

# Chaussette instrumentée pour la mesure de la pression et du frottement

C. GUIGNIER<sup>a,b</sup>, B. CAMILLIERI<sup>a</sup>, M. SCHMID<sup>b</sup>, R. R. ROSSI<sup>b</sup>, M.-A. BUENO<sup>a</sup>

<sup>a</sup>. Université de Haute-Alsace, Laboratoire de Physique et Mécanique Textiles (LPMT EA 4365), Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs Sud-Alsace, Mulhouse, France

<sup>b</sup>. Empa, Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology, Laboratory for Biomimetic Membranes and Textiles, St. Gallen, Switzerland

## Résumé :

*L'objectif est d'étudier la capacité des fibres optiques polymériques (POF) à être insérées dans un tricot pour mesurer la pression mais également le frottement. Des POF commerciales et en cours de développement ont été comparées en termes de propriétés mécaniques nécessaires pour l'intégration de ces POF dans un tricot selon un procédé industriel. Ensuite la fibre choisie a été insérée dans différents liages de tricot afin de déterminer la configuration donnant la sensibilité au frottement et à la compression la plus élevée. A partir de la structure tricotée ainsi choisie, une chaussette a été réalisée. Finalement, une étude de faisabilité a montré que la chaussette instrumentée d'une POF permet de suivre les différentes phases de la marche.*

## Abstract:

*The objective is to study the ability of polymer optical fiber (POF) to be inserted in a fabric to proof the ability of POF inserted in a knitted fabric to measure pressure but also friction. Firstly, POF marketed and in development have been compared in terms of required mechanical properties for the insertion of the fiber directly into a knitted fabric on an industrial scale. Secondly, the chosen optical fiber was inserted inside several types of knitted fabric and was shown to be sensitive to friction and compression. The knitted structure with the highest sensitivity has been chosen for the sock prototype. Finally, a feasibility study with an instrumented sock showed that it is possible to detect the different phases of walking.*

**Mots clefs : Smart textiles, frottement, pression, chaussette**

## 1. Introduction

Les smart textiles ou textiles intelligents sont sources de vives attentes car ils ont un grand potentiel dans le domaine du monitoring du corps humain, en particulier pour suivre les constantes vitales (la fréquence cardiaque, la température, l'humidité, la fréquence respiratoire) ou l'actimétrie (mesure de l'activité, des mouvements corporels) dans l'objectif de détecter la chute d'une personne par exemple. Ces textiles peuvent prendre la forme d'une ceinture, d'un T-shirt, de chaussettes ou autres.

Des chaussettes intelligentes sont commercialisées pour mesurer : i) le nombre et la cadence des pas, l'accélération lors de l'attaque du sol pendant un jogging (Sensoria®) ou encore ii) la température de certaines zones du pied pour la prévention du pied diabétique, conséquence de la neuropathie en vue de prévenir les ulcères (chaussettes pour diabétique Siren). En effet, il s'agit là d'un sujet de santé publique car plus de 7% de la population française est atteinte de diabète (insulino dépendant de type 1, ou non insulino dépendant dit diabète « gras » de type 2), dont 10% qui ont un trouble trophique du pied pouvant amener à l'amputation (première cause d'amputations non traumatiques). Cette pathologie, est due à une immunodépression locale et à des troubles sensitifs superficiels se traduisant par des prédispositions aux infections qui sont indolores aux diabétiques. La protection des pieds lors de la marche est donc fondamentale pour éviter tout début de lésions. Les équipements de protection proposés sont alors des chaussures, semelles ou chaussettes adaptées.

Le présent projet consiste à proposer une chaussette de monitoring des points de pression et de frottement du pied lors de la marche pour aider le praticien à prescrire des chaussettes dont les zones de renforts sont définies selon la morphologie du patient. A l'instar des bas de contention, le patient pourrait alors disposer de chaussettes adaptées.

