

Modélisation mécanique de la déformation de la topographie de prothèses mammaires macro-texturées

C. GARABEDIAN^a, R. DELILLE^a, B. BENNANI^a, F. BECHET^a, K. ANSELME^b, and M. BIGERELLE^a

a. LAMIH, UMR CNRS 8201, UVHC, Valenciennes, charlesgarabedian59@gmail.com

b. IS2M, Mulhouse, France

Résumé :

Cette étude propose une méthodologie de modélisation de la déformation d'un état de surface sous sollicitations mécaniques. La méthodologie permettra d'analyser la topographie de surface d'un matériau déformable, en prenant en compte les contraintes externes provenant d'un environnement mécanique complexe, telle que la biomécanique du corps humain. In fine, dans le cas de surfaces fortement déformables, cet outil pourrait aider à la modélisation du comportement à la friction de surfaces rugueuses in-situ.

L'exemple pris dans cette étude est caractéristique d'une surface fortement structurée et à faible module d'Young: l'enveloppe texturée en silicone d'un implant mammaire. Ces surfaces présentent des cavités cuboïdes de 200µm de profondeur, délimitées par de fines structures en silicone d'une épaisseur d'une dizaine de micromètres. L'intégrité de ses pores, et par conséquent le coefficient de friction qu'ils génèrent au contact des tissus, sont essentiels pour l'intégration biologique de l'implant dans le sein.

Des essais interrompus de compression et de cisaillement ont été conduits sous micro-tomographe. Un montage a permis d'induire un cisaillement à 45° de la surface.

Par reconstruction des scans, un modèle 3D de la surface a été développé. Le modèle 3D a été traité, notamment les artefacts de reconstruction à la surface ainsi que les auto-contacts, pour pouvoir être implémenté dans des logiciels d'éléments finis. Une taille d'élément adaptée a été choisie.

Les simulations numériques ont été analysées aux conditions de sollicitation des essais in-situ.

Sous compression uniaxiale, aucun flambage des cavités des pores de surface a été constaté sur les résultats des essais interrompus.

Des simulations sous différents cisaillements vont permettre d'affiner le comportement au flambage des structures de surface.

Des cartographies des contraintes et des déplacements au sein de la texture vont permettre de corroborer les déformations constatées.

La surface présente des repliements de ses structures en silicone sur eux même, uniquement pour certaines conditions de cisaillement. Sous compression uniaxiale, la surface ne présente donc plus de niches cellulaires à l'intérieur des pores, qui sont des pièges potentiels pour les cellules du sein et source de complications.

Abstract :

This study outlines a methodology to model the deformation of a surface finish under mechanical solicitations. Basically, the approach will analyze the surface topography of a deformable material, taking account of the external constraints potentially acting in a complex mechanical environment, such as inside some human body parts. Particularly for highly deformable surfaces, this tool paves the way of modeling friction behavior of rough surfaces in-situ.

This study will focus on an example characteristic of highly structured surfaces with a low Young's Modulus: the textured shell of a silicone breast implant. These surfaces feature 200µm-deep cuboid pores with fragile silicone walls (less than 10µm of thickness). The coefficient of friction generated by the pore-shaped structures in contact with biological tissues plays a major role in the biological integration of the implant in the breast.

Some interrupted tests under compression and under shearing were led during X-ray Microtomography. A layout allowed us to mimic a shearing of the surface at 45°.

After scan reconstruction, a 3D model of the surface was built. The 3D model, especially the reconstruction artefacts and the "self-contacts", were refined to be implemented in a Finite-Element-dedicated software. An adequate element size was chosen.

Numerical simulations were performed with the same mechanical conditions as the in-situ tests.

Under uniaxial compression, no buckling of the pore cavities was noticed on the interrupted test outcomes.

Simulations under different shearing will allow us to further refine the buckling behavior of the surface structures.

Mapping of the constraints and of the displacements in the texture supports the noticed deformations.

