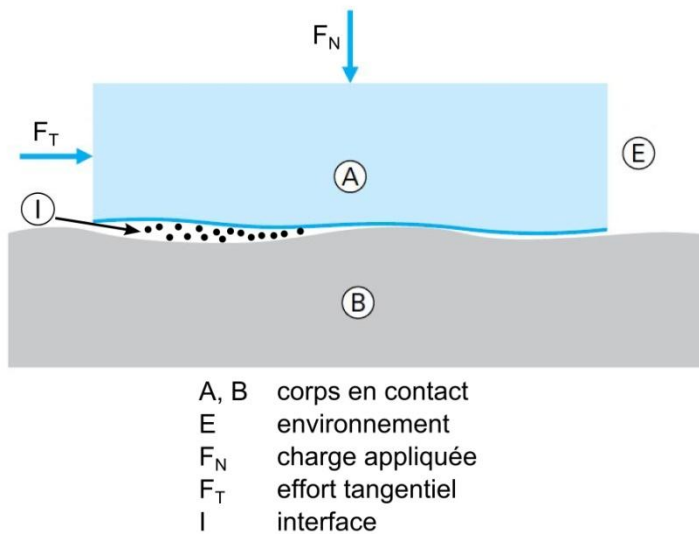


Figure 8 : contact tribologique¹⁰

1.2.2 Propriétés importantes des matériaux pour la tribologie

Les facteurs prédominants en tribologie sont les différentes caractéristiques liées aux matériaux : le module de Young, la dureté, le coefficient de Poisson, la ténacité, ainsi que les propriétés des corps en contact.

¹⁰ Cartier, M. & Kapsa, P. (2001). Usure des contacts mécaniques : Eléments de tribologie. In *Techniques de l'Ingénieur* (pp.1-13, BM 5066). Techniques de l'Ingénieur.

1.2.2.1 Les régimes de déformation

Lorsque deux matériaux sont en contact, leur régime de déformation est différent en fonction de la sollicitation et des propriétés de ces matériaux :

- des déformations purement élastiques : elles apparaissent immédiatement sous l'action d'une contrainte et disparaissent aussitôt cette contrainte enlevée ; c'est un phénomène réversible, indépendant du temps.
- des déformations plastiques : elles sont irréversibles c'est-à-dire que lorsque l'on relâche la contrainte, la déformation reste, indépendamment du temps.
- un comportement élastoplastique : il est caractérisé par un matériau dont le seuil d'écoulement est en dessous du comportement purement élastique. Une fois cette limite atteinte, la déformation n'est plus réversible. Ce comportement est indépendant du temps : la déformation n'évolue pas si la charge est maintenue et ne disparaît pas progressivement après la décharge. Typiquement les métaux possèdent un comportement élastoplastique.
- Un comportement viscoplastique : il est caractérisé par une déformation qui évolue dans le temps en fonction de la vitesse de déformation et qui ne disparaît pas à la décharge. Sous charge constante le matériau flue, sa déformation augmente. Si l'allongement est stabilisé, la contrainte appliquée à cette fin décroît au cours du temps, c'est un essai de relaxation ; après décharge la déformation du matériau est susceptible de diminuer, c'est un phénomène de recouvrance.
- Un comportement viscoélastique : lorsqu'on relâche la contrainte, la déformation disparaît entièrement au cours du temps, ce phénomène se déroule généralement en deux étapes ; une première élastique où la déformation disparaît immédiatement lorsque la contrainte est supprimée, puis une partie où la déformation disparaît au cours du temps, l'effet visqueux.
- Un comportement visco elastoplastique : c'est un comportement similaire à l'élastoplastique avec une partie dépendante du temps lors de la relaxation de la contrainte où la déformation va disparaître en partie au cours du temps.

1.2.2.2 Etat de surface

Lors du frottement entre deux corps, les contacts entre surfaces sont des facteurs prédominants, d'où l'importance de leurs état de surface. La micro-géométrie ou topographie

de surface correspond à la répétition des écarts par rapport à la surface nominale qui forme la topographie tridimensionnelle de la surface. La texture de surface inclut la rugosité (nano et microrugosité), l'ondulation de surface (macrorugosité), l'orientation principale des constituants de la surface et les défauts de surface (Figure 9).

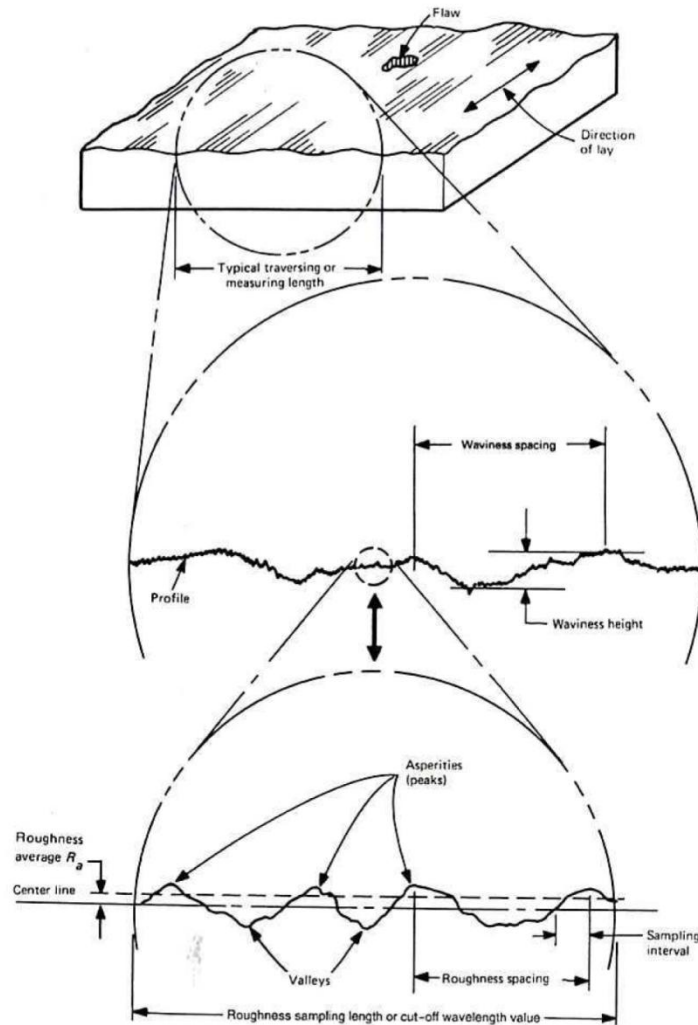


Figure 9 : Illustration d'une topographie de surface ¹¹

Une des caractéristiques de l'état de surface d'un matériau est la rugosité (Figure 10).

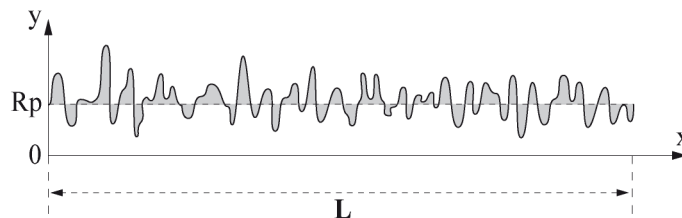


Figure 10 : Profil d'une surface ¹²

¹¹ Bhushan, B. (2002). *Introduction to Tribology*. John Wiley & Sons.

Le profil d'une surface peut être obtenu expérimentalement grâce à un profilomètre. Dans le cas d'une mesure avec contact, la surface est scannée par un palpeur qui est déplacé horizontalement sur la surface. Un capteur de déplacement enregistre les déplacements verticaux du palpeur en contact avec la surface étudiée. Le palpeur est généralement muni d'une tête sphérique de façon à obtenir un contact ponctuel d'angle infini et éviter toute indentation du matériau. Le profil obtenu dépend alors de la taille de la bille et de celle des aspérités. En fonction de l'échelle de la surface, une grosse bille détecte les ondulations de la surface, tandis qu'une petite bille détecte les plus petites aspérités et les défauts. La longueur du profil (et donc de la mesure), son orientation et la localisation sur la surface peuvent influencer la description ainsi faite de la surface.

La rugosité ne peut pas être décrite par une seule grandeur. Plusieurs paramètres statistiques peuvent être calculés à partir d'un profil (Figure 10) afin de le caractériser (norme : NF EN ISO 4287/A1 Août 2009).

Les principaux paramètres statistiques que l'on peut utiliser pour caractériser le profil d'une surface sont :

- La rugosité totale :

$$Rt = y_{max} - y_{min}$$

Équation 1

- La ligne moyenne :

$$Rp = \frac{1}{L} \int_0^L y \cdot dx$$

Équation 2

Avec,

y_{max} / y_{min} : point le plus haut / bas du profil,

L : longueur du profil mesuré.

- La rugosité moyenne :

$$Ra = \frac{1}{L} \int_0^L |y - Rp| \cdot dx$$

Équation 3

Différentes surfaces peuvent avoir le même Ra (Figure 11), pour les différencier, d'autres paramètres relatifs à la distribution des aspérités sont nécessaires.

¹² Bueno, M. A. (1995). *Caractérisation tribologique des surfaces textiles : application au contrôle des traitements spécifiques d'ennoblissement*. Université de Haute Alsace.

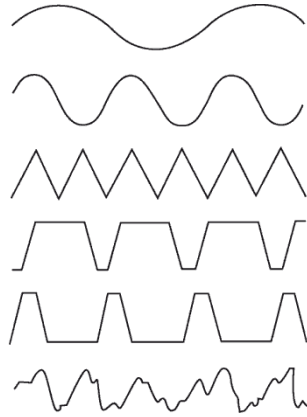


Figure 11 : Profils de surfaces ayant la même rugosité moyenne, Ra^{13} .

L'écart-type moyen :

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{L} \int_0^L (y - Rp)^2 \cdot dx}$$

Équation 4

L'asymétrie ou l'obliquité (Skewness, Figure 12.a) :

$$S = \frac{1}{L \cdot \sigma^3} \int_0^L (y - Rp)^3 \cdot dx$$

Équation 5

Si la distribution est :

- Gaussienne, $S=0$.
- Etalée vers les grandes valeurs, $S>0$.
- Etalée vers les petites valeurs, $S<0$.

La finesse ou l'aplatissement (Kurtosis, Figure 12.b) :

$$K = \frac{1}{L \cdot \sigma^4} \int_0^L (y - Rp)^4 \cdot dx$$

Équation 6

Si la distribution est :

- Gaussienne, $K=3$

¹³ Bhushan, B. (2002). *Introduction to Tribology*. John Wiley & Sons.

- Aplatie, $K < 3$ (distribution platycurtique)
- Pointue, $K > 3$ (distribution leptocurtique)

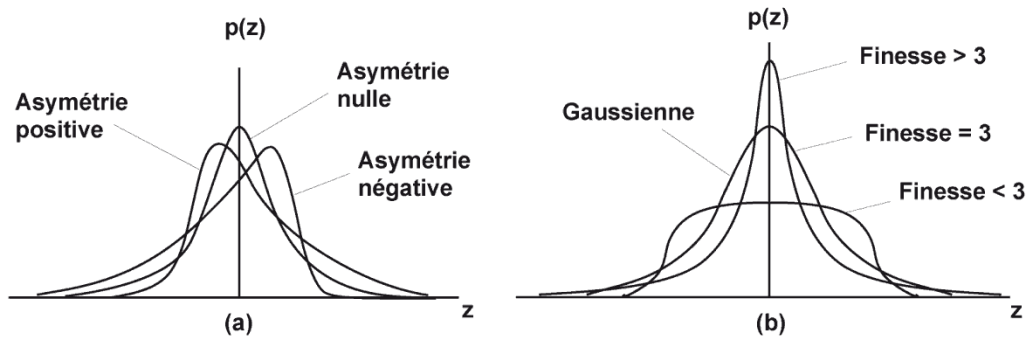


Figure 12 : Fonctions de densité de probabilité de (a) distributions aléatoires d'asymétrie différentes et (b) de distributions symétriques de finesse différentes¹⁴.

Il existe plusieurs moyens d'évaluer l'état de surface¹⁵. On peut les classer en groupes selon que l'évaluation est effectuée sur une surface ou sur un profil. Le choix de l'utilisation de ces moyens dépend notamment de leurs fréquences d'utilisation :

- utilisation courante dans l'industrie, appareil à palpeur avec contact, échantillons de comparaison viso-tactile ;
- utilisation moins courante pour des applications spécifiques, appareil à palpeur sans contact, méthodes optiques ;
- utilisation dans des laboratoires de recherche et développement, méthodes optiques.

1.2.3 Le frottement

1.2.3.1 Lois empiriques

L'étude du frottement est basée sur les lois classiques énoncées pour la première fois par Léonard de Vinci et reprises plus tard par G. Amontons en 1699. Ces lois sont énoncées ainsi :

¹⁴ Bhushan, B. (2002). *Introduction to Tribology*. John Wiley & Sons.

¹⁵ Raphet, B. (2012). Etats de surface – Mesure. In *Techniques de l'ingénieur* (thème Mesures mécaniques et dimensionnelles). Techniques de l'Ingénieur.

Chapitre n°1 : Les surfaces textiles et le frottement

- première loi : le frottement est indépendant de la surface apparente de contact entre les deux corps.
- deuxième loi : la force de frottement tangentielle F_T est directement proportionnelle à la charge normale F_N ,

$$F_T = \mu \cdot F_N$$

Équation 7

Où le coefficient de proportionnalité μ représente le coefficient de frottement, il est constant pour une paire donnée de corps en contact.

- troisième loi : la force de frottement est indépendante de la vitesse.

Il existe de nombreux cas où les lois ne sont pas vérifiées. En toute rigueur, on ne peut comparer les coefficients de frottement de plusieurs matériaux seulement lorsqu'ils ont été mesurés dans des conditions identiques : même pièce frotteuse, même environnement (température, humidité,...) et même mécanisme (force normale, vitesse de glissement, ...).

Ces lois ont été approfondies par Coulomb (1788) qui a introduit les notions de forces de frottement statique (force nécessaire pour initier le mouvement) et dynamique (force requise pour le maintenir) (Figure 13). Lorsque deux corps sont mis en contact sous une certaine charge et qu'une force tangentielle est appliquée, alors la force tangentielle nécessaire à initier le mouvement est opposée et a le même module que la force de frottement statique. La force tangentielle nécessaire à maintenir le mouvement est opposée et a le même module que la force de frottement dynamique. La force de frottement statique est généralement supérieure ou égale à la force de frottement dynamique.

Par commodité d'expression, on nomme force de frottement la force appliquée pour lutter contre le frottement, qui est la seule mesurable et qui est de même module mais opposée.

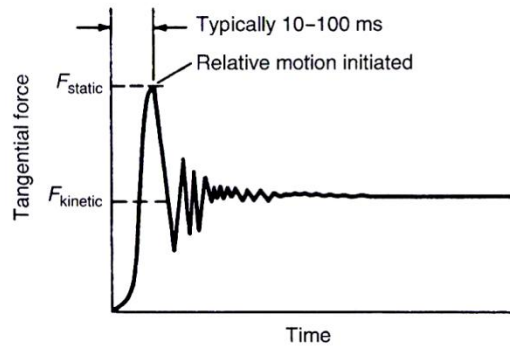


Figure 13 : Force tangentielle en fonction du temps ou déplacement¹⁶

1.2.3.2 Force de frottement dynamique

Si l'on considère deux corps ayant une surface commune plane S , pressés l'un contre l'autre par une force F_N normale à la surface commune. Si l'on cherche à produire un glissement relatif, à une vitesse V de l'un des deux corps par rapport à l'autre, dans une direction quelconque du plan normal à la force F_N , le système mécanique s'oppose à ce mouvement par la génération d'une force F_T de sens opposé à celui de la vitesse V . Cette force, dite force de frottement, est due à plusieurs phénomènes d'interaction entre les deux matériaux. Cette force de frottement est la force nécessaire pour maintenir le mouvement entre les deux corps.

1.2.3.3 Force de frottement statique

Lorsque l'on cherche à produire un glissement relatif, à une vitesse V , entre les deux corps dans une direction quelconque du plan normal à la force F_N , l'expérience montre qu'à très faible vitesse relative de glissement, le glissement ne se déclenche pas avant d'atteindre une force minimale appelée force de frottement statique. Lorsque le glissement est amorcé, la force de frottement dynamique ne change plus pour un glissement soutenu. La comparaison entre les deux forces de frottement statique et dynamique, montre qu'en général la force de frottement statique est supérieure à la force de frottement dynamique. A partir de ces forces de frottement, on peut définir des coefficients de frottement statique et dynamique pour un couple de matériaux tribologiques.

¹⁶ Bhushan, B. (2002). *Introduction to Tribology*. John Wiley & Sons.

1.2.3.4 Stick-Slip

Pour un couple de matériaux tribologiques dont les deux coefficients de frottement statique et dynamique sont différents, un déplacement relatif entre les deux corps à très faible vitesse relative de glissement est accompagné par un mouvement en cascade adhérence/glissement¹⁷ (Figure 14). On observe un régime dynamique de glissement, avec un mouvement relatif entre les surfaces qui n'est plus uniforme mais oscillant. Le frottement intermittent est appelé le stick-slip. Il s'agit d'oscillations de relaxation constituées de phases d'immobilité relative des deux surfaces (stick) et de phases de glissement (slip). Le phénomène du stick-slip augmente avec la force d'adhésion et diminue lorsque la rugosité du contact ou la vitesse de glissement augmentent. Ce phénomène engendre un spectre vibratoire spécifique au frottement sec et conduit à l'endommagement du mécanisme dynamique.

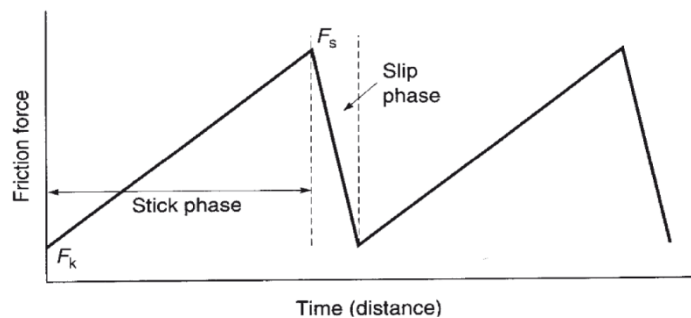


Figure 14 : Phénomène de Stick-Slip¹⁸

1.2.4 Etat de l'art sur les phénomènes d'adhésion et de déformation

Lorsque deux corps sont en contact, le contact ne se produit qu'en certains endroits, appelés jonctions, du fait de leur rugosité. La somme des aires de ces jonctions constitue l'aire de contact réelle. Cette aire est en général très inférieure à l'aire de contact apparente. L'aire réelle de contact dépend de différents critères : la rugosité des surfaces (l'aire réelle diminue lorsque la rugosité augmente), les propriétés des matériaux (plus la dureté est élevée moins le matériau se déforme et plus l'aire réelle de contact est faible), la charge normale (plus elle est élevée, plus les matériaux se déforment et plus l'aire réelle de contact est grande). De plus, la valeur de l'aire peut varier suivant l'échelle considérée (macroscopique, microscopique,...).

¹⁷ Bueno, M. A. & Lamy, B. (2011). *Caractérisation des surfaces: Surfaces industrielles classiques, surfaces textiles, tissus biologiques*. Ellipses.

¹⁸ Bhushan, B. (2002). *Introduction to Tribology*. John Wiley & Sons.

La détermination de l'aire de contact réelle, par mesure ou modélisation, constitue toujours un point clé et souvent non totalement résolu en tribologie. Dans le cas de surfaces lisses en contact, on peut citer les expressions les plus courantes reliant la force normale (F_N) et l'aire de contact réelle en fonction du régime de déformation.

- pour une surface rugueuse,

$$A_r = k \cdot F_N$$

Équation 8

- pour un contact purement élastique (Contact de Hertz¹⁹),

$$A_r = k \cdot F_N^{2/3}$$

Équation 9

- pour un contact élasto-plastique avec généralement $2/3 < n < 1$ (approximation de la théorie de Hertz),

$$A_r = k \cdot F_N^n$$

Équation 10

Avec A_r l'aire réelle de contact, F_N la charge normale, k et n des constantes liées aux matériaux.

Lorsque l'on met deux solides en contact, les jonctions se forment au niveau des aspérités par contact adhésif. L'adhésion est due à des attractions, chimiques et/ou physiques, entre les deux surfaces.

Le coefficient d'adhésion μ' (Figure 15) est le rapport de la force normale F_N' nécessaire pour séparer deux corps mis en contact sous une charge normale F_N , elle correspond alors à :

$$\mu' = \frac{F_N'}{F_N}$$

Équation 11

¹⁹ Bowden, F. P. & Tabor D. (1986). *The friction and lubrication of solids*. Clarendon press.

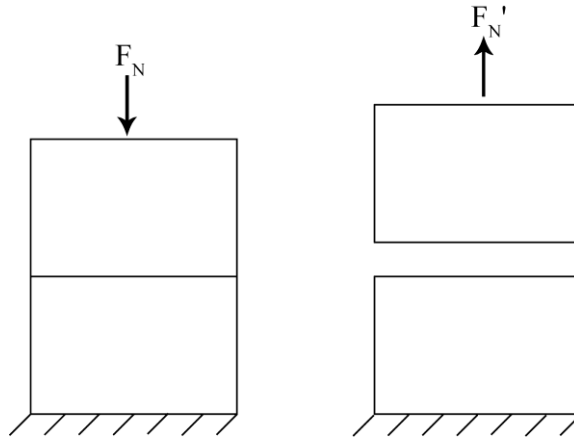


Figure 15 : Schéma de l'adhésion entre deux corps ²⁰

L'énergie d'adhésion (W_{ad})²¹ par unité de surface entre deux matériaux en contact est définie par :

$$W_{ad} = \Delta\gamma = \gamma_1 + \gamma_2 - \gamma_{12}$$

Équation 12

avec

$\Delta\gamma$: énergie de surface du système.

γ_1 et γ_2 : énergie de surface de chacun des matériaux en contact (en J/m²).

γ_{12} : énergie de surface de l'interface.

L'adhésion dépend de l'énergie de surface des matériaux ainsi que de l'aire réelle de contact. La durée de contact peut augmenter l'adhésion. En effet, l'aire de contact réelle augmente par fluage sous l'influence combinée des contraintes normale et tangentielle.

Dans de nombreuses applications technologiques, une réduction du frottement est recherchée. Pour ce faire une des solutions envisageables consiste à diminuer la composante adhésive par un choix judicieux des matériaux en contact. Il est recommandé d'utiliser des matériaux compatibles en frottement, c'est-à-dire qui ne sont pas ou peu sujets au grippage par

²⁰ Bhushan, B. (2002). *Introduction to Tribology*. John Wiley & Sons.

²¹ Rabinowitz, E. (1970). *The determination of the compatibility of metals through static friction tests* (pp. 198–205). American Society of Lubrication Engineers.

soudure. Dans le cas contraire, ils sont dits incompatibles, c'est-à-dire que le frottement va générer d'importants transferts adhésifs²².

Les corps 1 et 2 sont identiques :

$$W_{ad} \approx 2 \cdot \gamma_1$$

Équation 13

Les corps 1 et 2 sont compatibles en frottement :

$$W_{ad} \approx \frac{3}{4} \cdot (\gamma_1 + \gamma_2)$$

Équation 14

Les corps 1 et 2 sont incompatibles en frottement :

$$W_{ad} \approx \frac{1}{2} \cdot (\gamma_1 + \gamma_2)$$

Équation 15

Les mécanismes de frottement peuvent être décomposés en deux éléments distincts, l'adhésion et la déformation. Ce phénomène a été étudié dans la théorie de frottement adhésif de Bowden et Tabor²³. Il peut donc être dissocié en deux composantes : une composante d'adhésion entre le frotteur et la surface, et la seconde composante de déformation de la surface par le frotteur. Elles sont liées à la notion d'aire réelle de contact.

Lors du frottement si l'un des matériaux est plus dur que l'autre, il peut y avoir déformation et enlèvement de matière. Les déformations microscopiques sont dues à la rencontre entre les aspérités, tandis que les déformations macroscopiques sont dues à la forme des pièces en contact. Le labourage crée des rainures par déformations plastique et peut également générer des débris d'usure. Il dépend des aspérités et de la dureté des deux surfaces.

²² Rabinowitz, E. (1970). *The determination of the compatibility of metals through static friction tests* (pp. 198–205). American Society of Lubrication Engineers.

²³ Bowden, F. P. & Tabor, D. (1986). *The friction and lubrication of solids*. Clarendon press.

En supposant l'interaction entre l'adhésion et la déformation négligeable lors du frottement entre des surfaces, on peut écrire (Figure 16 gauche)²⁴ :

$$F_T = F_{adh} + F_{def}$$

Équation 16

F_{adh} est la composante d'adhésion ; elle est due aux interactions physico-chimiques entre le frotteur et la surface. Elle est définie par :

$$F_{adh} = A_r \cdot \tau$$

Équation 17

Avec, A_r : l'aire réelle de contact (Figure 16 droite),

τ : la contrainte de cisaillement de l'interface liée au couple frotteur et surface testée.

F_{def} est la composante de déformation et est la force nécessaire pour rayer un matériau ductile, elle est exprimée comme :

$$F_{def} = S_c \cdot p$$

Équation 18

Avec, S_c est la section de la rainure et p la pression de contact.

On obtient alors la forme générale :

$$F_T = S_c \cdot p + A_r \cdot \tau$$

Équation 19

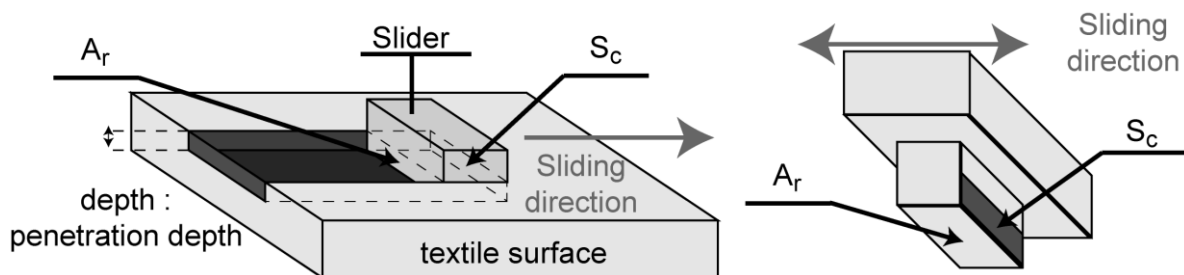


Figure 16 : Schéma de répartition des composantes de la force de frottement sur les différentes faces d'un frotteur

²⁴ Bowden, F. P. & Tabor, D. (1986). *The friction and lubrication of solids*. Clarendon press.

1.3 Etat de l'art sur la tribologie textile

Il est maintenant admis que le frottement dans les matériaux textiles n'obéit pas entièrement aux lois d'Amontons. Il a été constaté que le coefficient de frottement n'est pas constant, et qu'il augmente lorsque la charge diminue²⁵. La force de frottement n'est pas directement proportionnelle à la charge appliquée F_N . Pour exprimer la dépendance entre F_T et F_N , plusieurs relations empiriques ont été validées dans des conditions données et qui peuvent être, par exemple, de la forme :

$$F_T = K.F_N + \alpha.A$$

Équation 20

Où K et α sont des constantes, A est l'aire de contact apparente.

Ce comportement est dû à la structure particulière d'un matériau fibreux. En effet, une surface textile peut être composée de fils entrecroisés (tissus) ou entrelacés (tricots). Ces surfaces présentent une certaine rugosité, mais également une pilosité superficielle due à la présence de fibres émergeant de la surface.

On trouve également la relation :

$$F_T = k.F_N^n$$

Équation 21

Où k et n sont de constantes^{26,27}. Pour un contact élasto-plastique on a généralement :

$$\frac{2}{3} < n < 1.$$

1.3.1 Mesure de frottement entre fibres ou fils

Les principes de mesures de frottement à ces deux échelles sont identiques, mais les forces mises en jeu ainsi que la difficulté de mise en œuvre ne sont pas du même ordre de grandeur : la manipulation de fibres, en particulier si elles sont courtes et fines, est particulièrement délicate.

²⁵ Morrow, J. A. (1931). *Journal of Textile Institute* (t. 425). Textile Institute.

²⁶ Howell, H. G., Mieszkis, K. W. & Tabor, D. (1959). *Friction in textiles*. Textile Institute: Butterworths scientific publications.

²⁷ Aliouche, D. & P. Viallier. (2000). *Mechanical and Tactile Compression of Fabrics: Influence on Handle* (pp.70-939). Textile Research Journal.

Différents principes de mesures existent. Ils visent en général à mesurer le frottement fibre contre fibre ou fil contre fil à l'aide d'un dispositif où les éléments sont en général tendus sauf lorsqu'ils sont suffisamment rigides. Les éléments peuvent être parallèles, perpendiculaires, ou tordus entre eux pour former une hélice. Le contact est alors ponctuel, linéaire ou multilinéaire.

1.3.1.1 Frottement entre deux fibres ou fils unitaires

Deux éléments perpendiculaires, fibres ou fils, sont frottés l'un contre l'autre. La différence entre les méthodes provient du système de maintien et de tension des éléments ainsi que du mode de calcul du coefficient de frottement^{28,29,30}.

Si les éléments sont suffisamment rigides, la méthode du cantilever peut être utilisée. Un des deux textiles linéaires est tendu en ses deux extrémités et l'autre est encastré - libre (Figure 17).

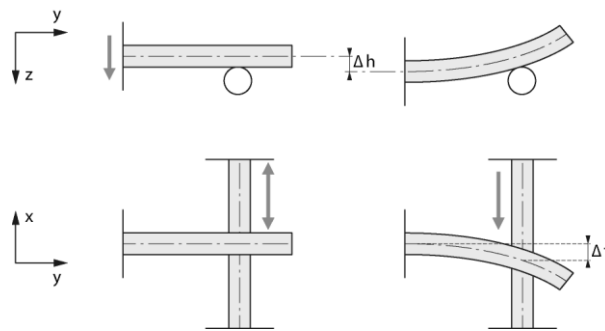


Figure 17 : Méthode du cantilever³¹

La déflexion verticale de l'élément encastré - libre permet de calculer la charge normale. Le déplacement horizontal de l'élément encastré – encastré provoque une flexion latérale de l'élément encastré – libre par frottement. En supposant que la déflexion Δf est suffisamment petite, la force de frottement est :

$$F_T = \frac{3.E.I.\Delta f}{L^3}$$

Équation 22

²⁸ Bueno, M. A. (2011). Tribologie des textiles. In *Techniques de l'ingénieur*, thème Mécanique (Réf : tri4400). Techniques de l'ingénieur.

²⁹ Howell, H. G., Mieszkis, K. W. & Tabor, D. (1959). *Friction in textiles*. Textile Institute: Butterworths scientific publications.

³⁰ Gupta, B. S. (2008). *Friction in textile materials*. Woodhead publishing in textiles n°78. Textile Institute : CRC Press: Woodhead Publishing.

³¹ Bueno, M. A. (2011). Tribologie des textiles. In *Techniques de l'ingénieur* (thème Mécanique, Réf : tri4400). Techniques de l'ingénieur.

Avec, L : la longueur de la fibre entre l'encastrement et le point de contact (de l'ordre de 1 mm),

E : son module d'Young, I : le moment quadratique de la section droite.

Le coefficient de frottement est donné par le rapport de la déflexion latérale par la déflexion verticale. Dans le cas de fibres suffisamment longues ou de fils, il est possible d'utiliser la méthode de Howell dont le montage est illustré par la Figure 18.

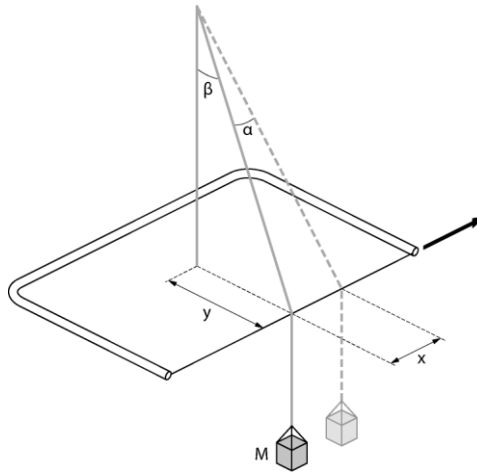


Figure 18 : Méthode de Howell³²

La tension de l'élément suspendu est donnée par une masse morte. L'autre élément est tendu sur un arc horizontal qui a un mouvement latéral alternatif entraînant la fibre suspendue en déplacement. Dans le cas de petits angles β et α , le coefficient de frottement est donné par :

$$\mu = \frac{M \cdot g \cdot \sin \alpha}{M \cdot g \cdot \sin \beta} = \frac{x}{y}$$

Équation 23

Une autre version inspirée de cette méthode est proposée par El Mogahzy et Gupta : l'arc qui maintient la fibre horizontale est fixe et le point d'accroche de la fibre suspendue est relié à un capteur de force pour mesurer la tension dans cette portion de fibre (Figure 19). Le coefficient de frottement est alors déterminé par la méthode du cabestan.

³² Bueno, M. A. (2011). Tribologie des textiles. In *Techniques de l'ingénieur* (thème Mécanique, Réf : tri4400). Techniques de l'ingénieur.

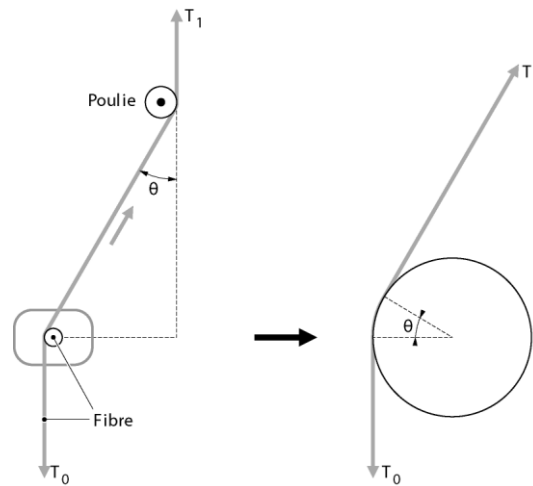


Figure 19 : Méthode de El Mogahzy et Gupta³³

Les deux fibres (ou fils) peuvent être torsadées (Figure 20) entre eux sur un certain nombre de tours. Une tension initiale T_0 est appliquée à une extrémité de chaque élément. La tension mesurée à l'autre extrémité T_1 permet de calculer le coefficient de frottement entre les fibres ou les fibres par la méthode du cabestan.



Figure 20 : Méthode fibres (ou fils) torsadés³⁴

1.3.1.2 Frottement de deux plans de fibres ou de fils

Pour des fibres (ou fils) suffisamment longues, deux nappes de fibres ou de fils parallèles sont frottées suivant un angle donné³⁵. L'influence de l'angle entre les deux nappes sur le coefficient de frottement est illustrée par la Figure 21.

³³ Bueno, M. A. (2011). Tribologie des textiles. In *Techniques de l'ingénieur* (thème Mécanique, Réf : tri4400). Techniques de l'ingénieur.

³⁴ Bueno, M. A. (2011). Tribologie des textiles. In *Techniques de l'ingénieur* (thème Mécanique, Réf : tri4400). Techniques de l'ingénieur.

³⁵ Gupta, B. S. (2008). *Friction in textile materials*. Woodhead publishing in textiles n°78. Textile Institute : CRC Press: Woodhead Publishing.

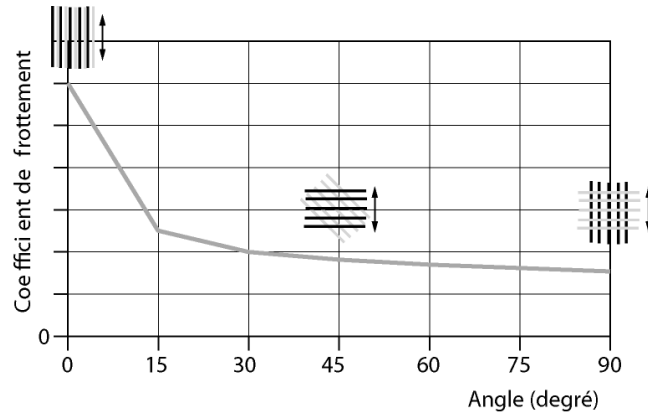


Figure 21 : Coefficient de frottement en fonction de l'angle de glissement entre deux nappes de fibres ou de fils³⁶

Pour des fibres courtes, El Mogahzy et Broughton proposent une méthode pour laquelle deux nappes de fibres parallélisées sont frottées l'une contre l'autre sous une charge normale fixée³⁷. Au début du glissement le contact est du type fibres – fibres, puis le nombre de fibres en contact diminue pour atteindre un contact métal – métal. La force de frottement suit une courbe type illustrée par la Figure 22.

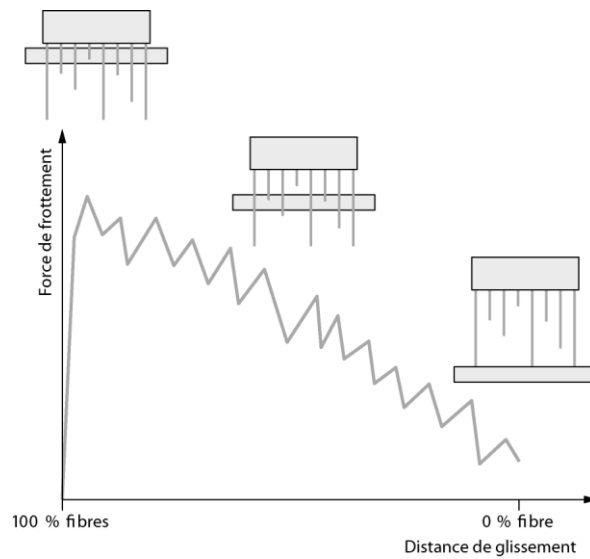


Figure 22 : Résultat type obtenu avec des fibres de coton dans le cas d'un frottement nappes contre nappes de fibres courtes³⁸

³⁶ Bueno, M. A. (2011). Tribologie des textiles. In *Techniques de l'ingénieur* (thème Mécanique, Réf : tri4400). Techniques de l'ingénieur.

³⁷ Gupta, B. S. (2008). *Friction in textile materials*. Woodhead publishing in textiles n°78. Textile Institute : CRC Press: Woodhead Publishing.

³⁸ Bueno, M. A. (2011). Tribologie des textiles. In *Techniques de l'ingénieur* (thème Mécanique, Réf : tri4400). Techniques de l'ingénieur.

L'extraction d'une fibre d'un ruban ou d'un assemblage fibreux peut également être réalisée, mais elle est délicate principalement parce qu'il est difficile de maîtriser et de mesurer la force normale réelle agissant sur ces fibres.

De même le frottement interfibres par la mesure de la force de rupture en traction, ou force de cohésion, d'un ruban ou d'une mèche est réalisable. Le ruban est alors soumis ou non à une force normale au cours de la traction³⁹. La force de frottement interfibres est alors la force de rupture du ruban rapportée à la fibre unitaire.

1.3.2 Mesure sur surface textiles

Les mesures peuvent être effectuées soit entre l'étoffe et elle-même, soit entre l'étoffe et une autre surface. Ces tests peuvent être unidirectionnels⁴⁰ ou multidirectionnels⁴¹. La méthode la plus couramment utilisée est unidirectionnelle ; elle consiste à fixer l'étoffe horizontalement et à faire glisser à sa surface un frotteur relié à un capteur de force. Le capteur de force est celui d'une machine de traction (Figure 23), à gradient d'allongement constant. Le frotteur est donc déplacé à vitesse constante.

