

Protocoles et Méthodes PSE Tissage 3D
Jules Dior - Jacques Louis - Jules Morel
Elève ESPCI Paris - Promotion 135

Notre PSE consistait tout d'abord à tisser des structures en 3D. Pour cela, nous nous sommes inspirés d'une vidéo de *Oluwaseyi Sosanya* disponible à l'adresse <https://www.sosafresh.com/3d-weaver/>. Après avoir fait varier de nombreux paramètres, nous avons finalement établi le Protocole n°1.

Protocole 1 : Tissage 3D _ Voir vidéo : <https://www.youtube.com/watch?v=sUBgteG4NJg>

Ensuite nous avons sélectionné une maille pour laquelle nous avons fait varier le module d'Young du silicone utilisé, ainsi que le diamètre du fil utilisé. Nous nous sommes intéressés à l'étude expérimentale de la structure en réalisant des tests mécaniques.

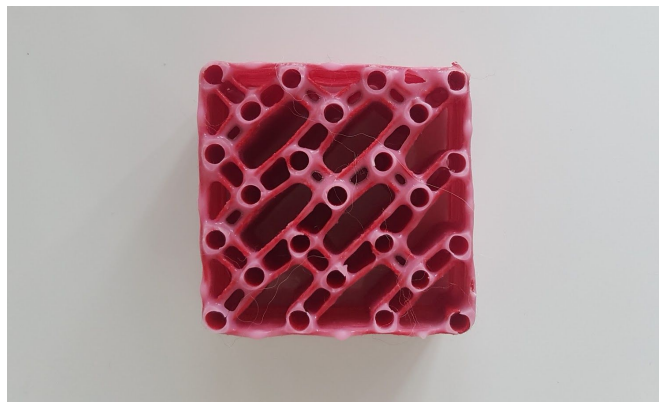


Figure 1 : maille choisie

Les tests de compression ont été réalisés sur une machine de traction *Instron 3300* pilotée depuis un ordinateur via le logiciel *Bluehill 3*. Ce dernier nous permet de définir quel type de test nous souhaitons effectuer en faisant varier de nombreux paramètres comme la vitesse de chargement, application d'une charge limite, ou encore la réalisation de tests cycliques. Pour tester les échantillons, nous avons réalisé plusieurs séries de test, notamment en compression (Protocole n°2).

Protocole 2 : Test en compression

1. Paramètres

Vitesse de compression :

- a 5 cm.min⁻¹
- b 3 cm.min⁻¹
- c 1 cm.min⁻¹

Remarques :

- a Le test ne donne rien de concluant .On observe de légers décrochés mais il est plus facile de les étudier en diminuant la vitesse de compression.
- b C'est le type de test que l'on garde dans la suite de nos manipulations car il nous permet de bien apprécier les claquages lors de la compression avec des variations de charge mesurables.
- c Le test donne des résultats similaires au test b.

2. Manipulation

Les directions d'intérêt des échantillons sont le plus souvent les diagonales, la manipulation consiste donc à placer l'échantillon sur une plaque (en plexiglas ou aluminium) qui sera ensuite comprimé par la machine.