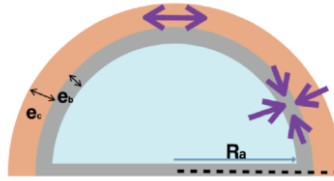
The surface features inward folding of some silicone structures, only for a couple of shearing conditions. Under uniaxial compression, the surface does not exhibit niche inside the pores, which are potential cellular traps and may be responsible for clinical complications.

Mots clefs : texturation de surface ; implant mammaire ; Microtomographie

1 Introduction

Les implants mammaires présentent sur leur dernière couche en silicone une texturation faite de pores cuboïdes de 100-400 µm de diamètre et de 100-200 µm de profondeur. L'ancrage de l'implant dans les tissus du sein est fortement dépendant de la présence de ces cavités sur la surface de l'implant. Il est nécessaire que l'intégrité de ces structures soit assurée dans le temps et sous les sollicitations mécaniques extérieures. Comme la biomécanique des tissus mous, dont le sein, est complexe, cette étude propose d'étudier le comportement des texturations sous certaines conditions mécaniques.

Un modèle « 3 couches » a déjà été présenté par Ben Amar *et al.* [1], impliquant l'implant (en bleu gris), la capsule (en gris) et la peau (en rose). Cependant, l'environnement tissulaire peut varier grandement entre un sein augmenté et un sein reconstruit.



Modèle « 3 couches » d'un sein reconstruit : implant, capsule et peau [1].

Des forces de compression et de cisaillement interviennent dans le scénario biologique. La formation d'une capsule autour de l'implant est une réaction biologique normale. Tout implant une fois inséré est entouré d'une capsule. La capsule croît normalement à la surface de l'implant et va générer automatiquement des stress de compression dans l'implant et dans les tissus. Ils sont appelés « stress passifs ».

L'objectif de l'article est d'étudier mécaniquement l'interface entre la capsule et un implant à l'échelle de la texture de l'implant. Le système biologique en question peut se résumer comme sur la figure ci-dessous si on suppose une capsule adhérente à la surface de l'implant. On parle d'« effet Velcro ». Des forces de cisaillement sont suspectées d'être responsables de stress cellulaire et donc d'une inflammation et d'un durcissement de la capsule (on parle cliniquement de contracture capsulaire), mais aussi d'une rotation de l'implant dans la capsule, voire d'une double capsule. Dans le cas de capsule non adhérente, les forces de friction sont responsables d'un liquide interstitiel entre l'implant et la capsule. Le système comportera donc 3 éléments.



Modèle morpho-mécanique de la texture d'un implant mammaire [2]

Le comportement d'une macro-texturation a été analysé sous compression et sous cisaillement. Des simulations numériques ont été commencées afin de construire une méthodologie de modélisation de la déformation. Une analyse sur un explant a permis de corroborer nos conclusions.

2 Déformation morphologique de la texture sous contact

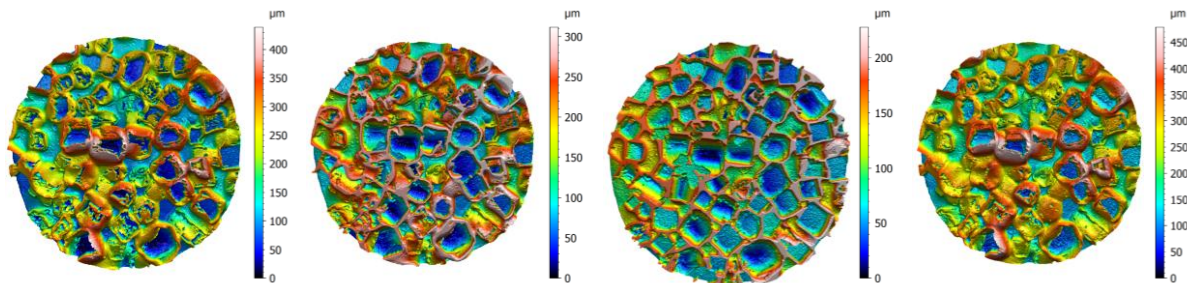
L'analyse a été portée sur un implant mammaire macro-texturé de la marque Sebbin. La déformation de la texturation sous sollicitation mécanique a pu être mesurée grâce à une cellule de compression insérée à l'intérieur d'un micro-tomographe. La compression est exercée par une plaque de Téflon, dont le déplacement et la force exercée sur l'échantillon sont contrôlés. La surface est ensuite reconstruite à partir des scans avec le logiciel nRecon et Mountains DigitalSurf.