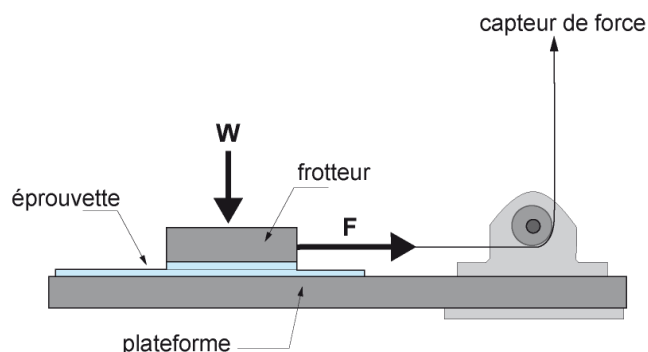


Figure 23 : Dispositif de mesure de frottement avec une machine de traction ⁴²

Le système d'évaluation Kawabata, le KES-F (Kawabata Evaluation System for Fabric) est utilisé pour mesurer les propriétés mécaniques des étoffes. Le système a été

³⁹ Sinoimeri, A. (2009). Friction in textile fibers and its role in fiber processing. In *Wear* (vol. 267, pp. 1619-1624). Elsevier.

⁴⁰ Ajayi, J. O. (1992). Fabric Smoothness, Friction and Handle. In *Textile Research Journal* (vol. 62, pp. 52-59). Sage Publications.

⁴¹ Hearle, J. W. S. & J. Amirbayat. (1988). The Design of a Multipurpose Fabric Tester. In *Journal of the Textile Institute* (vol. 4, pp. 588-597). Textile Institute.

⁴² Bueno, M. A. (1995). *Caractérisation tribologique des surfaces textiles : application au contrôle des traitements spécifiques d'ennoblissement*. Université de Haute Alsace.

développé par une équipe dirigée par le professeur Kawabata, Université de Kyoto au Japon. Il permet de mesurer les propriétés de traction, cisaillement, flexion et un module appelé KES-FB4 (Figure 24) est dédié à l'état de surface des surfaces textiles. Ce module permet d'évaluer la rugosité (R_a appelé *SMD* : Surface Mean Deviation) et deux paramètres de frottement : le coefficient de frottement (noté *MIU*) et la déviation par rapport à la moyenne du coefficient de frottement (noté *MMD*). Les mesures sont unidirectionnelles, dans le sens chaîne et le sens trame.

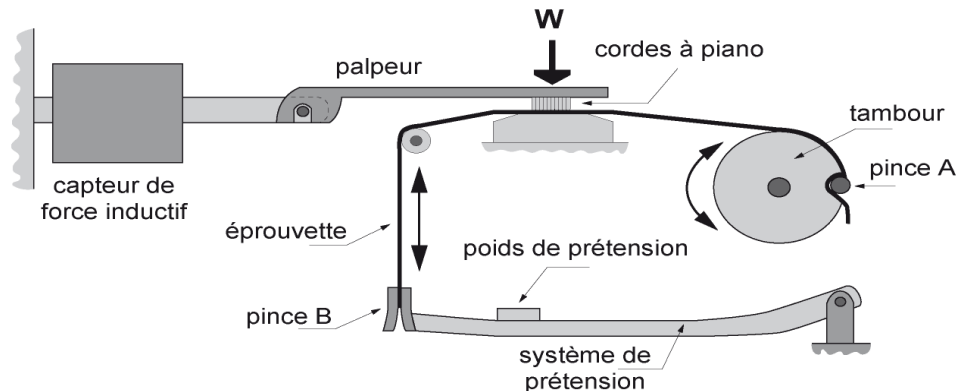


Figure 24 : KES-FB4: module de surface de la chaîne Kawabata, ici avec le capteur de frottement ⁴³

Le tribomètre multidirectionnel est un appareil, qui a été développé lors des travaux de thèse de Bueno car le KES-FB4, s'est avéré peu sensible pour caractériser les effets de certains traitements d'ennoblissement⁴⁴. Le tribomètre multidirectionnel allie deux caractéristiques qui n'avaient pas été combinées antérieurement, à savoir une étude de l'étoffe dans toutes les directions de sa surface (peu importe le positionnement de l'échantillon) et l'utilisation du caractère périodique de la surface des étoffes, exploité par un traitement du signal dans le domaine fréquentiel.

L'appareillage (Figure 25) comprend trois éléments : le porte-échantillon, l'unité de mesure, l'unité de traitement du signal. Le porte-échantillon est un plateau circulaire entraîné en rotation. L'étoffe est maintenue par une bague de serrage placée dans une rainure.

⁴³ Bueno, M. A. (1995). *Caractérisation tribologique des surfaces textiles : application au contrôle des traitements spécifiques d'ennoblissement*. Université de Haute Alsace.

⁴⁴ Bueno, M. A. (1995). *Caractérisation tribologique des surfaces textiles : application au contrôle des traitements spécifiques d'ennoblissement*. Université de Haute Alsace.

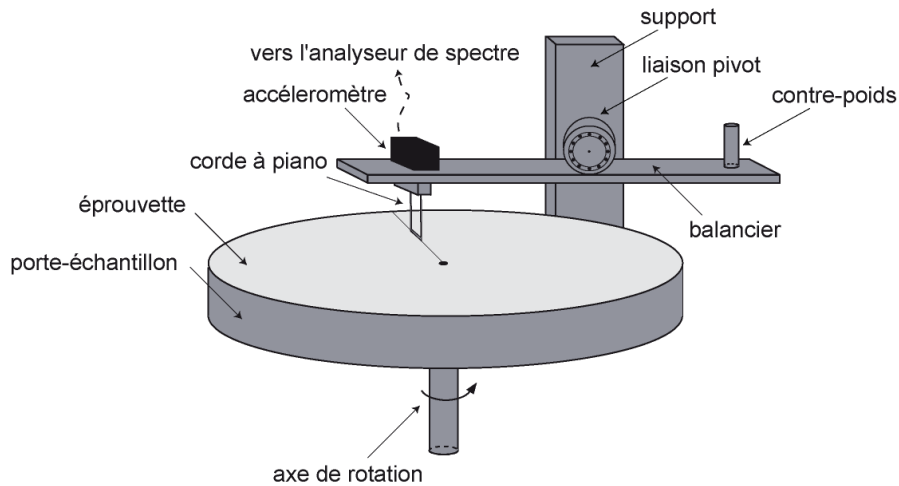


Figure 25 : Schéma de principe du tribomètre multi-directionnel ⁴⁵

Le frotteur est une corde à piano de diamètre du même ordre de grandeur que le diamètre d'un fil standard (0,5 mm). La corde est positionnée selon le rayon du plateau. La vitesse linéaire de mesure peut être modifiée en changeant la vitesse de rotation du plateau et/ou le rayon de mesure. Le frotteur est fixé à l'extrémité d'un balancier et la charge normale est réglée à l'autre extrémité du balancier. Le capteur lié au frotteur est un accéléromètre piézoélectrique. Le signal obtenu correspond à la vibration induite par l'étoffe se déplaçant sous le frotteur. L'unité de traitement du signal est un analyseur de spectre qui permet de faire une transformation de Fourier.

La représentation temps - fréquence permet de voir que le frotteur est excité fortement à certains moments qui correspondent aux moments où le frotteur est parallèle aux différents éléments du relief. A titre d'exemple, lors du frottement d'une toile, au cours d'une rotation du plateau, le frotteur rencontre successivement en boucle et à chaque demi-tour la diagonale puis la chaîne et de nouveau la diagonale et la trame alternativement.

Plusieurs études ont montré que ce tribomètre multidirectionnel est plus sensible que le KES-F à de fines modifications de l'état de surface d'une étoffe^{46,47}.

⁴⁵ Bueno, M. A. (1995). *Caractérisation tribologique des surfaces textiles : application au contrôle des traitements spécifiques d'ennoblissement*. Université de Haute Alsace.

⁴⁶ Bueno, M. A., Lamy, B., Renner, M. & Viallier, P. (1996). Tribological investigation of textile fabrics. In *Wear* (vol. 195, pp. 192-200). Elsevier.

⁴⁷ Bueno, M. A. & Renner, M. (2002). Comparison of a new tribological method for the evaluation of the state of the fabric with the KES-F Surface Tester. In *Journal of the Textile Institute* (vol. 92, Part. 1, n°3, pp. 212-227). Textile Institute.

Le rugosimètre optique développé par Bueno et al.⁴⁸ a deux caractéristiques communes avec le tribomètre multidirectionnel : les mesures multidirectionnelles et le traitement du signal. En revanche, cette méthode est sans contact et le rayon laser est plus fin que la corde à piano. Le porte échantillon et l'unité de traitement du signal sont les mêmes que ceux du tribomètre multidirectionnel (Figure 26).

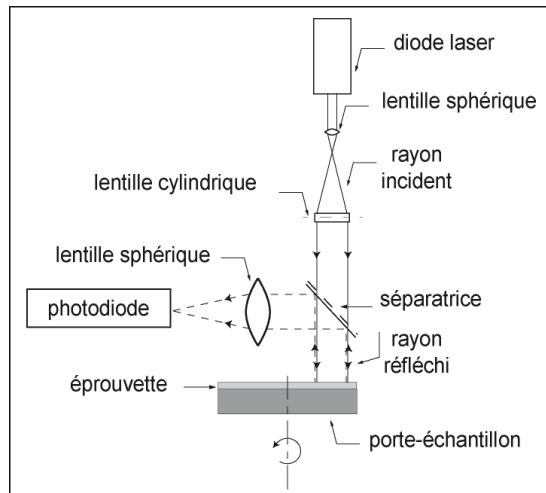


Figure 26 : Montage optique du rugosimètre

Son principe est de considérer la réflexion d'un trait fin lumineux à la surface d'une étoffe en rotation. Ce trait a la particularité d'être radial à tout instant. Lors de la rotation relative du trait par rapport à l'étoffe, celui-ci passe dans des zones où il est considéré comme étant parallèle aux éléments de structure de la surface (fils, côtes pour les sergés, alignement des points de fusion pour les non-tissés). Il y a donc dans ces zones une périodicité de la lumière réfléchi. Le traitement de ce signal temporel par une transformation de Fourier permet de mettre en évidence cet effet de périodes. C'est un traitement du même type que pour le tribomètre multidirectionnel. Les fréquences des pics dépendent de la structure de l'étoffe, tandis que l'énergie des pics dépend de l'état de surface de l'étoffe. En effet lorsque la surface de l'étoffe est modifiée, l'énergie lumineuse est également affectée. Par exemple, un écrasement de la structure augmente la réflexion directe, tandis qu'une création de pilosité diminue cette réflexion directe en augmentant la réflexion diffuse.

⁴⁸ Bueno, M. A., Durand, B. & Renner, M. (2000). Optical Characterization of the State of the Fabric Surfaces. In *Optical Engineering* (vol. 39, n°6, pp. 1697-1703). Spie Digital Library.

Chapitre n°1 : Les surfaces textiles et le frottement

Ce système présente un inconvénient : comme il est basé sur une mesure de réflexion, il est sensible à la couleur, il ne peut donc pas être appliqué à des étoffes imprimées. Ce défaut a été supprimé dans la version polarimétrique élaborée par Turlonias^{49,50,51}.

Le toucher d'une étoffe dépendant fortement de sa pilosité de surface, il est important de caractériser cette dernière, en termes de densité et de morphologie ou encore de propriétés mécaniques. S'il existe peu de méthodes pour caractériser sa densité et sa morphologie (voir ci-dessous), il n'en existe pas pour leurs propriétés mécaniques (ce qui est l'objet du présent travail).

Le pilosimètre optique (Figure 27) développé par Bueno et al.⁵² permet, en séparant l'ombre de la pilosité de celle de la structure, de mesurer une « quantité de poils ».

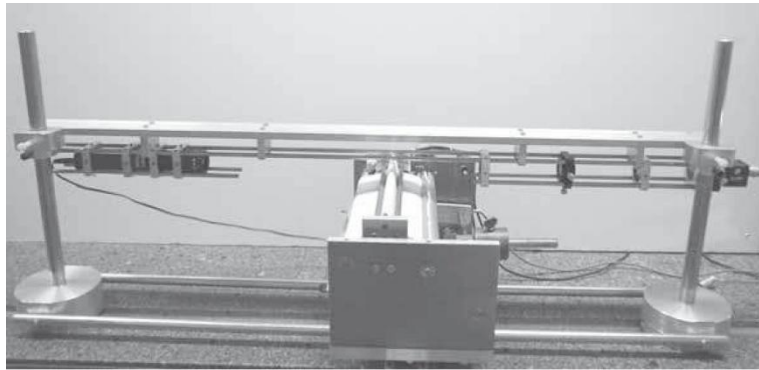


Figure 27 : Pilosimètre optique

L'appareil est constitué de trois parties (Figure 28) : le porte échantillon, le montage optique et l'unité de traitement du signal.

⁴⁹ Turlonias, M., Bigué, L. & Bueno, M. A. (2010) Contribution of polarimetric imaging for the characterization of fibrous surface properties at different scales. In *Optics and Lasers in Engineering* (pp. 75-82). Elsevier.

⁵⁰ Turlonias, M., Bigué, L. & Bueno, M. A. (2007). Polarimetric measurements of fabric surfaces. In *Optical Engineering*. Spie Digital Library.

⁵¹ Turlonias, M., Bueno, M. A., Bigué, L., Durand, B. & Renner, M. (2005). Contactless Optical Extensometer for Textile Materials. In *Experimental Mechanics* (pp. 420-426). Society for Experimental Mechanics.

⁵² Bueno, M. A., Durand, B. & Renner, M. (2000). Optical Characterization of the State of the Fabric Surfaces. In *Optical Engineering* (vol. 39, n°6, pp. 1697-1703). Spie Digital Library.

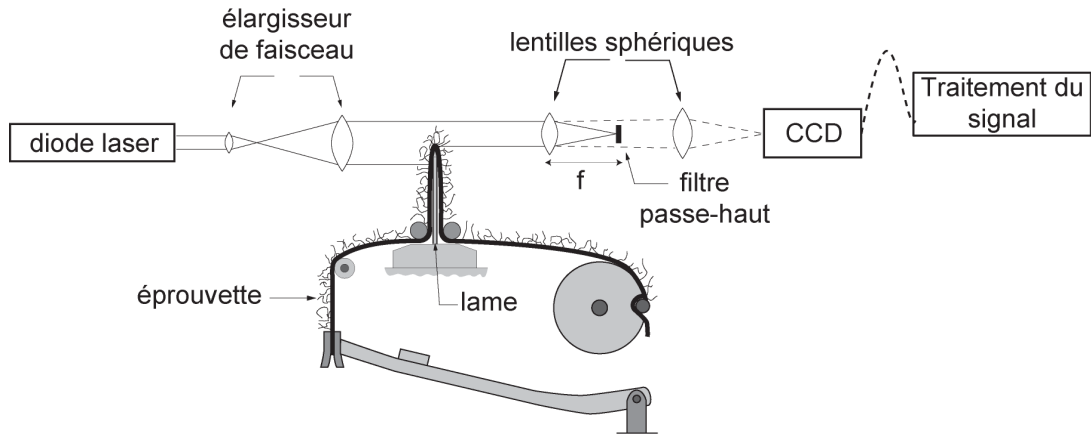


Figure 28 : Schéma de principe du pilosimètre optique.

Le porte échantillon permet de présenter l'étoffe sur la tranche et de la faire défiler grâce à un système d'entraînement sur une longueur de quelques centimètres.

Le montage optique est constitué d'une diode laser qui éclaire la tranche de l'étoffe sur une largeur de 5 à 10 mm. On obtient ainsi l'ombre portée de la pilosité et de la structure. Un filtrage optique (passe-haut) permet d'éliminer les basses fréquences spatiales, en particulier la composante continue. C'est-à-dire que le filtre ne laisse passer que les contours des ombres. Après le filtre, seule l'information provenant des fibres émergentes est encore présente dans le rayon lumineux. Ce dernier est focalisé sur une caméra CCD (Figure 29).

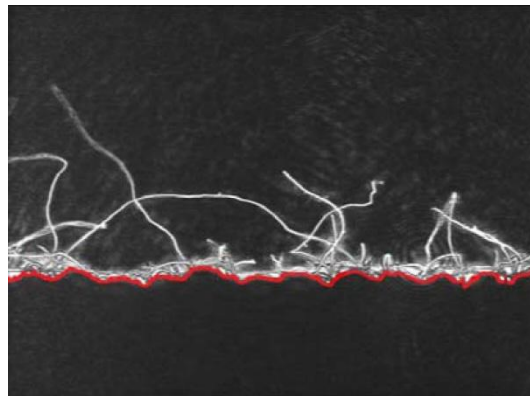


Figure 29 : Image de la pilosité reçue par la caméra CCD

Le traitement d'image permet d'obtenir l'énergie lumineuse globale reçue par la caméra CCD ainsi que la répartition de cette énergie lumineuse en fonction de la hauteur de l'image.

L'énergie lumineuse globale reçue par la caméra CCD peut être ramenée à une quantité de fibres émergentes. Cette quantité globale donne une information globale, qui peut être identique pour une pilosité dense et courte et pour une pilosité plus longue mais moins dense.

Chapitre 2 :

Descriptif des méthodes de mesures et matériaux

2 Chapitre 2 : Descriptif des méthodes de mesures et matériaux

Notre étude porte sur la compréhension du comportement au frottement de surfaces textiles pileuses. Dans un premier temps nous présenterons les étoffes pileuses que nous avons utilisées comme référence puis le tribomètre qui nous a permis de réaliser les essais.

2.1 Surfaces textiles pileuses de référence

- **Surfaces textiles réelles**

Nous avons vu, que lors du frottement de surfaces textiles, le premier élément structurel qui entrait en jeu était la pilosité superficielle de la surface frottée. Dans cette étude, nous nous sommes concentrés sur l'étude des phénomènes de frottement au niveau de ces entités qui émergent de la structure, périodiquement ou non. Aussi, avons-nous choisi plusieurs surfaces textiles dont la pilosité de surface est importante et qui balayent les grands types de surfaces textiles pileuses. Il s'agit de velours, surfaces textiles dont la pilosité peut être considérée comme régulière et orientée, de tricot polaire qui présente une pilosité irrégulière et désorientée et de tricot bouclette dont les éléments émergents sont des bouclettes de fil réparties périodiquement.

- **Velours**

Présentant une pilosité régulière et orientée, les velours peuvent être caractérisés, au-delà des caractéristiques habituelles des surfaces textiles, par leur nombre de poils par unité de surface (la densité de poils), la longueur moyenne et l'orientation principale de ces poils. Nous avons utilisé deux types de velours qui trouvent leur application finale dans l'habillement ou l'industrie automobile comme revêtement de siège.

Dans ce travail, le premier velours est noté V1, (Figure 30.a) il est constitué à 80% de fibres de laine de mouton et à 20% de polyéthylène téréphtalate (PET, type le plus courant de polyester) et le deuxième, noté V2 (Figure 30.b) qui est constitué à 100% de fibres de PET. Il s'agit de velours tricotés dont les caractéristiques sont récapitulées dans le Tableau 1.

Les poils formant la pilosité ont la même orientation initiale pour les 2 velours, mais ont une longueur différente.

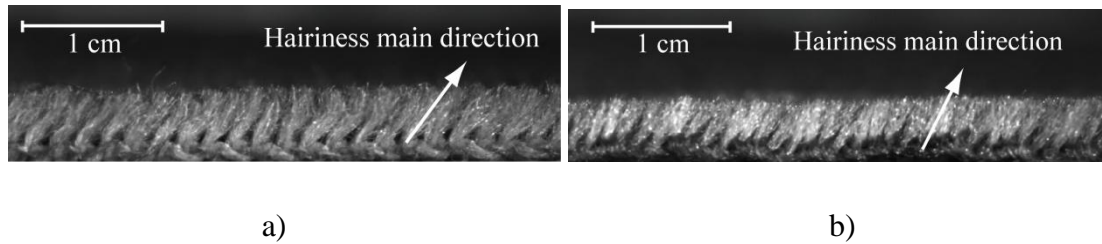


Figure 30 : a) Velours V1 et b) V2 (vue de profil).

- **Polaire**

La polaire utilisée est constituée de fibres à 100% de PET. Nous observons bien, en Figure 31, les fibres qui émergent de façon désordonnée de la structure du tricot de base suite au processus de grattage.

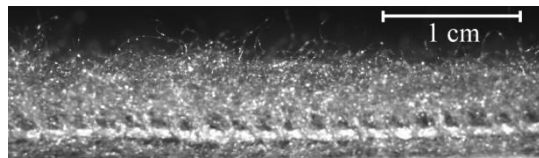


Figure 31 : Polaire (vue de profil).

- **Bouclettes**

Le dernier type de surface utilisée est un tricot bouclette (Figure 32). On le retrouve dans les chaussettes de sport et est fabriqué à partir de fils 100% coton. Nous assimilons les bouclettes à une macro-pilosité considérée régulière et présentant une orientation préférentielle.

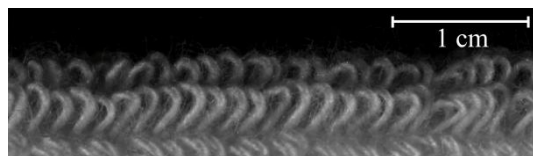


Figure 32 : Jersey bouclette (vue de profil).

Textile surface	Composition in mass	Thickness of the textile surface	Oriented hairiness	Hairiness distribution
Velvet V1	80% wool, 20% polyester	2.96 mm ± 0.14 mm	Yes	pseudo-uniform
Velvet V2	100% polyester	2.70 mm ± 0.12 mm	Yes	pseudo-uniform
Polar	100% polyester	5.08 mm ± 0.24 mm	No	pseudo-aleatory
Terry jersey	100% cotton	3.60 mm ± 0.06 mm	Yes	pseudo-uniform

Tableau 1 : Tableau récapitulatif des caractéristiques des surfaces textiles utilisées.

2.2 Macrosurfaces pileuses - modèles

2.2.1 Intérêt de ces surfaces

Comme cela vient d'être décrit précédemment, les fibres constituant la pilosité des surfaces textiles sont des éléments élancés dont la longueur moyenne est de quelques millimètres et le diamètre (en considérant que les sections sont circulaires) mesure environ 20-30 microns. Cela nous amène à des rigidités en flexion particulièrement faibles de l'ordre de 1.10^{-10} MPa pour la laine (le module de Young est d'environ 4 GPa) car les moments quadratiques sont de l'ordre de 4.10^{-20} m⁴. Si on considère un poil de 2 mm dont l'encastrement fait un angle de 90° par rapport à la surface de l'étoffe, la force suiveuse entraînant la flexion d'un poil unique pour un enfoncement donné et en négligeant le frottement entre le frotteur et la fibre se calcule de la façon suivante (Figure 33):

$$F = \frac{2B \sin \Psi}{(\zeta_0 \cos \Psi + \zeta \sin \Psi)^2}$$

Équation 24

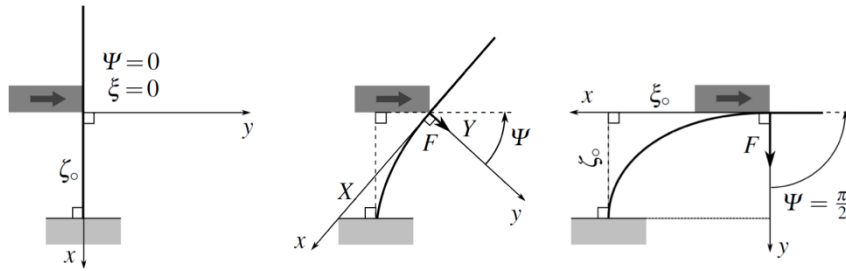


Figure 33 : élastica rectangle, Watzky⁵³

Pour la fibre de laine qui est la moins rigide des deux, nous obtenons une force suiveuse maximale $7.0 \cdot 10^{-5}$ N pour un enfoncement de 0,5 mm correspondant à une pression moyenne de 3 kPa exercée sur la surface pileuse correspondante. Cette force est trop faible pour être mesurée par nos moyens disponibles lors du début de ce travail.

Aussi durant ce travail, étant donnée l'échelle des éléments de pilosité des surfaces réelles et par conséquent des forces mises en jeu, il ne nous a pas été possible de d'étudier directement les mécanismes de déformation et d'adhésion se produisant lors du frottement d'éléments de pilosité. Aussi, nous avons réalisé des surfaces modèles de textiles pileux (Figure 34) à l'échelle macroscopique avec des éléments de pilosité de diamètre environ 10 fois supérieur à celui des éléments de pilosité décrits plus haut. De plus, nous avons alors pu choisir le nombre d'entités de pilosité et leur disposition ce qui nous a permis de générer des surfaces de caractéristiques différentes.



Figure 34 : Boucles créées à partir de monofilaments de polyester

Lorsqu'un poil est frotté, il se couche sur celui le précède. Il est évident que lorsque la densité est trop faible, cette superposition peut ne pas se produire or toutes nos observations montrent que dans nos surfaces réelles ce mécanisme se produit. De plus, afin de se ramener à un problème plan, c'est-à-dire que le déplacement des éléments de pilosité se

⁵³ Watzky, A. & Bueno, M. A. (2011). L'elastica revisitée sous l'angle des efforts. In *20^{ème} Congrès Français de Mécanique*, Besançon.

situe uniquement, ou au moins essentiellement, dans un plan perpendiculaire à la surface de ce macrotexile, parallèlement à la direction de glissement, leur morphologie doit permettre de bloquer les degrés de liberté indésirables tout en restant conforme à un contexte textile. Notre choix s'est ainsi porté sur des entités élémentaires en forme de boucles encastrées libres plutôt que de poils.

2.2.2 Réalisation de ces surfaces

Afin d'accueillir ces assemblages, nous avons conçu et fabriqué des supports perforés. La mise en place de boucles en sélectionnant tout ou une partie de ces orifices nous a permis de contrôler la densité de nos échantillons modèles ainsi que le nombre d'entités les constituant.

La longueur des boucles ainsi que leur orientation reste un paramètre fixe lié au dispositif permettant leur élaboration (Figure 35 a).

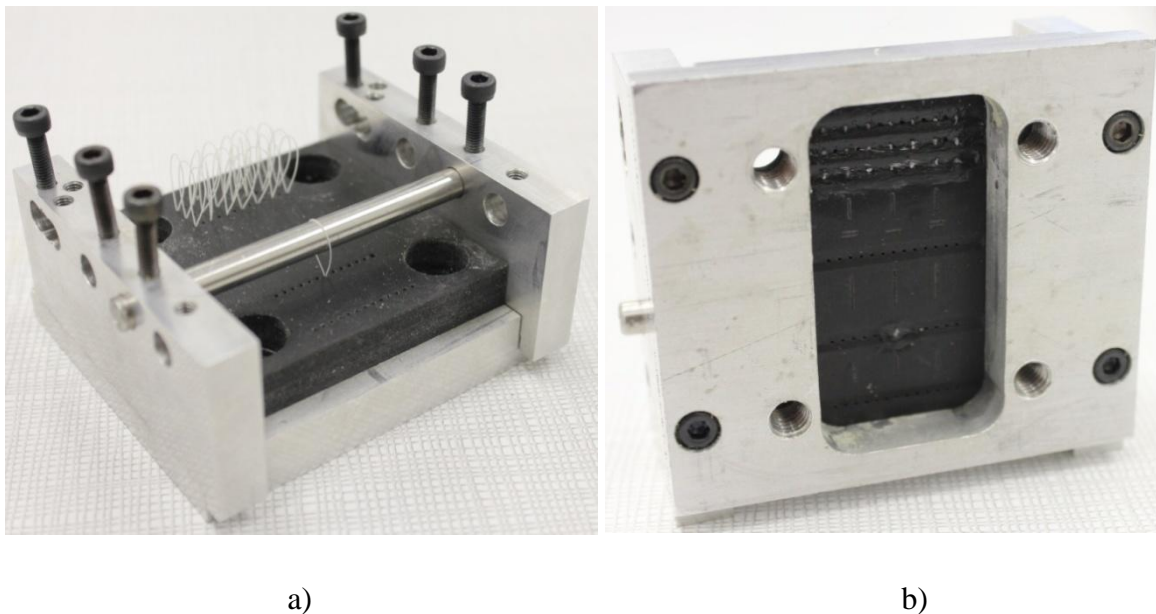


Figure 35 : Photos du dispositif de mise en place des boucles a) vue de dessus, b) vue de dessous

Le fil passe dans l'orifice, est enroulé autour d'un axe métallique fixe et retourne dans l'orifice initial. La boucle ainsi constituée est maintenue en position par collage. Afin de ne pas perturber le mouvement de la boucle lors des essais, le collage est réalisé à l'arrière du support (Figure 35.b). Les boucles obtenues ont une hauteur de 10 mm et un rayon de courbure au sommet de 2,5 mm.

2.2.3 Caractéristiques des filaments utilisés

Ces boucles ont été réalisées avec des monofilaments de PET d'environ 205 microns de diamètre et de module d'Young de 8.21 GPa ce qui nous amène d'après l'Équation 24 à une force de flexion maximale de 0.05 N en considérant la boucle comme deux poils de 10 mm de longueur et pour un enfoncement de 5 mm. Il s'agit là de forces comprises dans notre gamme de mesure.

Nous avons utilisé trois types de filaments : le filament brut non traité (notée NT), et deux lots ayant subi des traitements plasma en vue de modifier leurs propriétés de surface et plus particulièrement en adhésion. Les traitements plasma ont été réalisés à l'EMPA à Saint-Gall (Suisse). Le premier traitement plasma, en présence de dioxygène et d'argon d'une durée d'exposition de 4 minutes à 25 W, vise à rendre le filament hydrophobe (noté THO) et le deuxième, en présence de dioxygène et d'argon d'une durée d'exposition de 4 minutes à 15 W, vise à rendre le filament hydrophile (noté THI). Un exemple d'échantillon de boucles est donné Figure 36. Les caractéristiques des filaments sont données dans le Tableau 2.

filament	Diameter (μm)	σ	Tensile modulus (E in GPa)	σ
NT	205.0	1.1	8.21	0.14
THI	205.6	1.3	8.11	0.17
THO	205.6	0.8	8.22	0.15

Tableau 2 : Caractéristiques des filaments NT, THI et THO

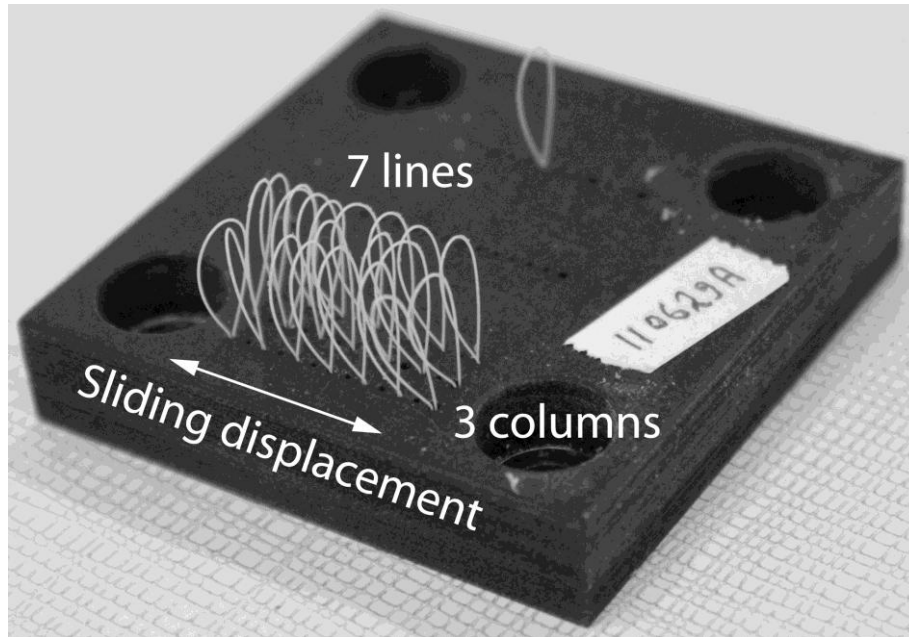


Figure 36 : échantillons constitués d'une boucle unique (en haut) et comportant 3 colonnes de 7 boucles (en bas).

Les propriétés de mouillabilité de ces filaments de polyester ont été mesurées par le Laboratoire IS2M de l'Université de Haute Alsace à l'aide d'un tensiomètre K14 (KRÜSS GmbH, Hambourg, Allemagne). Les liquides utilisés pour mesurer les propriétés de mouillabilité ont été de l'eau distillée et du diiodométhane (Tableau 3).

	$\text{mN/m} = \text{mJ/m}^2$	$\gamma_1(\text{mJ/m}^2)$	disperse part	polar part	
	density (g/cm^3)	SFT (mN/m)	$\gamma_1^d(\text{mJ/m}^2)$	$\gamma_1^{nd}(\text{mJ/m}^2)$	coeff: $\sqrt{\gamma_1^d/\gamma_1}$
diiodomethane	3.325	50.8	48.5	2.3	0.137
water	0.998	72.6	21.6	51	0.064

Tableau 3 : Caractéristiques des liquides utilisés

γ_1 est la tension superficielle du liquide, l'indice d correspond à la partie apolaire et nd à la partie polaire (aussi appelée partie non dispersive).

Nous avons obtenu les angles de contact répertoriés dans le Tableau 4.

Chapitre n°2 : Descriptif des méthodes de mesures et matériaux.

		θ contact angle way down (diving)		θ contact angle way up (extraction)		$\cos(\theta)$
filament	liquid	θ_a (deg)	σ	θ_r (deg)	σ	way down
NT	diiodométhane	62.3	3.1	50.8	2.3	0.46
	water	85.0	1.1	56.7	0.8	0.09
THI	diiodométhane	66.3	2.4	44.8	2.2	0.40
	water	78.8	2.1	44.2	3.9	0.19
THO	diiodométhane	63.6	2.7	45.3	1.0	0.44
	water	79.5	3.5	45.0	3.6	0.18

Tableau 4 : Récapitulatif des angles de contact par filament.

Afin de calculer la tension superficielle de chaque filament, nous avons suivi la démarche décrite en annexe. Nous obtenons ainsi les résultats suivant (Tableau 5) :

fiber	γ_s^d (mJ/m ²)	W_{s1}^{nd} (mJ/m ²) for water	γ_s^{nd} (mJ/m ²)	γ_s (mJ/m ²)
NT	28.5	29.3	4.2	32.7
THI	26.2	39.1	7.5	33.7
THO	27.8	36.9	6.7	34.4

Tableau 5 : Tensions superficielles des filaments

Nous constatons que les traitements plasma réalisés ont peu modifié les tensions superficielles des filaments contrairement à ce qui était attendu. En effet, que le traitement ait pour objectif d'augmenter ou de diminuer l'hydrophilie du filament, les propriétés en terme de tension superficielle obtenues sont très proches. Les différences les plus notables se situent entre les filaments traités et le non traité. Ce résultat peut être dû à un vieillissement très rapide de l'effet du traitement déjà observé après quelques heures pour d'autres matériaux⁵⁴. Dans notre cas, ces mesures ont été réalisées plusieurs mois après la fabrication.

⁵⁴ Bacharouche, J., Haidara, H., Kunemann, P., Vallat, M. F. & Roucoules, V. (2013). Singularities in hydrophobic recovery of plasma treated polydimethylsiloxane surfaces under non-contaminant atmosphere. In *Sensors and Actuators A: Physical* (vol. 197, pp. 25-29). Elsevier.

2.2.4 Macrosurfaces pileuses réalisées

Le Tableau 6 récapitule l'ensemble des échantillons qui ont été réalisés pour chaque filament, ainsi que leurs caractéristiques en termes de nombres colonnes, de rangées et d'intervalle entre les rangées et les colonnes.

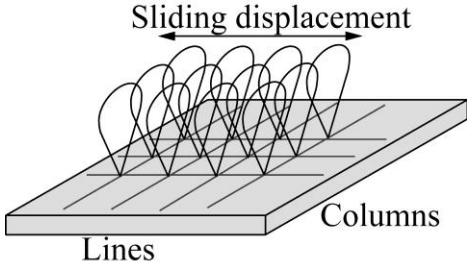
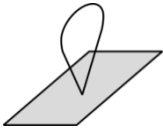
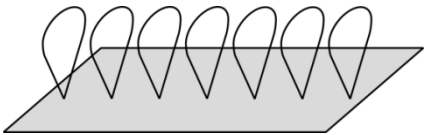
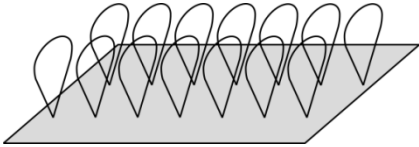
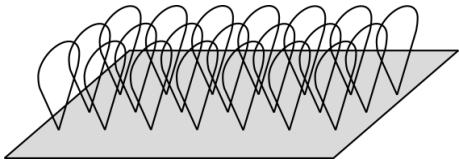
Designation	Schema	Number of loops		Interval between loops (mm)	
		Column direction	Line direction	Column direction	Line direction
3la-4l		3	4	3	3
1la-1l		1	1	0	0
1la-7l		1	7	0	3
2la-7l		2	7	6,5	3
3la-7l		3	7	3	3

Tableau 6 : Tableau récapitulatif des échantillons réalisés avec chaque monofilament.

2.3 Le tribomètre

2.3.1 Dispositif expérimental

Les mesures sont réalisées au moyen d'un tribomètre frotteur-plan alternatif qui a été développé au sein du laboratoire (Figure 37,⁵⁵)

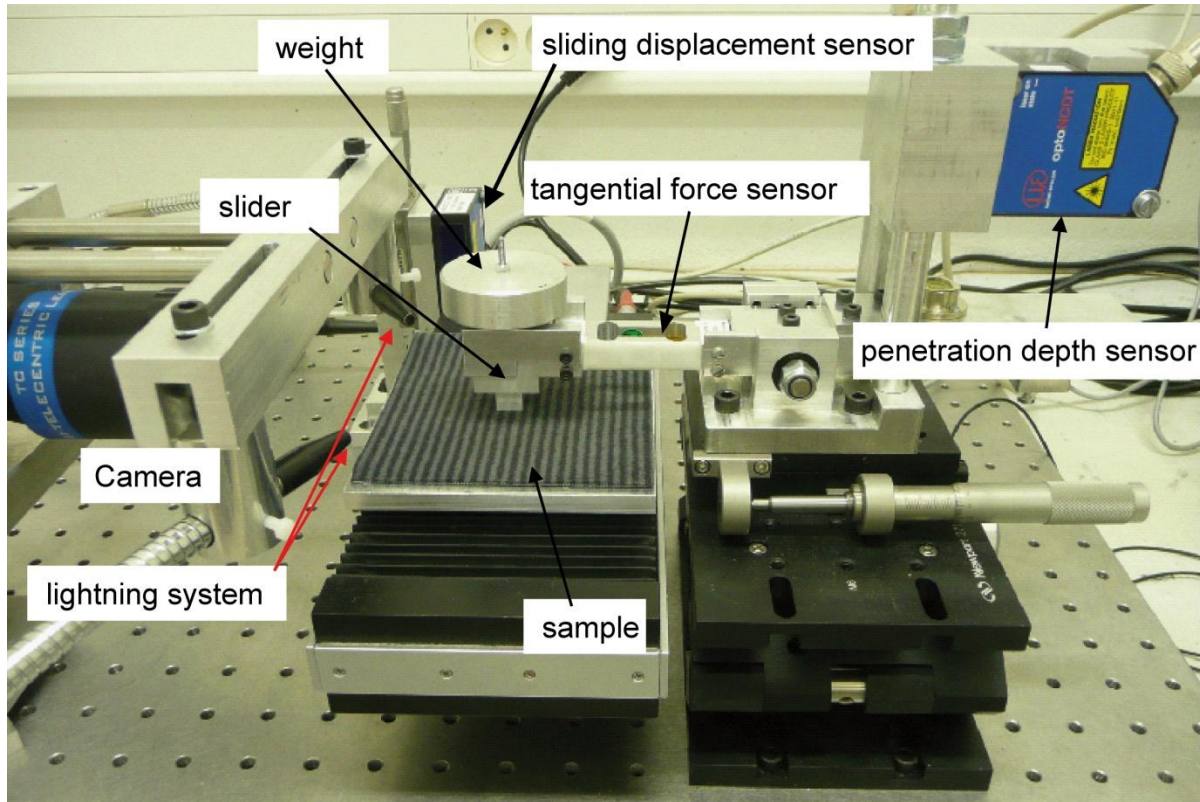


Figure 37 : Tribomètre pion-plan alternatif à masse morte

Ce tribomètre permet d'effectuer des mesures à l'aide d'un frotteur fixé à un bras de mesure. Celui-ci va venir frotter un échantillon collé sur une platine de translation uniaxiale (platine de translation linéaire x.act LT 100-2 ST contrôlée par un 3 Chanel Stepper-Motor-Controller M50.PCI, LINOS Photonics GmbH & Co. KG, Göttingen, Allemagne)⁵⁶). Sur le bras du frotteur se trouve un capteur de jauges de déformation (HBM PW4C3 capacité maximale du capteur 3 N, HBM France SAS, Mennecy, France) qui permet de mesurer la force tangentielle (force de frottement) durant l'essai. Un capteur de déplacement par

⁵⁵ Baussan, E., Bueno, M. A., Rossi, R. M., & Derler, S. (2010). Experiments and modelling of skin-knitted fabric friction. In *Wear* (vol. 268, pp. 1103-1110). Elsevier.