Plusieurs types de chaussettes instrumentées mesurant la pression sont proposés dans la littérature utilisant des fils à effet piézorésistif (1, 2), en insérant un polymère piézorésistif dans la structure textile (3, 4) ou en utilisant un textile conducteur constitué de plusieurs couches assemblées (5, 6). Par ailleurs, les fibres optiques ont été utilisées par Najafi *et al.* (7, 8). Il s'agit de fibres optiques en verre avec enveloppe comportant un réseau de Bragg intégré permettant de mesurer la température et la pression. Les fibres optiques présentent quelques avantages en particulier une insensibilité à l'humidité et à un environnement électromagnétique. Dans le présent travail, il s'agit d'étudier le potentiel des fibres optiques polymériques (POF) plus flexibles que les fibres optiques en verre, atout incontestable pour une application textile, même si elles présentent de moins bonnes propriétés optiques.

La réalisation d'une chaussette de monitoring avec POF intégrées implique différentes étapes :

- d'un point de vue scientifique : i) étudier le comportement tribologique des tricots comportant les POF et ii) d'étudier la mesure de frottement/compression obtenue par les POF.
- d'un point de vue technologique : i) identifier les fibres optiques compatibles avec le tricotage industriel et ii) choisir la structure textile la plus adaptée.

## 2. Choix de la fibre optique polymérique

### 2.1 Implémentation dans un tricot

Une chaussette est une forme 3D constituée de mailles et issue d'un procédé de fabrication additive : le tricotage. Les mailles sont des boucles entrelacées réalisées à partir d'un textile linéaire : le fil. Le fil qui fait une maille subit donc une courbure importante dépendant de la largeur des aiguilles utilisées pour réaliser le tricot, qui est en lien avec la taille de maille (la longueur de fil absorbé par une maille en mm/maille), de plus il subit une traction lors de la formation de la maille et des frottements contre des pièces métalliques (9-11). Le fil est soumis à ces 3 sollicitations (flexion, traction et frottement) simultanément. Cependant dans le cas des POF, une importante courbure est à proscrire sous peine de coupure du signal lumineux (le faisceau sort alors de la fibre et le signal lumineux n'arrive pas jusqu'à l'extrémité de la fibre considérée comme la sortie du signal).

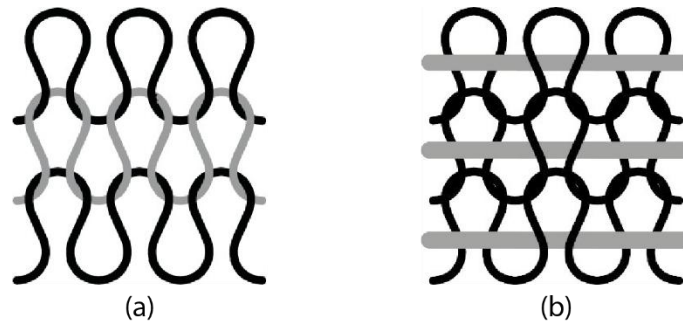


Figure 1: Exemple de structure tricotée (a) un jersey et (b) la même structure avec un fil de trame inséré (le fil de structure est en noir et le fil de trame en gris).

Dans ce cas, le choix se porte sur une insertion de la fibre de façon rectiligne, les mailles du tricot réalisées dans un fil de fond standard maintenant alors la fibre dans la structure tricotée. Il s'agit là de la technique d'insertion de trame utilisée par exemple pour insérer les fils élastiques dans les bords côtes des chaussettes ou dans toute la structure des bas ou chaussettes de compression (Fig. 1).

Il reste alors à choisir la structure du fond. Nous avons dans cette étude considérée trois structures de base : le jersey, la côte 1 et 1 et l'interlock 1 et 1.

