



**HAL**  
open science

## Contribution à l'étude du vieillissement de la peau humaine in vivo par simulations numériques d'essais d'indentation

Khouloud Azzez, Jean-Michel Bergheau, Abdelwahab Dogui, Hassan Zahouani, Marie-Angèle Abellan, Makram Chaabane

### ► To cite this version:

Khouloud Azzez, Jean-Michel Bergheau, Abdelwahab Dogui, Hassan Zahouani, Marie-Angèle Abellan, et al.. Contribution à l'étude du vieillissement de la peau humaine in vivo par simulations numériques d'essais d'indentation. 12e Colloque national en calcul des structures (CSMA 2015), CSMA, May 2015, Giens, France. hal-01514283

**HAL Id: hal-01514283**

**<https://hal.science/hal-01514283>**

Submitted on 26 Apr 2017

**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.

Public Domain

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.

# Contribution à l'étude du vieillissement de la peau humaine *in vivo* par simulations numériques d'essais d'indentation

K. Azzez<sup>1,2</sup>, J-M. Bergheau<sup>1</sup>, A. Dogui<sup>2</sup>, H. Zahouani<sup>1</sup>  
M-A. Abellan<sup>1</sup>, M. Chaabane<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Université de Lyon, ENISE, LTDS, UMR 5513, {khouloud.azzez,hassan.zahouani, jean-michel.bergheau,marie-angele.abellan}@enise.fr

<sup>2</sup> Université de Monastir, ENIM, LGM, {abdel.dogui@enim.mu.tn makram.chaabane29@gmail.com}

**Résumé** — Ce papier propose une caractérisation des propriétés viscoélastiques *in vivo* de la peau humaine par méthode inverse à l'aide d'un modèle numérique par éléments finis. Les simulations numériques sont conduites pour des essais d'indentation charge-décharge avec indenteur sphérique sur des sujets de 20, 60 et 80 ans avec le modèle viscoélastique linéaire de Zener. L'objectif est d'étudier l'évolution des paramètres mécaniques au cours du vieillissement.

**Mots clés** — peau, viscoélastique, approche inverse, simulation numérique, indentation

## 1. Introduction

La peau est l'organe le plus volumineux du corps humain, après le squelette et les muscles, ayant une superficie de 1,7 m<sup>2</sup> et une masse d'une moyenne de 4 kg [2]. Elle représente environ 5,5% de la masse du corps. La peau protège le corps des agressions extérieures et assure l'échange avec l'environnement. D'un point de vue mécanique, la peau représente un matériau complexe constitué de trois couches : épiderme, derme, hypoderme (Figure 1). Elle a un comportement non homogène, non linéaire, anisotrope et viscoélastique. L'étude des propriétés mécaniques de la peau s'avère d'une très grande importance pour le diagnostic des anomalies et pour tester l'efficacité de certains produits cosmétiques sur la peau [1].

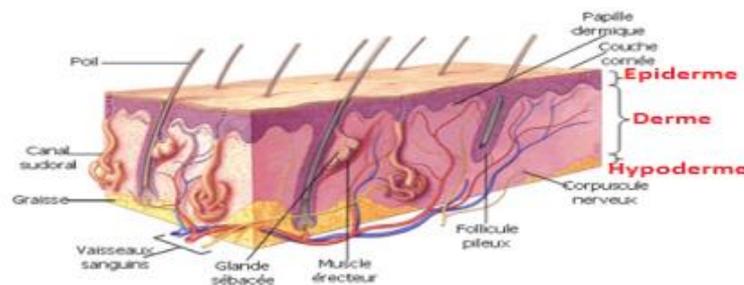


Figure 1. Structure de la peau [1]

L'objectif de notre travail est de faire une étude du vieillissement de la peau afin de déterminer ses propriétés viscoélastiques et leurs variations en fonction de l'âge. Ce travail met en œuvre une approche inverse qui permet de confronter les résultats numériques aux résultats expérimentaux afin de minimiser l'erreur entre eux. Cette minimisation permet de déduire les paramètres viscoélastiques de la peau qui décrivent le mieux son comportement réel. Cette étude représente une contribution à la compréhension de l'évolution des paramètres mécaniques viscoélastiques au cours du vieillissement.

## 2. Méthodologie couplée

### a. Modèle rhéologique de Zener

La loi de comportement pour un modèle viscoélastique est donnée par l'équation (1) :

$$\sigma^*(p) = 2G^*(p)\varepsilon^{D^*}(p) + K^*(p)Tr(\varepsilon^*(p)) \quad (1)$$

Avec :  $\sigma$  : tenseur des contraintes,  $\varepsilon$  : tenseur des déformations,  $^D$  : est la partie déviatorique du tenseur associé,  $G^*$  et  $K^*$  sont les modules respectifs aux comportements déviatorique et volumique et  $^*$  désigne la transformée de Laplace Carson.