⁵⁶ Camillieri, B., Bueno, M. A., Rossi R. M. & Derler, S. (2012). Brush model to predict the friction of hairy textile fabrics from indentation measurements. In *Wear* (vol. 296, pp. 519-527). Elsevier.

triangulation laser (Micro-Epsilon type OptoNCDT 1402-100) mesure la position de la platine au cours du déplacement. Nous avons équipé le tribomètre d'un système d'observation comprenant une caméra rapide (type AVT PIKE F-032B) et un objectif macro qui permet de visualiser les phénomènes au cours d'un essai.

La platine de translation est commandée via un programme en Visual Basic. Les mesures des différents capteurs sont acquises par un système d'acquisition (Pulse version 14.1.1 de Brüel & Kjaer, Mennecy, France).

La première version de ce tribomètre est à chargement normal par masse morte autorisant ainsi un mouvement vertical du frotteur (Figure 38 à gauche). En effet, il avait été constaté préalablement⁵⁷ que, lorsque l'on frotte avec le doigt une surface textile, celui-ci se déplace dans la direction perpendiculaire à la surface frottée pour s'adapter au profil ou à la raideur de la surface touchée. Aussi avons-nous une première configuration du tribomètre visant à reproduire ce phénomène : charge normale fixe et déplacement vertical libre.

Néanmoins, cette configuration n'étant pas adaptée au frottement de nos surfaces modèles, puisque l'effet de portance dû à la surface est alors discontinu, une seconde configuration du tribomètre avec blocage du déplacement vertical du frotteur et mesure de la charge normale a alors été mise en place (Figure 38 à droite). En fonction nos besoins le tribomètre peut être utilisé dans l'une ou l'autre des configurations.

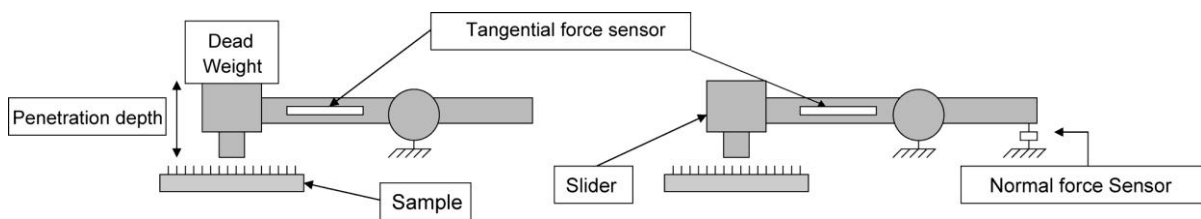


Figure 38 : Configuration du tribomètre : (à gauche) à masse morte, (à droite) à hauteur imposée.

⁵⁷ Tournonias, M. & Bueno, M. A. (2009). Etude phénoménologique du comportement au frottement de surfaces textiles. In 19^{ème} Congrès Français de Mécanique, Marseille.

- **Configuration à charge fixe**

Dans la configuration à charge fixe du tribomètre (Figure 38 à gauche), le bras de mesure mobile peut pivoter librement autour de son axe de rotation. La force de frottement est mesurée au cours d'un essai sous une charge fixe donnée par une masse morte placée au-dessus du frotteur. Dans la procédure expérimentale, le bras de mesure est tout d'abord équilibré à vide pour s'affranchir de la masse du frotteur puis la charge choisie est ajoutée, afin d'obtenir une pression nominale, et fixée sur l'échantillon. Un capteur de distance par triangulation laser permet de mesurer au cours de l'essai la profondeur de pénétration du frotteur dans l'échantillon. Compte tenues de l'amplitude du déplacement vertical du frotteur (maximum 10 mm) au cours d'un essai et de la distance avec l'axe de rotation, le déplacement vertical du frotteur peut être assimilé comme étant dû uniquement à une translation. En effet, la rotation induit alors un déplacement du frotteur de 10 mm suivant son axe engendre une rotation de $5,2^\circ$, ce qui est assimilé à un petit déplacement angulaire.

- **Configuration à déplacement vertical bloqué**

Dans la deuxième configuration (Figure 38 à droite et Figure 39), la rotation du bras de mesure est bloquée en rotation et la force verticale appliquée par le frotteur sur l'échantillon est mesurée au moyen d'un capteur de force piézo-électrique (Brüel & Kjaer 8200) associé à un amplificateur de charge (Brüel & Kjaer 2628). Le reste du dispositif reste inchangé.

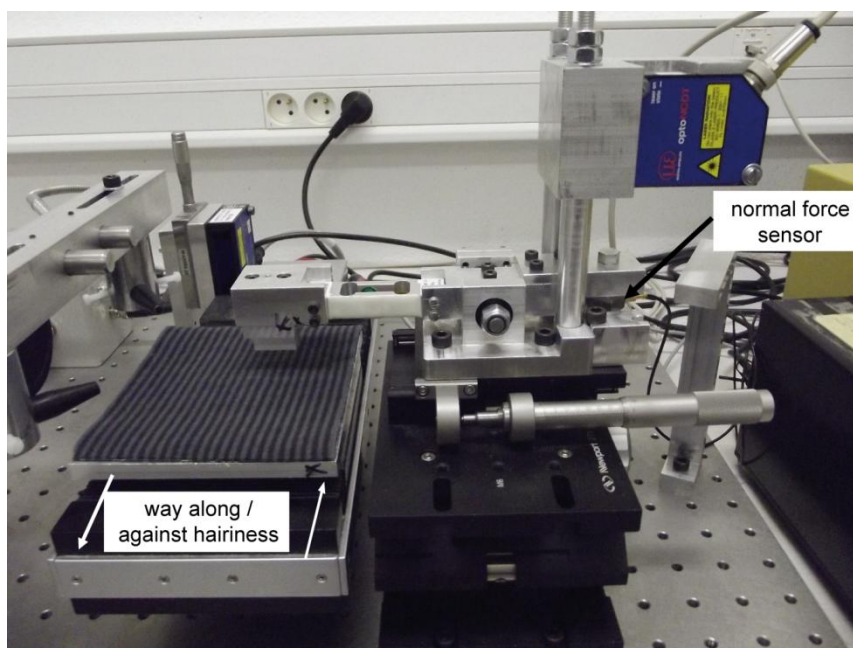


Figure 39 : Tribomètre pion-plan alternatif à déplacement vertical bloqué.

2.3.2 Paramètres expérimentaux

2.3.2.1 Frotteurs

Dans l'étude, plusieurs frotteurs ont été utilisés. Ils se différencient par leur géométrie et leurs propriétés de surface.

Une étude précédente a mis en évidence⁵⁸ que l'aire approximative du contact du doigt lors du toucher est en moyenne de $1,5 \text{ cm}^2$. Nous avons donc choisi de réaliser des frotteurs dont la face inférieure présente une telle aire, excepté les frotteurs dont la semelle est quasi-inexistante : les frotteurs dits linéiques (Figure 40 à droite).

La majorité des frotteurs utilisés ont un profil parallélépipédique de sorte à avoir leurs faces caractéristiques normales ou parallèles à la trajectoire. Les dimensions caractéristiques de ces frotteurs sont récapitulées dans le Tableau 3 ainsi que le matériau constitutif utilisé.

Nous pouvons noter que le choix de la longueur de 13,8 mm est lié au frotteur cylindrique. En effet, nous voulions pouvoir comparer les frotteurs cylindriques et parallélépipédiques en préservant une même aire apparente de contact et une longueur de frottement identique. Les autres dimensions découlent de ce choix.

Certaines géométries particulières de frotteurs ont également été réalisées avec, par exemple, la présence d'un chanfrein ou bien une surface latérale du frotteur évidée (Figure 40).

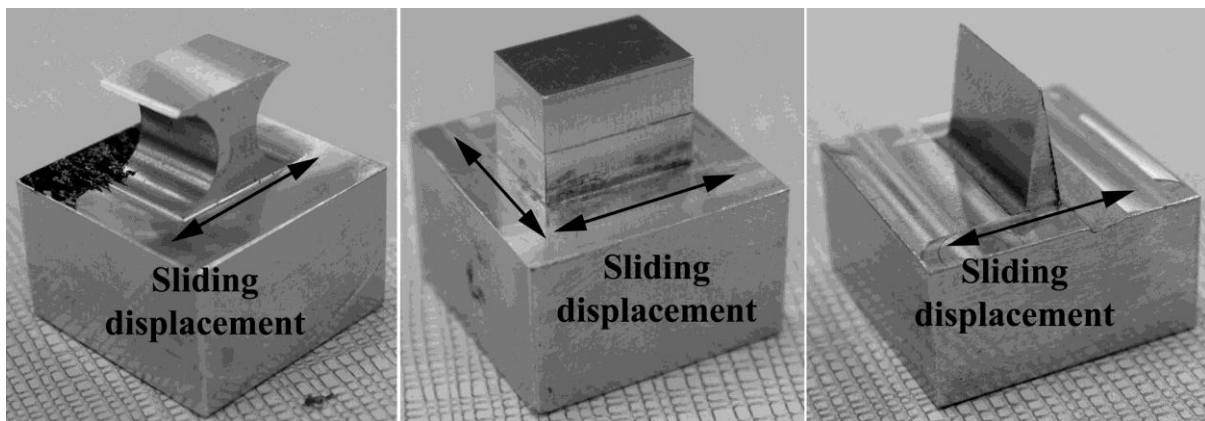


Figure 40 : A gauche frotteur avec chanfrein et surfaces latérales évidées, au milieu frotteur droit, à droite frotteur dit linéique.

⁵⁸ Baussan, E. (2010). *Etude tribologique et modélisation du contact peau-chaussette. Application à la course à pied*. Université de Haute-Alsace.

Chapitre n°2 : Descriptif des méthodes de mesures et matériaux.

Nous avons établi un système de désignation (Tableau 7) des frotteurs que nous avons basé sur leurs caractéristiques propres. Les noms sont définis par le matériau, la géométrie principale et enfin la largeur du frotteur. La largeur du frotteur correspond à la longueur de l'arête de la face normale au déplacement.

Material		Leading face		Chamfer option		Empty option		Leading face option	
Aluminium	A-	Straight	D	With chamfer	c	Empty along	Va	10,8 mm	11
Inox	I-	Cylinder	C	Without chamfer	o	Empty against	Vr	21,7 mm	22
PTFE	P-	Inclination	P	Inclination option		Empty along/against	Var		
				Round	A			Inclination 45°	45
		Ball * 19	B19	Inclination 60°	60	Multi zones option			
		Linear	L	Linear option		2 in width leading face		2la	
				Angle 17°	17	2 in length		2L	
Angle 34°	34	2 in width / 2 in length		2la2L					

Tableau 7 : Tableau de classification des frotteurs

Par exemple (Figure 41), un frotteur noté A-Dc-11 est un frotteur en aluminium A, de forme parallélépipédique dont les côtés sont droits D mais avec un chanfrein c à l'avant et à

l'arrière et dont la largeur est de 10,8 mm (proche de 11 mm). Pour information, sa longueur est alors de 13,8 mm afin que l'aire de sa semelle soit de 1,5cm².

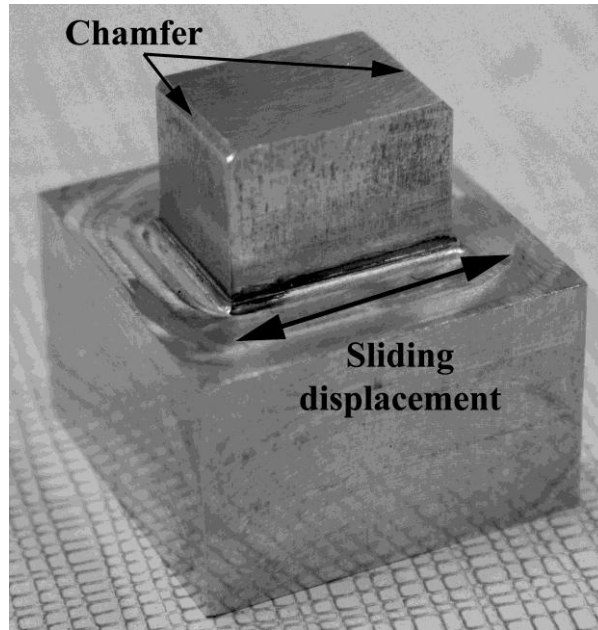


Figure 41 : Frotteur A-Dc-11

2.3.2.2 Conditions expérimentales

La cinématique relative entre le frotteur et l'échantillon est de type linéaire alternative. Nous commandons la platine de translation supportant le porte-échantillon afin qu'elle génère un profil de vitesse trapézoïdal, c'est-à dire présentant une zone à vitesse constante la plus longue possible (Figure 42).

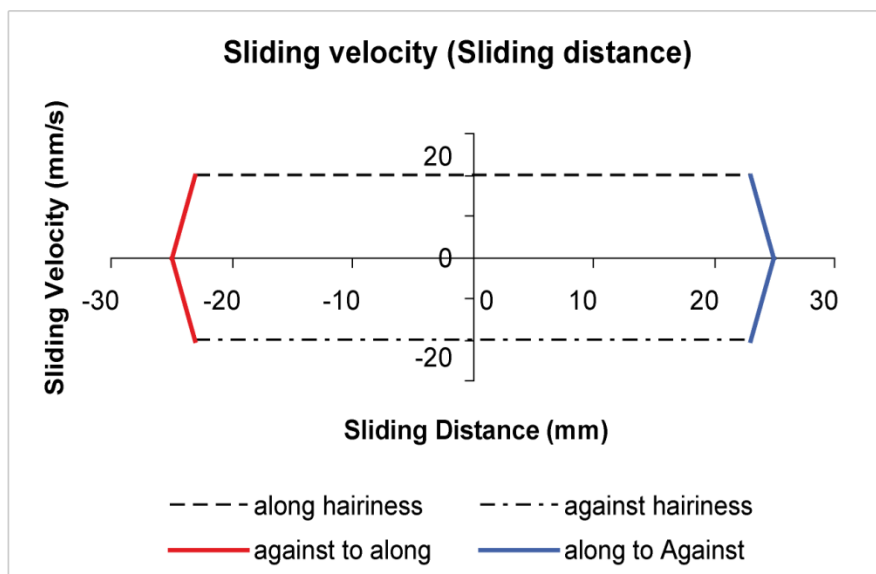


Figure 42 : Allure de vitesse trapézoïdale

La majorité des essais sont réalisés pour un déplacement de 50 mm sur un demi-cycle. Nous avons choisi une vitesse au niveau du plateau du cycle de 20 mm.s^{-1} se situent dans la gamme des vitesses du toucher, ainsi qu'une accélération de 50 mm.s^{-2} réduisant à 0,4 s et un déplacement de 4 mm les phases d'accélération et de décélération. Quelques essais ont été réalisés pour un déplacement de 30 mm ou avec d'autres consignes de vitesses maximales (à partir de 2 mm.s^{-1}).

Lors des essais à charge fixe, nous avons choisi deux chargements différents. Ils correspondent à deux cas classiques de frottement peau / surfaces textiles. La première charge, faible, correspond à la pression du doigt communément appliquée lors du toucher de surfaces textiles. Elle a été évaluée à 0,5 N, soit une pression de 3 kPa⁵⁹. La seconde charge, de 15 kPa (2,25N pour un frotteur de 150 mm^2), représente la pression engendrée par le pied sur la chaussette par un individu qui court à pied dans les zones courantes d'apparition des phlyctènes⁶⁰.

Afin d'obtenir des résultats représentatifs, pour chaque condition de test (même frotteur, même surface textile et mêmes conditions expérimentales) nous avons réalisé 5 essais par échantillons sur 5 échantillons différents de la surface textile, soit 25 courbes de frottement.

Le changement des échantillons s'est avéré nécessaire car certaines surfaces étaient rapidement abrasées en particulier avec les frotteurs linéiques pour lequel la surface de contact est bien inférieure à $1,5 \text{ cm}^2$ puisqu'elle est de $0,16 \text{ cm}^2$; sous une même charge normale les pressions de contact sont donc nettement plus élevées qu'avec les frotteurs pourvus d'une semelle. Cette usure est visible sur les Figure 43 et Figure 44 : une fois l'étoffe usée la pilosité est plus clairsemée et les fibres abîmées.

⁵⁹ Breugnot, C. (2005). *Contribution à la caractérisation mécanique du toucher des surfaces textiles à partir de critères neurosensoriels*. Université de Haute Alsace.

⁶⁰ Baussan, E., Bueno, M. A., Rossi, R. M. & Derler, S. (2010). Experiments and modelling of skin-knitted fabric friction. In *Wear* (vol. 268, pp. 1103-1111). Elsevier.

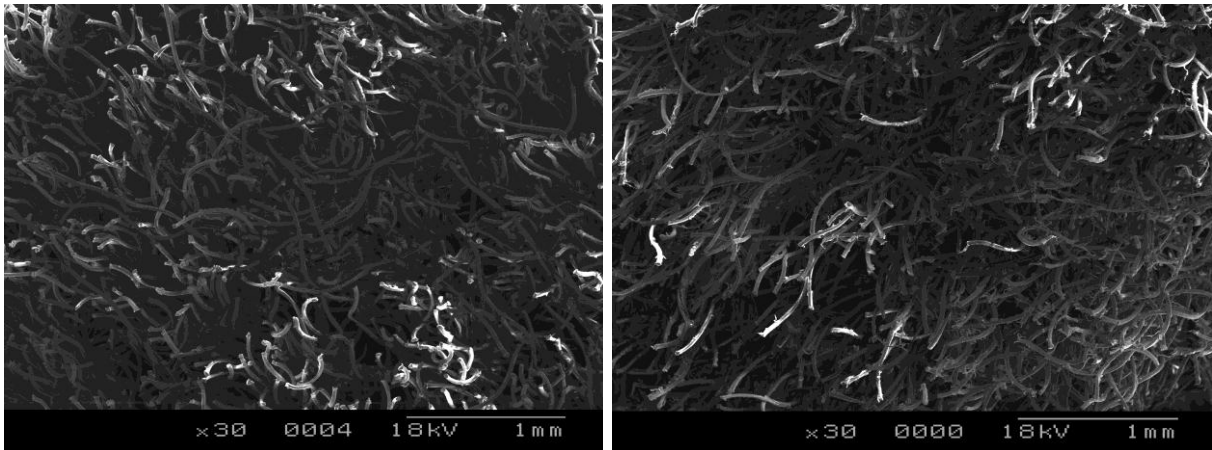


Figure 43 : Image MEB grossies 30 fois du velours V2 : étoffe non usée à gauche) et étoffe usée (à droite) étoffe usée).

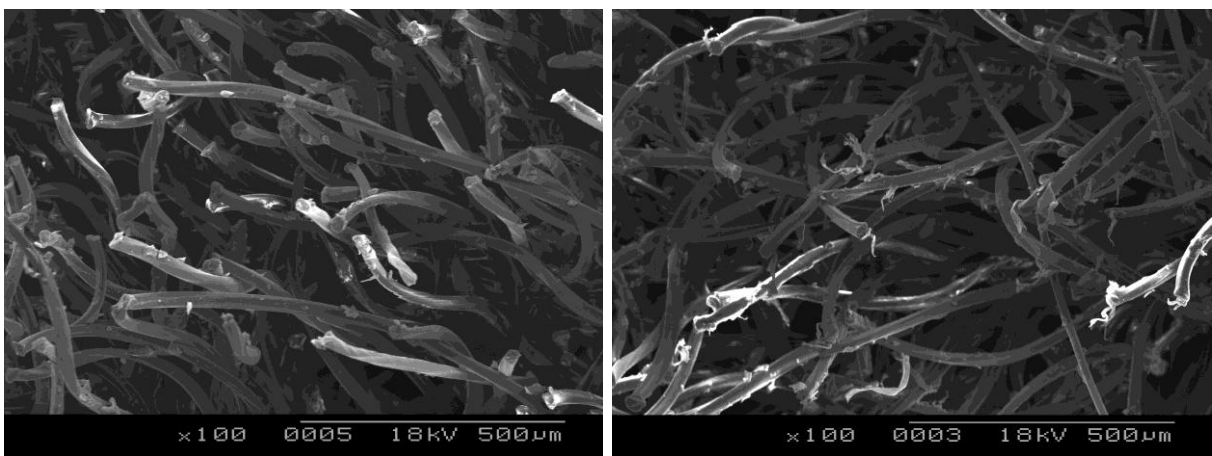


Figure 44 : Image MEB du velours du V2 : étoffe non usée (à gauche) et étoffe usée (à droite).

Dans la même finalité, nous avons veillé à ne pas réaliser plusieurs essais sur la même zone d'un échantillon. Pour s'affranchir d'écarts dus au lancement de l'essai (arrangement des poils lorsque l'on place le frotteur, ...), deux cycles aller et retour de frottement sont effectués avant de réaliser la mesure.

2.3.3 Analyse d'une courbe type

Lors de cette étude, nous avons travaillé avec des surfaces textiles qui pouvaient présenter une orientation au niveau de leur pilosité superficielle. Les essais ont été réalisés de telle sorte que la direction du mouvement soit toujours identique au regard de l'orientation de la pilosité. La Figure 45 présente une courbe type de frottement obtenue sur un échantillon du velours V1 réalisée avec un frotteur de largeur 21,7 mm et de longueur 6,9 mm. Sous le graphe est ajouté le profil de vitesse associé lorsque le déplacement va du sens poil au sens rebrousse-poil. La zone de vitesse de frottement constante représente une partie importante du cycle.

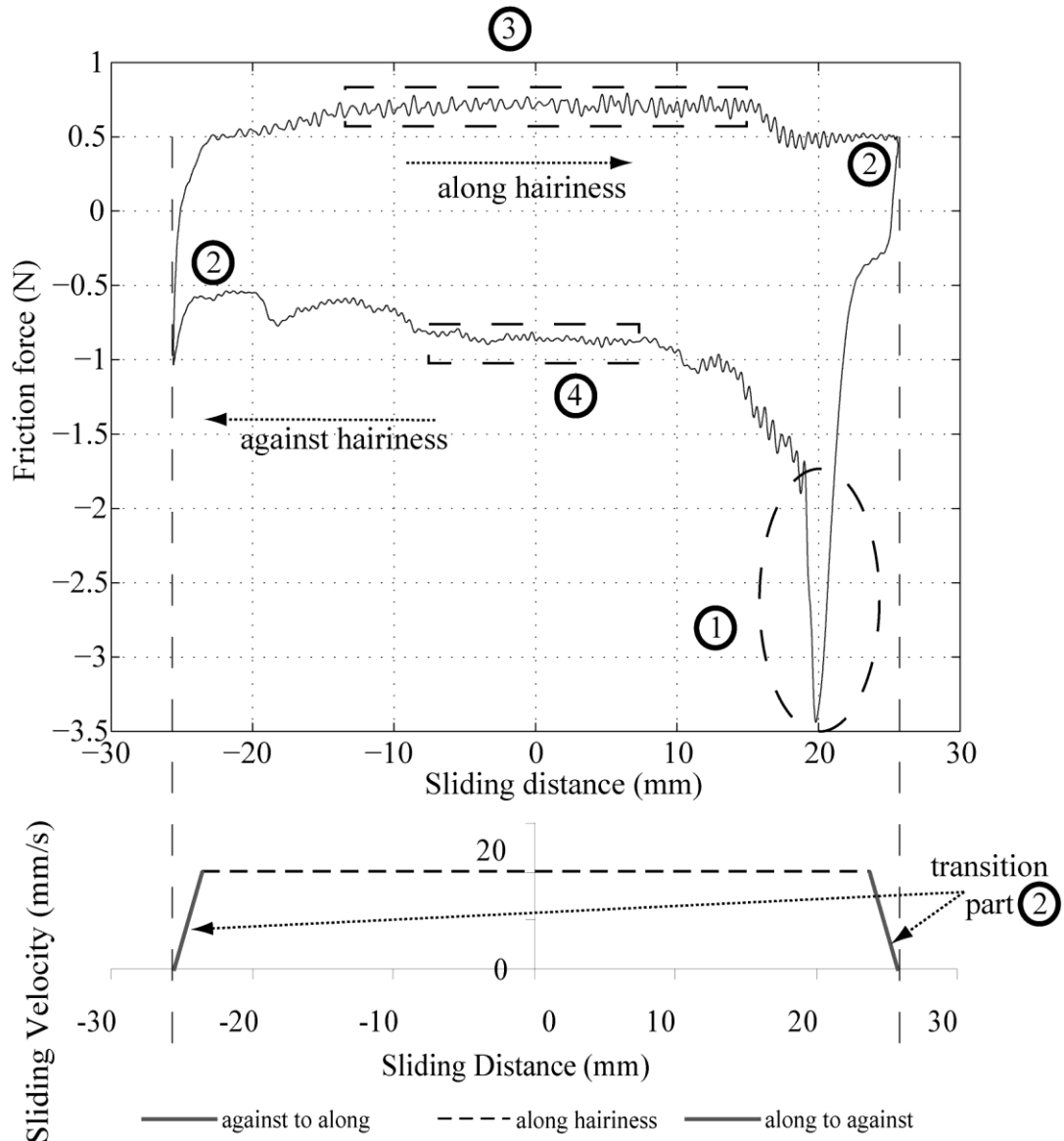


Figure 45 : Courbe type de frottement avec courbe de vitesse.

La première observation de cette courbe montre une nette différence entre sa partie supérieure (along hairiness main direction), qui correspond au frottement suivant l'orientation naturelle de la pilosité (sens poil) et sa partie inférieure (against hairiness) où au contraire, l'orientation de la pilosité est dans le sens inverse au déplacement du frotteur (sens rebrousse-poil). Ceci explique que la force de frottement soit légèrement plus importante lors d'un déplacement du frotteur dans le sens rebrousse-poil. Nous observons également que, lors du changement de sens (le frotteur passe du sens poil au sens rebrousse-poil), une nette augmentation de la force de frottement apparaît. Elle traduit la force nécessaire pour retourner la pilosité dans le sens contraire à son orientation naturelle (Figure 45 zone n°1).

Quelques millimètres avant les changements de direction du mouvement, les zones de transition présentent des évolutions particulières de la force de frottement. En effet, avant chaque changement de sens (chaque demi-cycle), nous observons une zone où la force mesurée est légèrement plus faible que dans le reste du cycle (Figure 45 zones n°2). Ces deux zones correspondent à l'endroit où les poils frottés ne sont jamais libérés derrière le frotteur. En fin de déplacement du frotteur dans une direction, ces poils conservent alors leur orientation car ils ne sont pas frottés dans une direction puis dans l'autre à chaque demi-cycle. La force de frottement de ces zones de l'échantillon est donc plus faible. La longueur de cette zone correspond à la longueur du frotteur utilisé (Figure 46).

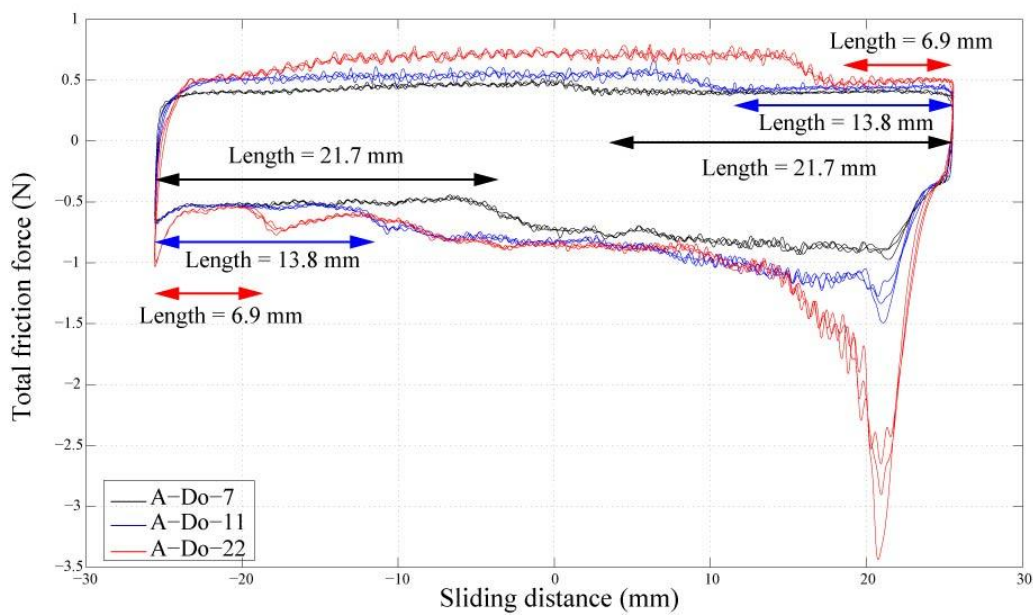


Figure 46 : Graphe présentant l'influence de la longueur du frotteur sur les zones 2 (Figure 45) lors du cycle de frottement. A-Do-7 (frotteur de longueur 6,9 mm), A-Do-11 (frotteur de longueur 13,8 mm) et A-Do-22 (frotteur de longueur 21,7 mm).

Juste après le changement de sens de déplacement, la force de frottement s'annule avant de changer également de direction. Les poils tendent alors à repousser le frotteur dans le sens inverse.

Dans cette étude, nous avons choisi de nous intéresser à la zone de régime établi, c'est-à-dire en dehors des phases d'accélération et de décélération du frotteur et des zones transitoires dues au changement de sens du mouvement. Par conséquent, la zone d'étude correspond aux zones 3 pour le sens poil et 4 pour le sens rebrousse-poil de la Figure 45.

Pour faciliter la lecture et le traitement des courbes obtenues, nous avons convenu de toujours orienter les échantillons dans le même sens par rapport à la platine de translation et

de réaliser l'acquisition des données en débutant toujours du même côté. Pour les surfaces textiles présentant une pilosité orientée (les velours et la bouclette), le sens aller sera le sens poil (Figure 45 : along hairiness) et le sens allant dans la direction contraire à l'orientation principale de la pilosité est le sens retour (Figure 45 : against hairiness).

Nous avons observé sur les courbes de frottement de oscillations récurrentes, de faible amplitude et espacées régulièrement (Figure 47).

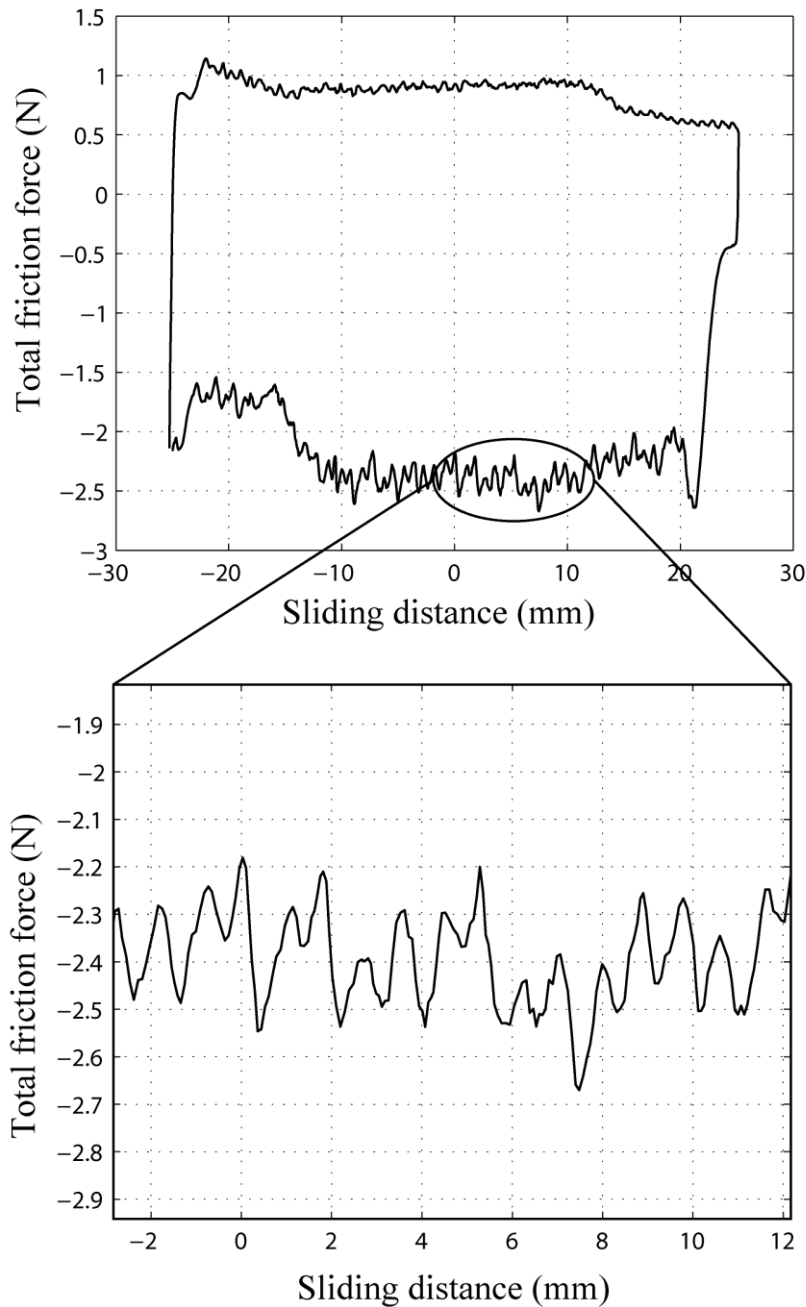


Figure 47 : Graphique de frottement en fonction du déplacement (en haut) et zoom sur une partie de la courbe (en bas).

Chapitre n°2 : Descriptif des méthodes de mesures et matériaux.

Nous avons cherché l'origine de ces petites oscillations. Elles peuvent provenir soit de la surface textile, soit d'une fréquence propre du système en vibration. Nous observons que l'intervalle entre les oscillations (de crête haute à crête haute, environ 2 pour 2 mm) correspond au passage successif des touffes de poils (Figure 48).

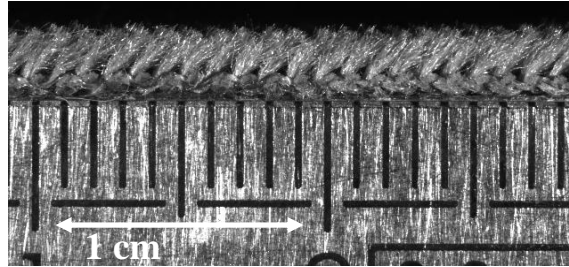


Figure 48 : Velours V1 avec échelle montrant l'espacement des touffes de poils.

La courbe ci-dessous (Figure 49) représente l'autospectre, en transformée de Fourier rapide, de la force de frottement pour le velours V1 avec le frotteur parallélépipédique de largeur 11 mm à une vitesse de 20 mm.s^{-1} .

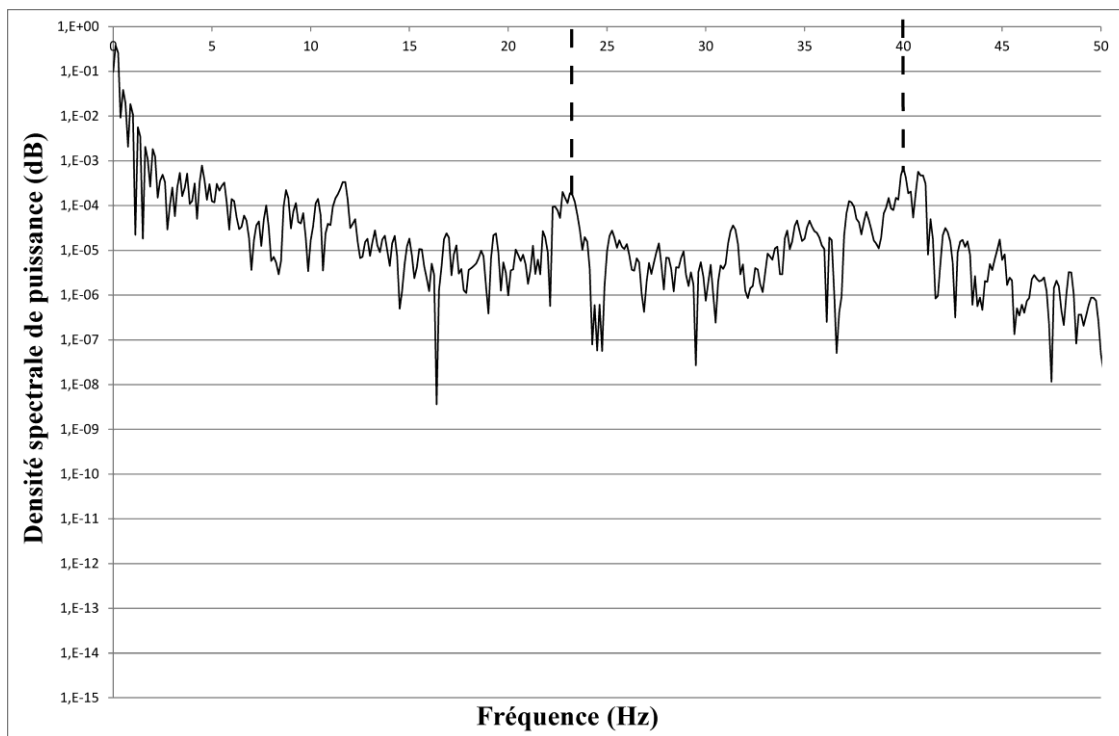


Figure 49 : Représentation de l'autospectre de la force de frottement.

Sur cette courbe nous retrouvons deux fréquences distinctes. La première, à 23 Hz, correspond pour la vitesse donnée à une distance de 0.88 mm et la seconde, à 40 Hz, correspond à une distance de 0.5 mm. Pour la première fréquence nous identifions la distance entre deux touffes de poils.

Chapitre n°2 : Descriptif des méthodes de mesures et matériaux.

étoffe	V1											
	A-Do-20110		A-Do-10120		A-Do-11					A-L-17		
distance de frottement (mm)	50				30					50		
vitesse de frottement (mm.s ⁻¹)	20				20					20	10	02
masse (g)	300	300	215	173	123	100	50	225	225	225		
freq n°1 (Hz)	22	23	23	23	23	22	23	23	11,3	2,3		
distance n°1 (mm)	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9		
freq n°2 (Hz)	37	37	40	45	49	51	59	75	76	75		
dist n°2 (mm)	0,5	0,5	0,5	0,4	0,4	0,4	0,3	0,3	0,15	0,05		

Tableau 8 : tableau des fréquences importantes dans le signal de frottement.

Nous avons vérifié dans le domaine fréquentiel (Tableau 8) si nous pouvions observer ce phénomène pour des essais réalisés à différentes masse et vitesse et effectivement nous observons une fréquence correspondant aux touffes de poils (fréquence n°1) et une seconde qui dépend de la masse appliquée (fréquence n°2).