## 2.2 Propriétés des fibres optiques polymériques

Même s'il ne fait pas de maille, un fil dans une machine à tricoter subit des courbures importantes pouvant aller jusque  $1 \text{ mm}^{-1}$  dans les différents œillets de guidage dans lesquels il passe puis au final à la sortie du guide-fil qui le présente suivant une trajectoire précise dans la zone de tricotage. La fibre optique destinée à être insérée sans dommage dans le tricot doit pouvoir accepter de telles courbures sans être déformée plastiquement. De plus, lors de l'usage, le tricot doit être souple donc les fibres optiques doivent avoir une faible rigidité en flexion. Celle-ci peut être obtenue par un faible module de Young ou un faible diamètre. Cependant, afin de pouvoir être manipulée et reliée facilement, la fibre ne doit pas être trop fine, idéalement elle doit avoir un diamètre du même ordre de grandeur que celui du fil de fond (de quelques dixièmes de mm à 1 mm). Aussi la résistance à la courbure et le module de Young ont été étudiés.

Une première analyse bibliographique a permis de cibler les types de fibres optiques à tester au regard de leur module de Young (Tableau 1).

Type de fibre	Module de Young
Fibres optiques en silice	$\sim 73 \text{ GPa}$
Polycarbonate (PC)	$2.89 \pm 0.30 \text{ GPa}$ (12)
Polyméthacrilate de méthyle (PMMA)	$1.8 - 4.5 \text{ GPa}$ (12)
POF Perfluorinée (CYTOP <sup>®</sup> )	$1.3 \pm 0.1 \text{ GPa}$ (13)
Geniomer 100*	$76 \pm 12 \text{ MPa}$ (14)

Tableau 1 : Module de Young des principales fibres optiques. \*POF fabriquée à l'EMPA

Il a donc été choisi d'étudier la fibre de CYTOP<sup>®</sup> (diamètre de fibre optique annoncé à  $50 \mu\text{m}$ , diamètre avec le revêtement :  $144 \pm 4 \mu\text{m}$ ) et de Geniomer 100 (diamètre :  $824 \pm 13 \mu\text{m}$ ). De plus, des mesures de traction ont permis de vérifier que la fibre de Geniomer 100 présente un allongement de rupture nettement plus grand et est moins fragile (travail de traction plus grand) que la fibre CYTOP<sup>®</sup>.

L'évaluation de la déformation résiduelle après une courbure de  $1 \text{ mm}^{-1}$  sous une tension de  $1,6 \text{ cN/tex}$  (avec  $1 \text{ tex} = 1 \text{ g}/1000 \text{ m}$  de fil) pendant 30 s donne des résultats également en faveur de la fibre de Geniomer 100 (Fig. 2). Cette fibre est donc finalement choisie pour insertion dans le tricot.

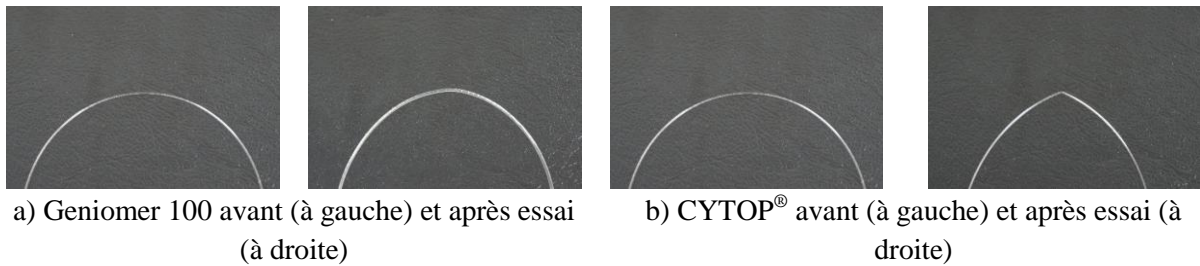


Figure 2 : Fibres de Geniomer 100 et de CYTOP<sup>®</sup> avant et 2 minutes après l'application d'une courbure de  $1 \text{ mm}^{-1}$  pendant 30 secondes.

### 3. Mesures du frottement et de la compression

Le frottement est réalisé sur un tribomètre linéaire alternatif frotteur-plan développé au Laboratoire de Physique et Mécanique Textiles (Fig. 3). L'échantillon de tricot avec la fibre est posé sur une peau artificielle (BIOSKIN, Beaulax Co., Saitama, Japon) et le frotteur plan de  $1,5 \text{ cm}^2$  de surface apparente est recouvert de Lorica<sup>®</sup> (15). La distance de glissement est de 30 mm pour une vitesse nominale de  $20 \text{ mm/s}$ .

