

Dispositif ultra-léger de caractérisation mécanique de la peau humaine *in vivo* en extensiométrie uniaxiale

Sylvain JOLY^a, Khansa REKIK^{a,b}, Jérôme CHAMBERT^a,
Emmanuelle JACQUET^a, Patrick SANDOZ^a

^aInstitut FEMTO-ST, Département Mécanique Appliquée, Université de Franche-Comté,
UMR CNRS 6174, 24 rue de l'Épitaphe, 25000 Besançon, France

^bEcole Nationale d'Ingénieurs de Sousse, BP 264, Sousse Erriadh 4023, Tunisie
Correspondant : emmanuelle.jacquet@univ-fcomte.fr

Résumé :

L'étude des propriétés mécaniques de la peau humaine in vivo est une étape utile dans l'optimisation des interventions chirurgicales. Pour évaluer les caractéristiques de ce tissu biologique complexe, un dispositif a été développé au sein de l'institut FEMTO-ST, il est composé d'un extensiomètre ultra-léger piloté par une application, elle-même comportant un éditeur de consigne ainsi qu'une interface de commande. Afin de valider ce dispositif, des tests ont été réalisés pour obtenir la réponse de celui-ci à différents types de sollicitations en extension uniaxiale, ainsi qu'une comparaison avec la réponse obtenue d'une machine de traction standard. Cette comparaison a montré une forte similarité entre les deux appareils de mesure. Grâce à sa taille, son poids et sa portabilité, le dispositif présenté a mis en évidence le comportement hyperélastique et visqueux du tissu cutané lors de tests réalisés in vivo en différentes localisations corporelles.

Abstract :

The analysis of the mechanical properties of human skin in vivo is an essential parameter for the optimization of surgical operations in terms of cutaneous tissues. This paper presents an experimental device that was developed at FEMTO-ST institute for evaluating the skin response to different loadings. The ultra-light extensometer developed was tested in a uniaxial extension on a phantom material. The results obtained were successfully compared with those of a conventional tensile test device. The user-friendly interface allows the definition of diverse load and discharge sequences. The results of the tests on human subjects are consistent with the hyperelastic and viscous behavior of the cutaneous tissue in vivo. Thanks to its size, weight and stand-alone capabilities, the device is suited for local measurements in most of human body zones. This study provides an experimental tool for investigating human skin behavior in vivo. Further researches are being directed towards identifying the strain fields of human skin by means of a biaxial extensometer and an imaging module.

Mots clefs : essais biomécaniques, extensiométrie, peau humaine *in vivo*

1 Introduction

La médecine personnalisée vise à intégrer la très grande variabilité inter et intra-individuelle des tissus biologiques pour le chirurgien optimise ses interventions en fonction de chacun de ses patients. Au niveau du tissu cutané, la mesure des propriétés mécaniques de la peau humaine *in vivo* est nécessaire pour atteindre cet objectif. C'est pourquoi de nombreux dispositifs de caractérisation mécanique ont été développés depuis de nombreuses années et améliorés au fur et à mesure des progrès en sciences des matériaux et en instrumentation.

Parmi eux, on trouve y compris sur le marché des dispositifs médicaux, des appareils de torsion [1], d'indentation [2,3], de succion [4] ou d'extension [5,6,7]. Ce papier présente un dispositif d'extensiométrie ultra-léger. Le type de sollicitation en extension est intéressant car il donne directement accès à la composante de traction uniaxiale du tenseur des contraintes. Nombre de dispositifs d'extensiométrie présentent des limites d'utilisation de par la présence d'un statif, de par leur taille, leur poids, le nombre limité de sollicitations accessibles. Un matériel expérimental a été développé pour résoudre ces difficultés. Cet article consiste en une description de ses spécificités techniques, des sollicitations caractéristiques proposées et des moyens d'instrumentation mis en œuvre pour l'asservissement du système.