2.3.4 Influence de la rugosité du frotteur

Lors des essais de frottement menés avec le tribomètre, nous avons étudié l'influence de la rugosité des frotteurs sur le signal de frottement obtenu. Nous avons fait des essais avec un frotteur dont la semelle est brute après usinage (A-Do-11ru, $R_a = 0,78 \pm 0,01$ microns) sur différentes surfaces textiles, les velours V1, V2 et la polaire à une pression de 15 kPa. Une deuxième série d'essais a été réalisée avec le même frotteur après polissage doux (toile). Nous avons poli la surface de la semelle de frotteur pour obtenir une rugosité plus faible (A-Do-11, $R_a = 0,20 \pm 0,01$ microns). Les nouveaux essais nous ont permis d'obtenir des valeurs de force de frottement plus faible d'au moins 10% (Figure 50).

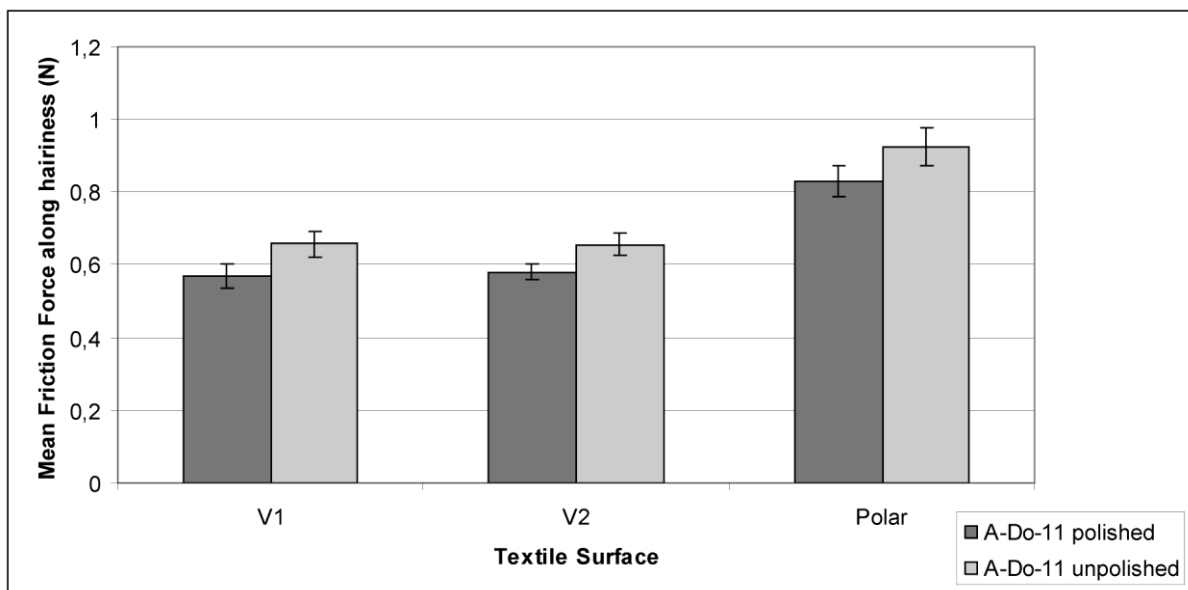


Figure 50 : Effet de la rugosité du frotteur (cas du frotteur A-Do-11) sur la force de frottement.

Nous observons donc que l'état de surface, et plus spécifiquement la rugosité, a une influence sur la force de frottement. Le fait que la force de frottement soit supérieure avec le frotteur non poli, montre que le mécanisme le plus influant n'est pas l'adhésion.

Nous avons établi un protocole de polissage des semelles des frotteurs pour que tous les tests soient effectués dans des conditions identiques.

2.3.5 Etude sur la planéité du porte échantillon.

Afin de vérifier la planéité du porte-échantillon fixé sur la table de translation, nous avons mesuré le déplacement vertical du frotteur en différents points de sa surface. Nous avons constaté qu'il existe une zone importante du porte-échantillon pour laquelle la planéité est de 0,0225 mm (Figure 51). Pour tous les essais de frottement réalisés dans la suite de cette étude nous utilisons uniquement cette zone du porte-échantillon, afin d'avoir le moins d'effet extérieur sur le déplacement vertical (DeplaV) du frotteur. On positionne donc le frotteur à 30 mm dans le sens perpendiculaire au mouvement (platine), le déplacement vertical total sur un trajet (DeplaH) du frotteur est alors de 0,045 mm.

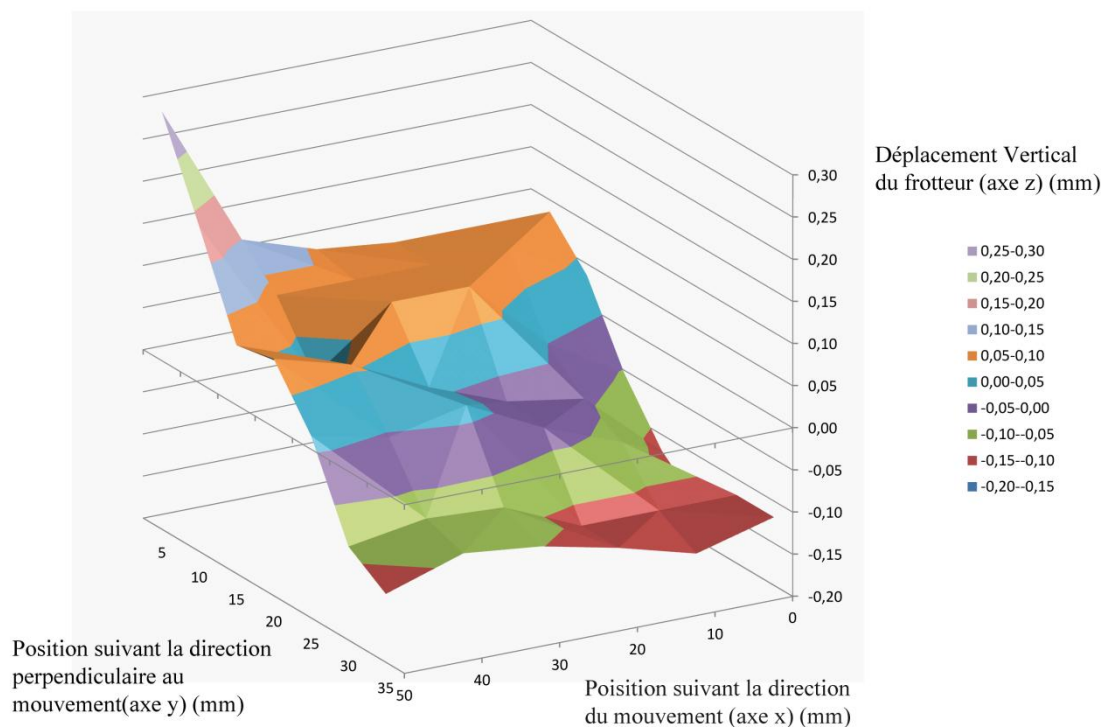


Figure 51 : Graphique représentant le déplacement vertical du frotteur lorsque'il se déplace sur le porte-échantillon (origine arbitraire).

Chapitre 3 :

Mise en place et validation du modèle de frottement

3 Chapitre 3 : Mise en place et validation du modèle de frottement

L'objectif de ce chapitre est de mettre en place une méthode permettant de mesurer les propriétés à l'interface du contact entre un frotteur, considéré comme infiniment rigide, et une surface pileuse. Pour ce faire un modèle expérimental est avancé, simplifié puis validé.

3.1 Modèle mis en place et simplifications préliminaires

Les mécanismes de frottement peuvent être décomposés en deux éléments distincts, l'adhésion et la déformation. Ce phénomène a été étudié dans la théorie du frottement adhésif de Bowden et Tabor dans le cas d'une rayure⁶¹. Cette théorie a été complétée par Childs⁶² pour une rayure dans le domaine plastique et par Gauthier⁶³ pour le domaine elasto-plastique. (cf. Équation 16 et Équation 19) :

$$F_{tot} = F_{def} + F_{adh} = S_c \cdot p + A_r \cdot \tau$$

Équation 25

Avec,

F_{adh} est la composante d'adhésion ; elle est due aux interactions physico-chimiques entre le frotteur et la surface,

A_r : l'aire réelle de contact,

τ : la contrainte de cisaillement de l'interface liée au couple frotteur et surface testée,

F_{def} est la composante de déformation et est la force nécessaire pour rayer un matériau ductile,

S_c est la section de la rainure,

p la pression de contact.

Nous cherchons à appliquer cette théorie aux surfaces textiles. Lorsqu'une surface textile est en interaction avec un frotteur, considéré comme infiniment rigide et sous une charge donnée, celui-ci s'enfonce dans la pilosité et la déforme. Aussi pouvons-nous faire l'hypothèse que la force de frottement totale est la combinaison des forces s'appliquant sur les

⁶¹ Bowden, F. P. & Tabor, D. (1986). *The friction and lubrication of solids*. Clarendon press.

⁶² Childs, T. H. C. (1970). The sliding of rigid cones over metals in high adhesion conditions. In *International Journal of Mechanical Sciences* (pp. 393–403). Elsevier.

⁶³ Gauthier, C., Lafaye, S. & Schirrer, R. (2001). Elastic Recovery of a Scratch in a Polymeric Surface : Experiments and Analysis. In *Tribology International* (vol. 34, pp. 469-479). Elsevier.

différentes surfaces du frotteur. Il nous a paru limpide que ces surfaces sont : la face avant du frotteur (la face d'attaque du frotteur dans le sens du déplacement : (F_{front}), la face arrière (F_{rear}), la semelle (F_{bottom}) ainsi que les surfaces latérales ($F_{lateral}$) (Figure 52).

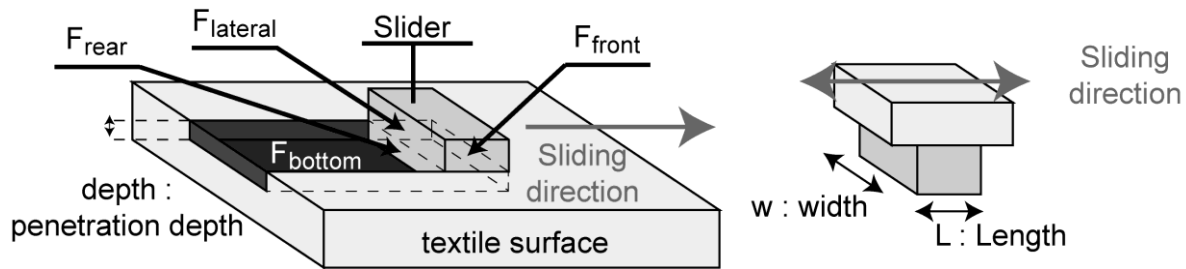


Figure 52 : Localisation des forces sur les différentes faces du frotteur.

Nous pouvons alors écrire l'équation générale de la force de frottement sous la forme :

$$F_{tot} = F_{front} + F_{rear} + F_{bottom} + F_{lateral}$$

Équation 26

Par le biais d'une étude expérimentale menée en faisant varier les conditions d'essais, nous cherchons à définir les composantes de cette équation et à déterminer l'influence de chacun d'entre eux. Nous avons utilisé le tribomètre linéaire alternatif décrit précédemment, dans sa configuration de chargement avec une masse morte, pour effectuer ces tests.

Les essais que nous allons présenter ont été faits, sauf contre-indication, dans les conditions expérimentales que nous avons définies précédemment : une vitesse du frotteur de 20 mm.s^{-1} , une accélération de 50 mm.s^{-2} , une distance de frottement de 50 mm, deux charges normales de 0,5 et 2,25 N donnant une pression moyenne de contact respectivement 3 et 15 kPa. Nous avons effectué cinq essais sur cinq échantillons pour chaque résultat présenté. Ces investigations ont été essentiellement faites avec le velours V1.

3.1.1 Influence des effets de bords latéraux sur le frottement

Afin de vérifier l'influence des forces latérales sur la force de frottement totale, nous avons réalisé des essais avec des frotteurs de même aire dont seules les surfaces de contact latérales étaient différentes. Le frotteur de référence est le frotteur parallélépipédique chanfreiné à l'avant et à l'arrière (A-Dc-11). Le frotteur spécifique dédié à cette étude a été réalisé en scindant en deux la partie active du frotteur de référence dans la direction du frottement de sorte à doubler les surfaces latérales (frotteur A-Dc-2la-11, Figure 53). Ce troisième frotteur utilisé est proche du A-Dc-11 mais avec des bords droits.

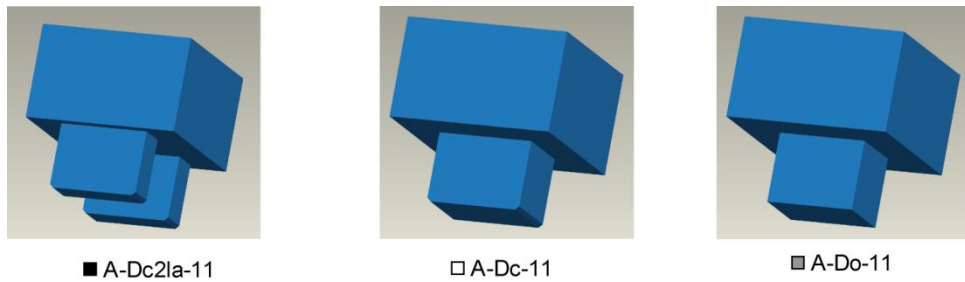


Figure 53 : Frotteurs A-Dc2la-11, A-Dc-11 et 1-Do-11

Les dimensions de deux parallélépipèdes identiques ainsi formés ont été choisies pour respecter le fait que la largeur des faces avant et arrière, ainsi que l'aire de la semelle du frotteur soient identiques pour les trois frotteurs (A-Dc-11, A-Do-11 et A-Dc-2la-11). Les résultats sont donnés dans la Figure 54 et la Figure 55.

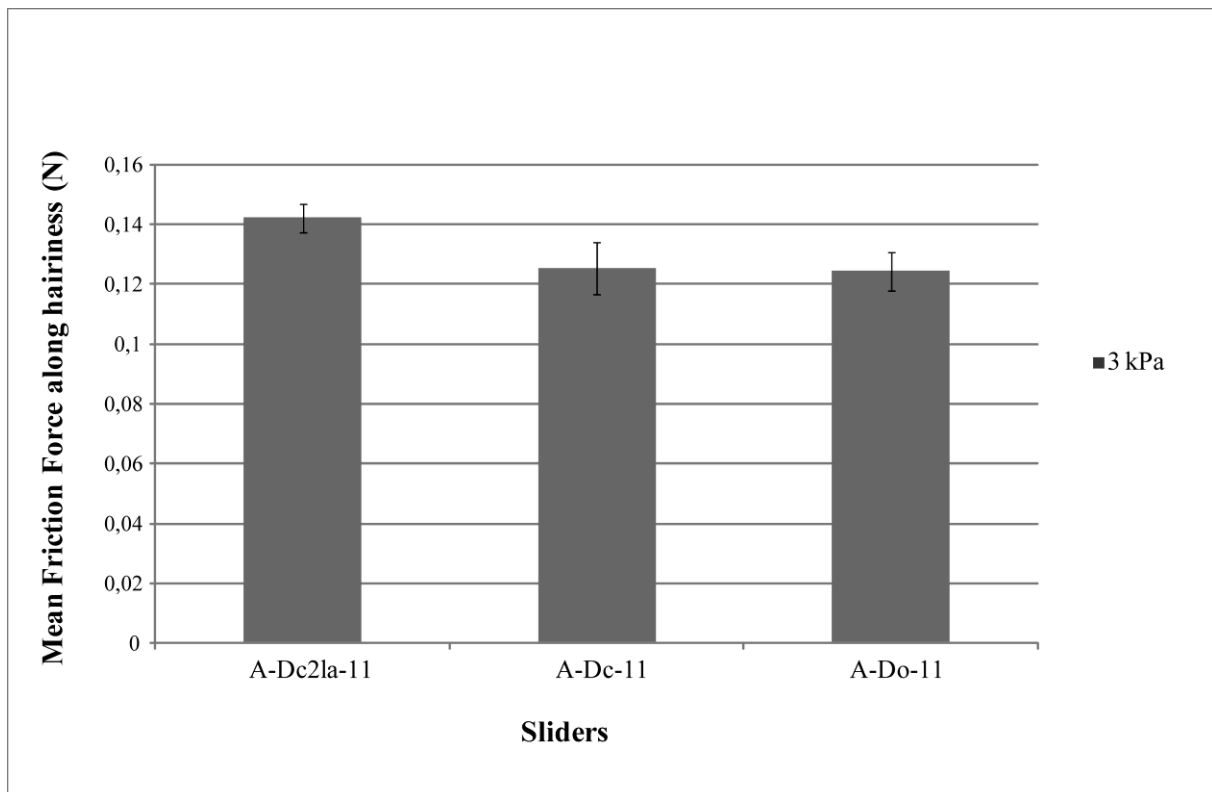


Figure 54 : Force de frottement dans le sens poil pour les frotteurs A-Dc2la-11, A-Dc-11 et 1-Do-11 à 3 kPa.

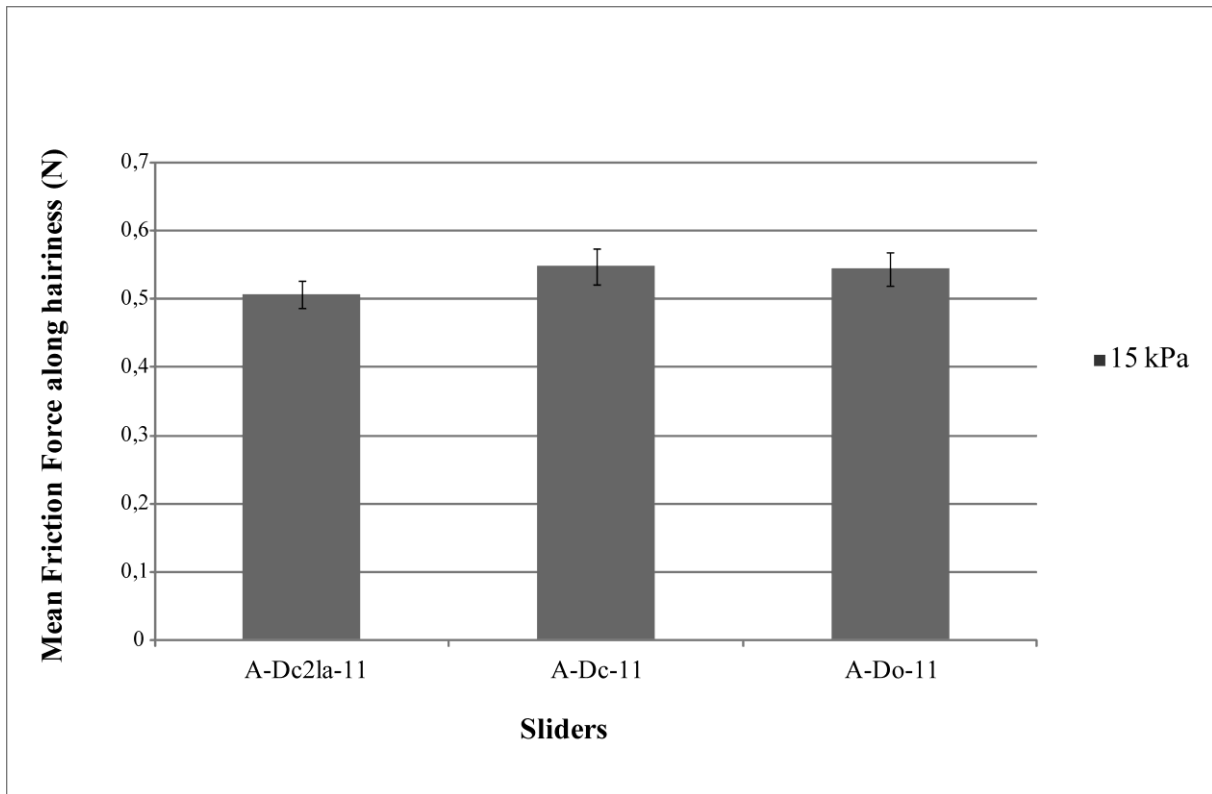


Figure 55 : Force de frottement dans le sens poil pour les frotteurs A-Dc2la-11, A-Dc-11 et 1-Do-11 à 15 kPa.

Nous observons que les écarts entre les différentes valeurs de force de frottement sont inférieurs à 10%. Nous pouvons donc admettre que dans le sens poil les effets de bords, donc les forces s'exerçant sur les faces latérales du frotteur ($F_{lateral}$), sont négligeables.

De plus, une observation nous a permis de visualiser le peu d'effet des faces latérales sur la surface. En effet, non seulement il n'y a pas de contacts latéraux entre la pilosité et le frotteur donc pas de frottement, mais en plus le frotteur ne déforme pas latéralement la surface frottée dans le cas du velours et peu dans celui de la polaire. Le caractère discret de la pilosité est ici prépondérant. Dans le cas de la polaire, l'enchevêtrement de la pilosité est à l'origine de la faible déformation latérale observée dans la Figure 56.

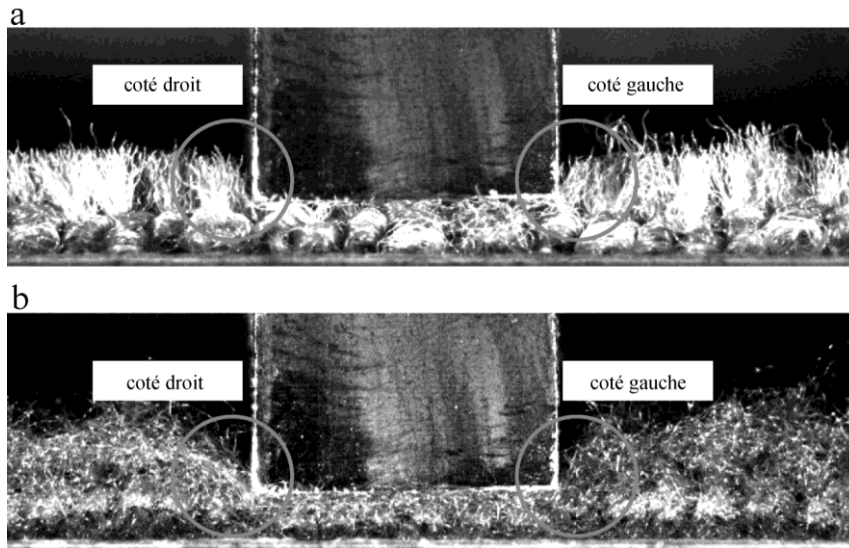


Figure 56 : Photographie du contact surface textile / frotteur vue de face, (a) pour le velours V1 et (b) la polaire.

3.1.2 Influence de la face arrière sur le frottement

Par la suite nous nous sommes intéressés aux effets de la face arrière du frotteur sur les forces de frottement mesurées. Nous avons choisi d'utiliser des frotteurs de même largeur d'attaque et de semelle de même aire apparente. Là encore nous avons joué sur les géométries des frotteurs utilisés. Nous avons pris comme référence un frotteur droit (A-Do-11, Figure 57) que nous avons décliné en un frotteur avec un chanfrein à l'avant et à l'arrière (A-Dc-11) et un frotteur avec un chanfrein sur une seule de ses faces. Ce dernier frotteur a été utilisé dans les deux sens possibles : le chanfrein sur la face d'attaque (A-Dcatt-11) ou le chanfrein à l'arrière (A-Dcarr-11). L'ajout d'un chanfrein permet de modifier la géométrie de la face d'attaque ou de la face arrière et ainsi d'envisager une modification des composantes des forces de frottement liées à ces faces.

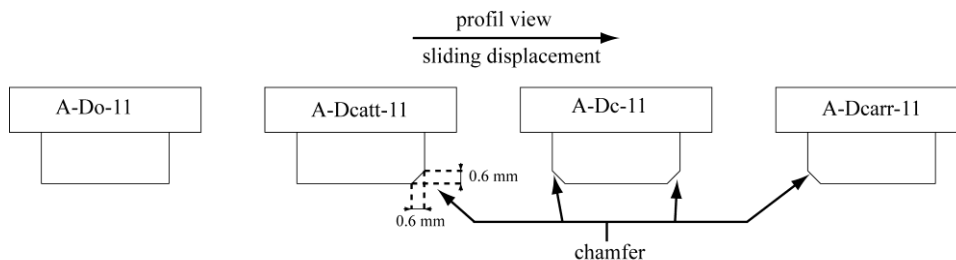


Figure 57 : frotteur avec et sans chanfrein, vue de profil.

Les essais ont été menés sur le velours (V1) pour les deux pressions prédéfinies. Dans un premier temps nous avons les résultats de la force de frottement dans le sens de la pilosité (sens poil, Figure 58 à 3 kPa et Figure 59 à 15 kPa).

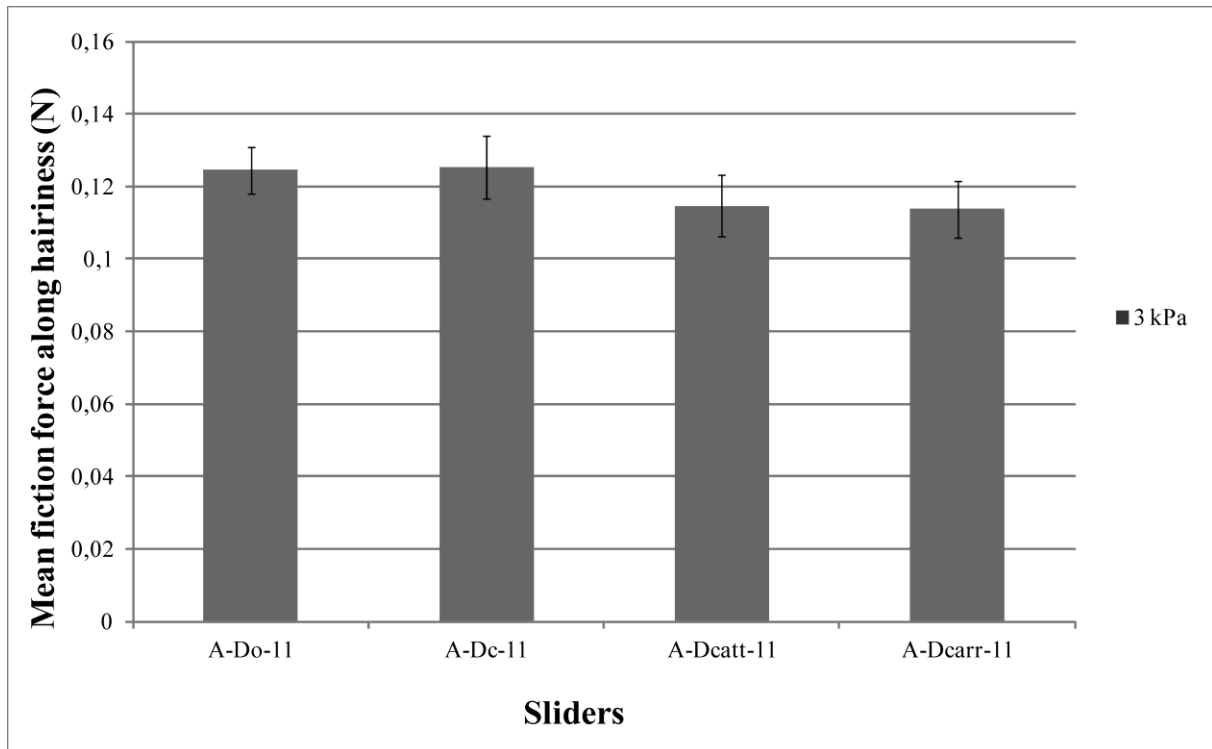


Figure 58 : Effet de la forme de la face avant et/ou arrière du frotteur sur la force de frottement totale lors d'un déplacement dans le sens poil à 3 kPa : frotteur sans chanfrein (A-Do-11), avec chanfrein à l'avant et à l'arrière (A-Dc-11), uniquement à l'avant du glissement (A-Dcatt-11) et à l'arrière (A-Dcarr-11).

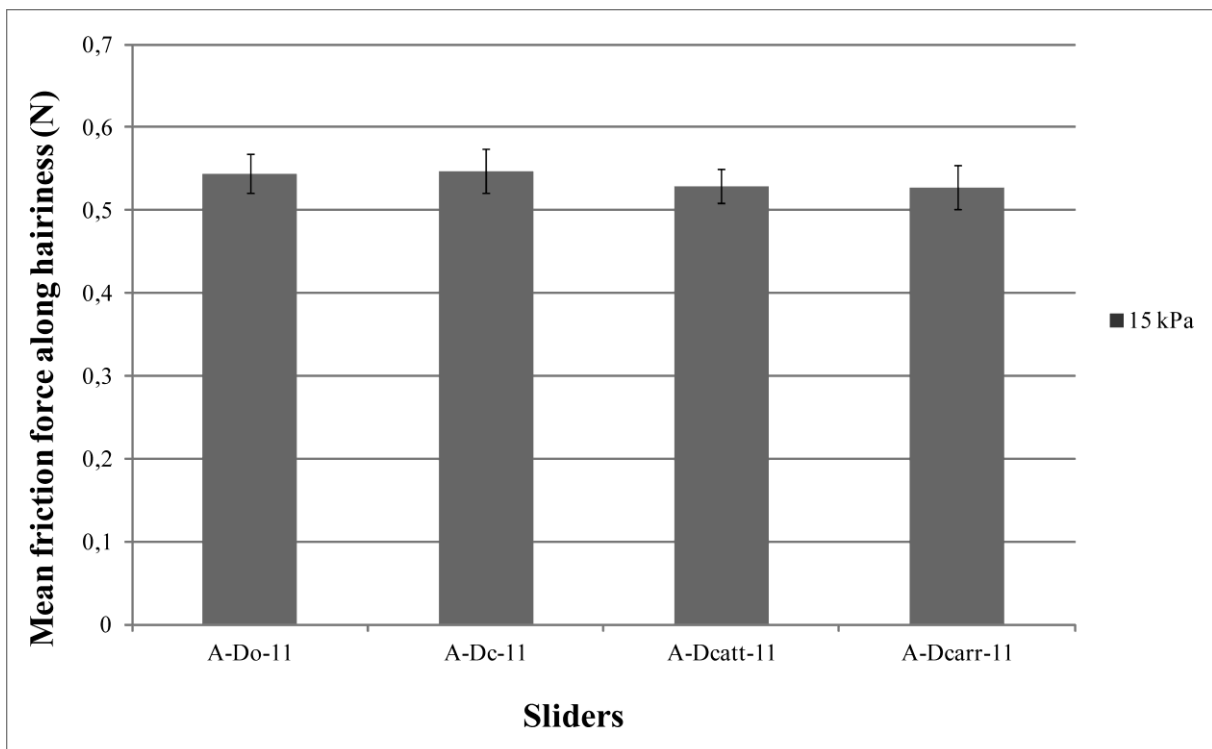


Figure 59 : Effet de la forme de la face avant et/ou arrière du frotteur sur la force de frottement totale lors d'un déplacement dans le sens poil à 15 kPa : frotteur sans chanfrein (A-Do-11), avec chanfrein à l'avant et à l'arrière (A-Dc-11), uniquement à l'avant du glissement (A-Dcatt-11) et à l'arrière (A-Dcarr-11).

Nous constatons que les écarts entre les différentes forces mesurées sont inférieurs à 10%. Nous pouvons alors admettre que le chanfrein n'a pas d'effet sur la force de frottement lorsque le frottement s'effectue dans le sens correspondant à l'orientation principale de la pilosité, que ce chanfrein soit à l'avant ou à l'arrière. Nous pouvons observer sur la Figure 60 pour un velours et une polaire il n'y a pas de contact entre la face arrière du frotteur et la pilosité contrairement à la face avant.

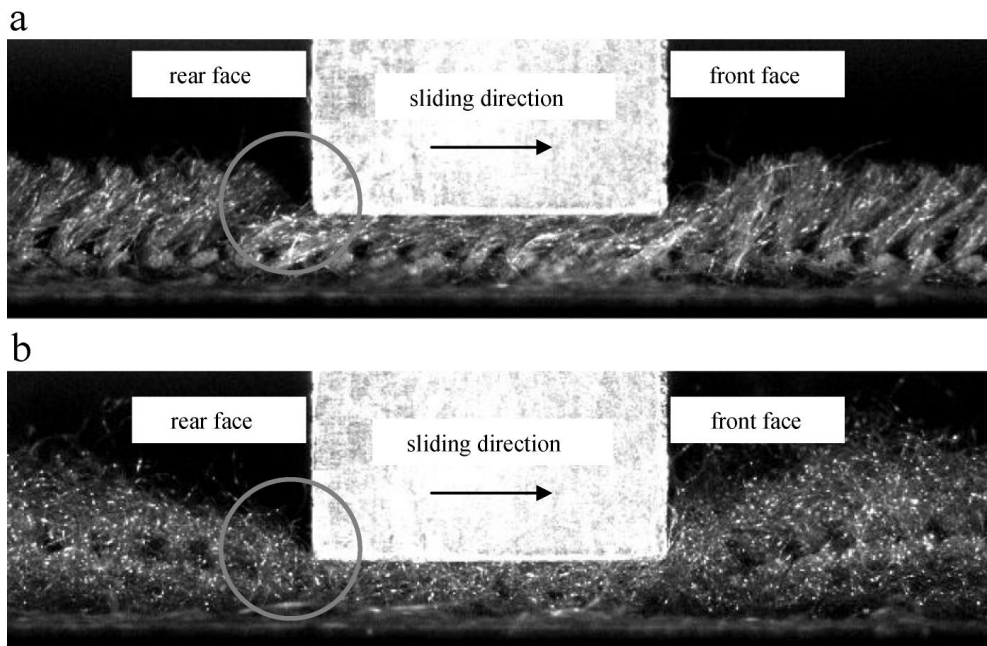


Figure 60 : Photographie du contact surface textile / frotteur vue de profil durant le frottement, (a) pour le velours V1 dans le sens poil et (b) la polaire avec le frotteur A-Do-11.

La force s'exerçant sur la face arrière du frotteur (F_{rear}) est donc négligeable dans le sens poil.

Nous pouvons alors nous intéresser au frottement dans le sens opposé à l'orientation principale de la pilosité (sens rebrousse-poil, Figure 61 à 3 kPa et Figure 62 à 15 kPa).

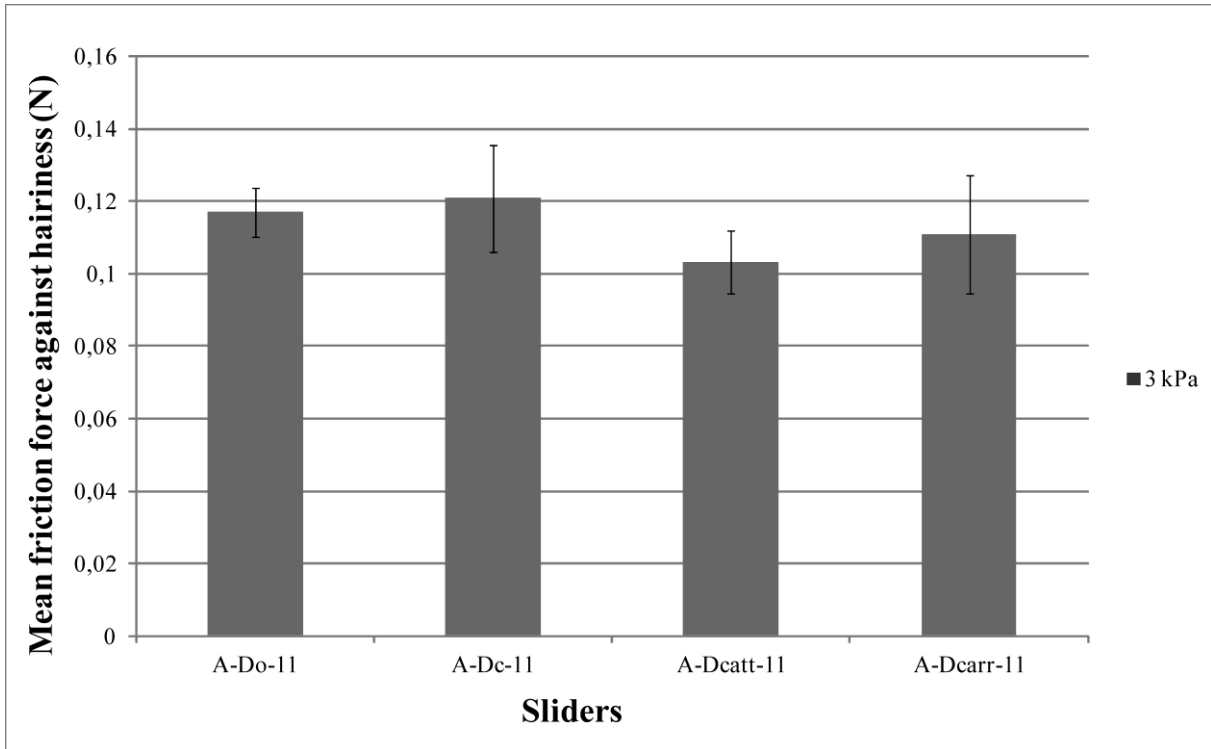


Figure 61 : Effet de la forme de la face avant et/ou arrière du frotteur sur la force de frottement totale lors d'un déplacement dans le sens rebrousse-poil à 3 kPa : frotteur sans chanfrein (A-Do-11), avec chanfrein à l'avant et à l'arrière (A-Dc-11), uniquement à l'avant du glissement (A-Dcatt-11) et à l'arrière (A-Dcarr-11).

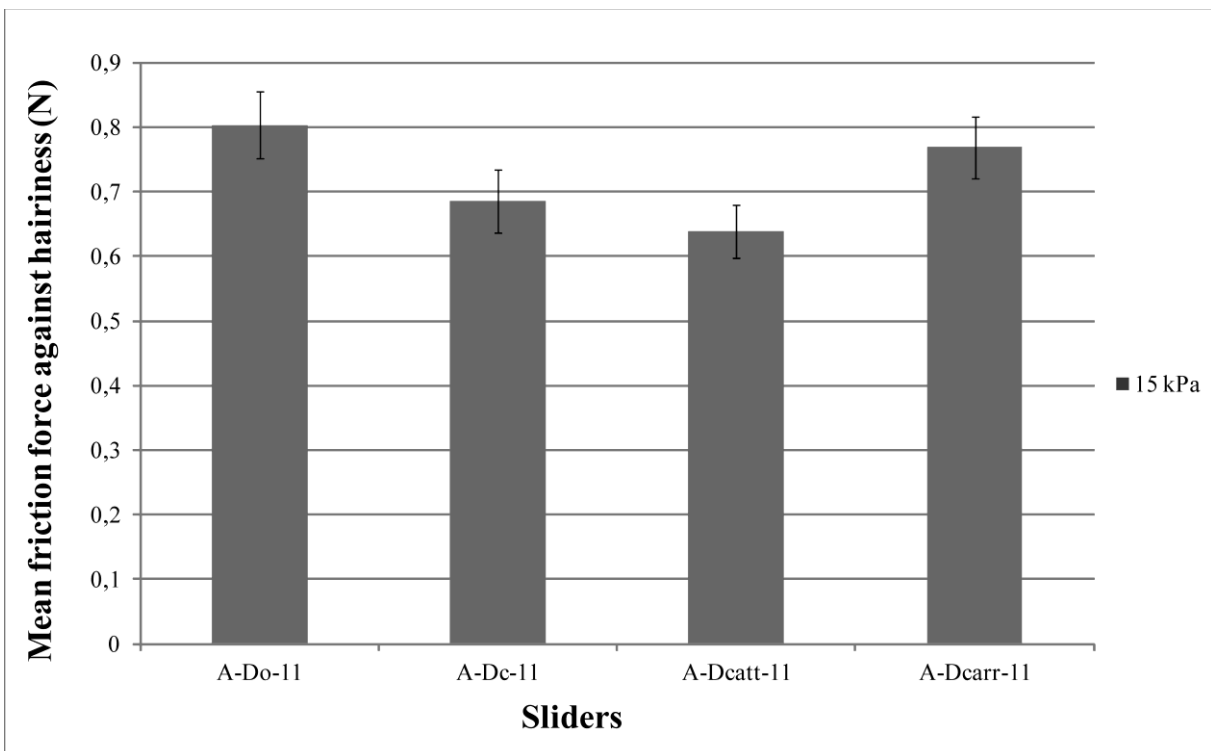


Figure 62 : Effet de la forme de la face avant et/ou arrière du frotteur sur la force de frottement totale lors d'un déplacement dans le sens rebrousse-poil à 15 kPa : frotteur sans chanfrein (A-Do-11), avec chanfrein à l'avant et à l'arrière (A-Dc-11), uniquement à l'avant du glissement (A-Dcatt-11) et à l'arrière (A-Dcarr-11).