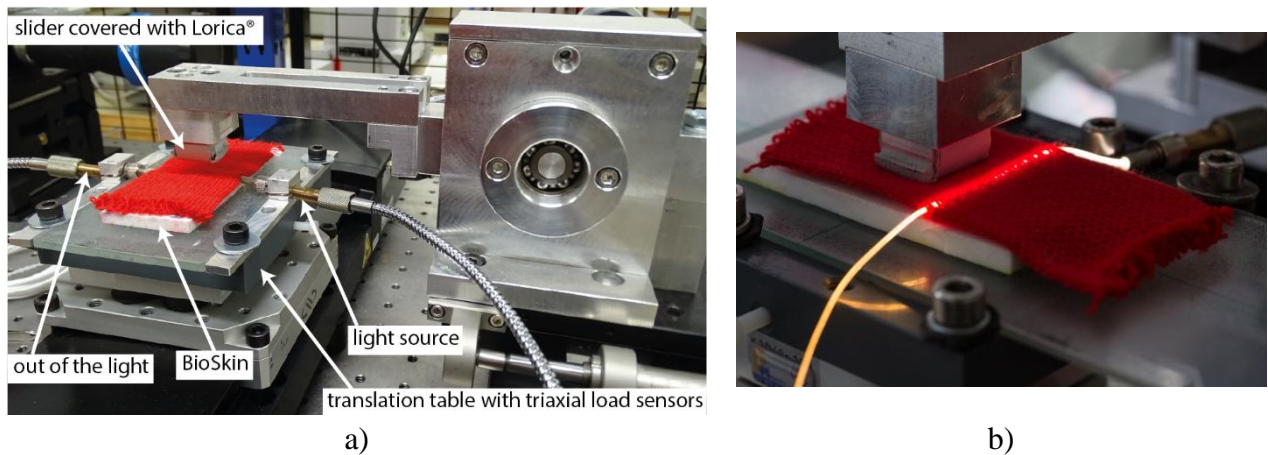
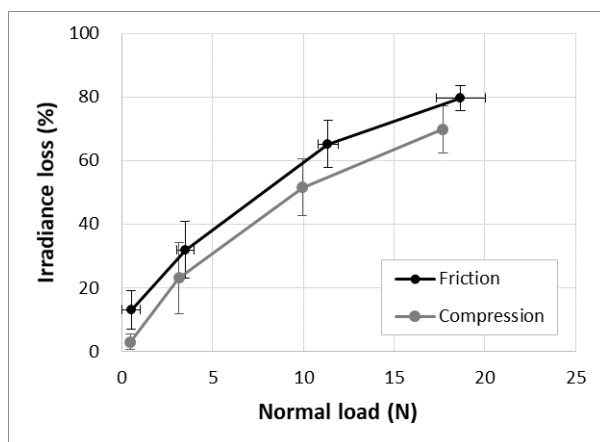
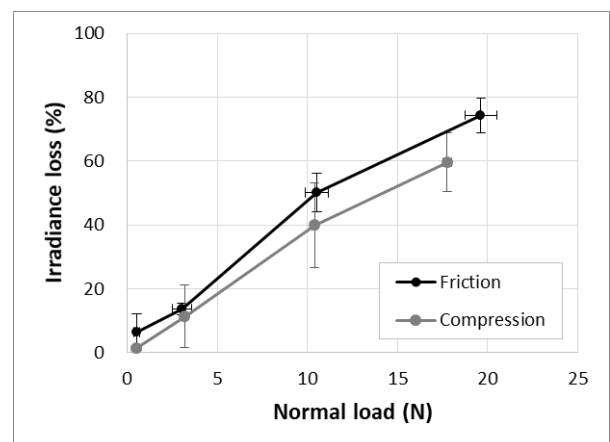