La texture a pu être imagée après essais interrompus au micro-tomographe sous deux sollicitations mécaniques : compression et cisaillement.

2.1 Contact en compression

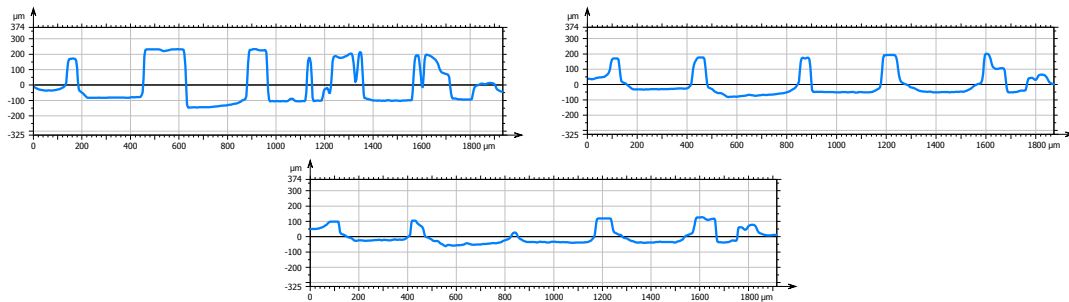
Quatre essais interrompus ont été réalisés : un essai avant la compression, un autre avec un déplacement de 0.17mm, un suivant avec un déplacement de 0.26mm et un dernier après relaxation. Les topographies sont présentées ci-dessous. Les fines structures ne flambent pas sous la compression, on constate par ailleurs une ouverture des pores.

Les résultats sont reproductibles sur les deux essais réalisés.



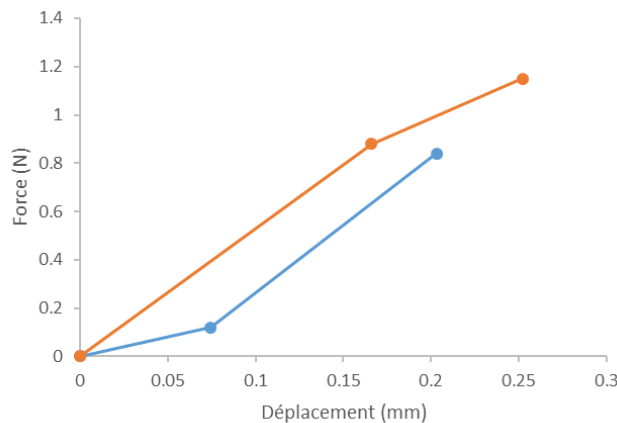
Topographies d'une macro-texture sous compressions uniaxiales.

Des profils ont été tracés sur les trois premiers essais. On constate une diminution de la hauteur des parois, cependant ces dernières ne semblent pas s'épaissir avec la compression.



Profils 2D d'une macro-texture sous compressions uniaxiales.

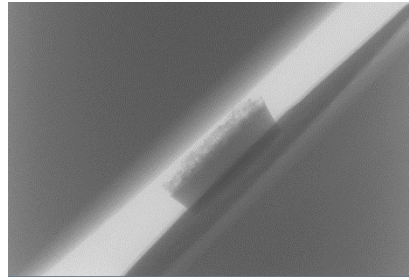
Les forces ont été mesurées lors des essais interrompus, une courbe force-déplacement a pu alors être obtenue ci-dessous sur les deux essais réalisés.