Dans ce cas où nous nous intéressons au sens rebrousse-poil, nous pouvons observer deux tendances de résultats. Les frotteurs ayant une face d'attaque droite présentent, quelles que soient leurs géométries arrières (A-Do-11 et A-Dcarr-11), des forces de frottement similaires à 15 kPa. Ceux qui, au contraire, présentent un chanfrein à l'avant occasionnent, quel que soit la face (A-Dc-11 et A-Dcatt-11), des forces de frottement similaires et plus faibles. Ces différences s'expliquent par le fait que la face avant doit retourner les poils, dont l'orientation principale s'oppose au déplacement du frotteur en rebrousse-poil : le chanfrein facilite ce retournement. A 3 kPa, la différence entre les forces est plus faible, la présence du chanfrein est négligeable à faible charge.

Nous pouvons en conclure que dans le sens poil la force à l'arrière du frotteur est négligeable, et que le chanfrein à l'avant n'a pas non plus d'influence.

En rebrousse-poil la force s'exerçant sur la face arrière a peu d'incidence sur la force de frottement, mais à l'avant la géométrie influence les forces de frottement mesurées.

- Modèle simplifié

Nous avons donc pu éliminer les composantes de force à l'arrière et sur les bords du frotteur dans le sens poil, la répartition des forces sur les surfaces du frotteur s'écrit alors :

$$F_{tot} = F_{front} + F_{bottom}$$

Équation 27

3.2 Validation du modèle pour les surfaces textiles pileuses

3.2.1 Différences en fonction de la configuration du tribomètre

Dans la partie dispositif expérimental (3.1) du chapitre 2, nous avons évoqué la particularité d'avoir deux configurations du tribomètre.

Une première configuration à charge fixe autorise le bras de mesure à avoir un déplacement vertical du frotteur. Dans cette configuration nous pouvons mesurer en temps réel la force de frottement tangentielle, le déplacement horizontal de la platine et le déplacement vertical du frotteur.

La seconde configuration à déplacement vertical bloqué, comme son nom l'indique, empêche la rotation du bras de mesure, celui-ci est bloqué à une altitude fixe. La force normale au frotteur est mesurée à l'aide d'un capteur de force piézo-électrique. Cette

configuration permet en temps réel de mesurer la force de frottement tangentielle, le déplacement horizontal de la platine et la force normale qui s'applique au frotteur durant un essai.

Ici, sont présentées les principales différences de chacune des configurations. Les courbes expérimentales, illustrées par la Figure 63, sont issues d'essais réalisés avec le velours V1 à une pression de 15 kPa, en utilisant un frotteur parallélépipédique sans chanfrein de largeur 10,8 mm en aluminium (A-Do-11), sur une distance de frottement de 50 mm, à une vitesse de $13,8 \text{ mm.s}^{-1}$ et une accélération de 50 mm.s^{-2} .

Sur la Figure 63 nous observons les courbes de force de frottement en fonction du déplacement horizontal du frotteur. Dans un premier temps nous remarquons que les deux courbes admettent une zone de mesure stable à vitesse constante dans le sens poil. Au retournement de la pilosité (passage du sens poil au sens rebrousse-poil) le pic de force est plus marqué avec le frotteur mobile. Lorsque le bras est mobile le frotteur retourne les poils. La force exercée par les poils sur le frotteur est alors suffisamment importante pour relever le frotteur. Dans le cas du frotteur fixe la force exercée par la pilosité lors du retournement est alors visible sur l'effort normal que subit le frotteur (Figure 64).

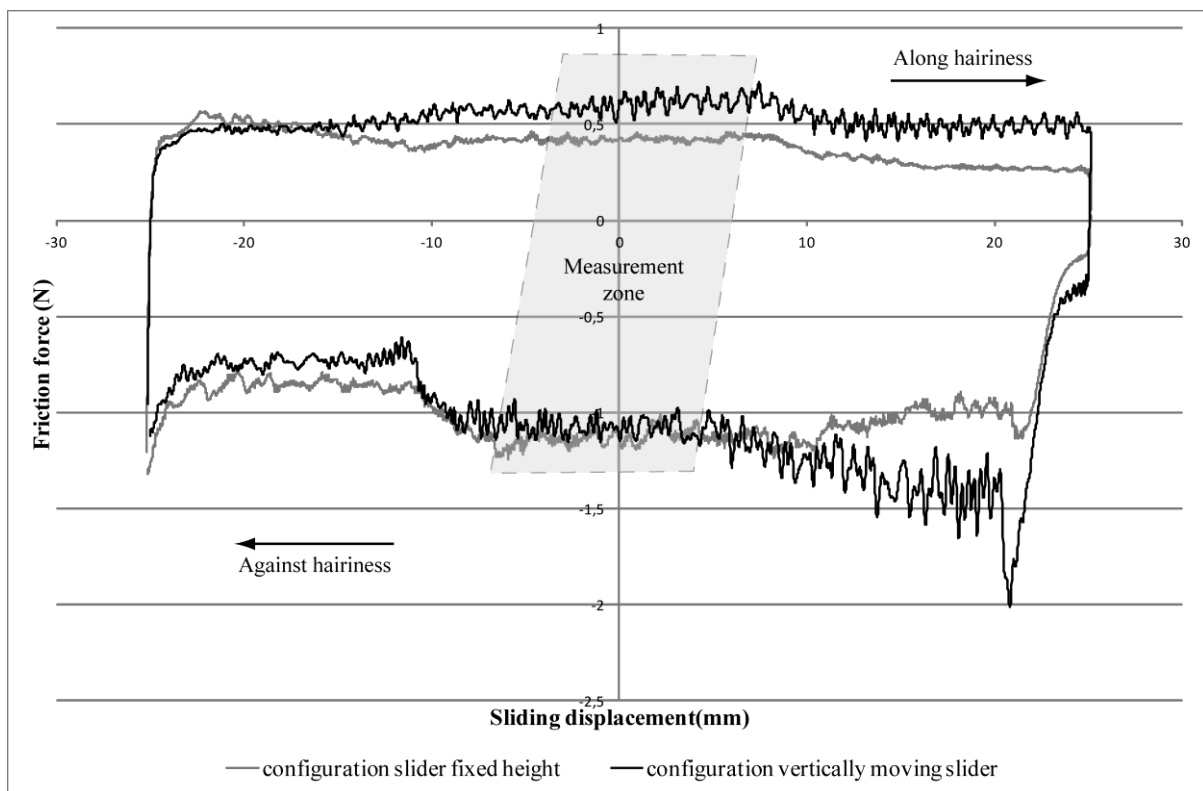


Figure 63 : Graphique représentant la force de frottement en fonction du déplacement horizontal pour les deux configurations du tribomètre : à frotteur mobile verticalement (chargement par masse morte) et à frotteur à altitude fixe (la force normale est alors mesurée).

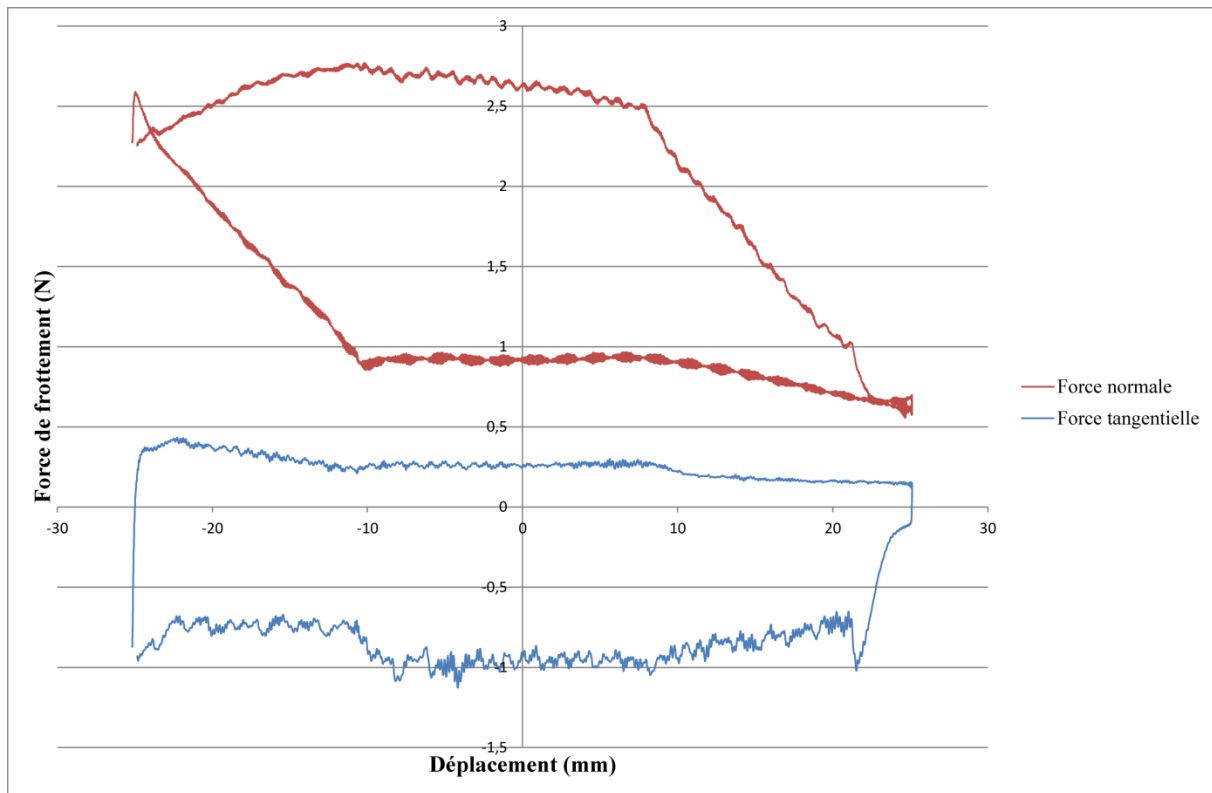


Figure 64 : Graphique représentant la force de frottement (force normale et force tangentielle) en fonction du déplacement horizontal pour la configuration du tribomètre à frotteur à altitude fixe.

La différence entre les deux configurations de chargement du frotteur s'observe principalement dans la Figure 65. La profondeur de pénétration du frotteur, dans la configuration où le frotteur est mobile, est comparée à la force normale exercée par la pilosité sur le frotteur lorsqu'il est fixe. Nous observons que dans le sens poil le frotteur s'enfonce dans la surface textile puis reste à une altitude presque constante dans la zone de mesure à vitesse constante. Lors du passage du sens poil au sens rebrousse-poil, c'est-à-dire la zone de retournement de la pilosité, le frotteur est soulevé par la pilosité pour se stabiliser dans la zone de mesure. Dans le cas du frotteur fixe, nous pouvons remarquer que la force normale évolue de façon similaire à la profondeur de pénétration lorsque le frotteur est mobile : dans le sens poil la force diminue pour atteindre un plateau dans la zone de mesure puis augmente au lors du passage au sens rebrousse-poil pour admettre un maximum dans la zone de mesure.

Les deux configurations du tribomètre ont une similitude : la profondeur de pénétration et la force normale évoluent de la même façon durant les tests. Nous pouvons donc en déduire que la force normale est liée à la profondeur de pénétration. Lorsque le frotteur s'enfonce dans la surface textile (cas du frotteur mobile à pression constante) la force

normale diminue (cas du frotteur fixe). En effet, si le frotteur a tendance à aider la pilosité à fléchir dans le sens de l'orientation principale de cette dernière, celle-ci aura donc peu de résistance à opposer au frotteur. A l'opposé, lors du passage du sens poil au sens rebrousse-poil, le frotteur va retourner les poils dans le sens contraire à leur orientation principale, ce qui va avoir pour effet de soulever le frotteur lorsqu'il est mobile, et d'augmenter la force normale lorsque le frotteur est bloqué.

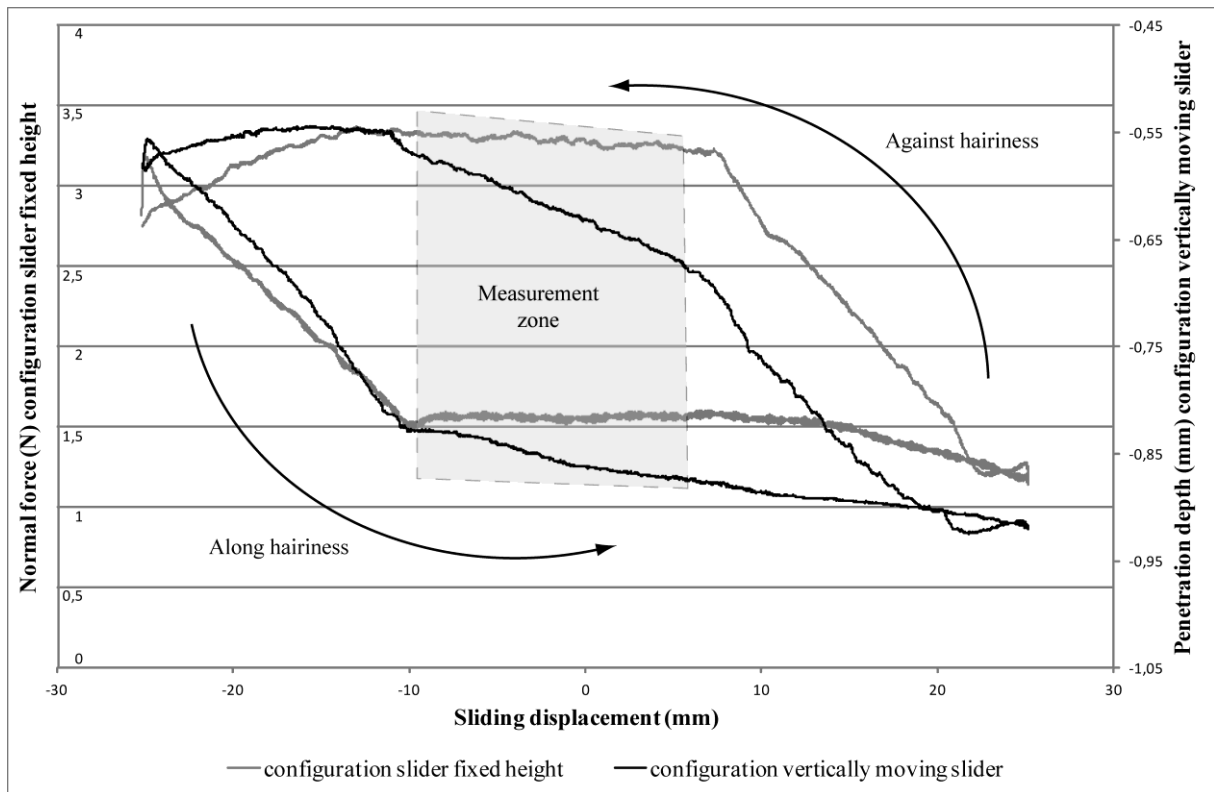


Figure 65 : Graphique représentant le déplacement vertical (configuration frotteur mobile) et la force normale (configuration frotteur fixe) en fonction du déplacement horizontal.

Nous pouvons constater dans la Figure 66 que les coefficients de frottements des deux configurations sont très proches dans le sens poil ce qui montre bien que la profondeur de pénétration dans la surface textile et la force normale sont intimement liées.

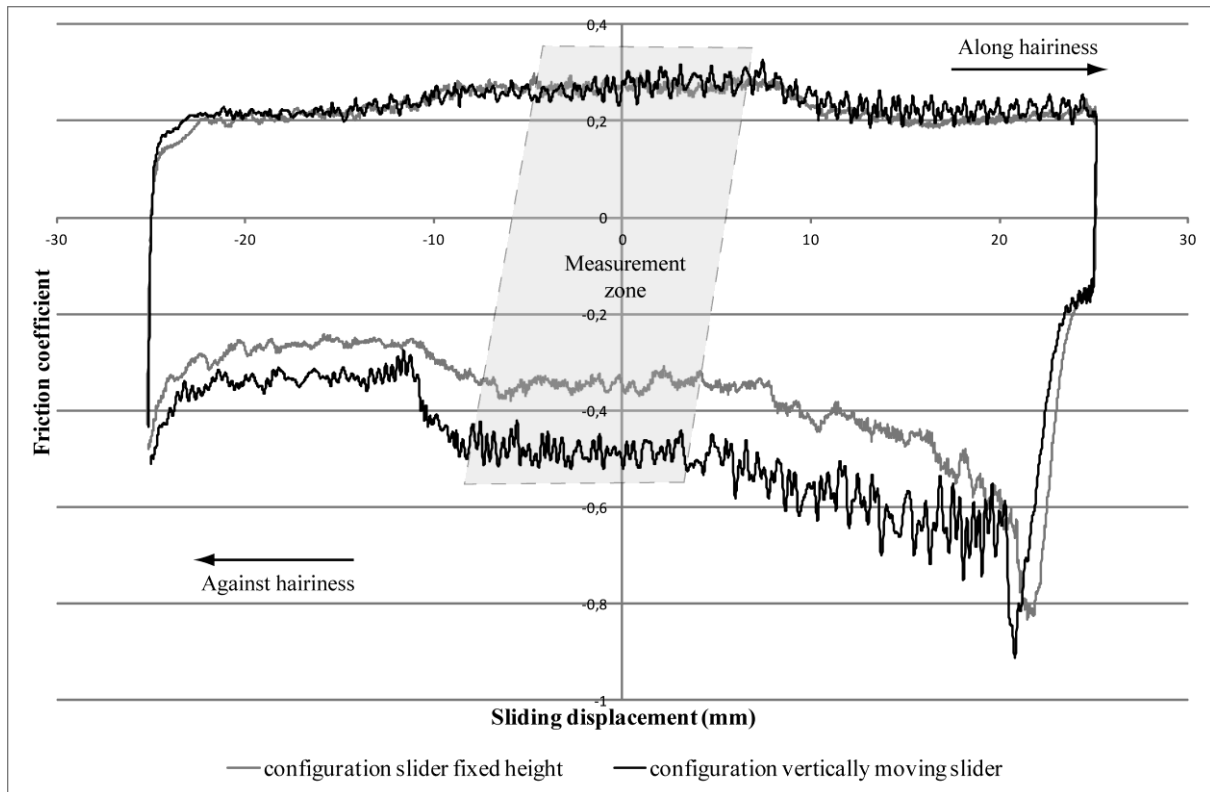


Figure 66 : Graphique représentant le coefficient de frottement en fonction du déplacement horizontal pour les deux configurations du tribomètre.

3.2.2 Influence de la pression appliquée sur la surface textile

Dans le chapitre 2 nous avons présenté les différentes pressions auxquelles nous travaillons : 3 et 15 kPa. La Figure 67 nous permet de faire l'hypothèse que dans la gamme de pressions utilisée l'évolution de la force de frottement en fonction de la pression appliquée est linéaire, le coefficient de frottement est donc constant. Pour la suite de l'étude les essais ont été menés essentiellement sous 15 kPa, le rapport signal sur bruit étant alors plus élevé.

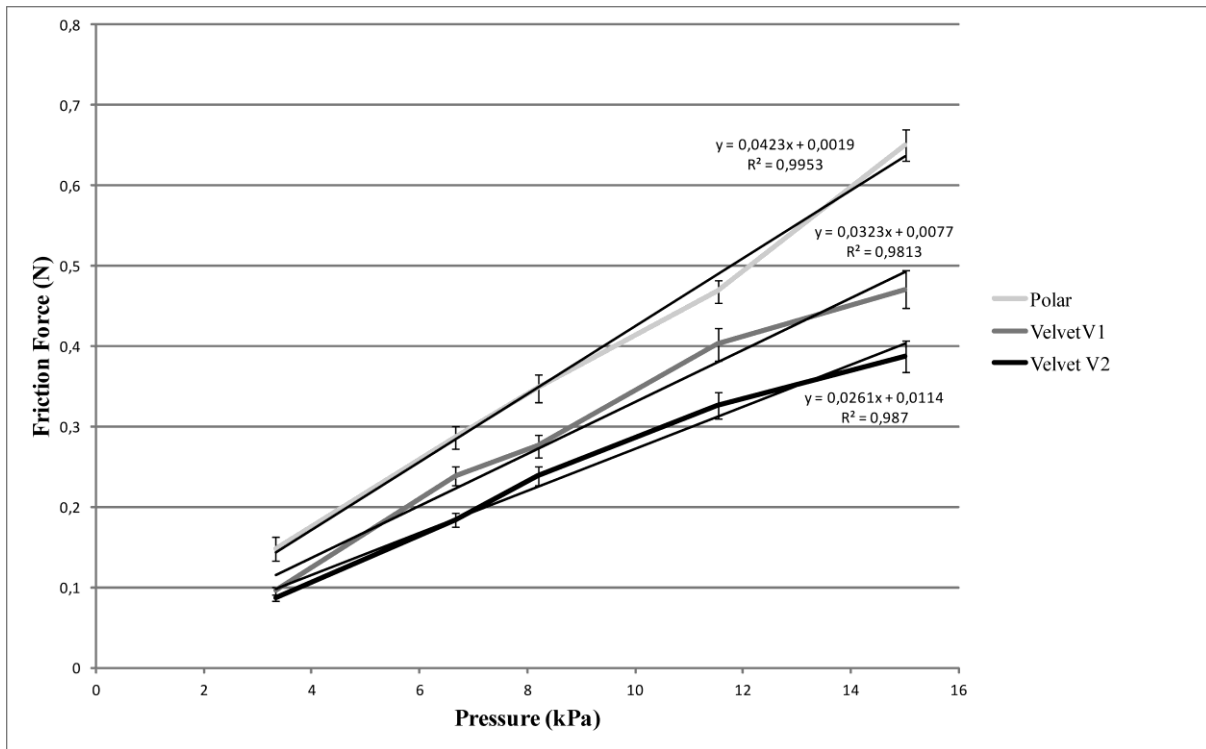


Figure 67 : Influence de la force de frottement en fonction de la pression appliquée (mesures réalisées à 20 mm.s⁻¹ avec le frotteur parallélépipédique en aluminium de largeur 11 mm, A-Do-11).

3.2.3 Influence de la largeur du frotteur sur la force de frottement.

D'après le modèle établi précédemment dans l'Équation 25. La force de frottement totale évolue linéairement avec la largeur ($S_c = w \cdot \delta$ avec w largeur du frotteur et δ la profondeur de pénétration du frotteur dans la surface textile) du frotteur dans le cas où la force normale et l'aire sous le frotteur sont maintenues constantes.

Nous voulons donc déterminer l'évolution de la force de frottement en fonction de la largeur du frotteur. Nous avons effectué des essais (Figure 68) sur les velours V1 et V2 à pression constante de 15 kPa, avec des vitesses de glissement ajustées de telle sorte que le temps de maintien d'un poil sous la semelle du frotteur reste constant (voir chapitre 4). Les frotteurs utilisés ont la même aire apparente de 150 mm². Nous avons utilisé les frotteurs suivants :

- A-Do-10115 d'une largeur de 10 mm.
- A-Do-11, largeur 10.8 mm.
- A-Do-15110, largeur 15 mm.
- A-Do-22, largeur 21.7 mm.

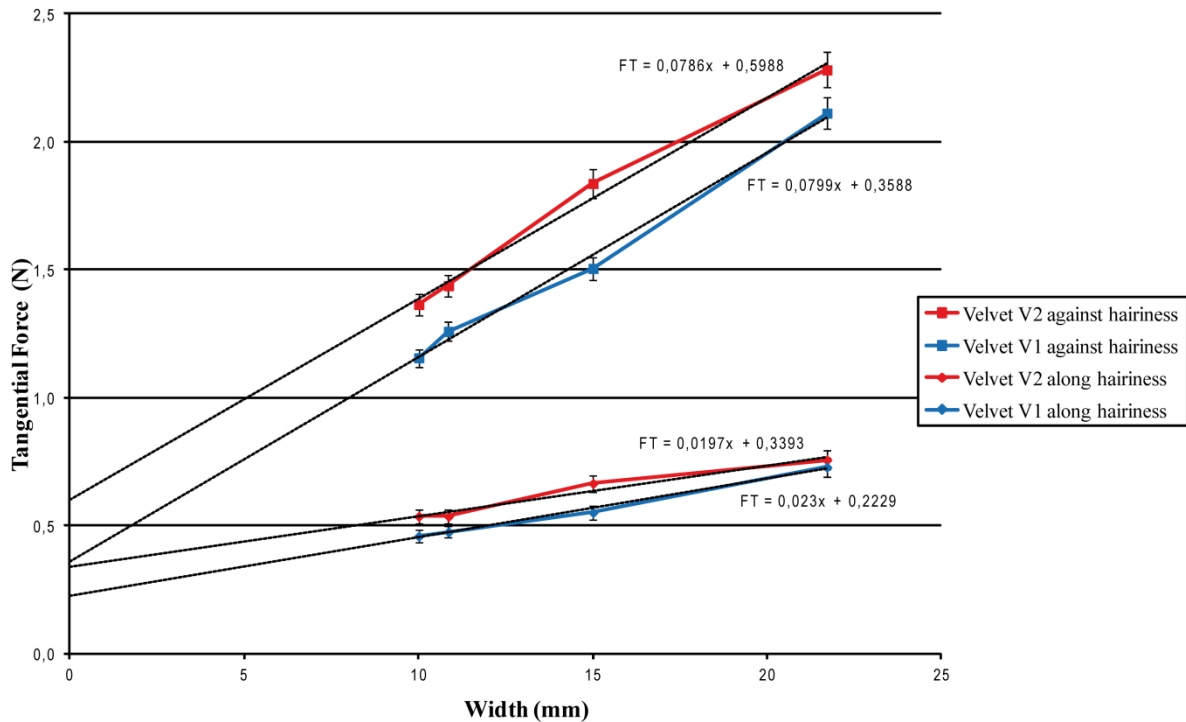


Figure 68 : Force de frottement en fonction de la largeur de frotteur.

Nous remarquons que les courbes de tendances issues de ces essais sont linéaires (Figure 68). L'évolution de la force tangentielle en fonction de la largeur du frotteur est donc linéaire dans le cas d'un temps de relaxation constant sous le frotteur et ceci pour une force normale et une aire de la semelle du frotteur fixées. Nous vérifions donc que :

$$F_T = w. (\delta.p) + Constante$$

Équation 28

Par ailleurs, nous observons que la force de frottement dans le sens rebrousse-poil est plus élevée que dans le sens poil. Cette différence s'explique par le fait que la force mise en jeu pour coucher les poils dans le sens opposé à leur orientation principale est plus importante que dans la direction de leur orientation naturelle.

3.2.4 Influence de l'aire sous le frotteur sur la force de frottement

De même que précédemment, à partir de l'Équation 25, mais en fixant ici la largeur du frotteur et la pression moyenne, la force de frottement devrait évoluer linéairement avec l'aire sous le frotteur.

Chapitre n°3 : Mise en place et validation du modèle de frottement

Nous avons donc étudié l'évolution de la force de frottement en fonction de l'aire de la semelle du frotteur.

La Figure 69 montre que si la pression moyenne et la largeur du frotteur sont fixes, la force de frottement totale évolue linéairement avec l'aire de la semelle du frotteur.

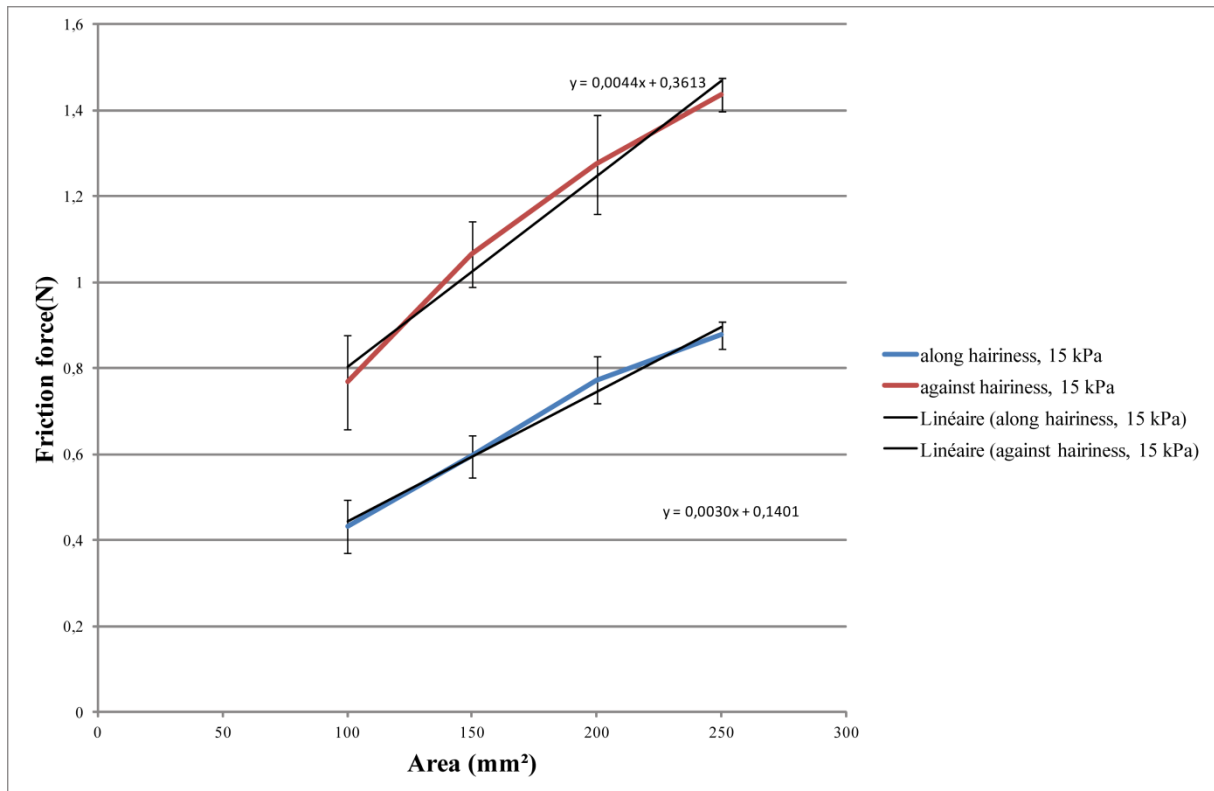


Figure 69 : Force de frottement en fonction de l'aire sous le frotteur.

Nous vérifions donc :

$$F_T = A \cdot \tau + \text{constante}$$

Équation 29

Avec,

A : l'aire du frotteur, ce n'est pas l'aire réelle de contact ici,

τ : contrainte de cisaillement sous le frotteur à la pression concernée.

3.2.5 Validité du modèle

Il a été montré que la force de frottement totale évolue linéairement :

- avec la largeur du frotteur lorsque l'aire de la semelle et la force normale sont fixes. La force à l'avant du frotteur peut être considérée comme étant proportionnelle à la largeur du frotteur.
- avec l'aire de la semelle du frotteur lorsque la largeur et la force normale sont fixes. La force sous le frotteur est proportionnelle à l'aire de la semelle de ce dernier.

Le modèle présenté ici est donc validé dans notre gamme de conditions de mesure :

$$F_T = w. (\delta. p) + A_r. \tau$$

Équation 30

Chapitre 4 :
Résultats provenant du modèle de frottement et visco-
élasticité.

4 Chapitre 4 : Résultats provenant du modèle de frottement et visco-élasticité.

Nous venons de déterminer dans le chapitre précédent, que la force de frottement totale se décompose en une combinaison des forces s'appliquant sur la face avant et la semelle du frotteur. Nous allons désormais nous attacher à déterminer les composantes de ces forces. Nous avons montré que ces forces sont liées à la géométrie du frotteur, telles que la largeur d'attaque (w) et l'aire sous le frotteur (A) (voir §1.2.3, chapitre 3). Comme cela a été montré au chapitre 3, la force est également influencée par la charge normale appliquée (voir §1.2.2, chapitre 3) et donc par conséquent par la profondeur de pénétration (δ) dans la surface textile pileuse.

L'objectif initial de ce chapitre est d'utiliser le modèle précédemment validé pour déterminer les contraintes de frottement à l'avant et sous le frotteur pour les étoffes étudiées à une pression donnée. Il est alors apparu que la vitesse de glissement a une influence sur la force de frottement totale. Cet effet de la vitesse est alors étudié de deux manières différentes : directement en fonction de la vitesse de frottement, ou en fonction du temps de relaxation des poils sous le frotteur, c'est-à-dire la durée durant laquelle un élément de pilosité est maintenu sous le frotteur. L'origine de ces phénomènes visqueux est également étudiée.

4.1 Influence de la vitesse sur le frottement

4.1.1 Etude de la relaxation de la pilosité sous le frotteur

Afin de déterminer quelles composantes agissent sur la force de frottement, nous avons mené des essais sur l'influence de la vitesse de glissement. Pour ce faire, nous utilisons des frotteurs de largeurs d'attaque différentes avec une même aire apparente de 150 mm^2 sur une plage de vitesses de glissement comprises entre 2 et 20 mm.s^{-1} . Pour chaque frotteur, en fonction de leur longueur et de la vitesse, nous pouvons déterminer combien de temps un poil va rester sous la semelle (Tableau 9).

Chapitre n°4 : Résultats provenant du modèle de frottement et visco-élasticité.

frotteur	A-Do-10115	A-Do-11	A-Do-15110
Largeur (mm)	10	10,9	15
longueur (mm)	15	13,8	10
vitesse (mm/s)	Temps de relaxation (s)		
2	7,5	6,9	5
5	3	2,8	2
10	1,5	1,4	1
20	0,75	0,7	0,5

Tableau 9 : Temps de relaxation des poils sous le frotteur en fonction de la vitesse et du frotteur.

Nous pouvons alors tracer l'évolution des forces de frottement en fonction du temps de relaxation de la pilosité sous la semelle d'un frotteur (Figure 70).

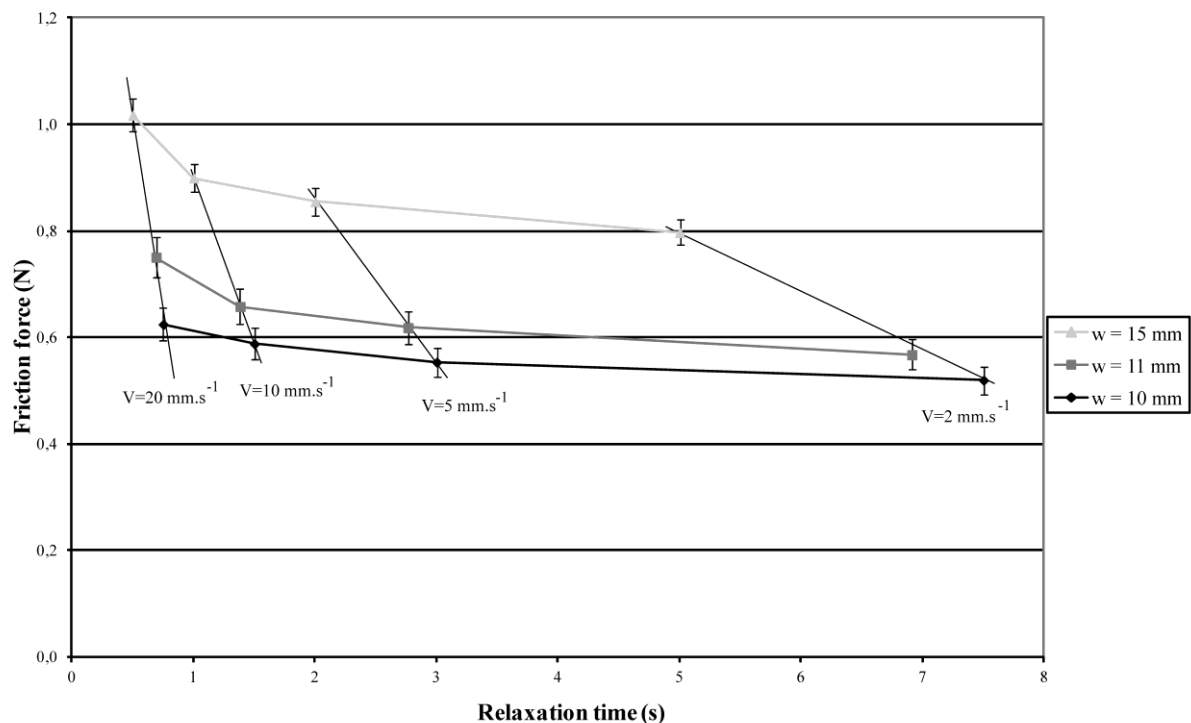


Figure 70 : Force de frottement en fonction du temps de relaxation pour différentes largeurs de frotteur w.

Nous remarquons que lorsque la vitesse de glissement augmente la force de frottement diminue. Pour un frotteur donné, une augmentation de la vitesse induit une diminution de

temps de relaxation, alors pour les trois frotteurs, la force de frottement est plus grande. Cette dépendance au temps peut être apparenté à de la viscosité. Il s'agit alors de déterminer son origine physique.

4.1.2 Effet de la vitesse sur la face avant du frotteur

Nous venons d'observer que la force de frottement est influencée par la vitesse. Cependant nous cherchons maintenant à déterminer l'origine de ces phénomènes visqueux, c'est-à-dire au niveau de quelle composante (force à l'avant ou sous le frotteur) elle entre en jeu. Pour élucider cette question nous avons fabriqué un frotteur ayant une surface de la semelle quasi nulle, le frotteur A-L-17 (Chapitre 2, §2.3.2.1 Figure 40). Nous avons fait des essais sur le velours V1 à différentes vitesses (Figure 71).