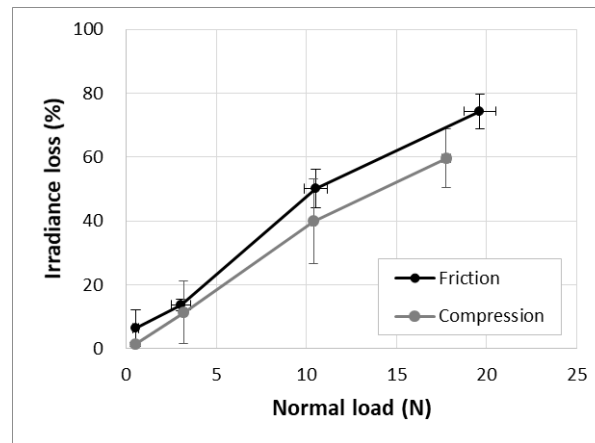
Figure 3: Tribomètre utilisé a) vue globale et b) vue du contact.



a)



b)



c)

Figure 4 : Perte d'irradiance en fonction de la force normale appliquée pour les différentes structures tricotées : a) le jersey, b) la côte 1 et 1 et c) l'interlock 1 et 1.

La compression consiste en des tests de charge et de décharge jusqu'à une valeur maximale de la force de 0,45 à 18 N, correspondant à une pression apparente de 3 kPa (pression du toucher) à 120 kPa (pression moyenne dynamique pendant la marche) (16, 17).

Le système d'éclairage et de réception lumineux ont été préalablement étudiés (18). La lumière transmise dépend de la déformation de la fibre, il s'agit de l'irradiance. La perte d'irradiance permet de quantifier l'effet d'une sollicitation :

$$\text{Irradiance loss (\%)} = \frac{\text{Irrad}_{\max} - \text{Irrad}_{\min}}{\text{Irrad}_{\max}}$$

avec :

$\text{Irrad}_{\min}$  : irradiance minimale correspondant à l'application de la charge maximale pendant l'essai de compression ou lorsque le frotteur est sur la fibre lors de l'essai de frottement,

$\text{Irrad}_{\max}$  : irradiance maximale correspondant à une charge nulle pour l'essai de compression ou en début d'essai de frottement.

Les résultats Figure 4 montrent que la structure tricotée qui présente la plus grande sensibilité à la compression seule ou au frottement avec application d'une charge donnée est le jersey. En effet, cette structure voit son irradiance diminuer plus rapidement que les autres structures en fonction de la charge normale. Cette structure est donc choisie pour réaliser la chaussette instrumentée.

De plus, on peut constater que pour une charge normale donnée la perte d'irradiance est plus importante lors du frottement que lors de la compression, donc lors de la combinaison d'une force de frottement et d'une force normale que sous l'effet de la force normale seule. Le tricot ainsi instrumenté est donc sensible au frottement.

#### 4. Mesure lors de la marche

La chaussette réalisée compte 3 fibres optiques couvrant différentes zones : les métatarses, le milieu du pied et le talon (Fig. 5). Des essais de faisabilité ont été réalisés au porter sur un sujet (femme de 50 ans, IMC=24) marchant sur un tapis de course à une vitesse de 2 km/h. Un accéléromètre collé sur la pointe de la chaussure a permis de synchroniser les signaux issus des fibres.