2 Descriptif du dispositif

Ce dispositif vise à identifier les propriétés mécaniques de la peau humaine *in vivo*, son anisotropie, ses propriétés élastiques et visqueuses. Il intègre des sollicitations mécaniques variées quasi-statiques ou harmoniques. Il est constitué d'un extensiomètre ULE (Ultra-Light Extensometer) et d'une interface de pilotage.

2.1 Extensiomètre ULE

L'extensiomètre, présenté sur la Figure 1, est constitué d'un bâti de forme rectangulaire auquel sont fixés un moteur électrique, deux colonnes de guidage, deux traverses ; l'une fixe, l'autre mobile. Chacune de ces traverses comprend deux patins, l'un de mesure instrumenté par un capteur de force, et l'autre secondaire en forme de « U ». Les patins secondaires protègent la zone de mesure des effets parasites des zones latérales et périphériques [6,8]. La traverse mobile est pilotée par un moteur électrique dont le mouvement de rotation est transformé en translation grâce à un système vis-écrou. La position de la traverse mobile est repérée par un capteur de déplacement LVDT.

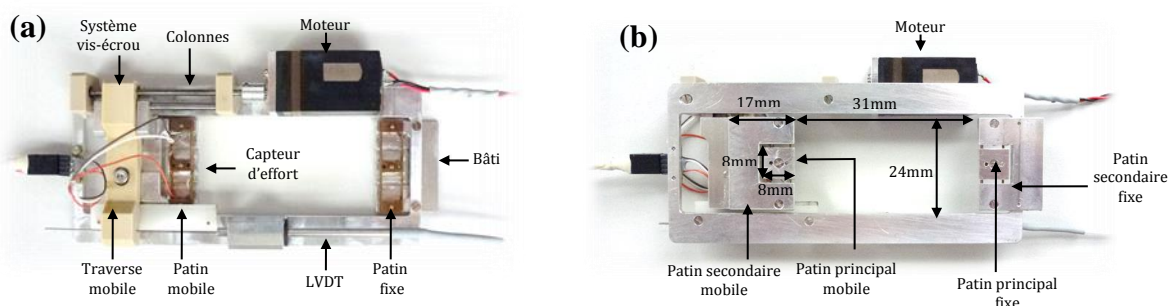


Figure 1 :Extensiomètre ULE : (a) Vue de dessus, (b) Vue de dessous.

L'extensiomètre développé est portable, léger de façon à limiter les perturbations liées à son propre poids et à des mouvements parasites (respiration, etc.). Les caractéristiques principales sont réunies dans la Table 1.

Propriétés	Valeurs
Encombrement	100×40×6 mm ³
Masse	35 g
Domaine observable	40×24 mm ²
Déplacement maximal	17 mm
Précision du capteur de déplacement	38 µm
Vitesse maximale	1,5 mm/s
Déformation maximale	58,3 %
Force maximale	10 N
Précision du capteur de force	5 mN

Table 1 : Caractéristiques techniques de l'extensiomètre ULE.

2.2 Interface de pilotage

Deux applications ont été développées sous LabVIEW™ 2011: un éditeur de consigne et une interface de commande. L'éditeur de consigne autorise des essais asservis en force ou en déplacement. L'amplitude, la fréquence, le type de sollicitation (quasi-statique ou harmonique) sont définis pour chaque type d'asservissement (Figure 2). L'interface de commande permet de piloter et gérer l'extensiomètre via une carte d'acquisition NI-DAQ et le fichier de consigne. Elle enregistre et réalise des post-traitements sur les données. Elle offre une première étape de lecture des mesures expérimentales.