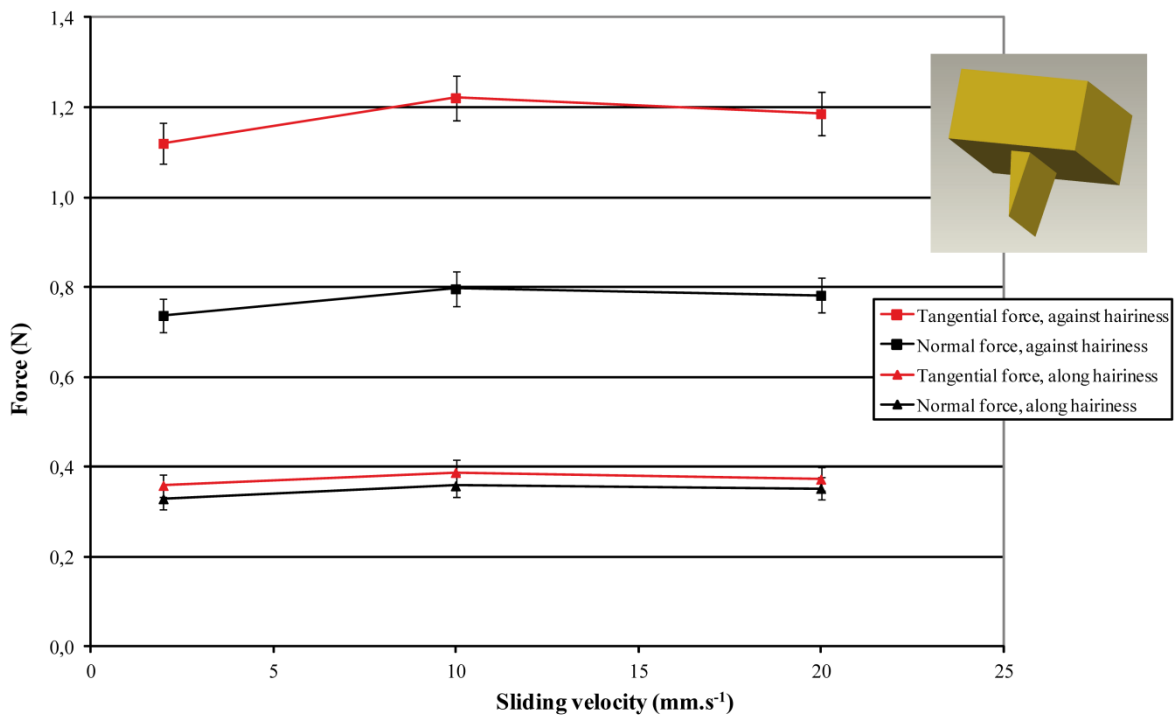


Figure 71 : Forces tangentielles (F_T) et normales (F_N) dans le sens poil et rebrousse-poil en fonction de la vitesse de glissement.

Avec le frotteur linéique (A-L-17) l'aire de la semelle peut être négligée alors :

$$F_{tot} = F_{front}$$

Équation 31

La Figure 71 montre que la vitesse n'a pas d'influence sur la face avant du frotteur. Par conséquent aucun phénomène visqueux ne se produit à l'avant du frotteur (dans la gamme de vitesse étudiée). Le phénomène de viscosité observé précédemment (Figure 70) trouve par conséquent son origine sous le frotteur.

C'est pour cette raison que dans le chapitre 3 (§1.2.3) nous avons pris la précaution d'avoir d'un temps de relaxation constant sous le frotteur lors de l'étude sur l'évolution de la force tangentielle en fonction la largeur du frotteur.

4.1.3 Détermination des contraintes à l'avant et sous le frotteur pour les surfaces étudiées

A partir des résultats obtenus précédemment, la détermination des contraintes de frottement à l'avant et sous le frotteur est réalisée en prenant la précaution d'avoir un temps constant et maîtrisé de maintien d'un poil sous le frotteur.

Comme cela a été montré au chapitre précédent, les composantes de force à l'arrière et sur les bords du frotteur dans le sens poil peuvent être négligées, la répartition des forces sur les surfaces du frotteur s'écrit alors suivant l'Équation 25 et l'Équation 27 alors nous avons pu écrire l'Équation 30.

Les deux termes F_{front} et F_{bottom} ont une composante mécanique (de déformation) et une composante physico-chimique (d'adhésion) selon l'Équation 25. En raison de la zone relativement petite de contact entre la pilosité et la face frontale du frotteur, la composante d'adhésion correspondante peut être négligée dans une première approche, d'où :

$$F_T = F_{front_def} + (F_{bottom_def} + F_{bottom_adh})$$

Équation 32

En réalité, une autre étude nous a montré que le frottement entre l'arrête du frotteur a une légère influence, que nous négligeons ici, sur la valeur de la force tangentielle à l'avant du frotteur^{64,65}.

⁶⁴ Watzky, A. & Bueno, M. A. (2013) L'elastica revisitée sous l'angle des efforts. In *21^{ème} Congrès Français de Mécanique*, Bordeaux.

⁶⁵ Tourlonias, M., Bocquet, R., Bueno, M. A., Derler, S. & Rossi, R. (2011). Participation d'un élément unitaire de pilosité lors du frottement d'une surface textile. In *23^{ème} Journées Internationales Francophones de Tribologie*, Obernai.

Dans ce qui suit, les expressions sont calculées pour les différentes composantes de la force. F_{front_def} est la force nécessaire pour fléchir les poils à l'avant du frotteur, en déformant ainsi la surface textile. Il peut être écrit, selon une expression similaire à l'Équation 30, à savoir:

$$F_{front_def} = S_{front} \times \sigma_{front} = \delta \times w \times \sigma_{front}$$

Équation 33

Où la zone de contact frontale est donnée par la largeur w multipliée par la profondeur de pénétration δ du frotteur dans l'étoffe et σ_{front} est la contrainte tangentielle à la surface nécessaire pour coucher les poils d'une position initiale à une position finale.

Il est possible de déterminer F_{front_def} en analysant au moins deux géométries différentes de frotteur. Pour deux frotteurs de même matériau, de même aire apparente de contact et ayant des propriétés de surfaces analogues, mais de longueur et largeur différentes, la différence entre les forces de frottement est donnée par:

$$\Delta F_{front_def} = \delta \times \Delta w \times \sigma_{front}$$

Équation 34

Δw est la différence des largeurs des frotteurs.

A partir des équations Équation 30 et Équation 32, on peut en déduire que les paramètres suivants ont une influence sur F_{bottom_adh} :

- le type de matériaux en contact, car leurs propriétés mécaniques et physico-chimiques influencent la contrainte de cisaillement τ ,
- la rugosité de surface et la morphologie des corps en contact est importante pour l'aire réelle de contact A_r ,
- la pression de contact a une influence sur A_r .

La force de frottement de déformation due à F_{bottom_def} (Équation 32) correspond à la force mécanique nécessaire pour maintenir les poils de la structure de la surface textile sous le frotteur. Outre les propriétés de compression de la surface textile pileuse, cette force dépend principalement de la géométrie du frotteur et de la pression de contact. Il résulte de la combinaison d'une surface textile donnée et d'un frotteur à une même pression de contact que les forces F_{bottom_def} et F_{bottom_adh} sont constantes pour les différentes dimensions du frotteur avec la même surface de semelle. La somme des forces F_{bottom_def} et F_{bottom_adh} peut être exprimée en fonction d'une contrainte tangentielle globale σ_{bottom} :

$$F_{bottom} = F_{bottom_def} + F_{bottom_adh} = A \times \sigma_{bottom}$$

Équation 35

Comme dans beaucoup de problèmes tribologiques avec des surfaces industrielles la détermination de l'aire de contact réelle est délicate. À l'heure actuelle, la seule méthode qui serait performante pour déterminer l'aire de contact en dynamique est la tomographie dynamique. Il n'existe aucune méthode de mesure en laboratoire permettant de déterminer A_r entre un frotteur et une surface textile pileuse. Pour cette équation, nous considérons donc l'aire de contact apparente A , désignant la surface de la face inférieure du frotteur. La prise en compte de l'aire apparente à la place de l'aire réelle implique que la valeur de σ_{bottom} est dépendante de la pression moyenne appliquée comme F_T d'après l'Équation 21⁶⁶.

Sur la base des équations Équation 32, Équation 33, Équation 34 et Équation 35, les données de mesure de frottement pour des frotteurs de différentes géométries permettent de déterminer les paramètres σ_{bottom} , σ_{front} ou F_{bottom} et F_{front} pour une charge normale donnée. Les incertitudes de ces paramètres sont calculées suivant la méthode recommandée dans la norme française NF ENV 13005⁶⁷. En outre, la comparaison des moyennes est utilisée pour l'acceptation ou le rejet d'un résultat significatif.

A partir des équations Équation 33 et Équation 35, on obtient alors la forme générale :

$$F_T = A \times \sigma_{bottom} + \delta \times w \times \sigma_{front}$$

Équation 36

Nous utilisons dans un premier temps des couples de frotteurs avec une même aire apparente sous la semelle de sorte à déterminer des premiers éléments de l'équation :

$$\begin{cases} F_1 = A \cdot \sigma_{bottom} + \delta \cdot w_1 \cdot \sigma_{front} \\ F_2 = A \cdot \sigma_{bottom} + \delta \cdot w_2 \cdot \sigma_{front} \end{cases}$$

Équation 37

$$\begin{cases} \sigma_{front} = \frac{F_1 - F_2}{\delta \cdot (w_1 - w_2)} \\ \sigma_{bottom} = \frac{F_1 - \delta \cdot w_1 \cdot \sigma_{front}}{A} \end{cases}$$

Équation 38

⁶⁶ Johnson, K. L. (1985). *Contact Mechanics*. Cambridge University Press.

⁶⁷ Priel, M., Désenfant, M. & Rivier, C. (2005). Evaluation des incertitudes des résultats d'analyse. In *Techniques de l'ingénieur* (p.105). Techniques de l'ingénieur.

Chapitre n°4 : Résultats provenant du modèle de frottement et visco-élasticité.

Dans un second temps nous utilisons un frotteur linéique A-L-17 qui a une surface inférieure négligeable, et nous pouvons faire l'hypothèse que ce frotteur donne directement la relation suivante (cf Équation 34 et Équation 35) :

$$F_T = F_{front_def} = \delta \times w \times \sigma_{front}$$

Équation 39

Avec cette équation nous pouvons alors déterminer la force nécessaire pour fléchir les poils à l'avant du frotteur pour une largeur de frotteur donnée. Il suffit alors de faire un ratio avec la largeur de frotteur souhaitée :

$$\begin{cases} F_{w17} = S_{c17} \cdot \sigma_{front} = \delta \cdot w_{17} \cdot \sigma_{front} \\ F_{wx} = S_{cx} \cdot \sigma_{front} = \delta \cdot w_x \cdot \sigma_{front} \end{cases}$$

Équation 40

$$\delta \cdot \sigma_{front} = \frac{F_{wx}}{w_x} = \frac{F_{w17}}{w_{17}}$$

Équation 41

$$F_{wx} = \frac{F_{w17}}{w_{17}} \cdot w_x$$

Équation 42

Les expériences ont été réalisées en prenant la précaution d'enfoncer le frotteur prismatique à la même profondeur de pénétration que celle d'un frotteur avec une semelle sous une pression moyenne de 15 kPa. Nous pouvons donc en déduire les composantes de force par unité de largeur suivantes (Tableau 10, pour la force de frottement du frotteur A-L-17 divisée par sa largeur de 16 mm) :

$F_{front/w}$: Friction force by width (N.mm ⁻¹)	Velvet V1	Velvet V2
Along hairiness	0.023 ± 0.0005	0.028 ± 0.0005
Against hairiness	0.073 ± 0.0019	0.088 ± 0.0004

Tableau 10 : Force de frottement à l'avant du frotteur prismatique par unité de largeur de frotteur, pour les velours V1 et V2.

Chapitre n°4 : Résultats provenant du modèle de frottement et visco-élasticité.

Les essais réalisés avec les frotteurs parallélépipédiques de même aire apparente de la semelle et de largeurs différentes, nous permettent d'appliquer Équation 36 et d'obtenir σ_{front} , puis σ_{bottom} . Ensuite, nous pouvons calculer les composantes des forces s'appliquant au frotteur $F_{\text{front/w}}$ et $F_{\text{bottom/w}}$, (Tableau 11).

	Units	V1	V2
$\delta_{\text{along hairiness}}$	mm	1.09 ± 0.05	1.05 ± 0.03
$\delta_{\text{against hairiness}}$	mm	0.86 ± 0.06	0.81 ± 0.03
$F_{\text{front/w along hairiness}}$	N.mm^{-1}	0.0230 ± 0.0036	0.0197 ± 0.0068
$F_{\text{front/w against hairiness}}$	N.mm^{-1}	0.0799 ± 0.0120	0.0786 ± 0.0130
$\sigma_{\text{front along hairiness}}$	MPa	0.0211 ± 0.0060	0.0188 ± 0.0110
$\sigma_{\text{front against hairiness}}$	MPa	0.0929 ± 0.0270	0.0970 ± 0.0290
$F_{\text{bottom/w along hairiness}}$	N.mm^{-1}	0.2229 ± 0.0550	0.3393 ± 0.1000
$F_{\text{bottom/w against hairiness}}$	N.mm^{-1}	0.3588 ± 0.1900	0.5988 ± 0.2000
$\sigma_{\text{bottom along hairiness}}$	MPa	0.0015 ± 0.0006	0.0023 ± 0.0012
$\sigma_{\text{bottom against hairiness}}$	MPa	0.0024 ± 0.0021	0.0040 ± 0.0023

Tableau 11 : Caractéristiques des composantes de frottement obtenues à partir de frotteurs parallélépipédiques.

Nous allons maintenant pouvoir comparer les forces obtenues par unité de largeur pour le frotteur prismatique (Tableau 10, méthode 1) par rapport aux frotteurs parallélépipédiques (Tableau 11, méthode 2)(Figure 72 et Figure 73).

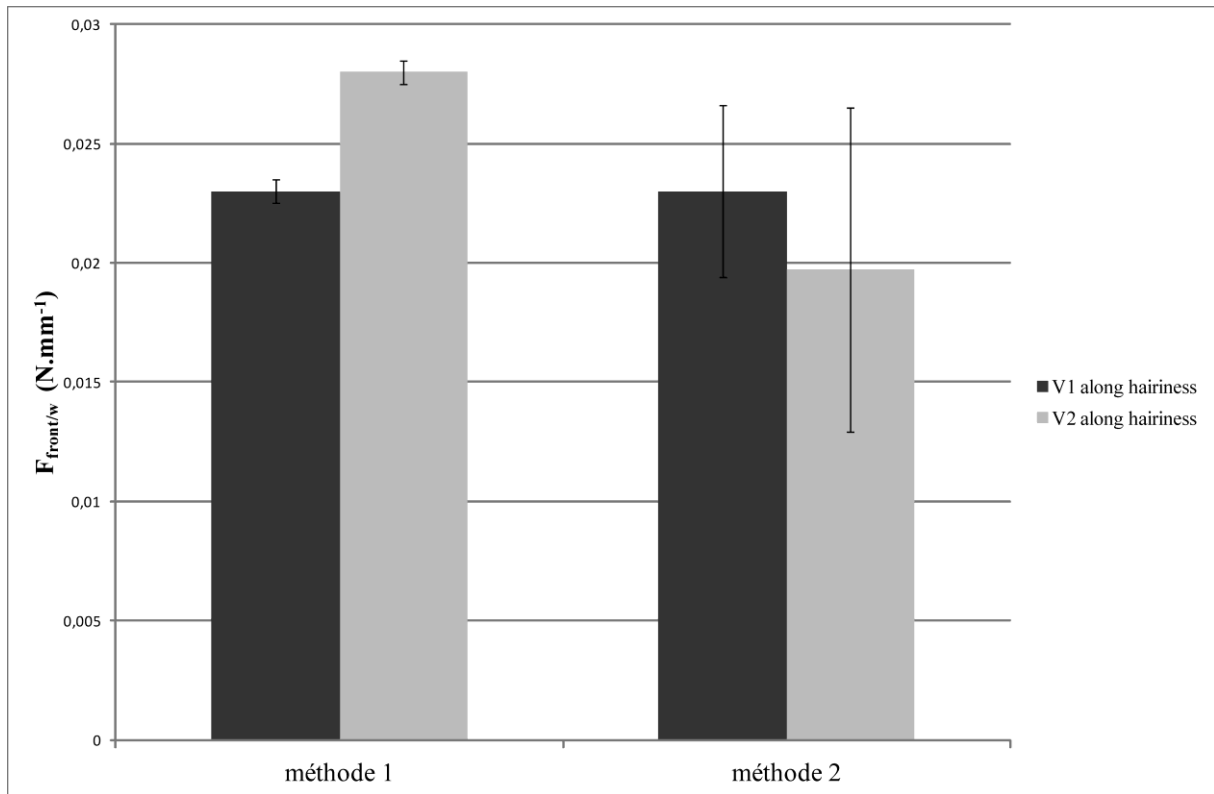


Figure 72 : Force de frottement à l'avant du frotteur par unité de largeur dans le sens poil. Méthode 1 avec le frotteur prismatique et méthode 2 avec les frotteurs parallélépipédiques.

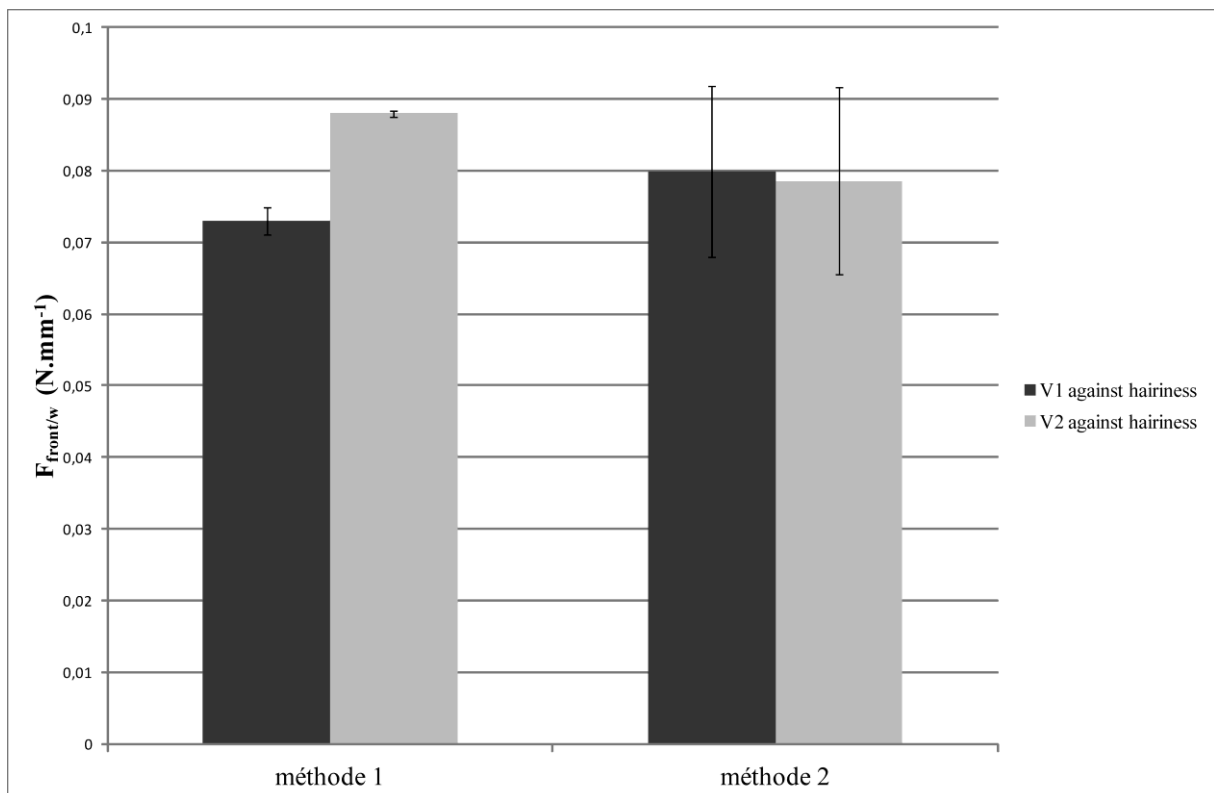


Figure 73 : Force de frottement à l'avant du frotteur par unité de largeur dans le sens rebrousse-poil. Méthode 1 avec le frotteur prismatique et méthode 2 avec les frotteurs parallélépipédiques.

Nous observons pour la force de frottement en fonction de la largeur, que les deux méthodes de caractérisation des composantes de frottement donnent des résultats similaires à la fois dans le sens poil (Figure 72) et le sens rebrousse-poil (Figure 73). Les valeurs obtenues avec les frotteurs parallélépipédiques se retrouvent, avec les barres d'erreur, dans la même plage de valeurs que celles mesurées avec le frotteur prismatique. Nous remarquons, concernant la force à l'avant du frotteur, qu'il n'y a que très peu de différence entre les deux velours, moins de 20% d'écart entre les valeurs pour le sens poil et rebrousse-poil. Cet écart est inférieur à l'erreur estimée sur la mesure.

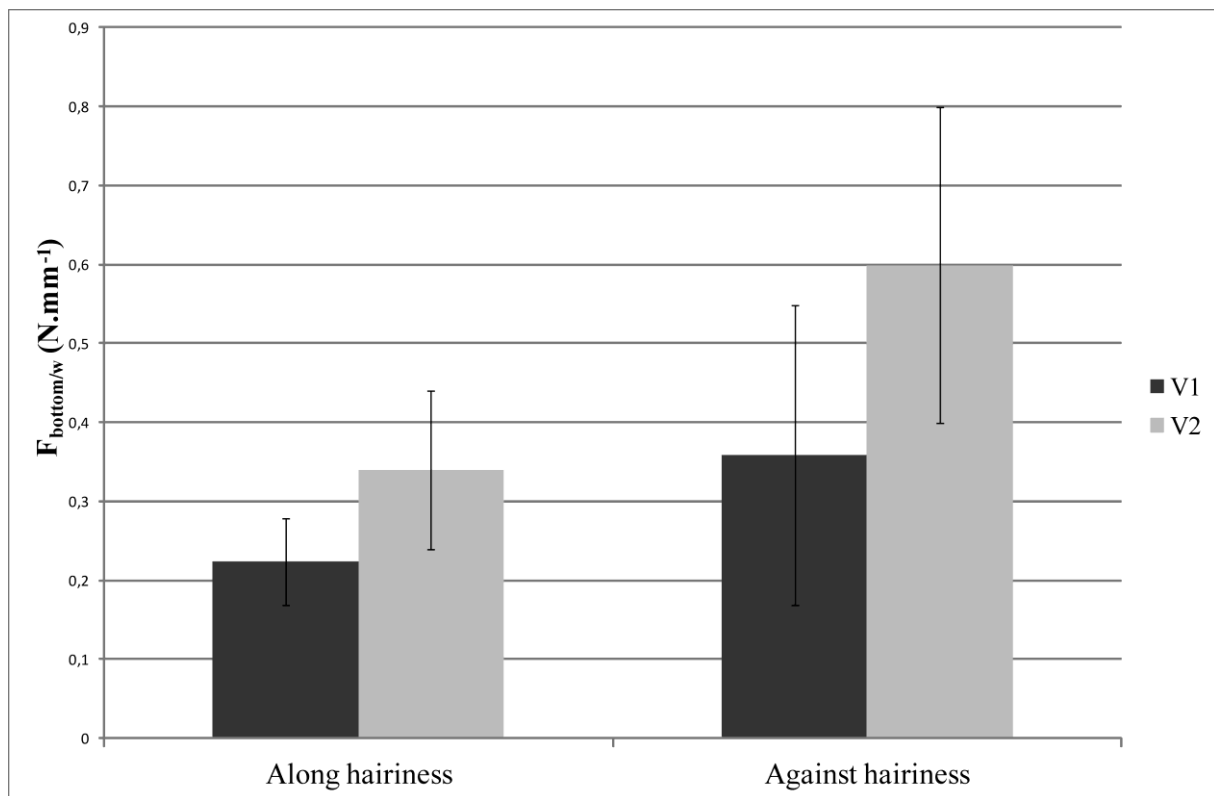


Figure 74 : Force de frottement sous le frotteur par unité de largeur lors d'un frottement dans le sens poil et le sens rebrousse-poil.

Sur la Figure 74 nous observons que la différence entre les velours pour le sens poil et le sens rebrousse-poil est d'environ 40%, mais nous avons une marge d'erreur assez importante sur les résultats et cette différence est couverte par les barres d'erreurs. Nous remarquons également que la force exercée sous la semelle du frotteur dans le sens poil est pratiquement deux fois moindre que celle exercée à rebrousse-poil.

Nous constatons également une prédominance de la force sous le frotteur par rapport à la force totale. En effet la force à l'avant du frotteur correspond à hauteur de 1/5 à 1/20 de la force sous la semelle. La part de force à l'avant du frotteur est donc faible par rapport à celle sous le frotteur.

4.2 Origine du comportement visqueux d'une surface pileuse au frottement

Nous allons étudier les phénomènes de relaxation rapportés en début de chapitre et qui ont été identifiés comme se produisant sous le frotteur. L'objectif est d'en déterminer l'origine et les paramètres influents. Pour ce faire, nous avons réalisé des macrosurfaces pileuses modèles dont nous maîtrisons les caractéristiques morphologiques.

4.2.1 Analyse du signal de frottement d'une boucle unique

Comme nous l'avons introduit dans le chapitre 2, donc pour approfondir la compréhension des phénomènes rencontrés, nous avons également étudié le frottement sur des modèles d'éléments unitaires de pilosité : les boucles. Des boucles ont été préférées ici à des poutres encastrées libres (poils) pour limiter les déformations dues à des éventuelles rotations en dehors du plan de la Figure 75 (en bas) et donc se ramener le plus possible à un problème plan.

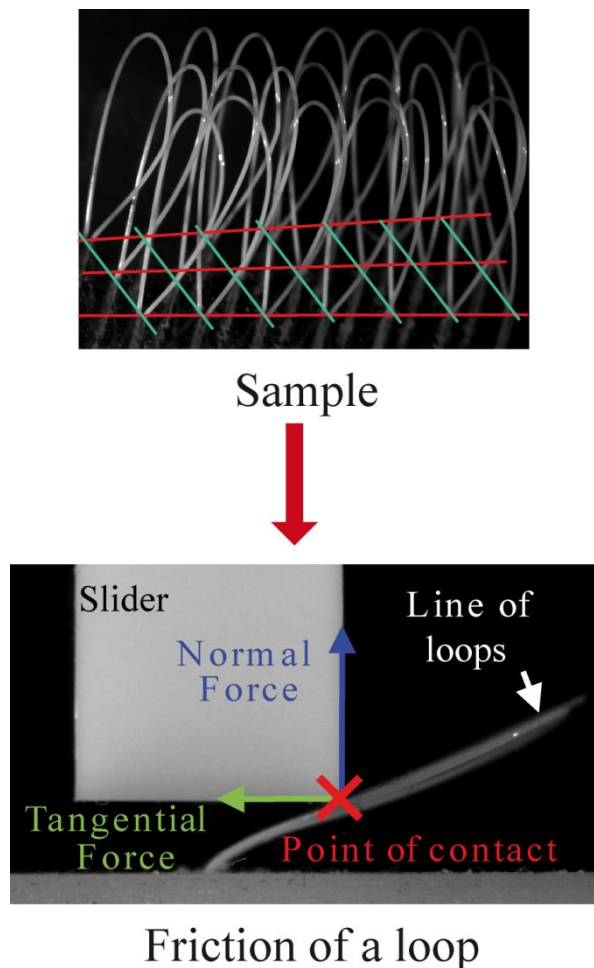


Figure 75 : Frottement d'une boucle dans le plan du déplacement.

Comme on peut l'observer sur la vue de face (Figure 76), la boucle a deux points de contact avec le frotteur lors de la flexion. Aussi, pourrions-nous assimiler le comportement d'une boucle à la somme en parallèle de deux poutres dans le même plan orthogonale au mouvement du frotteur.

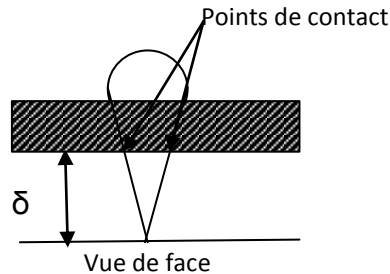


Figure 76 : Flexion d'une boucle, vue de face.

Nous avons fait varier le nombre de boucles et leur densité sur la surface pour comprendre leurs interactions lors d'un essai de frottement. Nous nous sommes intéressés aux phases de flexion des boucles (Figure 77, zone 1 et 2) et de frottement sous le frotteur (Figure 77, zone 3 : Plateau). Nous avons défini comme force totale, la résultante des forces normales et tangentielles au cours du contact boucle / frotteur. En Figure 77, nous présentons un schéma de l'évolution de la force totale au cours d'un essai de frottement sur une boucle. Les composantes normales et tangentielles peuvent être détaillées selon le même schéma d'évolution.

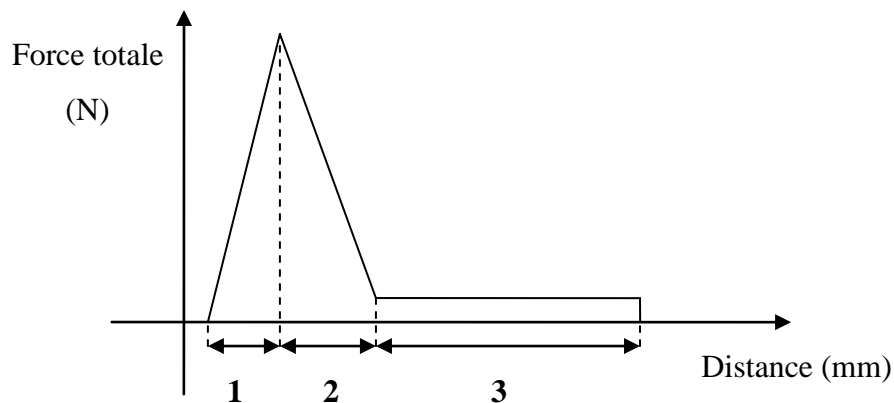


Figure 77 : Schéma représentant l'évolution de la force totale sur une boucle.

Les phases 1 et 2 correspondent à la phase de flexion de la boucle, première phase du frottement. La force totale passé par un maximum.

Lorsque la boucle a été fléchie, le frottement se produit uniquement sous le frotteur (Figure 78). La distance parcourue par le frotteur, correspondant aux zones 1 et 2, est inférieure à la longueur initiale de la boucle.

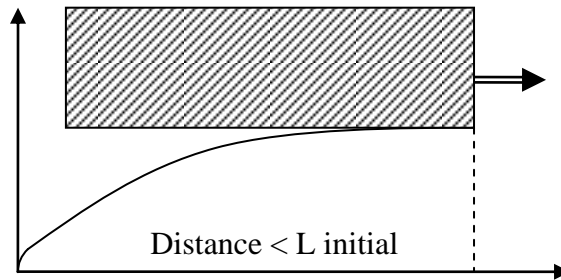


Figure 78 : Fin de flexion, et début de frottement sous le frotteur.

La zone 3 correspond au frottement de la boucle sous le frotteur. Cette zone a une distance correspondant à la longueur du frotteur (Figure 79).

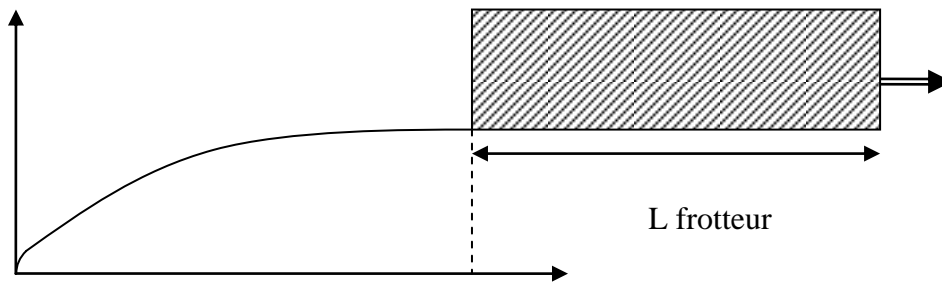


Figure 79 : Frotteur à la fin de la zone de frottement sous le frotteur, avant relâchement de la boucle.

En Figure 80, nous présentons une courbe expérimentale caractéristique. Elle a été réalisée avec une hauteur de 2 mm entre la base de la boucle et la semelle du frotteur. Le frotteur utilisé est parallélépipédique, d'une largeur de 21,7 mm et de longueur 6,9 mm. La boucle est créée à partir du monofilament brut non traité (noté : NT, cf. §2.2.3).

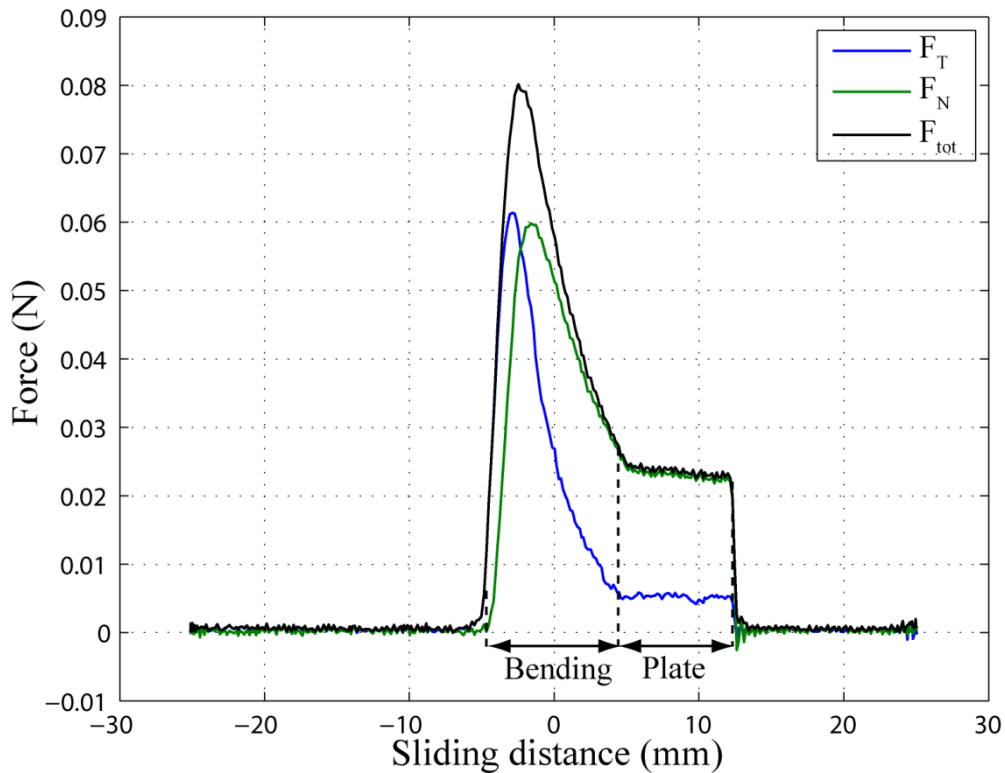


Figure 80 : Force de frottement tangentielle (F_T), normale (F_N) et totale (F_{tot}) d'une boucle unique en fonction du déplacement.

Nous remarquons l'augmentation de la force tangentielle lors de la flexion de la boucle, puis il apparaît un plateau où la force est constante lorsque la boucle est fléchée. Sous la semelle du frotteur, nous pouvons noter que la longueur du plateau correspond à la longueur de la semelle. Dans le cas de la force normale nous observons les mêmes phases que pour la force tangentielle, à savoir la flexion de la boucle puis le frottement sous la semelle, mais avec un léger décalage pour la montée en force et le point maximum

4.2.2 Influence de la vitesse du frotteur sur un élément unitaire de pilosité.

Nous avons fait varier la vitesse du frotteur de 1 à 20 mm.s^{-1} par rapport aux boucles tout d'abord sur une boucle unique afin de déterminer si la boucle présente un comportement visqueux en déformation. D'après les Figure 81 et Figure 82 présentant la force normale et tangentielle d'une boucle, il apparaît que dans la gamme de vitesse de notre étude la vitesse de déformation n'a pas d'influence sur une boucle unique. Il n'y a donc pas de phénomène visqueux provenant de la boucle seule, ni au niveau du comportement du polymère constituant le filament et pas ou peu au niveau du frottement entre la boucle et le frotteur.

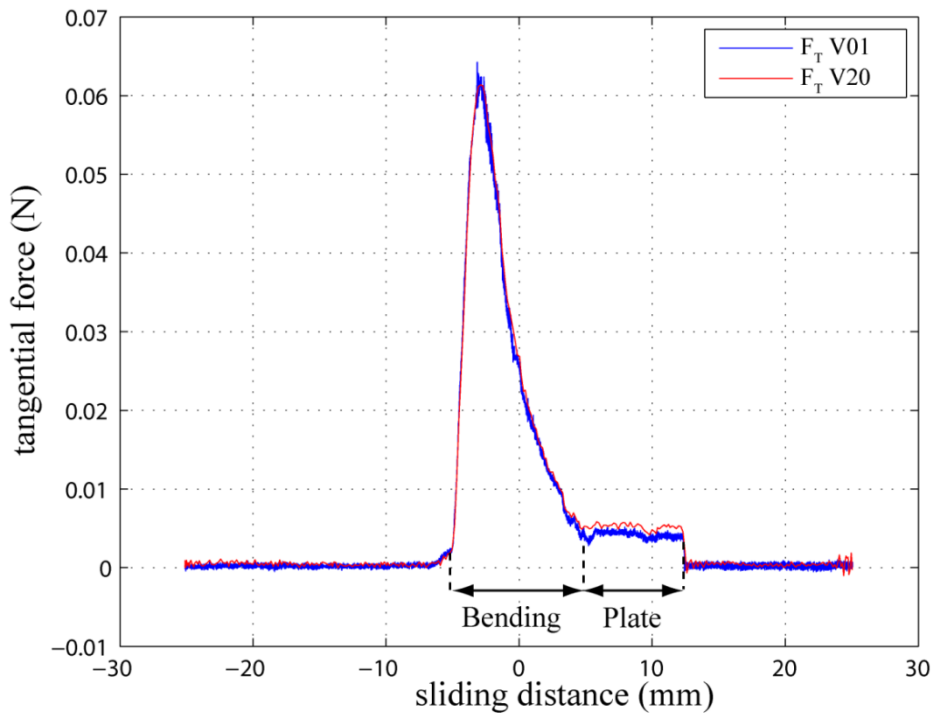


Figure 81 : Effet de la vitesse (V indiqué en mm.s^{-1}) sur une boucle unique, force tangentielle (F) en fonction du déplacement.

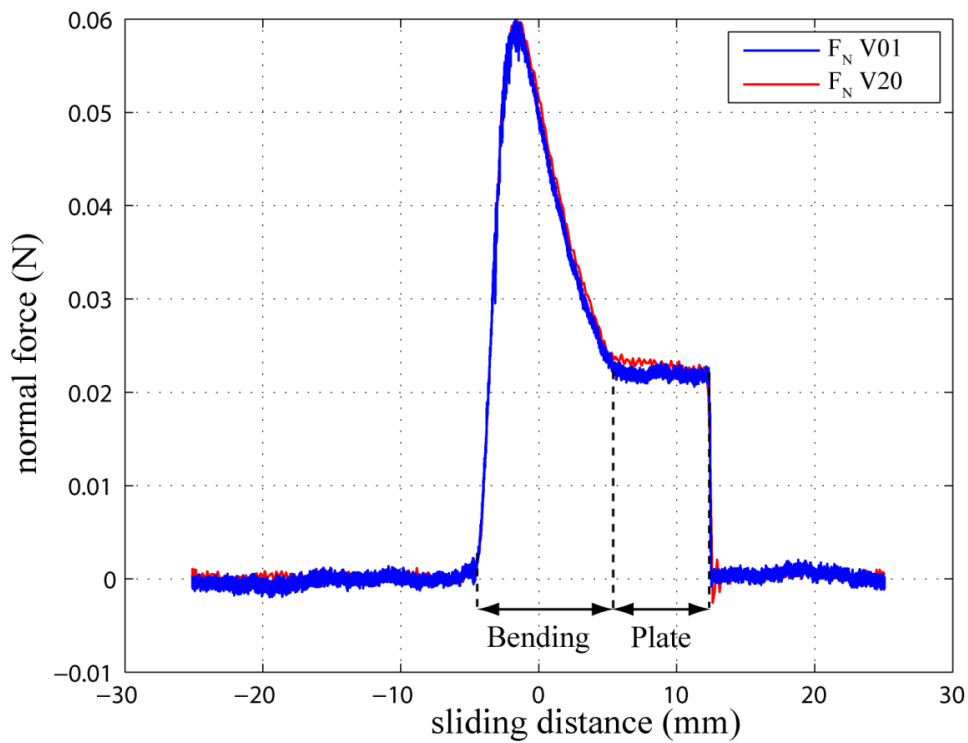


Figure 82 : Effet de la vitesse (V indiqué en mm.s^{-1}) sur une boucle unique, force normale (N) en fonction du déplacement.