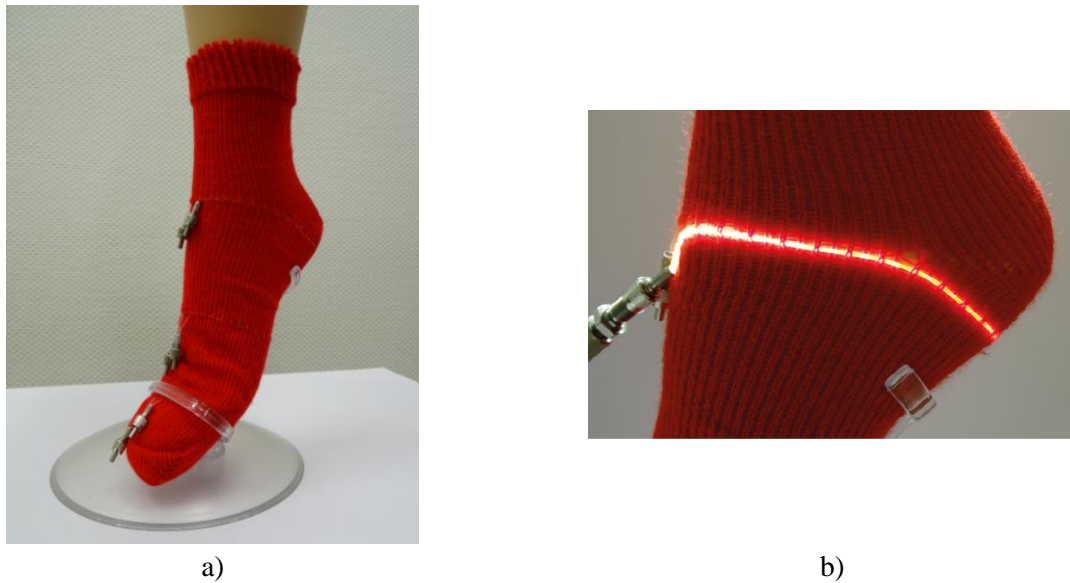


Figure 5: Chaussette instrumentée de fibres optiques : a) vue d'ensemble, b) vue de la zone du talon.

Les signaux sont répétables et montrent le déroulé du pied lors de la marche avec une diminution de l'irradiance dans les zones de pression lors de la marche (Fig. 6). Le paramètre suivi ici est l'irradiance relative instantanée :

$$Irradiance_i (\%) = \frac{Irrad_i}{Irrad_{max}}$$

avec :

$Irrad_i$  : irradiance instantannée,

$Irrad_{max}$  : irradiance maximale de la fibre considérée lors de la marche.

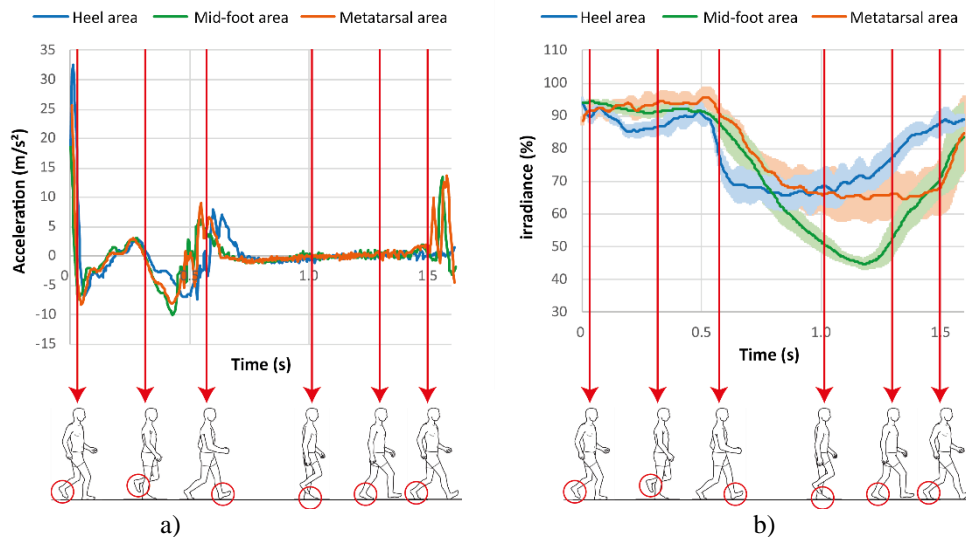


Figure 6: Evolution pendant la marche a) du signal d'accélération et b) de l'irradiance relative provenant des 3 fibres placées dans la zone métatarsale, le milieu du pied et le talon. Chaque courbe correspond à la moyenne de 5 essais.

## 5. Conclusion

Cette étude préliminaire a permis de choisir une fibre optique adaptée pour être insérée dans un tricot destiné à être porté et de faire un choix concernant la structure tricotée. Elle constitue une preuve de

concept concernant la capacité d'un textile instrumenté d'une fibre optique de mesurer des sollicitations en termes de frottement et de compression lors du porter.