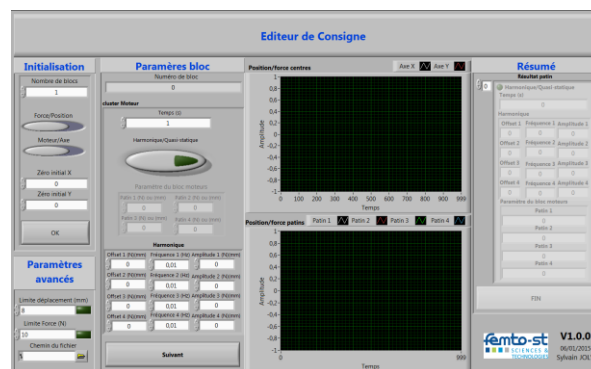


Figure 2 : Interface LabVIEW™ d'édition d'une consigne de sollicitation.

3 Validation du dispositif

3.1 Asservissement

Des tests à vide à déplacement imposé ou force imposée, en sollicitation quasi-statique ou harmonique ont été réalisés à vitesse maximale (1,5mm/s). Les résultats montrent un écart quasi-nul entre la consigne et la réponse du dispositif pour un pilotage en déplacement (Figures 3a et 3c) et très faible pour un pilotage en force (Figures 3b et 3d).

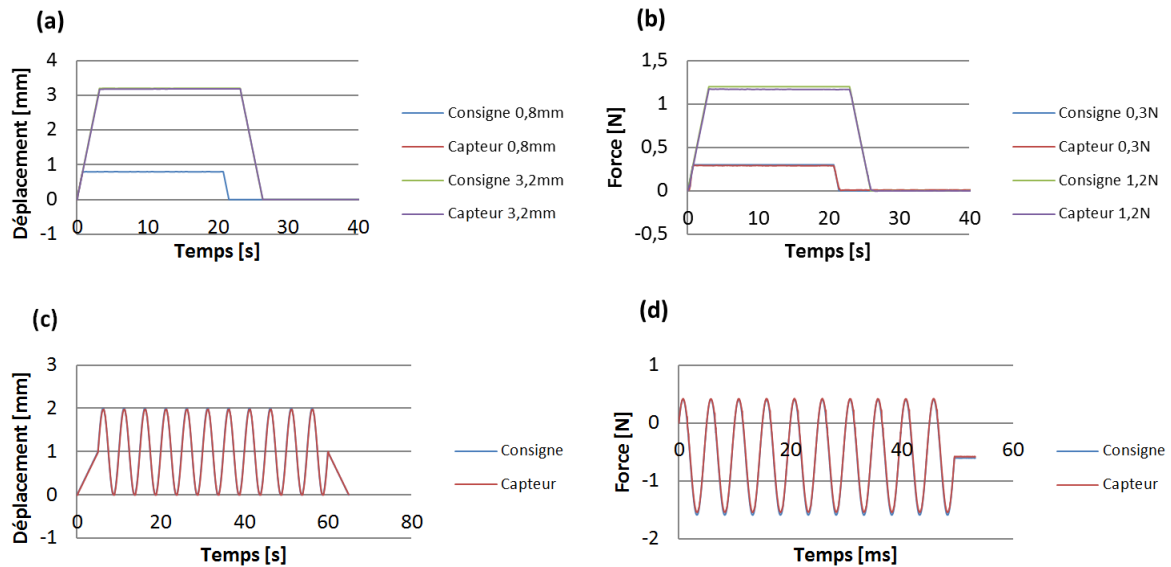


Figure 3 : Asservissement en quasi-statique à déplacement imposé (a) et à force imposée (b) – Asservissement en harmonique à déplacement imposé (c) et à force imposée (d).

3.2 Comparaison avec une machine de traction standard

L'extensiomètre ULE de par son fonctionnement se rapproche d'une machine de traction uniaxiale pour laquelle la sollicitation est identique dans toute la zone d'intérêt de l'éprouvette de mesure. Deux éprouvettes identiques, de dimensions (8 mm × 47,5 mm × 2 mm), d'un même matériau phantom ont été testées, l'une avec l'appareil ULE, l'autre avec une machine standard de traction DMA (Dynamic Mechanical Analyser, Bose Electroforce 3230). Les réponses obtenues sont présentées dans la Figure 4, et montrent une forte similarité. La différence de rigidité du bâti entre les deux matériels n'est pas prise en compte, ce qui peut expliquer la faible différence d'amplitude entre les deux réponses.