Courbe force-déplacement des essais en compression

2.2 Contact en cisaillement

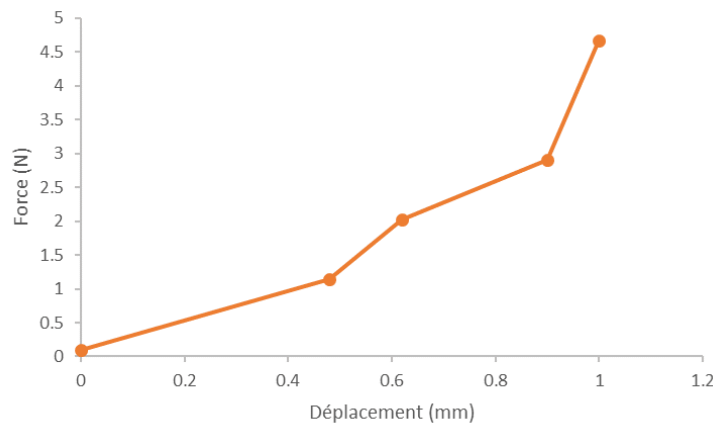
Le contact en cisaillement a été simulé expérimentalement par une compression entre deux plans parallèles et inclinés à 45°.



Essai de cisaillement mené sous micro-tomographe

Six essais interrompus ont été également menés, avec des déplacements de 0.48mm, de 0.62mm, de 0.9mm et de 1mm.

La courbe force-déplacement a été tracée en prenant l'essai 0 comme référence des déplacements et des forces.



Courbe force-déplacement des essais en cisaillement

Les rendus 3D de l'essai 1 ($\Delta l=0.48\text{mm}$), de l'essai 2 ($\Delta l=0.62\text{mm}$) et de l'essai 4 ($\Delta l=1\text{mm}$) sont représentés sur la figure ci-dessous. L'essai 3 ($\Delta l=0.9\text{mm}$) est fortement bruité. Sur l'essai 2, il n'y a a priori pas contact (absence de déformation notable de la texture). On constate sur certains motifs de l'essai 4, un affaissement des parois sur un côté.



Morphologies d'une macro-texture sous cisaillement à 45°
(de gauche à droite : essai 1, essai 2 et essai 4)

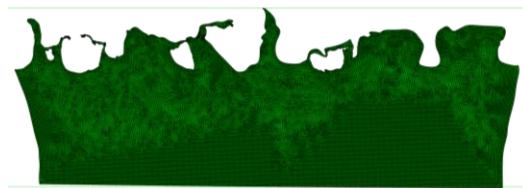
3 Simulation du contact

L'échantillon en volume a été obtenu à partir de la surface. Le maillage a été réalisé avec HyperMesh, puis la simulation numérique a été menée en explicite sur Abaqus.

Des essais de traction sur éprouvettes ont permis de déduire les caractéristiques du matériau.

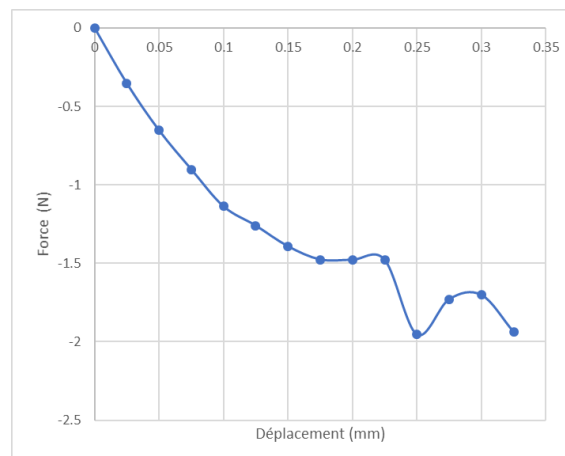
Avant d'être implémenté, un « nettoyage » du fichier est nécessaire pour éviter les « auto-contacts » nécessaire pour avoir convergence du calcul. Pour cette raison, la simulation sur la surface 3D semble être impossible. Uniquement la compression sur un profil 2D a été simulée numériquement pour l'instant.

