

Cinématique d'un câble acier pénétré de gomme par essai de traction in-situ

Kinematics of rubber penetrated steel cable from in-situ tensile test

Loïc Seauve¹, Camille Gandiolle¹, Youssef Younes¹ et Jan Neggers¹

1 : Laboratoire de Mécanique Paris-Saclay (LMPS)
Université Paris Saclay, CentraleSupélec, ENS Paris Saclay
3 rue Joliot-Curie 91190 Gif-sur-Yvette
e-mail : camille.gandiolle@centralesupelec.fr

Résumé

Les pneus sont composés de nappes composites superposées. Les nappes sont des plis unidirectionnels de renforts câblés (en acier ici) dans une matrice de gomme élastomère. Les câbles gommés doivent résister à la tension générée par le gonflage et le poids de la structure. Afin de prédire la durée de vie des câbles pénétrés en traction, il est nécessaire de pouvoir correctement simuler la cinématique des fils d'acier constitutifs du câble dans la matrice. La cinématique est particulièrement complexe du fait de la géométrie câble et de la forte disparité de propriétés mécaniques entre élastomère et métal. Un essai de traction in-situ en tomographie X a été développé pour étudier cette cinématique. La tomographie a pour conséquence un nombre limité de pas de temps, ce qui, associé au contraste important de la cinématique entre la gomme et le câble, est très exigeant pour la corrélation numérique du volume (DVC). Un algorithme DVC spécialisé a donc été développé. Il combine la régularisation mécanique, les corrections de luminosité et de contraste et la régularisation des limites polynomiales dans une approche pyramidale à plusieurs étapes. La solution obtenue montre une expulsion de la gomme située au centre du câble pendant la sollicitation.

Abstract

Tires are structures made up of superimposed composite plies. The plies are unidirectional plies, with rubber as matrix and steel cords as reinforcement. The rubberized cords must withstand the tension generated by tire inflation and the weight of the structure. To predict the service life of penetrated cables under tension, it is necessary to be able to correctly simulate the kinematics of the steel wires making up the cable in the rubber matrix. The kinematics are particularly complex, given the cable geometry and the wide disparity in mechanical properties between the elastomer and the metal. This article presents the development of an in-situ traction test using X-ray tomography to study kinematics. A consequence of tomography is a limited number of time steps, which together with the large contrast in kinematics between the rubber and the cable is very demanding for Digital Volume Correlation (DVC). As such, a specialized DVC algorithm was developed that combines mechanical regularization, brightness and contrast corrections and polynomial boundary regularization in a multi-step pyramid approach to converge to the solution. Each kinematic is obtained and shows an expulsion of the rubber located at the center of the cable during the loading.

Mots Clés : Câble pénétré, Essai in-situ, Tomographie RX, CVN

Keywords: Rubberized cords, in-situ test, X-ray Tomography, DVC

1. Introduction

Les pneus utilisés par les véhicules lourds dans les mines représentent un coût important pour les entreprises. Ils doivent faire face à des contraintes mécaniques importantes liées au gonflage des pneus, au poids du véhicule et des produits transportés, aux contraintes supplémentaires liées à l'état de la route et aux effets de l'environnement. Les pneus pour les véhicules de cette taille sont composés de plusieurs nappes composites, chacune composée de câbles alignés noyés dans une matrice de caoutchouc. On s'intéresse ici aux couches dont le rôle est d'absorber la majeure partie de la déformation du pneu. Les câbles de ces couches ont une structure plus aérée, permettant la

pénétration du caoutchouc d'une part et un allongement structural plus important qu'un câble classique d'autre part. Lorsqu'une indentation est appliquée sur un pneu, la flexion causée par cette indentation entraîne une tension sur les câbles [1]. Si des essais de traction classique confirme un fort allongement structural à faible force appliquée, la cinématique du câble dans la gomme est encore méconnue. Ce travail propose d'étudier ces cinématiques, en mesurant expérimentalement les champs de déplacement 3D grâce à la tomographie à rayons X et la corrélation d'image volumique (DVC) [2]. Ces résultats permettront non seulement de comprendre la mécanique du câble à l'échelle des fils et du caoutchouc à l'intérieur du câble, mais ils serviront également de référence pour des simulations éléments finis.

2. Essais in-situ en Tomographie X

2.1 Matériaux

Le câble est composé de 4 brins torsadés. Le câble est complètement pénétré par de la gomme élastomère de pneumatique. L'éprouvette testée est constituée d'un renfort câble dans un pavé de gomme (Figure 1). Dans le but de pouvoir suivre les déformations de la gomme par corrélation d'image volumique lors de l'essai in-situ en tomographie X, la gomme est chargée de particule de silice avec une taille médiane de 20 micromètres.

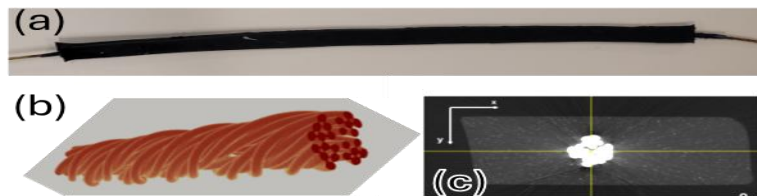


Fig. 1 : (a) Éprouvette testée, (b) trajectoires des fils du renfort câblé extraites de la tomographie, (c) position du câble dans la gomme à partir d'un slice de tomographie.