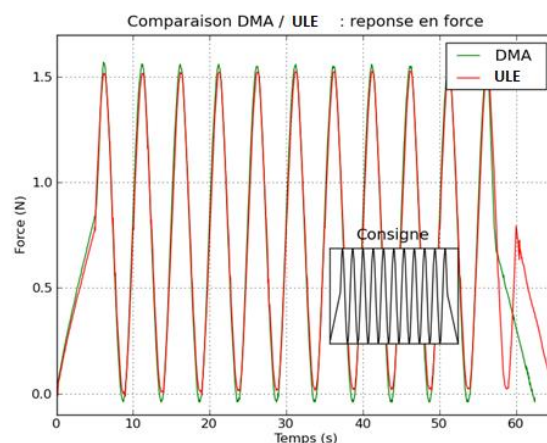


Figure 4 : Comparaison entre la réponse DMA et l'extensiomètre ULE en sollicitation harmonique.

4 Résultats

L'extensiomètre a été collé à l'aide d'une colle chirurgicale cyanoacrylate sur la peau humaine *in vivo* dans la zone de la cuisse antérieure proche du genou. Plusieurs essais ont été réalisés en extension uniaxiale et sous différents types de chargement à déplacement imposé (Figure 5).

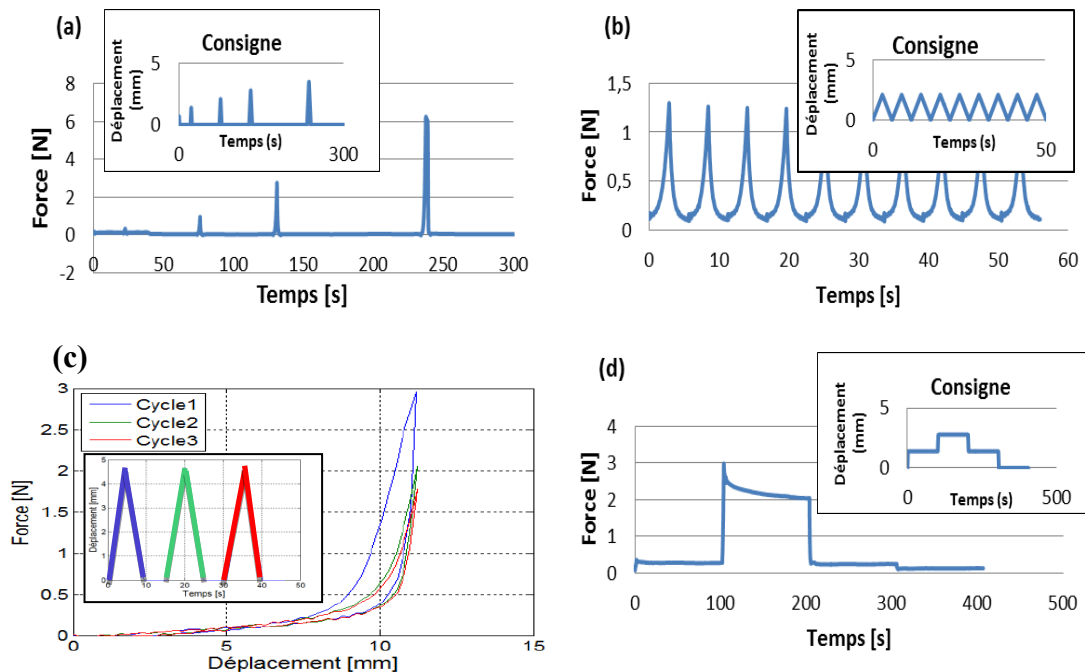


Figure 5 : Essais réalisés sur la peau *in vivo* : (a) essai impulsionnel ; (b) essai harmonique ; (c) chargement cyclique répété ; (d) essai de relaxation.