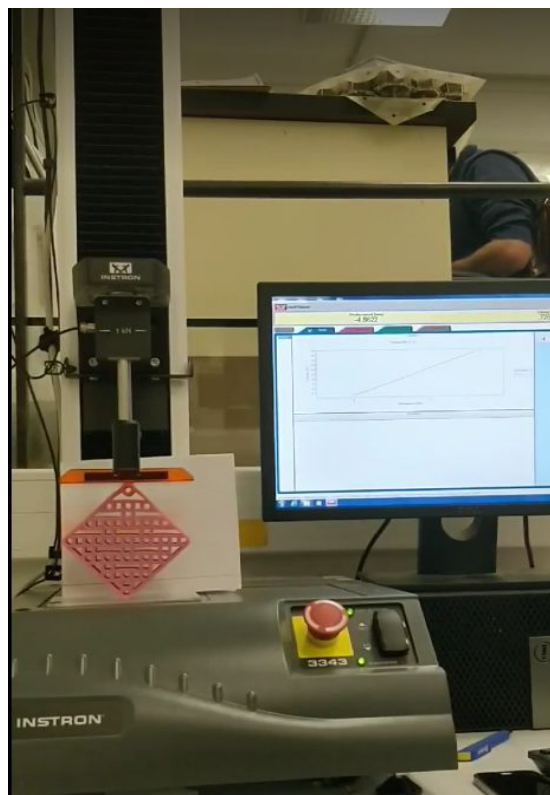


Figure 2 : éprouvette au début d'un test de compression

3. Résultats

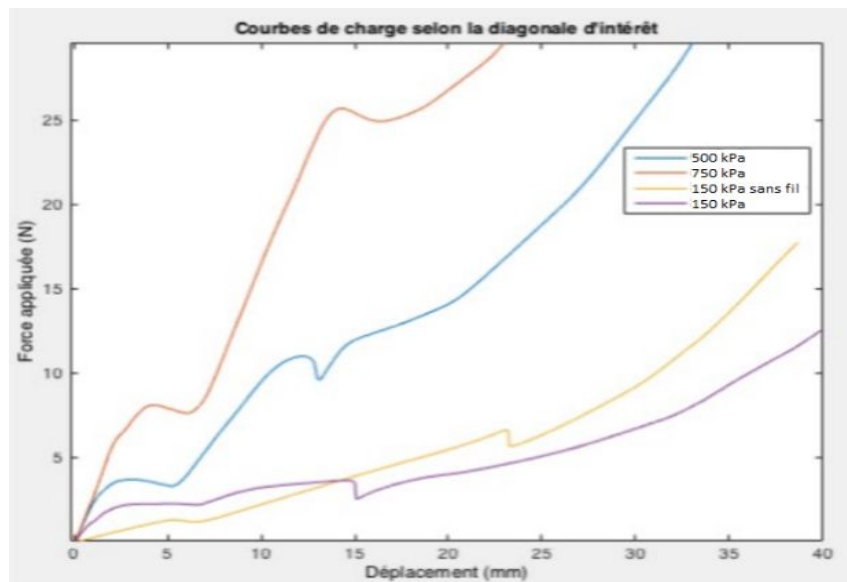


Figure 3 : graphique présentant les résultats de tests de compression pour plusieurs séries de mesures non cycliques

On a ensuite réalisé des tests cycliques dans lesquels l'échantillon est comprimé jusqu'à une certaine charge puis relâché à la même vitesse.

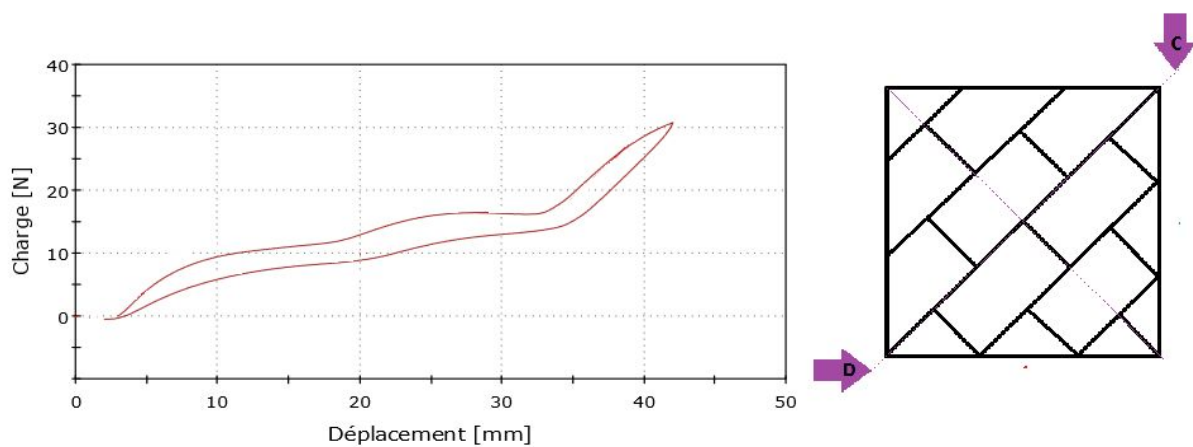


Figure 4 : courbe de charge lors d'un test cyclique.