La partie volumique du modèle a un comportement élastique :  $K = \frac{E_0}{3(1-2\nu_0)}$ , avec :  $\nu_0 = 0.48$ . La partie déviatorique du modèle est représentée par le modèle de Zener, on a une association d'un ressort en parallèle à une association en série d'un ressort et d'un amortisseur (Figure 2). Le module correspondant au comportement déviatorique s'écrit sous la forme : (2)

$$G^*(p) = G_0 \left( g_\infty + g_1 \frac{p}{p + \frac{1}{\tau_1^G}} \right) \quad (2)$$

Avec :  $G_0 = G_\infty + G_1$  ,  $\tau_1^G = \frac{\mu_1^G}{G_1}$  ,  $g_1 = \frac{G_1}{G_0}$

$G_0, G_\infty$  : Module de rigidité instantané et différé du comportement déviatorique.

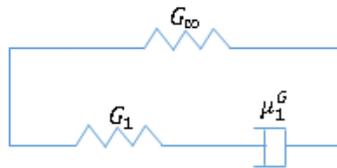


Figure 2. Schéma du modèle rhéologique de Zener

### b. Essai d'indentation

Les résultats expérimentaux d'indentation à déplacement imposé ont été réalisés sur l'indenteur sphérique (rayon 6,35 mm) du LTDS pour le master de A. Dridi [4]. Les mesures sont faites sur l'avant-bras pour des sujets de 20, 60 et 80 ans. L'effort est mesuré à l'aide d'un capteur de force et conduit à des courbes donnant la variation de l'effort en fonction du déplacement imposé (Figure 3).

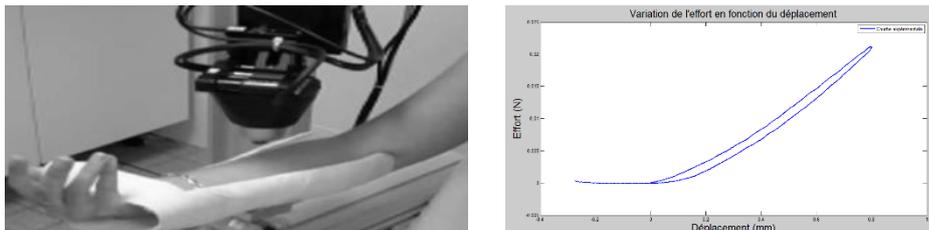


Figure 3. Dispositif de l'essai d'indentation (gauche) [3] et exemple de courbe effort-déplacement (droite)

### c. Présentation du modèle numérique

Le modèle numérique de la peau développé dans cette étude sous ABAQUS® est un modèle axisymétrique ayant la géométrie d'un cylindre de rayon 36 mm et de hauteur 36 mm et d'un indenteur représenté par une sphère de diamètre 6,35 mm. La peau est constituée d'une seule couche homogène, incompressible ayant un comportement viscoélastique linéaire, isotrope. L'étude est réalisée pour le modèle de Zener présenté à la sous-section 2.a. Le contact entre la peau et l'indenteur est considéré parfait sans frottement. Le test consiste en un essai de charge décharge, de durées égales. Les conditions aux limites imposent : un déplacement au point de tangence entre la peau et l'indenteur, un encastrement de tous les nœuds de la surface inférieure et de la surface extérieure du cylindre. Le maillage est de type quadratique bilinéaire à quatre nœuds.

### d. Démarche de l'approche inverse

L'approche inverse permet de coupler le modèle numérique et le modèle expérimental afin de déterminer les paramètres qui optimisent le modèle numérique. L'identification des coefficients viscoélastiques est obtenue par minimisation de l'écart quadratique entre les valeurs expérimentales et numériques des efforts (en fonction du déplacement) (3). La minimisation (algorithme du simplexe) et les commandes relatives au lancement des itérations de calcul sur ABAQUS® sont réalisées sur MATLAB® ; cette démarche a nécessité le développement d'une procédure adéquate.

$$f = \sum_{i=0}^n (f_{exp}(i) - f_{num}(i))^2 \quad (3)$$

où :  $f_{exp}$  est l'effort expérimental et  $f_{num}$  est l'effort numérique.

## 3. Résultats et discussion

La simulation numérique par approche inverse des essais d'indentation aux trois âges permet de déterminer les propriétés viscoélastiques de la peau correspondant à chaque individu afin de comprendre son comportement mécanique en termes d'étude du vieillissement. La comparaison courbes expérimentales-résultats numériques optimisés donnant la variation de l'effort en fonction du déplacement pour les trois âges sont données figures 4 à 6 pour respectivement l'âge 20, 60 et 80 ans.