Ces résultats préliminaires mettent en évidence le comportement hyperélastique (Figures 5a-b-c-d) et visqueux (Figure 5b-d) du tissu cutané *in vivo*. La Figure 5c illustre l'effet mémoire de la peau *in vivo* pour un chargement cyclique répété. Cet effet, appelé pré-conditionnement, tend à se stabiliser à partir du 3^e cycle [9].

5 Conclusion et Perspectives

Les spécificités essentielles du dispositif développé sont la portabilité et la légèreté du matériel. Il est adapté à la majeure partie des zones anatomiques. L'extensiomètre ULE est assimilable à une machine de traction dans la zone centrale d'intérêt. Le dispositif développé a été validé par de multiples tests sous différents chargements à force ou déplacement imposé, en sollicitations quasi-statiques ou harmoniques.

Deux pistes complémentaires sont envisagées pour l'extension de l'étude. D'une part l'identification des champs de déformation de la peau par corrélation d'images enregistrées en cours de sollicitation. D'autre part un dispositif analogue utilisant les mêmes électroniques et interface pour l'application de sollicitations biaxiales. Ces deux versions complémentaires sont en cours de développement.

Remerciements

Ces travaux ont été financés par la région Franche-Comté et l'Europe (programme FEDER, convention Derm'@x N°36381) et s'intègrent à l'axe transverse Biom'@x de l'institut FEMTO-ST. Les auteurs soulignent l'importante contribution d'Éric Joseph, ingénieur de recherche à l'institut FEMTO-ST, au développement du dispositif.

Références

- [1] J. De Riga, Hardware and Basic Principles of the Dermal Torque Meter, Bioengineering of the Skin – Skin Biomechanics, CRC Press, ISBN: 0-8493-7521-5, 63-76, 2002
- [2] J. Jachowicz, R. McMullen, D. Prettypaul, Indentometric analysis of *in vivo* skin and comparison with artificial skin models, Skin Research and Technology 13 (2007) 299-309
- [3] G. Boyer, C. Pailler Mattei, J. Molimard, M. Pericoi, S. Laquieze, H. Zahouani, Non contact method for *in vivo* assessment of skin mechanical properties for assessing effect of ageing, Medical Engineering & Physics 34 (2012) 172-178
- [4] S. Diridollou, D. Black, J.M. Lagarde, Y. Gall, M. Berson, V. Vabre, F. Patat, L. Vaillant, Sex- and site-dependent variations in the thickness and mechanical properties of human skin *in vivo*, International Journal of Cosmetic Science 22 (2000) 421-435
- [5] J.F.M. Manschot, A.J.M. Brakkee, The measurement and modelling of the mechanical properties of human skin *in vivo* – II. The model, Journal of Biomechanics 19 (1986) 517-521
- [6] E. Jacquet, G. Josse, F. Khatyr, C. Garcin, A new experimental method for measuring skin's natural tension, Skin Research and Technology 14 (2008) 1-7
- [7] G. Boyer, J.Molimard, M. Ben Tkaya, H. Zahouani, M.Pericoi, S. Avril, Assessment of the in-plane biomechanical properties of human skin using a finite element model updating approach combined with an optical full-field measurement on a new tensile device, Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials 27 (2013) 273-282
- [8] K.H. Lim, C.M. Chew, P.C.Y. Chen, S. Jeyapalina, H.N. Ho, J.K. Rappel, B.H. Lim, New extensometer to measure *in vivo* uniaxial mechanical properties of human skin, Journal of Biomechanics 41 (2008) 931-936
- [9] C. Flynn, A. Taberner, P. Nielsen, Modeling the mechanical response of *in vivo* human skin under a rich set of deformations, Annals of Biomedical Engineering 39 (2011), 1935-1946