4. Conclusion

On observe des claquages lors des tests de compressions qui interviennent pour une certaine valeur de déplacement, similaire entre les différentes manipulations. Un premier claquage intervient autour de 5 mm, le second entre 15 et 25 mm environ. Nous nous intéressons dans la suite à ce phénomène.

Nous avons aussi réalisé des tests en traction. Pour cela nous avons usiné des mors au cutter laser pour pouvoir tirer notre structure, mais les nombreuses difficultés pour mettre en place ce genre d'expériences nous ont poussés à nous recentrer sur les tests de compression, qui montraient des particularités intéressantes à étudier contrairement à la traction.

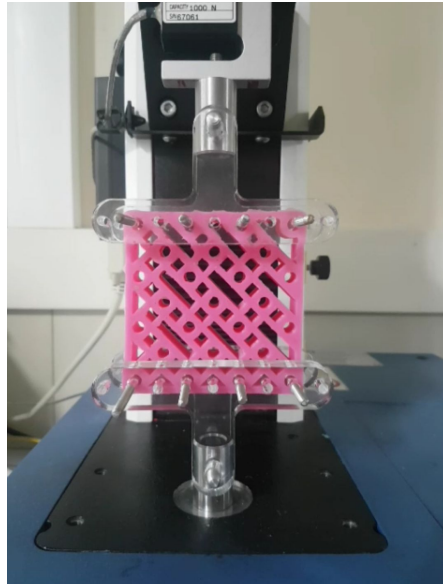


Figure 5 : mors utilisés pour les tests de traction

Le logiciel *Bluehill 3* exporte les données récoltées (vitesse de déplacement, force par pas de temps, déplacement par pas de temps) au format CSV. Le format CSV (comma-separated values) est le format classique de report de valeurs tabulées. On peut donc traiter ces fichiers notamment grâce au logiciel *MatLab* afin de déterminer des modules de Young comme expliqué dans le Protocole n°3.

Protocole n°3 : Détermination d'un module d'Young

À partir de *MatLab*, nous avons pu tracer les courbes de charges obtenues pour les différents échantillons, directement à partir des valeurs relevées. En dérivant ces courbes au niveau de l'origine, on peut déterminer le module de Young (E) des échantillons. C'est par cette méthode que, sur des éprouvettes de traction moulées par nos soins, nous avons déterminé les modules des trois silicones utilisés lors de notre PSE (150kPa, 500kPa et 750kPa). Nous avons aussi pu déterminer le module apparent des échantillons étudiés.

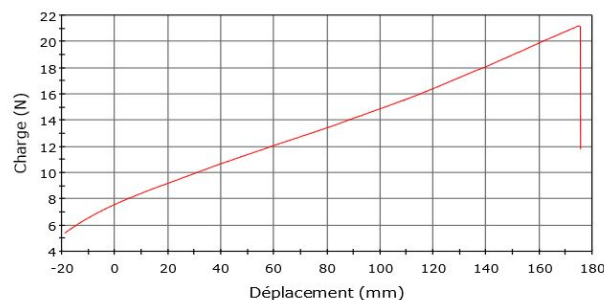


Figure 6 : courbe de charge pour une éprouvette en silicone de taille $100 \times 10 \times 5 \text{ mm}^3$; module d'Young obtenu = 150 kPa.

Le premier constat que nous avons fait est que le module apparent des structures construites à partir de la maille choisie ne correspondait pas avec la simple valeur du silicone. Nous nous sommes alors posé la question suivante:

Est-ce que les courbes de charges obtenues sont dues à un effet de structure ou à une conséquence de la nature du matériau étudié ?

Pour répondre à cette question, nous avons décidé de créer un moule par impression 3D pour couler un échantillon de même forme mais sans fil. Le moule fut dessiné informatiquement par le biais du logiciel de Dassault *CATIA*. Ce logiciel permet effectivement d'exporter des dessins industriels en code pour imprimante 3D. Une fois l'échantillon sans fil obtenu, nous l'avons soumis aux mêmes tests que les échantillons composites (Protocole n°2). Nous avons tracé les courbes de charge de plusieurs échantillons de même forme mais de silicones différents, donc de modules de Young différents, nous avons remarqué que le premier claquage intervenait pour un même déplacement. Le claquage en question est la compression subite d'un étage de notre échantillon, passant de poutres en flambement léger à une torsion complète. Ce claquage implique même une chute de la courbe de charge, traduisant une libération d'énergie.