4.2.3 Analyse du signal de frottement d'un tapis de boucles

Un phénomène de viscosité étant visible sur les surfaces réelles à ces mêmes vitesses du frotteur, nous avons voulu vérifier si nous l'observions également sur une de nos surfaces pileuses modèles : des tapis de boucles différents représentés Figure 83.

Dans un premier temps, nous allons étudier le comportement au frottement d'un tapis de boucles (NT).

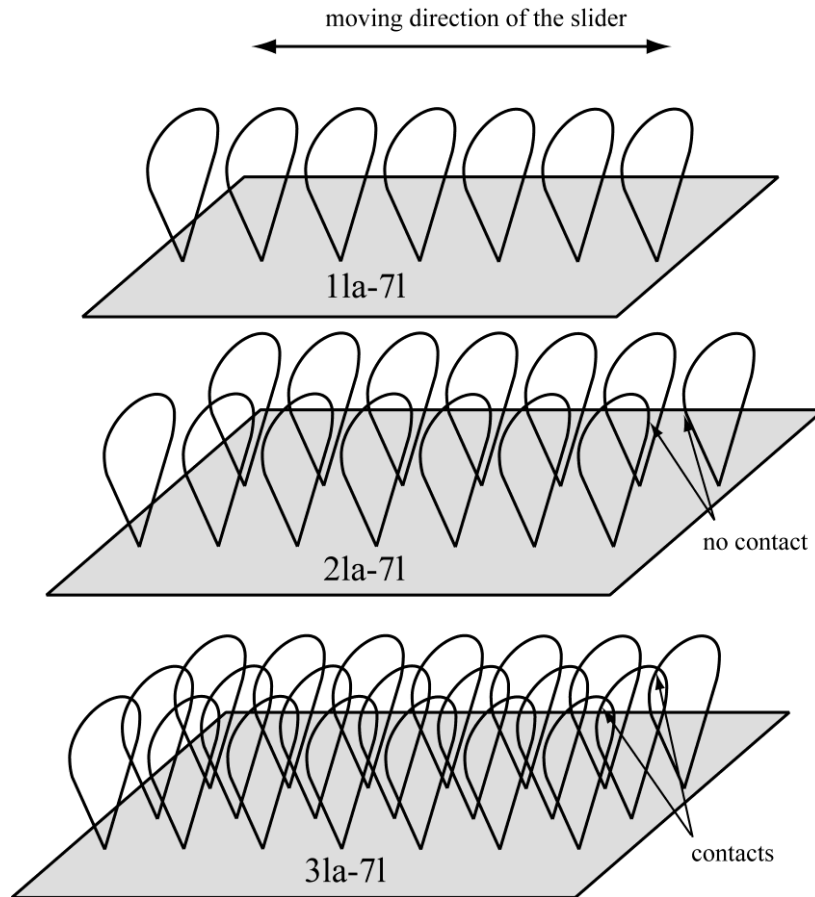


Figure 83 : Représentations de tapis de boucles.

Le premier tapis est constitué d'une boucle en largeur et 7 en longueur (11a-7l), un second avec 2 boucles en largeur (sans contact possible entre elles) et 7 en longueur (21a-7l) et un dernier avec 3 boucles en largeur (en contact) et 7 en longueur (31a-7l). Le contact entre boucles (Figure 84) intervient seulement lorsqu'il y a trois boucles sur la même ligne.

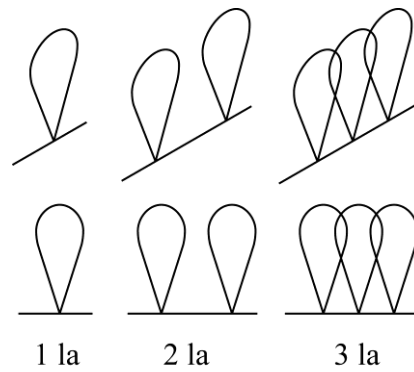


Figure 84 : Représentation du nombre de boucles en lignes.

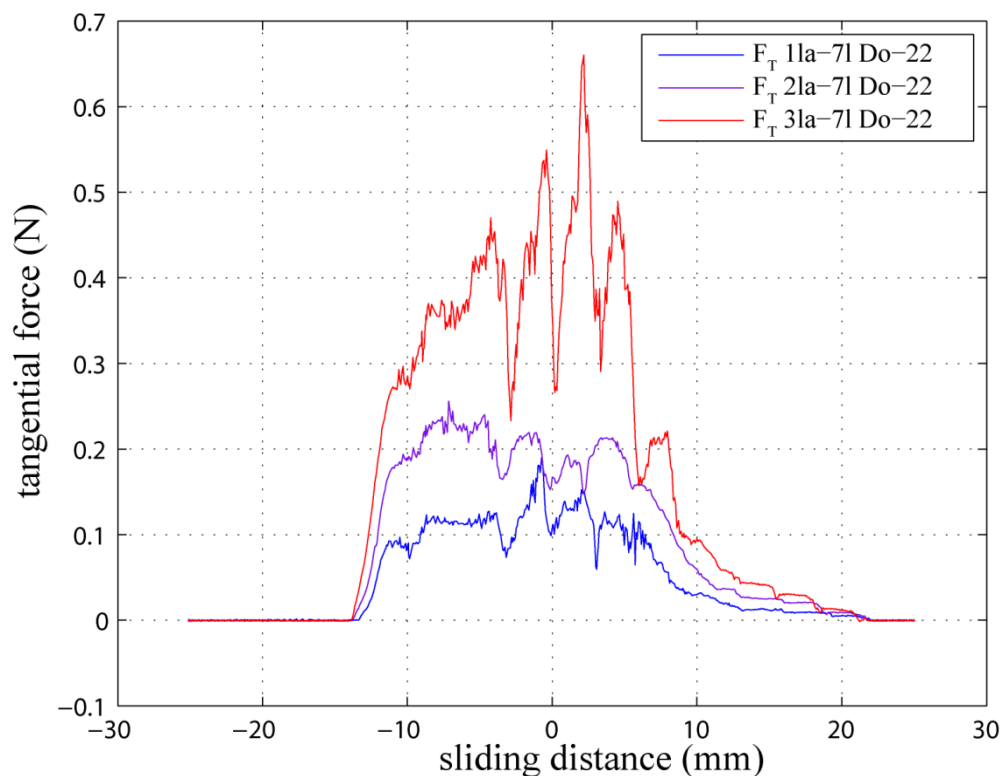


Figure 85 : Effet du nombre de boucles, force tangentielle (F) en fonction du déplacement.

Nous constatons que, sur la force de frottement tangentielle, le fait d'augmenter le nombre de boucles en longueur (1la-71, Figure 85 courbe du bas) augmente de deux à trois fois la force maximale de flexion par rapport à la boucle unique, les frottements entre les boucles sur une même colonne sont donc mis en évidence.

En revanche la force maximale dans le cas de deux colonnes de boucles ne se touchent pas (2la-71) est approximativement le double de celle obtenue avec une colonne de boucles (1la-71). Nous constatons sur le tapis de boucle 3la-71 (Figure 85 courbe du haut), une nette

hausse de la force (jusqu'à 4 fois plus élevée) le frottement entre boucle est encore plus important car elles sont en contact en largeur et en longueur lors du frottement.

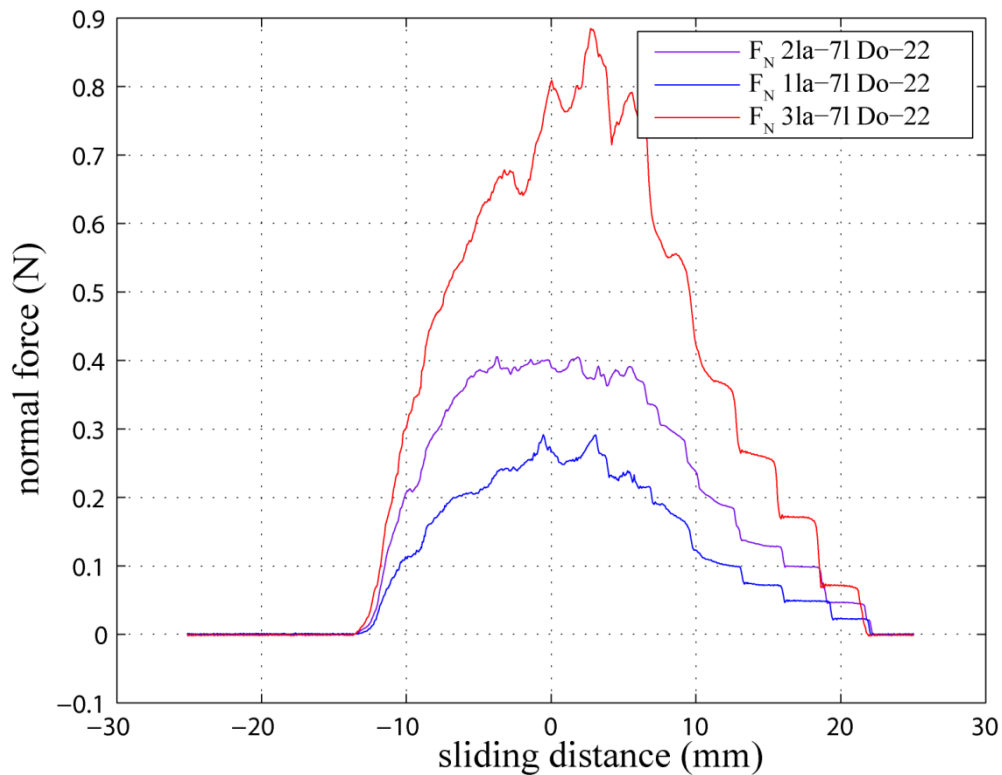


Figure 86 : Effet du nombre de boucles, force normale (N) en fonction du déplacement.

Sur la force normale (Figure 86) nous observons les mêmes phénomènes, nous pouvons ajouter que, sur la fin des courbes, nous observons plus distinctement des paliers que sur la force de frottement. Ces paliers correspondent aux lâchers successifs des premières boucles rencontrées.

Nous venons donc de mettre en évidence l'influence des frottements entre les boucles, sur une même ligne et sur une même colonne. Par conséquent la densité des boucles à son importance sur les frottements inter-boucles.

4.2.4 Influence de la vitesse du frotteur sur un tapis de boucles.

Nous allons maintenant nous intéresser à l'effet de la vitesse du frotteur sur un tapis de boucles. Nous utilisons pour ce cas un échantillon de boucles comportant 3 boucles sur une ligne et 7 lignes et réalisé avec le monofilament de polyester non-traité (3la-71-NT) avec un frotteur en aluminium (A-Do-22) (Figure 87 et Figure 88) et pour des vitesses allant de 1 à 20 mm.s⁻¹.

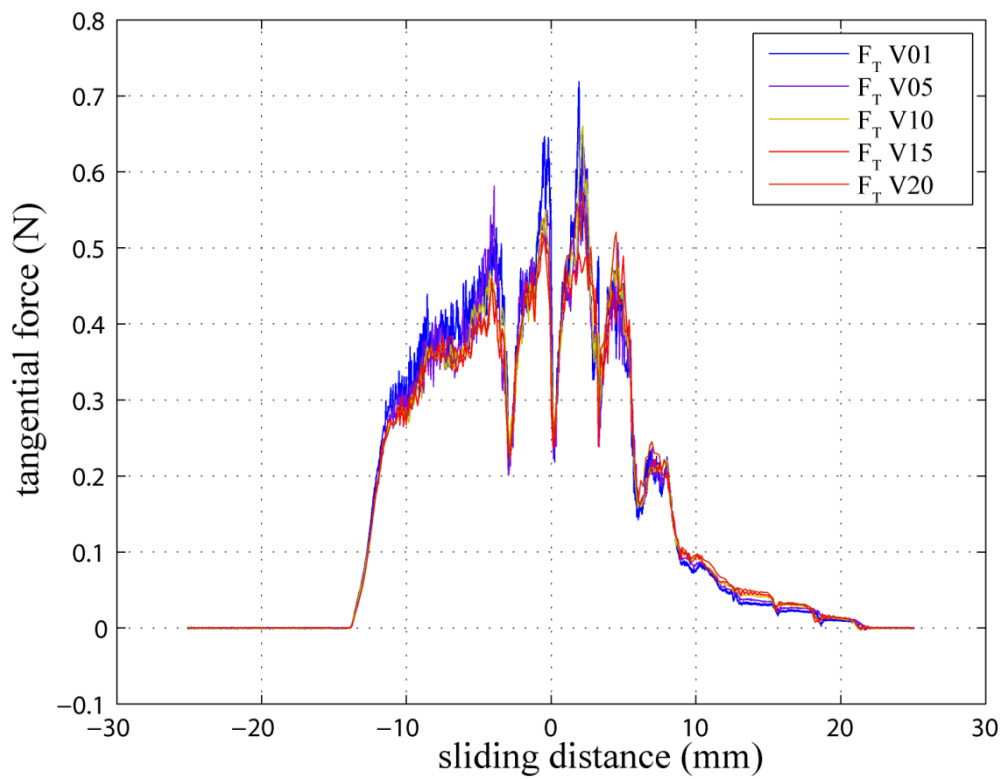


Figure 87 : Force tangentielle (F) en fonction du déplacement pour différentes vitesses relatives du frotteur (V de 1, 5, 10, 15 et 20 mm.s⁻¹).

Sur ce premier graphique nous observons principalement des différences de force sur les plateaux à la fin des signaux, lorsqu'il reste encore plusieurs boucles sous le frotteur. La force est plus grande quand la vitesse est plus élevée.

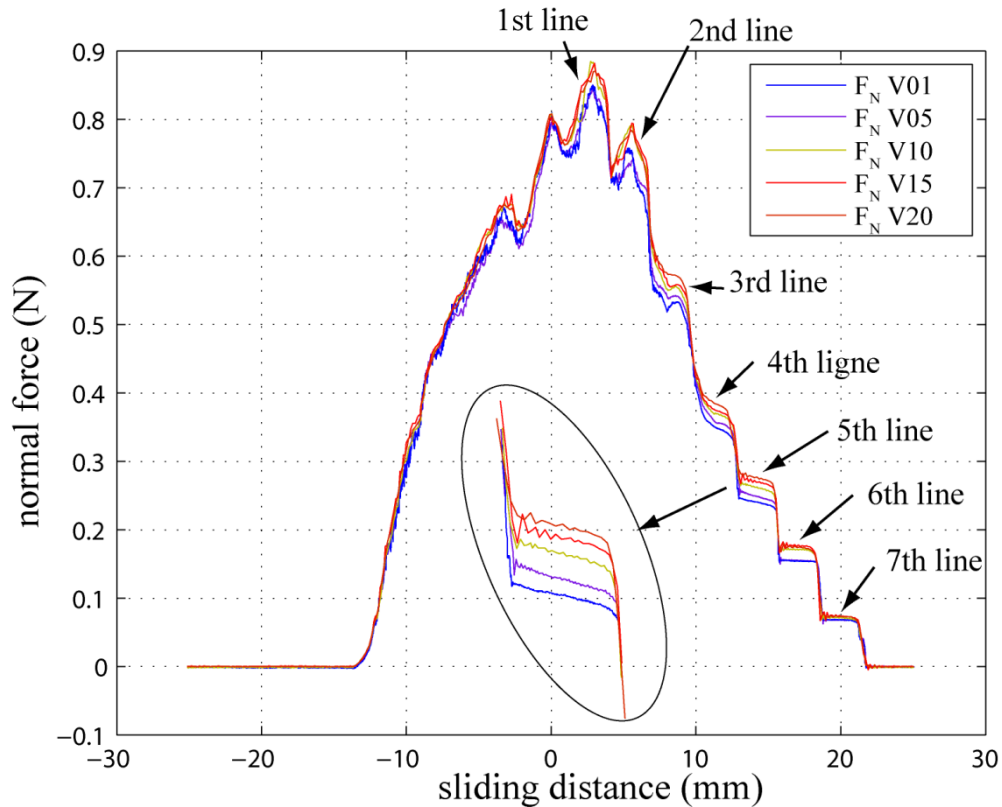


Figure 88 : Force normale (N) en fonction du déplacement pour différentes vitesses relatives du frotteur (V de 1, 5, 10, 15 et 20 mm.s⁻¹). Les zones de maintien sous le frotteur des différentes lignes de boucles sont indiquées (distance de frottement de la ligne sous le frotteur).

Sur le signal de la force normale nous remarquons également que l'influence de la vitesse est plus marquée lorsque des boucles sont sous le frotteur au-delà de leur phase de flexion. En effet, il y a 7 lignes de boucles sur l'échantillon et nous observons les premiers écarts sur la première ligne sous le frotteur. Nous en déduisons donc que la vitesse a un effet sur la force normale et donc aussi sur la force totale agissant sur la boucle. Ces surfaces présentent donc un caractère visqueux, dont l'origine n'est pas le matériau constitutif des boucles, pas ou peu le frottement avec le frotteur, mais le frottement entre ces boucles puisque cet écart n'apparaissait pas lors de l'étude de la boucle unique.

Comme cela a été mis en évidence avec les surfaces textiles pileuses réelles, le caractère visqueux de ces surfaces provient du frottement interfibrés.

Afin de déterminer dans quelle zone le frottement entre les boucles se produit essentiellement (à l'avant et/ou sous le frotteur), nous effectuons un essai similaire à celui fait sur les surfaces textiles. Nous utilisons le frotteur A-L-17, c'est-à-dire un frotteur dont l'aire de la semelle est négligeable (Figure 89 et Figure 90). Le tapis de boucle utilisé est le 3la-7l (3 colonnes et 7 lignes de boucles). Les valeurs de vitesses évoluent comme précédemment de 1 mm.s^{-1} à 20 mm.s^{-1} .

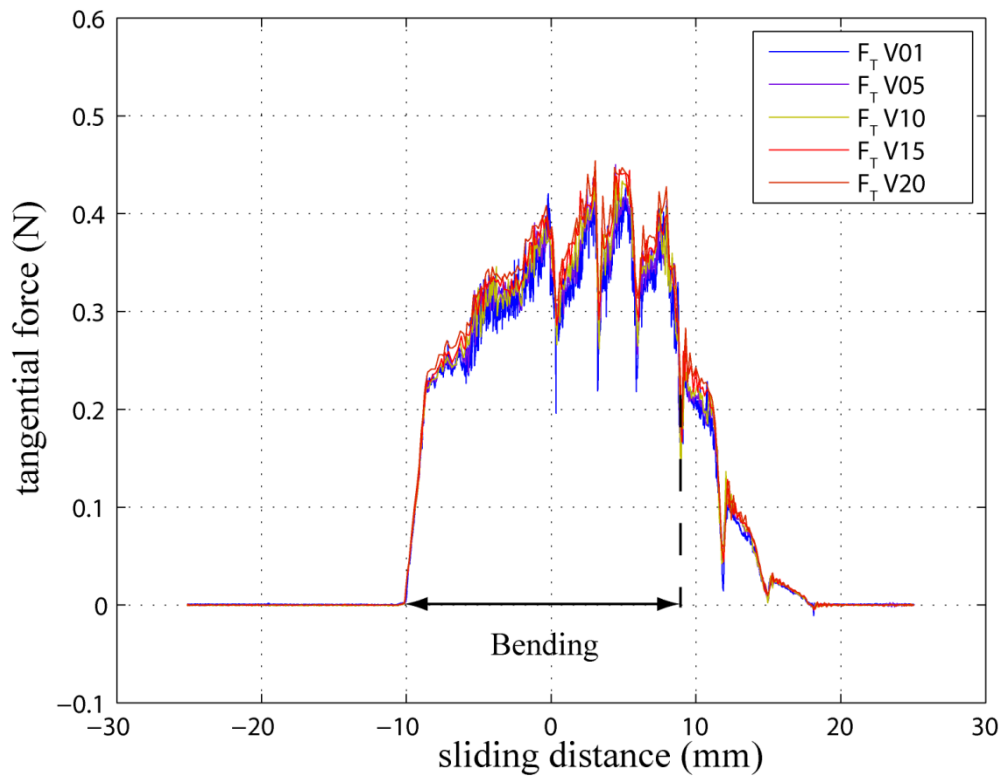


Figure 89 : Effet de la vitesse (V de 1 à 20 mm.s^{-1}) sur la composante tangentielle (F) de la force de flexion des boucles.

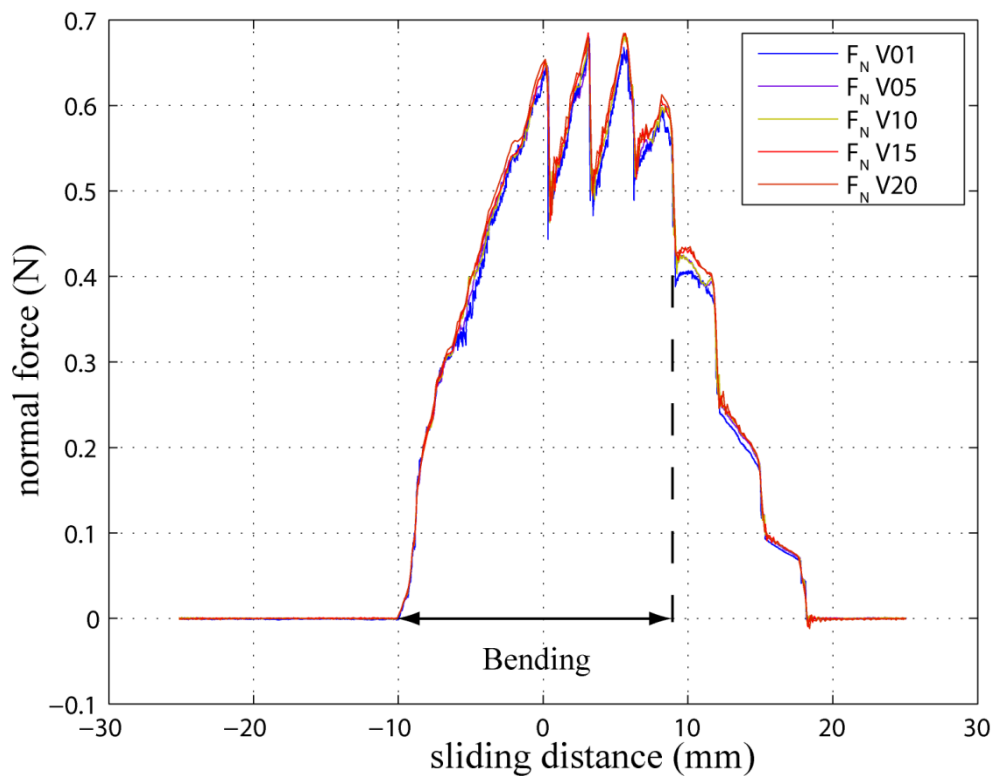


Figure 90 : Effet de la vitesse (V de 1 à 20 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$) sur la composante normale (N) de la force de flexion des boucles.

Nous observons que la vitesse du frotteur n'a pas d'influence sur la force de déformation à l'avant du frotteur, correspondant à la zone de flexion. Nous constatons donc que l'origine de la dépendance à la vitesse du comportement au frottement de ces surfaces se situe principalement sous le frotteur.

Néanmoins, même si l'influence du frottement entre les boucles à l'avant du frotteur n'est pas influent ici il est difficile de croire qu'il est inexistant. Aussi, avons-nous réalisé les mêmes essais avec le même filament ayant subi un traitement de surface. Ce traitement a pour objectif de modifier ses propriétés physico-chimiques de surface sans changer sa rigidité en flexion, ni sa rugosité.

Nous avons donc fait varier les propriétés adhésives du monofilament constitutif des boucles (cf §2.2.3 Chapitre 2). Outre le filament non traité, nous avons utilisé deux filaments ayant subi des traitements plasma en vue de modifier leurs propriétés de surface et plus particulièrement en adhésion. Le premier traitement vise à rendre le filament hydrophobe (noté THO) et le deuxième hydrophile (noté THI). Les caractéristiques de ces filaments sont décrites dans le §2.2.3 du Chapitre 2 (pour rappel, Tableau 5). Le filament qui présente la tension superficielle la plus faible et l'angle de contact le plus grand est le NT. Les deux autres

filaments THI et THO ont des caractéristiques assez proches (Tableau 12 récapitulant les valeurs essentielles présentées dans le Tableau 4).

fiber	$\gamma_s(\text{mJ/m}^2)$	θ (deg) contact angle way down (diving) for water
NT	32.7	85
THI	33.7	79
THO	34.4	79

Tableau 12 : Valeur de la tension superficielle de chacun des filament et de l'angle de contact à l'avancée avec l'eau.

Nous vérifions ensuite si la vitesse a une influence sur le frottement d'une boucle seule avec le filament THI (Figure 91 et Figure 92).

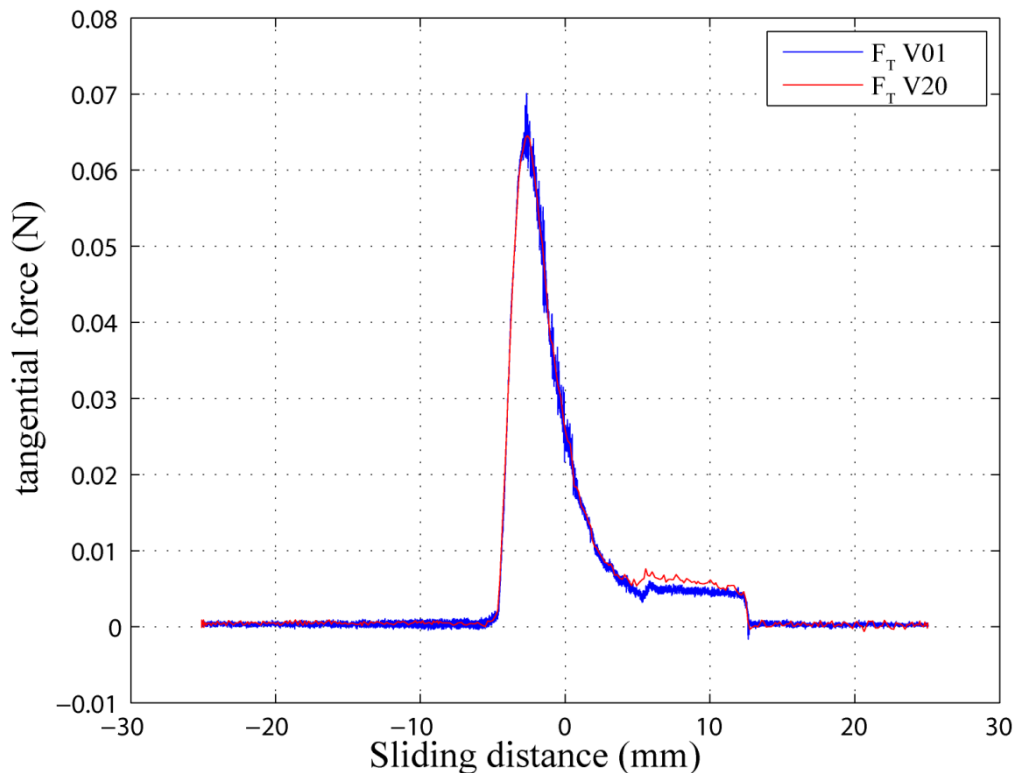


Figure 91 : Effet de la vitesse (V indiqué en $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$) sur une boucle unique (THI), force tangentielle (F) en fonction du déplacement

Nous ne notons pas d'effet sur la force de frottement tangentielle.

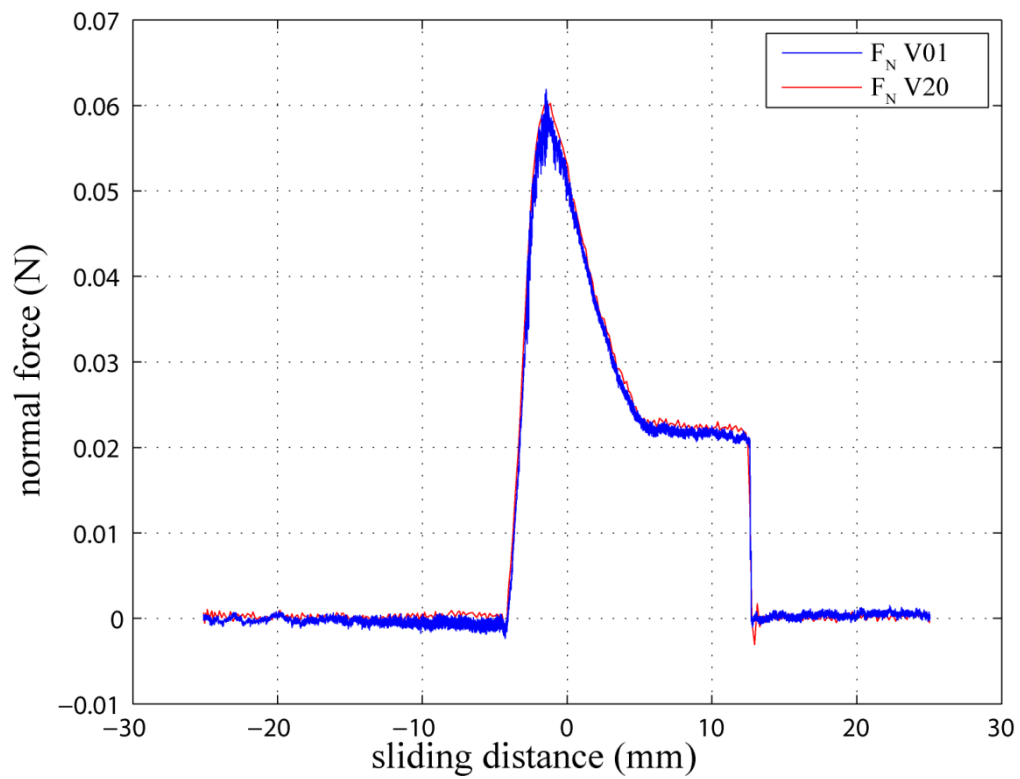


Figure 92 : Effet de la vitesse (V indiqué en mm.s^{-1}) sur une boucle unique (THI), force normale (N) en fonction du déplacement

Nous n'observons pas non plus de différence sur la force de frottement normale.

Nous contrôlons également si la vitesse a une influence sur le frottement d'une boucle seule avec le filament THO (Figure 93 et Figure 94).

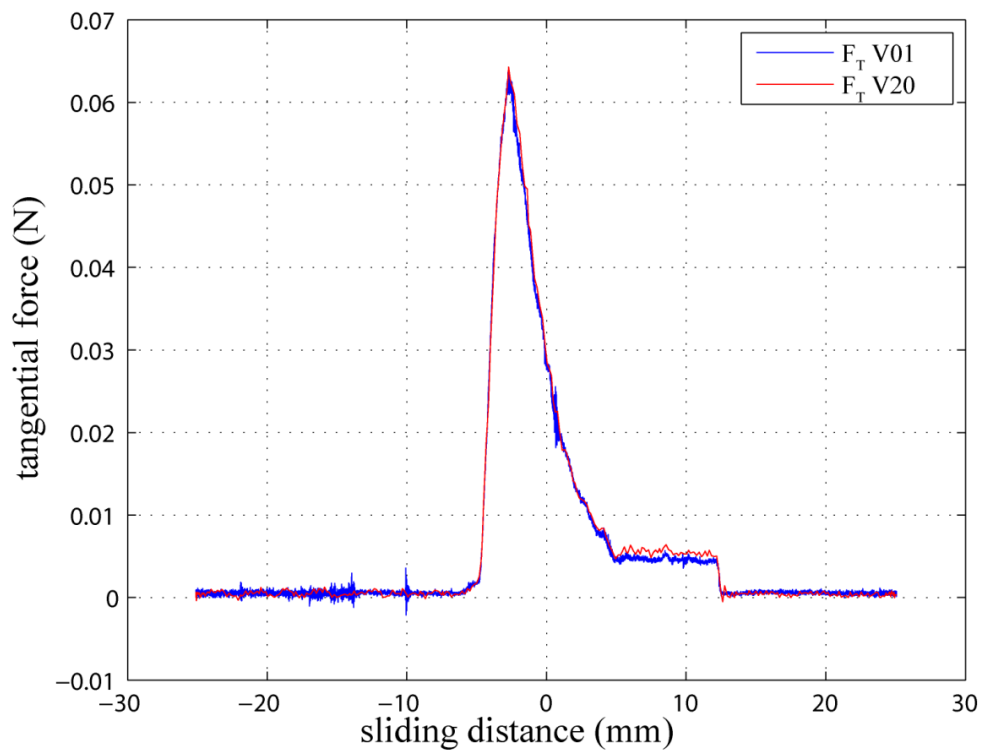


Figure 93 : Effet de la vitesse (V indiqué en mm.s^{-1}) sur une boucle unique (THO), force tangentielle (F) en fonction du déplacement

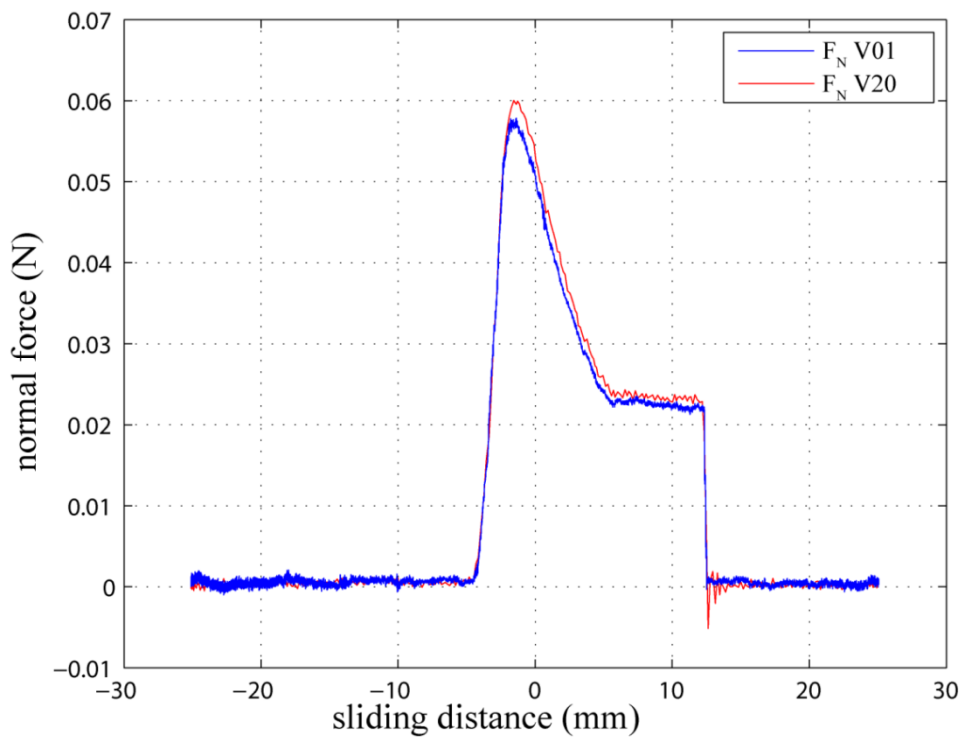


Figure 94 : Effet de la vitesse (V indiqué en mm.s^{-1}) sur une boucle unique (THO), force normale (N) en fonction du déplacement

L'étude des forces tangentielles (Figure 93) et normales (Figure 94) met également en évidence qu'il y a peu d'influence de la vitesse.

Nous cherchons maintenant à vérifier si la vitesse a une influence sur les tapis de boucles de filaments traités THI (Figure 95 et Figure 96) et THO (Figure 97 et Figure 98).