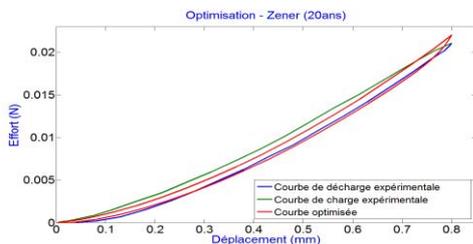


Figure 4. Comparaison courbe expérimentale-résultat numérique pour le sujet de 20 ans

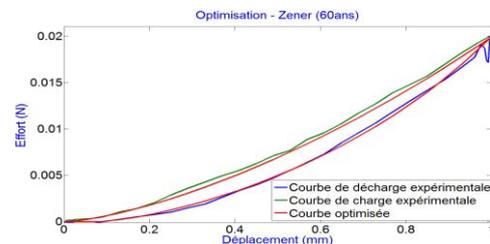


Figure 5. Comparaison courbe expérimentale-résultat numérique pour le sujet de 60 ans

Les courbes numériques obtenues avec le modèle de Zener donnent une bonne approximation des courbes expérimentales aux trois âges. Le tableau 1 donne les valeurs des paramètres viscoélastiques obtenus par la méthode inverse pour caractériser la peau humaine *in vivo* par rapport aux trois âges.

Les résultats numériques donnent un module d'Young instantané décroissant avec l'âge d'une dizaine de kPa à quelques kPa. Dans le même temps, la viscosité augmente en fonction de l'âge de 0,193 kPa.s à 3,469 kPa.s. Ces deux résultats sont très cohérents avec ceux disponibles dans la littérature pour un essai d'indentation avec un indenteur sphérique. Ils rendent bien compte d'une diminution de la résistance du tissu cutané au cours du vieillissement et en parallèle de l'augmentation de sa viscosité.

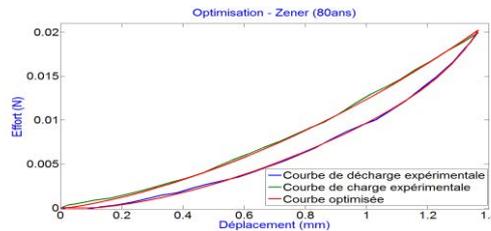


Figure 6. Comparaison courbe expérimentale-résultat numérique pour le sujet de 80 ans

Tableau 1. Les valeurs des paramètres viscoélastiques pour les trois sujets après optimisation

	Modèle de Zener		
	20 ans	60 ans	80 ans
$f_{\min}$	$9,18.10^{-6}$ N	$1,48.10^{-6}$ N	$1,952.10^{-6}$ N
$E_{\infty}$	5,721 kPa	3,488 kPa	2,06 kPa
$E_1$	4,165 kPa	4,23 kPa	1,579 kPa
$\eta_1$	0,193 kPa.s	0,353 kPa.s	0,3469 kPa.s
$E_0$	9,886 kPa	7,718 kPa	3,639 kPa

où :  $f_{\min}$  est l'erreur minimale entre l'effort numérique et l'effort expérimental,  $E_{\infty}$ ,  $E_1$  et  $\eta_1$  sont les paramètres du modèle de Zener et  $E_0$  est le module d'Young instantané.

## 4. Conclusion

Ce papier a proposé un modèle numérique axisymétrique de la peau humaine in vivo. Les simulations numériques par approche inverse d'essais d'indentation avec indenteur sphérique sont réalisées pour des sujets de 20, 60 et 80 ans pour le modèle de Zener. La comparaison des courbes expérimentales et numériques conduit à la caractérisation des propriétés mécaniques de la peau humaine in vivo et d'en déduire des informations sur leur évolution au cours du vieillissement.

## Références

- [1] G. Boyer. Modélisation du comportement mécanique de la peau humaine in vivo : Application au vieillissement et aux gestes du clinicien, Thèse Mécanique et Ingénierie, Saint-Etienne : Ecole Nationale d'Ingénieurs de Saint-Etienne, 2010.
- [2] E. Christopher, M. Ronald. Evaluation of biomechanical properties of human skin, Clinics in Dermatology, 13, page 375-page 380, 1995.
- [3] A. Delalleau, G. Josse, J-M. Lagarde, H. Zahouani, J-M. Bergheau. A nonlinear elastic behavior to identify the mechanical parameters of human skin in vivo, Skin Research and Technology, 14, page 152-page 164, 2008.
- [4] A. Dridi. Modélisation du comportement mécanique de la peau, Master Mécanique, Monastir : Ecole Nationale d'Ingénieurs de Monastir, 2011.