Ce phénomène valide donc le fait qu'il s'agit d'un effet de structure. Mais il intervient pour des compressions différentes, il y a donc un effet de matériaux composites. Nous nous sommes donc posé la question suivante:

Quel est l'impact de la présence de fil dans le silicone ?

Pour y répondre, nous avons réalisé 4 échantillons calibrés, d'un même silicone mais avec une structure interne de fil différente. Nous avons réalisé des tests en compression comme en Protocole n°2.

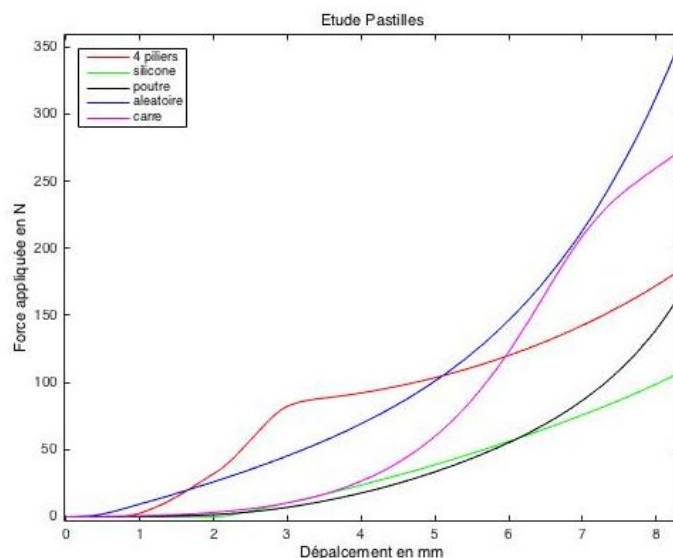


Figure 7 : courbes de charge des pastilles en compression.

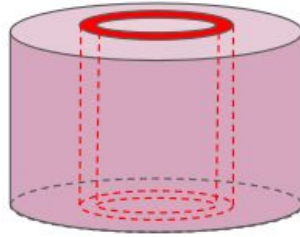


Figure 8 : schéma 3D d'une pastille présentant un enroulement circulaire de fil à l'intérieur.



Figure 9 : schéma des pastilles vues de dessus.

Nous pouvons observer sur les courbes de charge précédentes, que la structure en piliers et la structure en carrée possèdent aussi une rupture de pente que nous avons associé à nos claquages. Nous avons donc modélisé les claquages des poutres considérées.

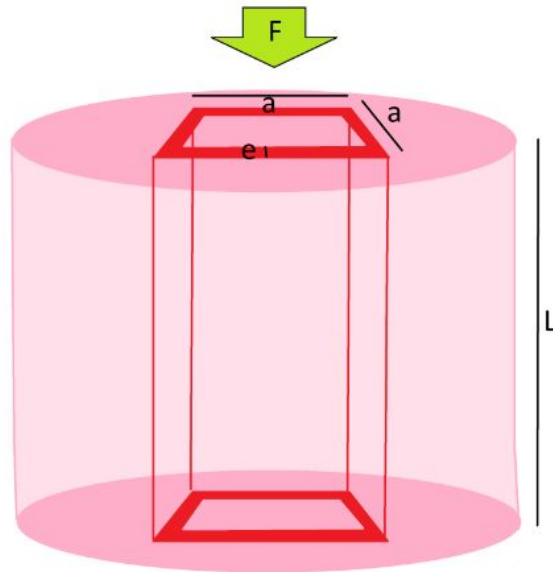
Détail du calcul du modèle

Notations :

- e = épaisseur du fil imbibé de silicone
- a = côté du carré
- L = hauteur de la pastille
- E = Module d'Young
- l = longueur de fil
- S = surface
- F = force

Hypothèses de calcul :

- Poutre circulaire assimilée à une poutre rectangulaire pour petit rayon
- Pour une poutre en simple compression : $F_{flambementsansfil} = \frac{\pi^2 E_{silicone} I}{L^2}$
- Loi de Hooke : $\frac{F_{flambementsansfil}}{S} = E_{silicone} \frac{\Delta L}{L}$
- Schéma de la pastille considérée pour le calcul