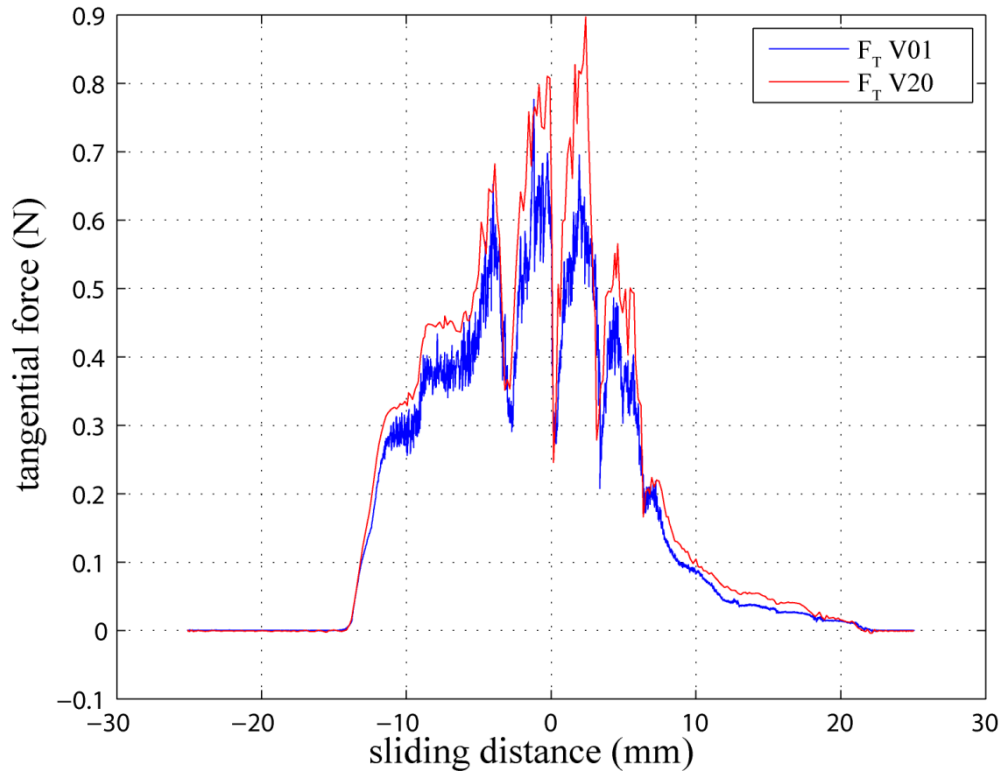


Figure 95 : Effet de la vitesse (V indiqué en mm.s^{-1}) sur un tapis de boucles (THI), force tangentielle (F) en fonction du déplacement

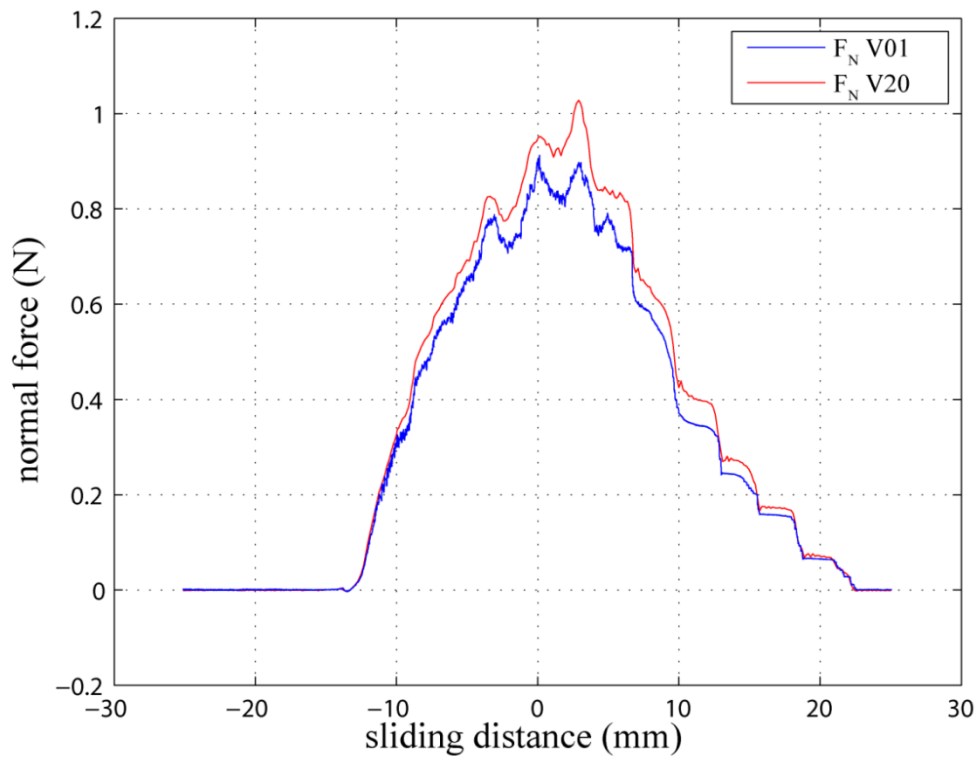


Figure 96 : Effet de la vitesse (V indiqué en mm.s^{-1}) sur un tapis de boucles (THI), force normale (N) en fonction du déplacement

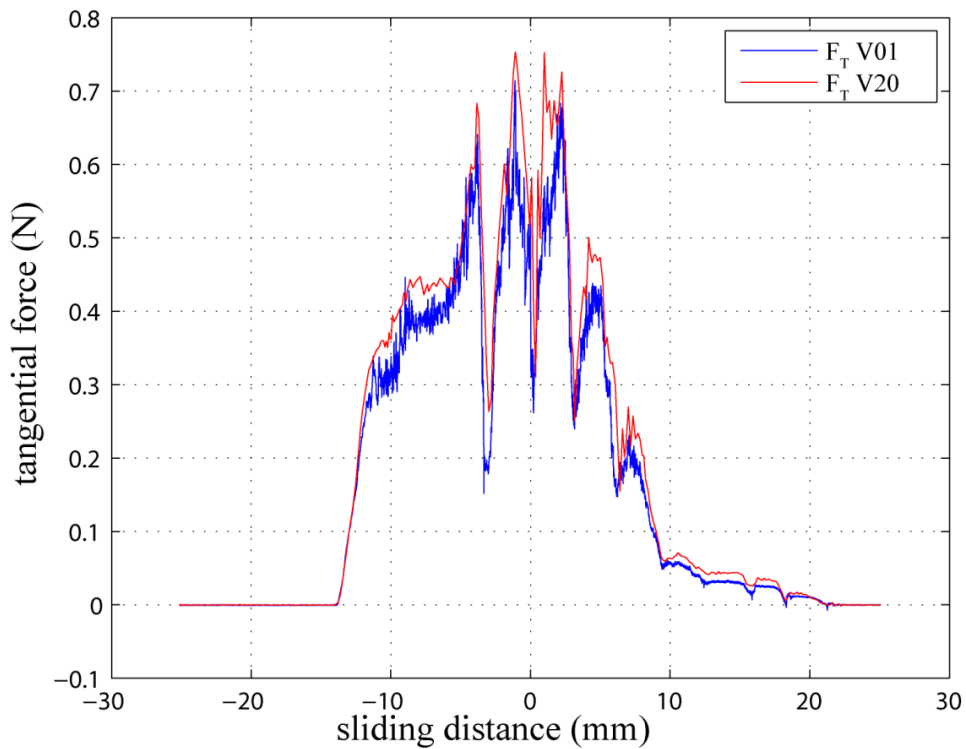


Figure 97 : Effet de la vitesse (V indiqué en mm.s^{-1}) sur un tapis de boucles (THO), force tangentielle (F) en fonction du déplacement

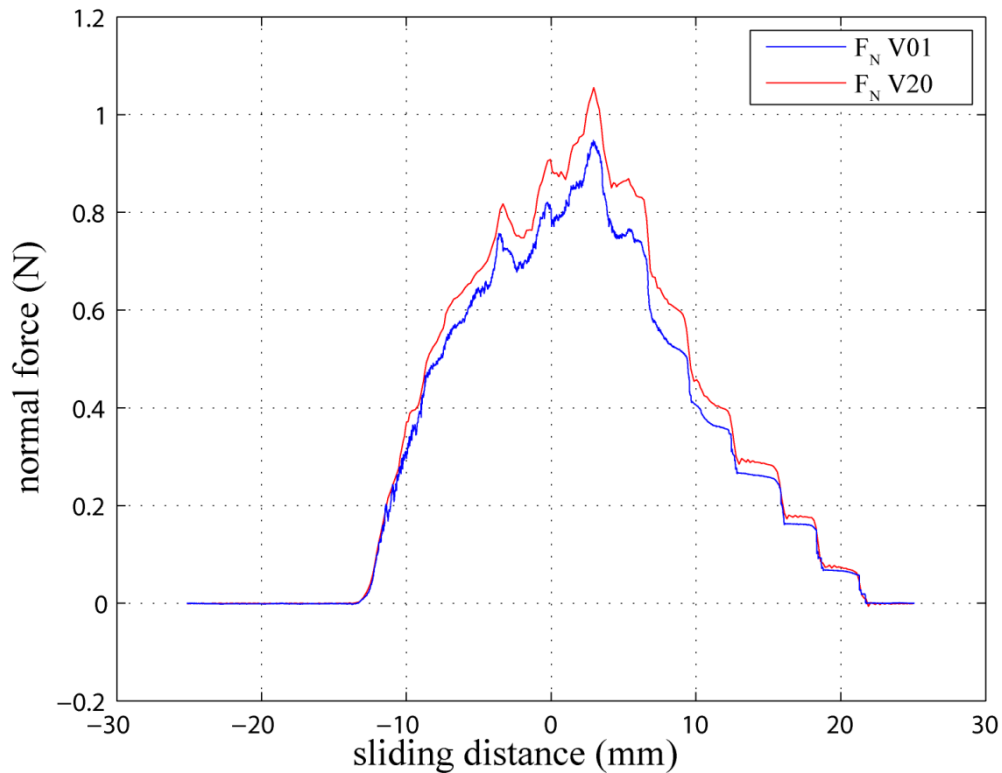


Figure 98 : Effet de la vitesse (V indiqué en mm.s^{-1}) sur un tapis de boucles (THO), force normale (N) en fonction du déplacement

Nous observons une différence sur la force de frottement tangentielle sur les tapis de boucles THI et THO. Cette différence est également observable sur la force normale. Il y a donc un effet de viscosité sur les filaments THI et THO, ceci se produit dès la phase de flexion des boucles. Comme pour les filaments NT, lorsque la vitesse est plus importante, les forces normales et tangentielles mesurées sont plus importantes.

Les résultats présentés montrent que :

- le phénomène de viscosité reste présent que ce soit avec ou sans traitement des filaments, puisque des différences de forces apparaissent selon la vitesse de frottement,
- le caractère visqueux n'est pas dû à un comportement du polymère constitutif des boucles du fait de leur sollicitation en flexion, puisque nous n'observons pas de différences lors de la phase de flexion de boucle seule,

Chapitre n°4 : Résultats provenant du modèle de frottement et visco-élasticité.

- le caractère visqueux ne provient pas ou peu des frottements entre le frotteur et les boucles, car nous n'observons pas ce phénomène sur le frottement d'une boucle seule,
- pour les trois filaments testés dont seules les propriétés adhésives changent, le frottement entre les boucles dépend donc de la vitesse de glissement. Pour les filaments testés, ce phénomène est toujours présent sous le frotteur mais peut être également visible à l'avant du frotteur lorsque la tension superficielle est suffisante. L'augmentation des frottements avec l'augmentation de la vitesse semble inverse de la dépendance connue de l'adhésion avec le temps. Néanmoins nous avons observé ce phénomène sur les surfaces réelles et les surfaces modèles.

4.2.5 Influence de la tension superficielle des filaments

L'objectif de cette section est de comparer le comportement au frottement des surfaces générées à partir des 3 filaments NT, THI et THO.

Nous commençons par comparer ces filaments avec un test de frottement sur boucle seule (Figure 99 et Figure 100).

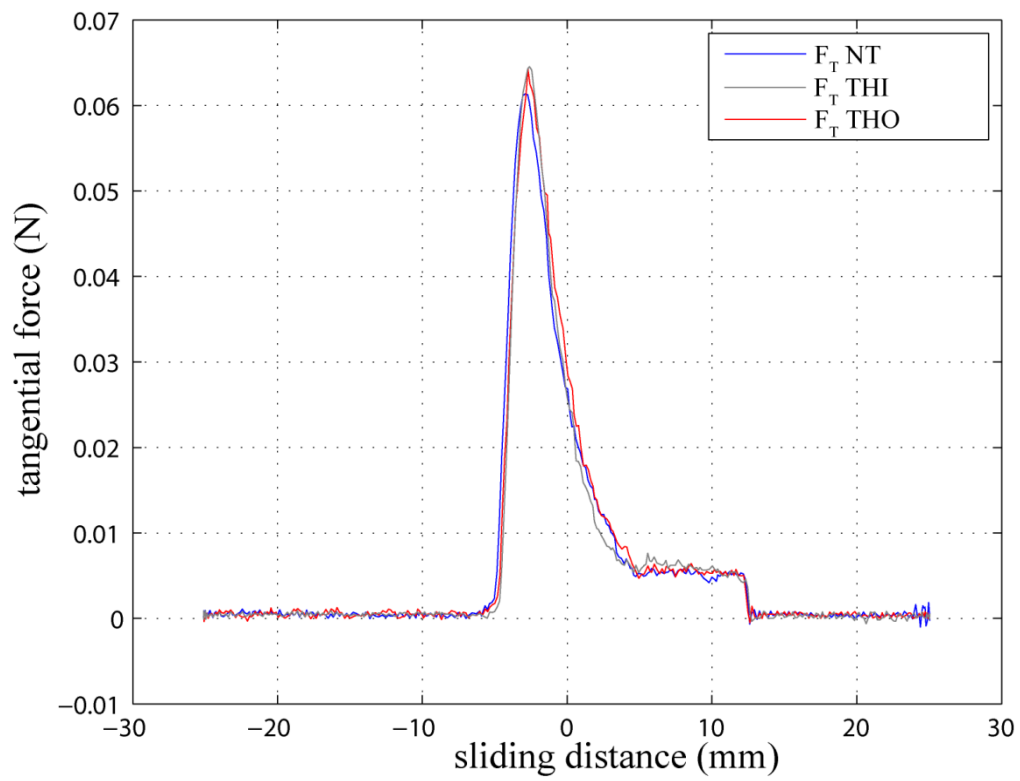


Figure 99 : Effet de la tension superficielle sur la force tangentielle (F), cas de la boucle unique

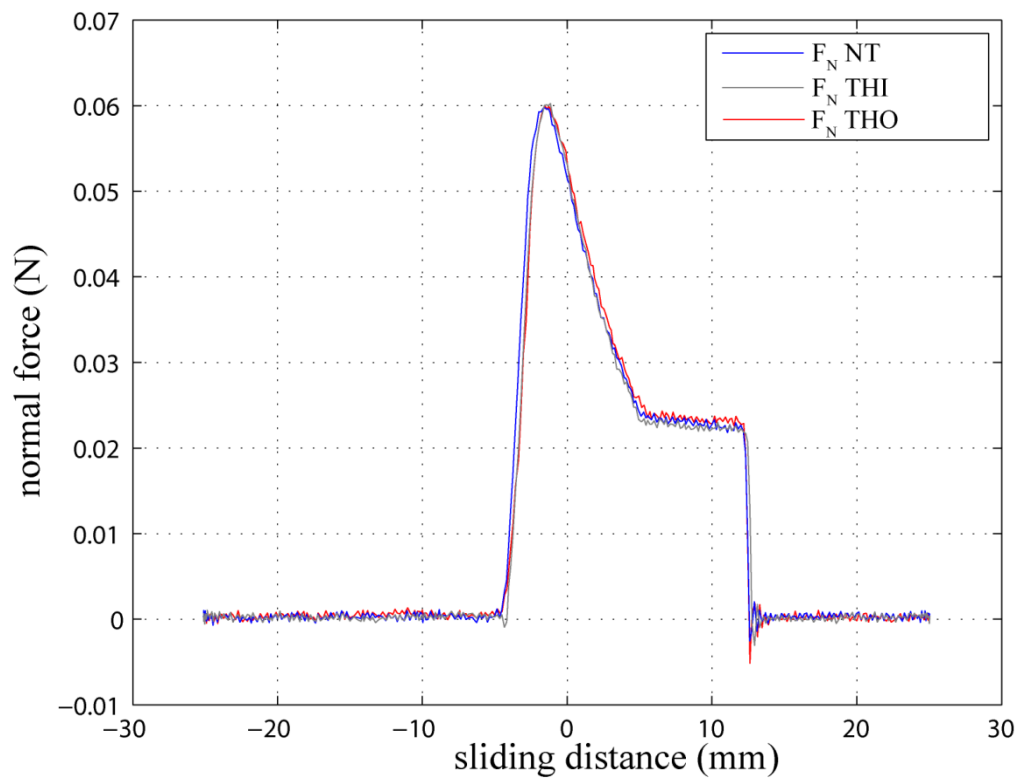


Figure 100 : Effet de la tension superficielle sur la force normale (N), cas d'une boucle unique

La Figure 99 et la Figure 100 montrent que le frottement frotteur/boucle n'est pas modifié par le changement de propriétés de surface des filaments.

Nous allons donc observer si le changement de propriétés surfaciques des monofilaments a une influence sur le contact entre boucles. Nous avons donc réalisé un essai sur les tapis de boucle 3la-7l, constitués chacun de l'un des trois filaments, avec un frotteur A-Do-22 à vitesse 20 mm.s^{-1} (Figure 101 et Figure 102).

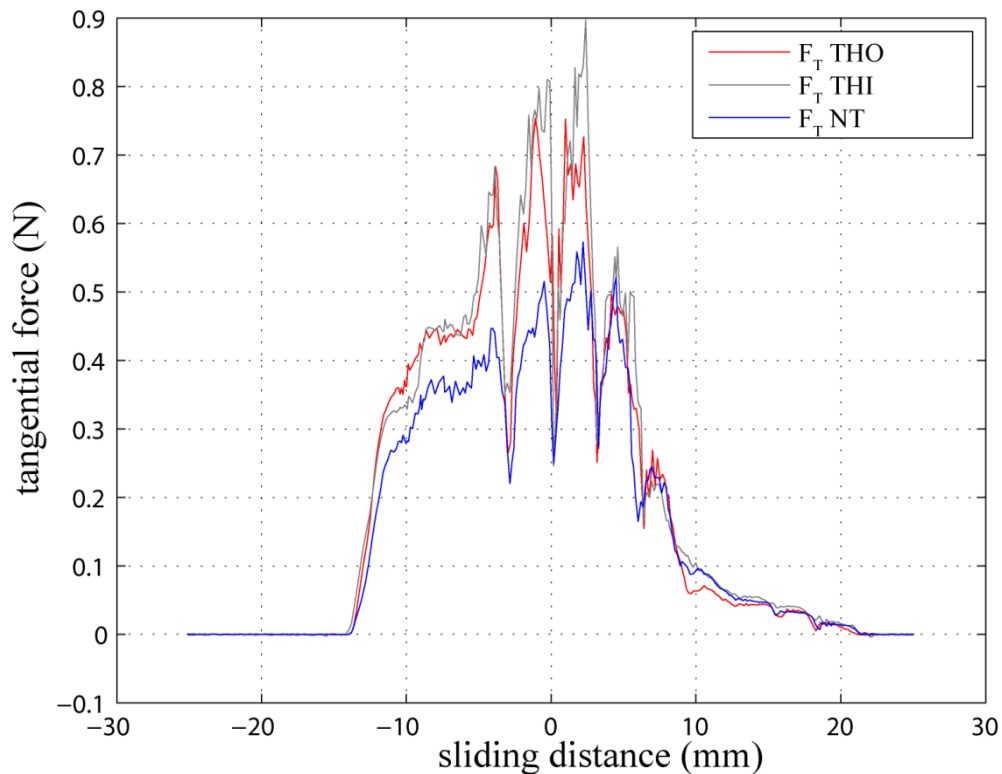


Figure 101 : Effet de la tension superficielle sur la force tangentielle (F), cas d'un tapis de boucles

Sur ce graphique de la force tangentielle en fonction du déplacement, nous observons une nette différence dès la phase de flexion entre les filaments traités (THI et THO) et le filament non traité (NT).

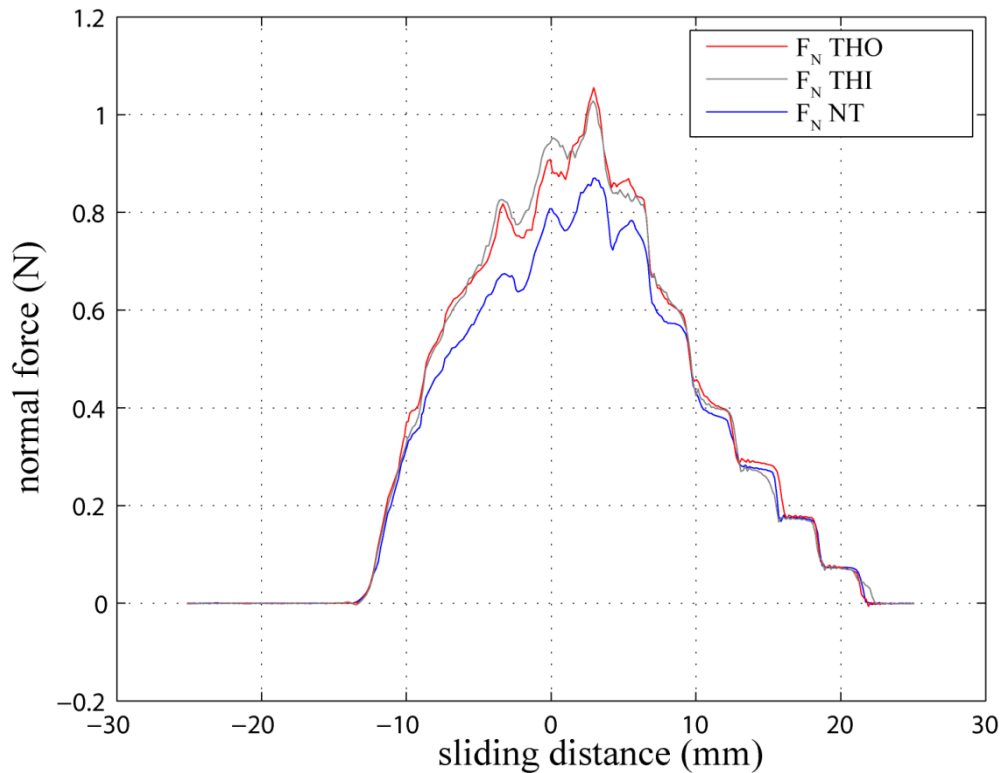


Figure 102 : Effet de la tension superficielle sur la force normale (N), cas d'un tapis de boucles

Sur le graphique de la force normale en fonction du déplacement nous constatons également qu'il y a une grande différence dès la phase de flexion entre les filaments traités et le filament non traité.

Le changement de propriétés surfaciques des filaments a donc une influence sur les frottements entre les boucles et ceci est particulièrement notable dans la phase de flexion des filaments. En effet, c'est la phase où il y a le plus de mouvement entre boucles, puisqu'une boucle, lorsqu'elle commence à être fléchie, tend à fléchir la boucle devant elle (Figure 103). Cette différence est moins marquée sur le frottement sous le frotteur où il y a peu de mouvement relatif entre les boucles.

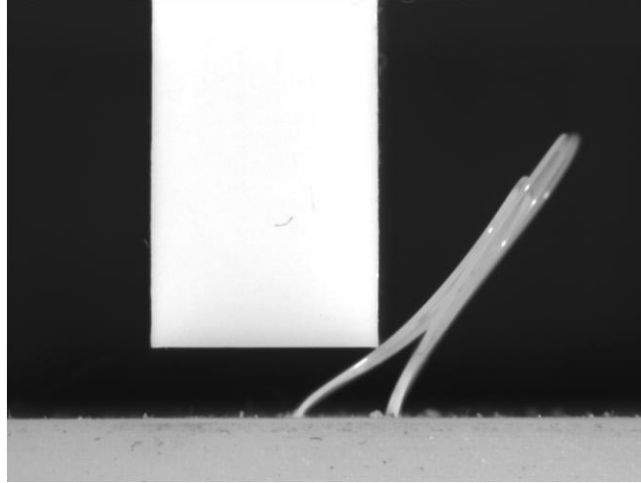


Figure 103 : Photo montrant une première série de boucle qui fléchit la suivante

A partir de ces mesures de frottement, nous pouvons classer les filaments. $F_{NT} < F_{THI} < F_{THO}$. Ce classement est similaire au classement des filaments en fonction de leur tension superficielle (Tableau 5).

Contrairement à ce que nous nous attendions après le traitement plasma, les différences entre THO et THI n'étaient pas importantes. Des cas de vieillissement rapide des traitements plasma ont déjà été constatés sur d'autres polymères⁶⁸. Ce qui pourrait expliquer la faiblesse de l'effet du traitement. Néanmoins, malgré des filaments dont la tension superficielle varie très peu (l'angle de contact avec l'eau à l'avancée varie légèrement), nous constatons des différences notables de comportement tribologique. Les frottements entre les fibres sont donc particulièrement sensibles aux propriétés adhésives.

⁶⁸ Bacharouche, J., Haidara, H., Kunemann, P., Vallat, M. F. & Roucoules, V. (2013). Singularities in hydrophobic recovery of plasma treated polydimethylsiloxane surfaces under non-contaminant atmosphere. In *Sensors and Actuators A: Physical* (vol. 197, pp. 25-29). Elsevier.

Chapitre n°4 : Résultats provenant du modèle de frottement et visco-élasticité.

Dans ce chapitre, nous avons pu mettre en évidence que:

- la part de la force de frottement d'une surface textile réelle due à la flexion de la pilosité à l'avant du frotteur est très faible dans le sens poil et faible dans le sens rebrousse-poil par rapport aux forces sous le frotteur.
- le phénomène de viscosité a une influence sur la force de frottement, essentiellement sous le frotteur, pour les surfaces réelles. Ceci peut s'expliquer par le faible module de la force à l'avant du frotteur en comparaison à celle sous le frotteur.
- dans le cas des macro-surfaces pileuses modèles, la viscosité se manifeste à l'avant du frotteur lorsque leur tension superficielle est suffisamment importante (cas des filaments THO et THI).
- le phénomène de viscosité est issu du frottement filament/filament et pas ou peu du frottement frotteur/filament. Cette étude réalisée sur les surfaces modèles valide l'hypothèse faite sur les surfaces réelles selon laquelle le phénomène de relaxation observé sur les surfaces textiles réelles est seulement dû à la surface utilisée et pas ou peu au frotteur.

Conclusion :

L'objectif de cette étude a consisté à étudier le comportement au frottement de surfaces textiles pileuses en étudiant plus particulièrement la pilosité émergeant d'une telle surface textile. Notre étude a été restreinte à des surfaces textiles dont la pilosité émergeant de la surface est régulière et orientée. Cette étude, expérimentale, a été menée à partir de mesures de frottement réalisées au moyen d'un tribomètre conçu au Laboratoire de Physique et Mécanique Textiles. L'influence des conditions expérimentales a été étudiée, tant au niveau dynamique (vitesse de glissement) qu'au niveau des caractéristiques des frotteurs utilisés (géométrie). Cette étude nous a permis de mettre en place un modèle de frottement de ces surfaces permettant d'obtenir les caractéristiques mécaniques de la pilosité et des informations liées à l'adhésion entre le frotteur et la pilosité.

En premier lieu, nous nous sommes basés sur la théorie de Bowden & Tabor selon laquelle la force totale de frottement entraînant la rayure d'une surface peut être décomposée en la somme de deux forces: une force de déformation de la matière entraînant la rayure et une force d'adhésion entre le matériau et le frotteur.

Nous avons pu vérifier qu'un tel raisonnement s'appliquait à nos surfaces textiles pileuses et nous avons pu dissocier la force totale de frottement en deux forces :

- la force appliquée par la face avant du frotteur, qui a été montrée lors de cette étude comme proportionnelle à la largeur du frotteur,
- la force appliquée par la semelle du frotteur et qui s'est révélée proportionnelle à l'aire de la semelle de celui-ci.

Lors du frottement d'une surface pileuse, le poil est donc dans un premier temps fléchi par la face avant du frotteur, puis est ensuite frotté par sa semelle.

Dans une seconde étape, notre travail nous a permis de mettre en évidence que la force de frottement d'une surface textile réelle due à la flexion de la pilosité à l'avant du frotteur est moins importante que celle provenant de la semelle du frotteur. De plus, la force de frottement dépend de l'orientation de la pilosité par rapport à la direction de glissement : elle est beaucoup plus faible dans le sens poil (sens naturel de flexion du poil) que dans le sens rebrousse-poil. Pour le velours et les tricots bouclettes qui présentent une pilosité régulière et

orientée, le rapport de forces sens rebrousse-poil / sens poil est environ de 1,1 à faible charge (3 kPa) et de 1,5 à charge élevée (15 kPa). Pour la polaire, qui elle présente une pilosité pseudo-aléatoire et désordonnée, le rapport est de 1 pour les deux charges testées.

De plus, nous avons pu caractériser la pilosité de surfaces textiles des velours en déterminant la contrainte nécessaire à l'avant du frotteur pour coucher la pilosité et sous le frotteur pour la maintenir ainsi déformée et rompre les liaisons physiques entre le frotteur et la pilosité.

Cette étude, menée à plusieurs vitesses de glissement différentes, nous a permis de mettre en évidence des phénomènes de viscosité lors du frottement de tels échantillons. Nous avons montré que le phénomène de viscosité se situe essentiellement sous le frotteur pour les surfaces réelles probablement du fait du faible module de la force à l'avant du frotteur en comparaison à celle sous le frotteur. Pour approfondir la compréhension de ces phénomènes, nous avons travaillé sur des macro surfaces textiles pileuses, conçues et fabriquées au sein du LPMT à partir de filaments réalisés à l'EMPA. Nous avons pu observer que, pour ces surfaces pileuses modèles, la viscosité se manifeste également à l'avant du frotteur lorsque leur tension superficielle du monofilament est suffisamment importante (cas de filaments dont la tension de surface a été volontairement augmentée ce qui augmente également le frottement entre ces filaments et le frotteur). La tension superficielle des fibres, c'est à dire leurs propriétés adhésives, est fondamentale dans le cas d'une surface pileuse. En effet, nous avons pu déterminer que le phénomène de viscosité, observé lors du frottement d'une surface pileuse par un frotteur suffisamment long, est essentiellement issu du frottement filament/filament. Nous avons vérifié qu'il ne s'agit pas ou peu du frottement frotteur/filament ni du comportement visqueux du polymère constitutif de la pilosité. Cet effet est renforcé lorsque la pilosité est dense. S'il n'y a pas de contact entre les poils, les seuls mécanismes qui persistent sont la flexion des poils et le frottement frotteur/poils.

Perspectives :

Pour compléter ce travail, il resterait à appliquer un tel raisonnement en faisant varier le chargement afin d'obtenir la loi d'évolution des contraintes à l'avant et sous le frotteur. De plus, il serait intéressant d'appliquer cette méthode à un plus grand nombre de surfaces textiles afin d'extraire des caractéristiques de pilosité standards.

Pour finir, il reste à séparer la composante sous le frotteur en une part adhésive et une part de maintien de la déformation. Nous nous en sommes rapprochés mais n'avons pas encore atteint cet objectif, le recours à un modèle numérique ou analytique semble alors indispensable.

De plus, lorsque l'on frotte une surface textile avec notre tribomètre, le frotteur décrit un mouvement alternatif. L'étude a ciblé uniquement les parties à régime établi, à vitesse constante. Il serait intéressant d'observer les zones de retournement du sens poil au sens rebrousse-poil et inversement. En effet, dans ces zones transitoires les phénomènes se produisant peuvent apporter des réponses intéressantes vis-à-vis du comportement mécanique d'une pilosité.

Bibliographie :

- Ajayi, J. O. (1992). Fabric Smoothness, Friction and Handle. In *Textile Research Journal* (vol. 62, pp. 52-59). Sage Publications.
- Aliouche, D. & P. Viallier. (2000). *Mechanical and Tactile Compression of Fabrics: Influence on Handle* (pp.70-939). Textile Research Journal.
- Bacharouche, J., Haidara, H., Kunemann, P., Vallat, M. F. & Roucoules, V. (2013). Singularities in hydrophobic recovery of plasma treated polydimethylsiloxane surfaces under non-contaminant atmosphere. In *Sensors and Actuators A: Physical* (vol. 197, pp. 25-29). Elsevier.
- Baussan, E. (2010). *Etude tribologique et modélisation du contact peau-chaussette. Application à la course à pied*. Université de Haute-Alsace.
- Baussan, E., Bueno, M. A., Rossi, R. M. & Derler, S. (2010). Experiments and modelling of skin-knitted fabric friction. In *Wear* (vol. 268, pp. 1103-1111). Elsevier.
- Bhushan, B. (2002). *Introduction to Tribology*. John Wiley & Sons.
- Bowden, F. P. & Tabor D. (1986). *The friction and lubrication of solids*. Clarendon press.
- Breugnot, C. (2005). *Contribution à la caractérisation mécanique du toucher des surfaces textiles à partir de critères neurosensoriels*. Université de Haute Alsace.
- Bueno, M. A. & Lamy, B. (2011). *Caractérisation des surfaces: Surfaces industrielles classiques, surfaces textiles, tissus biologiques*. Ellipses.
- Bueno, M. A. & Renner, M. (2002). Comparison of a new tribological method for the evaluation of the state of the fabric with the KES-F Surface Tester. In *Journal of the Textile Institute* (vol. 92, Part. 1, n°3, pp. 212-227). Textile Institute.
- Bueno, M. A. (1995). *Caractérisation tribologique des surfaces textiles : application au contrôle des traitements spécifiques d'ennoblissement*. Université de Haute Alsace.
- Bueno, M. A. (2008). Structure and mechanics of knitted fabrics. In *Structure and mechanics of fibre assemblies. The Textile Institute and Woodhead Publishing Limited* (pp.84-115). CRC Press.

- Bueno, M. A. (2011). Tribologie des textiles. In *Techniques de l'ingénieur*, thème Mécanique (Réf : tri4400). Techniques de l'ingénieur.
- Bueno, M. A., Durand, B. & Renner, M. (2000). Optical Characterization of the State of the Fabric Surfaces. In *Optical Engineering* (vol. 39, n°6, pp. 1697-1703). Spie Digital Library.
- Bueno, M. A., Lamy, B., Renner, M. & Viallier, P. (1996). Tribological investigation of textile fabrics. In *Wear* (vol. 195, pp. 192-200). Elsevier.
- Camillieri, B., Bueno, M. A., Rossi R. M. & Derler, S. (2012). Brush model to predict the friction of hairy textile fabrics from indentation measurements. In *Wear* (vol. 296, pp. 519-527). Elsevier.
- Cartier, M. & Kapsa, P. (2001). Usure des contacts mécaniques : Eléments de tribologie. In *Techniques de l'Ingénieur* (pp.1-13, BM 5066). Techniques de l'Ingénieur.
- Childs, T. H. C. (1970). The sliding of rigid cones over metals in high adhesion conditions. In *International Journal of Mechanical Sciences* (pp. 393–403). Elsevier.
- Fontaine, S. (2001). *Contribution à la compréhension des mécanismes tribologiques lors d'une usure abrasive ou chimique de structures fibreuses. Applications industrielles aux tissus en PET-laine*. Université de Haute Alsace.
- Gauthier, C., Lafaye, S. & Schirrer, R. (2001). Elastic Recovery of a Scratch in a Polymeric Surface : Experiments and Analysis. In *Tribology International* (vol. 34, pp. 469-479). Elsevier.
- Gupta, B. S. (2008). *Friction in textile materials*. Woodhead publishing in textiles n°78. Textile Institute : CRC Press: Woodhead Publishing.
- Hearle, J. W. S. & J. Amirbayat. (1988). The Design of a Multipurpose Fabric Tester. In *Journal of the Textile Institute* (vol. 4, pp. 588-597). Textile Institute.
- Howell, H. G., Mieszkis, K. W. & Tabor, D. (1959). *Friction in textiles*. Textile Institute: Butterworths scientific publications.
- Johnson, K. L. (1985). *Contact Mechanics*. Cambridge University Press.
- KRÜSS. Mesure d'angle de contact – une approche théorique. In *Principes de mesure des tensiomètres KRÜSS*. Consulté en avril 2013 sur le site internet : <http://www.kruss.de/de/theorie/messungen/theorie-franzoesisch/angle-de-contact.html>
- Morrow, J. A. (1931). *Journal of Textile Institute* (t. 425). Textile Institute.

- Pac, M. J. (2001). *Les surfaces textiles aux échelles micro-méso et macroscopiques : propriétés thermiques et tribologiques*. Université de Haute Alsace.
- Priel, M., Désenfant, M. & Rivier, C. (2005). Evaluation des incertitudes des résultats d'analyse. In *Techniques de l'ingénieur* (p.105). Techniques de l'ingénieur.
- Rabinowitz, E. (1970). *The determination of the compatibility of metals through static friction tests* (pp. 198–205). American Society of Lubrication Engineers.
- Raphet, B. (2012). Etats de surface – Mesure. In *Techniques de l'ingénieur* (thème Mesures mécaniques et dimensionnelles). Techniques de l'Ingénieur.
- Sinoimeri, A. (2009). Friction in textile fibers and its role in fiber processing. In *Wear* (vol. 267, pp. 1619-1624). Elsevier.
- Tourlonias, M. & Bueno, M. A. (2009). Etude phénoménologique du comportement au frottement de surfaces textiles. In *19^{ème} Congrès Français de Mécanique*, Marseille.
- Tourlonias, M., Bigué, L. & Bueno, M. A. (2007). Polarimetric measurements of fabric surfaces. In *Optical Engineering*. Spie Digital Library.
- Tourlonias, M., Bigué, L. & Bueno, M. A. (2010) Contribution of polarimetric imaging for the characterization of fibrous surface properties at different scales. In *Optics and Lasers in Engineering* (pp. 75-82). Elsevier.
- Tourlonias, M., Bocquet, R., Bueno, M. A., Derler, S. & Rossi, R. (2011). Participation d'un élément unitaire de pilosité lors du frottement d'une surface textile. In *23^{ème} Journées Internationales Francophones de Tribologie*, Obernai.
- Tourlonias, M., Bueno, M. A., Bigué, L., Durand, B. & Renner, M. (2005). Contactless Optical Extensometer for Textile Materials. In *Experimental Mechanics* (pp. 420-426). Society for Experimental Mechanics.
- Watzky, A. & Bueno, M. A. (2011). L'elastica revisitée sous l'angle des efforts. In *20^{ème} Congrès Français de Mécanique*, Besançon.
- Weidman, D. (2010). *Aide-mémoire : Textiles techniques*. Dunod.

Annexe :

calcul de tension superficielle

Afin de calculer la tension superficielle de chaque filament, nous avons suivi la démarche décrite ci-dessous⁶⁹ :

γ : tension superficielle (en mN.m^{-1} ou mJ.m^{-2}),

θ : angle de contact (issu des mesures sur le tensiomètre Kruss K14, avec au minimum 5 mesures proches pour admettre un résultat correct),

Indices :

d pour dispersif (ou apolaire),

nd pour non dispersif (ou polaire),

l pour liquide,

s pour solide,

W_{sl}^{nd} : travail réversible d'adhésion solide liquide (en mJ/m^2)

Calcul du $\frac{\sqrt{\gamma_l^d}}{\gamma_l}$ pour chacun des liquides (eau et diiodométhane)

Calcul de la pente liée à l'équation issue des relations de Fowkes et Dupré :

$$\cos \theta = 2 \cdot \sqrt{\gamma_s^d} \frac{\sqrt{\gamma_l^d}}{\gamma_l} + \frac{W_{sl}^{nd}}{\gamma_l} - 1$$

Équation 43

⁶⁹ KRÜSS. Mesure d'angle de contact – une approche théorique. In *Principes de mesure des tensiomètres KRÜSS*. Consulté en avril 2013 sur le site internet : <http://www.kruss.de/de/theorie/messungen/theorie-franzoesisch/angle-de-contact.html>

Nous obtenons des courbes du type (Figure 104) :

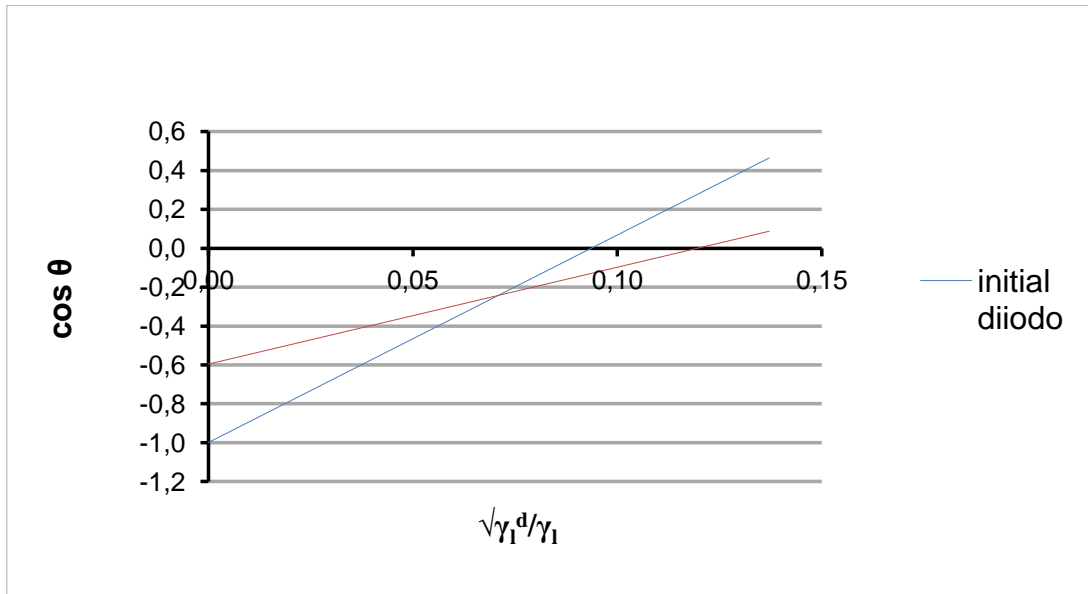


Figure 104 : Courbe type de $\cos \theta$ en fonction de $\sqrt{\gamma_l^d}/\gamma_l$

Pour la courbe du diiodométhane $W_{sl}^{nd}=0$ car la partie polaire (non dispersive) est considérée comme nulle. Nous obtenons alors une équation :

$$\cos \theta = 2 \cdot \sqrt{\gamma_s^d} \frac{\sqrt{\gamma_l^d}}{\gamma_l} - 1$$

Équation 44

La pente de la courbe est alors égale à : $2 \cdot \sqrt{\gamma_s^d}$.

On en déduit la valeur de : $\gamma_s^d = \left(\frac{\text{pente}}{2}\right)^2$.

Le travail réversible d'adhésion solide liquide (différence entre les deux courbes au point $\frac{\sqrt{\gamma_l^d}}{\gamma_l}$ de l'eau, est tiré de l'équation de la droite pour l'eau :

$$W_{sl}^{nd} = \left(\cos \theta - 2 \cdot \sqrt{\gamma_s^d} \frac{\sqrt{\gamma_l^d}}{\gamma_l} + 1 \right) \cdot \gamma_l$$

Équation 45

Le travail s'écrit également sous la forme :

$$W_{sl}^{nd} = 2 \cdot \sqrt{\gamma_s^{nd} \cdot \gamma_l^{nd}}$$

Équation 46

Nous en déduisons la valeur de :

$$\gamma_s^{nd} = \frac{\left(\frac{w_{sl}^{nd}}{2}\right)^2}{\gamma_l^{nd}}$$

Équation 47

Nous pouvons alors déterminer la tension superficielle totale de la fibre :

$$\gamma_s = \gamma_s^d + \gamma_s^{nd}$$

Équation 48