Le module d'Young a été tiré de la courbe de traction expérimentale ($E = 2 \text{ MPa}$) et le coefficient de Poisson choisi en accord avec la littérature est de $\nu = 0.48$.



Maillage 2D

La courbe a été obtenue sur le 2D (déformation plane) et modifiée en multipliant par le facteur adéquat pour avoir un même volume que l'expérimentation.



Courbe force-déplacement déduite de la simulation 2D en compression

Les déformées à 0.175 mm et à 0.275 mm sont présentées ci-dessous pour comparaison avec les essais interrompus.



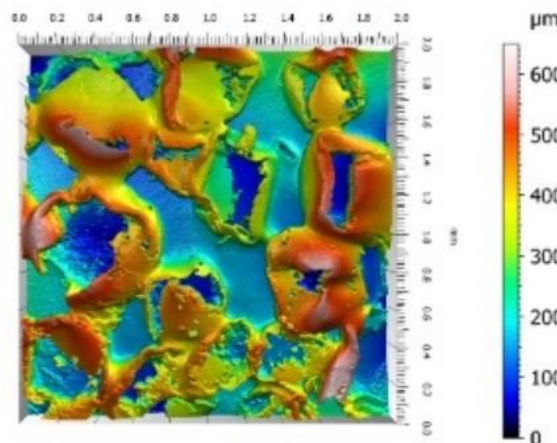
Déformées de la texturation à 0.175 mm et à 0.275 mm.

Contrairement aux essais interrompus, un flambage des parois d'un pore est constaté sur les coupes ci-dessus. Il est certain qu'une simulation sur un profil ne tient pas compte du « support » que peut constituer un pore dans sa totalité. En conséquence, des simulations doivent être réalisées sur un pore caractéristique en 3D pour avoir un temps de nettoyage du fichier relativement raisonnable et avoir confirmation du flambage constaté expérimentalement.

Sans coefficient de frottement, la simulation de l'essai de cisaillement ne sera pas significative. Des essais au tribomètre seront réalisés avant de lancer les modélisations.

4 Analyse des explants

Les altérations morphologiques de la texture d'une prothèse une fois implantée peuvent être caractérisées à la surface de celle-ci lorsqu'elle est retirée du sein (on parle d'explant alors).



Surface d'un explant après 4 ans d'implantation.

Le cas présenté est une patiente asymptomatique : la capsule est donc relativement fine. Les fragiles structures (moins de 10µm d'épaisseur) délimitant les pores sont encore présentes après 4 ans d'implantation. Elles ont résisté aux frottements (cisaillement) entre les tissus et l'implant. L'absence de flambage constatée expérimentalement pourrait être la raison de la stabilité de ces structures en silicone, qui ne seraient pas en tension sous compression. Des études plus approfondies seront menées sur une plus grande population d'explants.

5 Conclusion

Le comportement des structures en silicone à la surface des implants mammaires texturés ne présente pas de flambage sous compression, ce qui pourrait être la raison de leur bonne stabilité dans le temps.

Cependant, ce comportement, d'une importance biologique, doit être pris en compte avant de mener des essais tribologiques de friction.

Références

- [1] Ben Amar M, Wu M, Trejo M, Atlan M. Morpho-elasticity of inflammatory fibrosis: the case of capsular contracture. *Journal of the Royal Society, Interface*. 2015 Oct 06;12(111)
- [2] Giot JP, Paek LS, Nizard N, El-Diwany M, Gaboury LA, Nelea M, et al. The double capsules in macro-textured breast implants. *Biomaterials*. 2015 Oct;67:65-72.