- L'incompressibilité du silicone donne : $a^2 L = (L + \Delta L)(a + \Delta a)^2$

Résultats du calcul :

$$F_{\text{flambement}} = \frac{E_{\text{silicone}} + f_{\text{fil}} \Delta l_{\text{fil}} S_{\text{fil}}}{l_{\text{fil}}}$$

$$\Rightarrow F_{\text{flambement}} = \frac{E_{\text{silicone}} + f_{\text{fil}} e^2 a}{a + 2e} \left(\sqrt{\frac{12L}{12L - \pi^2 a}} - 1 \right)$$

Par ailleurs, la pastille avec un enchevêtrement aléatoire de fil possède un module d'Young bien supérieur à celui d'une pastille sans fil.

Ainsi, nous avons pu affirmer qu'il est nécessaire de prendre en compte la nature composite du matériau, notamment au travers de la force de flambement qui expliquerait les claquages observés.

Enfin, nous nous sommes posé la question suivante :

Est ce que le phénomène de claquage observé sur notre structure de départ a une explication physique ou est ce la cause d'aberrations due à la méthode moulage ?

Les aberrations possibles sont par exemple : un silicone pas tout à fait homogènement réparti, ou une structure de géométrie approximative.

Protocole n°4 : Modélisation de notre structure

Nous avons d'abord dessiné l'échantillon sous un autre logiciel de Dassault, *Abaqus*. La version accessible d'*Abaqus* permet de dessiner les formes voulues grâce à des côtes et des angles. On a donc relevé sur nos échantillons épaisseurs du fil siliconé (1 mm de diamètre), angles entre les motifs internes, longueurs de ces motifs, etc...

Une fois le modèle tracé, nous avons entré les paramètres physiques de la matière composant la structure. Nous n'avons pas ici pris en compte le matériaux comme composite (fil + silicone) mais juste en silicone de module d'Young 150 kPa. Nous avons enregistré un coefficient de poisson de 0,5 comme pour un élastomère classique dont se rapproche le silicone. Nous avons ensuite placé le cadre de l'étude en compression : point d'accroche de translation et rotation au coin de la maille de la diagonale d'intérêt, axe de compression selon la diagonale, vitesse de compression.

Enfin, nous avons discrétisé la structure 3D dessinée en une maille minimale pour placer un noeud à suivre à chaque endroit nécessaire au calcul de déformation. Le logiciel impose un minimum de points pour décrire la structure mais on peut ajouter des points pour avoir des matrices de contrainte et de déformation plus dense. Cependant la version accessible ne fonctionnait qu'avec 1000 noeuds maximum, nous avons pu utilisé le travail effectué sur *Abaqus* en transférant l'ensemble sur la logiciel *Catia*.. Par cette simulation, nous avons retrouvé la forme typique de nos échantillons lors de la compression.

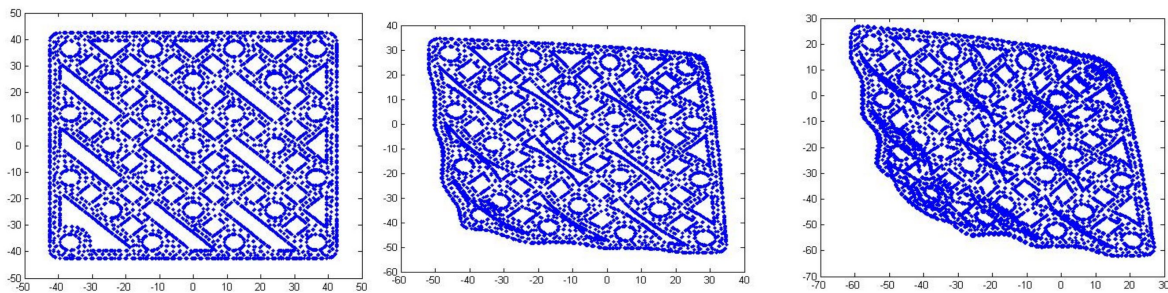


Figure 10 : modélisation de la maille en compression sous *CATIA*

Résultat : Nous pouvons donc en déduire que nos observations sont bien dues à la structure, notamment les claquages, et pas à des maladroites de fabrications.