## Références

1. Perrier A, Vuillerme N, Luboz V, Bucki M, Cannard F, Diot B, et al. Smart Diabetic Socks: Embedded device for diabetic foot prevention. *IRBM*. 2014;35(2):72-6.
2. Oks A, Katashev A, Zadinans M, Rancans M, Litvak J, editors. Development of Smart Sock System for Gait Analysis and Foot Pressure Control. XIV Mediterranean Conference on Medical and Biological Engineering and Computing 2016; 2016 2016//; Cham: Springer International Publishing.
3. Lin X, Seet B. A Linear Wide-Range Textile Pressure Sensor Integrally Embedded in Regular Fabric. *IEEE Sensors Journal*. 2015;15(10):5384-5.
4. Lin X, Seet B. Battery-Free Smart Sock for Abnormal Relative Plantar Pressure Monitoring. *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*. 2017;11(2):464-73.
5. Leong J, Parzer P, Perteneder F, Babic T, Rendl C, Vogl A, et al. proCover: Sensory Augmentation of Prosthetic Limbs Using Smart Textile Covers. Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology; Tokyo, Japan. 2984572: ACM; 2016. p. 335-46.
6. Ferreira A, Catarino A, Monteiro J, Rocha A. Textile-based pressure sensors for step detection: a preliminary assessment. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018;459(012041):1-6.
7. Najafi B, Mohseni H, Grewal GS, Talal TK, Menzies RA, Armstrong DG. An Optical-Fiber-Based Smart Textile (Smart Socks) to Manage Biomechanical Risk Factors Associated With Diabetic Foot Amputation. *Journal of Diabetes Science and Technology*. 2017;11(4):668-77.
8. Rahemi H, Nguyen H, Lee H, Najafi B. Toward Smart Footwear to Track Frailty Phenotypes—Using Propulsion Performance to Determine Frailty. *Sensors*. 2018;18(6):1763.
9. Cooke WD, Kamal MS. Effect of Twist Factor on the Knitability of Combed Cotton Yarn. *Text Res J*. 1986;56(11):679-82.
10. Lau KW, Dias T. Knittability of High-modulus Yarns. *The Journal of The Textile Institute*. 1994;85(2):173-90.
11. Sasaki T, Kuroda K. Evaluation and Measurement of Knittability. *Journal of the Textile Machinery Society of Japan*. 1975;21(1):9-16.
12. Leal-Junior A, Frizera A, Pontes MJ, Fasano A, Woyessa G, Bang O, et al. Dynamic mechanical characterization with respect to temperature, humidity, frequency and strain in mPOFs made of different materials. *Opt Mater Express*. 2018;8(4):804-15.
13. Fong NR, Berini P, Tait RN. Mechanical Properties of Thin Free-Standing CYTOP Membranes. *Journal of Microelectromechanical Systems*. 2010;19(3):700-5.
14. Quandt M. Optical Fibre Textiles in Non-Invasive Medical Applications: thèse de doctorat, ETH Zurich; 2016.
15. Derler S, Schrade U, Gerhardt LC. Tribology of human skin and mechanical skin equivalents in contact with textiles. *Wear*. 2007;263(7-12):1112-6.

16. Halawa MR, Eid YM, El-Hilaly RA, Abdelsalam MM, Amer AH. Relationship of planter pressure and glycemc control in type 2 diabetic patients with and without neuropathy. *Diabetes & metabolic syndrome*. 2018;12(2):99-104.
17. Pabon-Carrasco M, Juarez-Jimenez JM, Reina-Bueno M, Cohena-Jimenez M. Behavior of provisional pressure-reducing materials in diabetic foot. *Journal of tissue viability*. 2016;25(2):143-9.
18. Peyre K, Tournalias M, Bueno M-A, Spano F, Rossi RM. Tactile perception of textile surfaces from an artificial finger instrumented by a polymeric optical fibre. *Tribol Int*. 2019;130:155-69.