2.2 Dispositif d'essai

L'essai de traction est réalisé par la machine DEBEN CT20kN, adaptable sur le tomographe de laboratoire du LMPS. De nouveaux mors, adaptés aux câbles sont réalisés : ils permettent de diminuer l'effort de manière progressive dans notre éprouvette sans tête et limiter les glissements. Pour ce faire, le câble est tiré avec une pince plate, enroulé autour d'ellipses puis fixé par une vis. Les mors et le montage du câble sont visible sur la Figure 2. Du jeu peut apparaître sur le pont entre les 2 ellipses selon la rigidité de l'éprouvette et la force de traction avec laquelle le câble est mis en place. Ce jeu doit être limité au maximum pour ne pas perdre en amplitude de traction.

2.3 Protocole

L'éprouvette composite est installée sur les mors en limitant les jeux. La partie gommée s'étend jusqu'à la première partie de la première ellipse pour prévenir les rotations d'éprouvette mais le câble est nu ensuite pour diminuer sa rigidité et limiter les jeux. Une légère précharge est imposée afin supprimer les jeux puis une première acquisition tomographique est réalisée. 3 charges-décharges successives à niveau d'effort croissant sont ensuite appliqués (Figure 3). A chaque niveau

de chargement, un temps d'attente de 10 minutes est réalisé avant le scan tomographique afin de stabiliser les relaxations. Chaque scan dure ensuite environ 30 minutes.

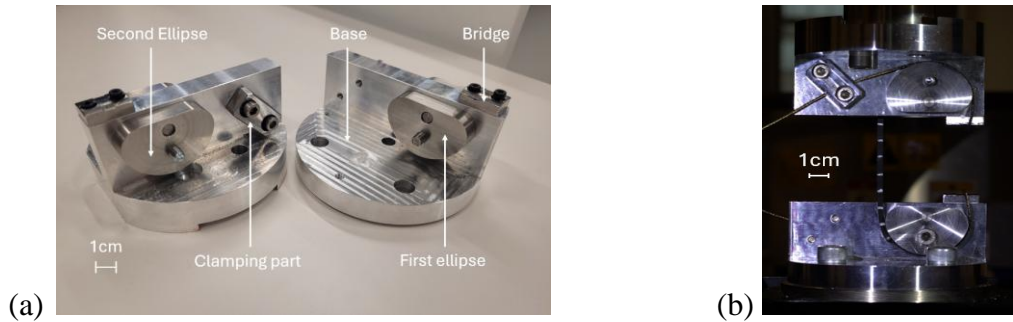


Fig. 2 : (a) Nouveaux mors développés pour la sollicitation in-situ des éprouvettes en traction, (b) installation de l'éprouvette de câble gommé sur les mors, dans la machine d'essai.

2.4 Résultats d'essai

La courbe force temps effectivement réalisée et mesurée par les capteurs de la machine Deben, est présentée sur la Figure 3. A chaque cercle, un scan tomographique a été réalisé nous permettant d'obtenir des images 3D de résolution 15.4 $\mu\text{m}/\text{vx}$. La Figure 3 montre que la majeure partie de la relaxation s'est bien produite avant le début du scan. La Figure 3 présente des slices, de la même section, à chaque point de mesure.

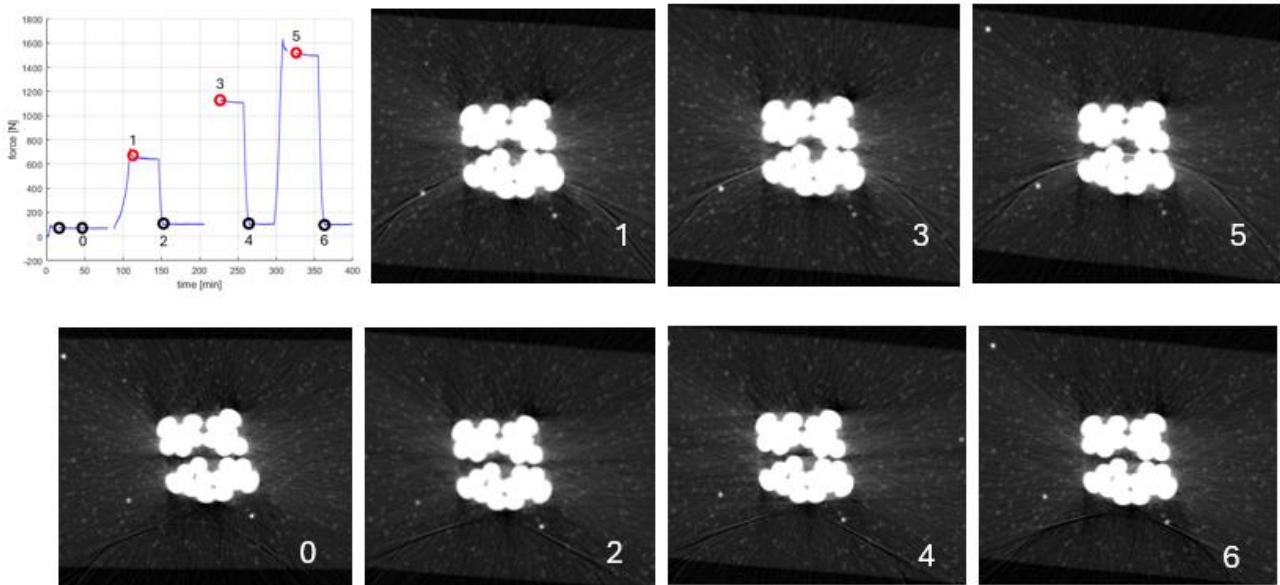


Fig. 3 : Courbe Force-temps de l'essai de traction in-situ et slice de la même section de l'éprouvette à chaque scan réalisé.

Le contraste de chaque slice est fixé à 4% de saturation afin que les marqueurs (charges de silice) soit visible dans l'élastomère. Les fils d'acier apparaissent donc saturés et flou mais une image moins contrastée montrerait une séparation nette. On peut toutefois observer que dans les configurations chargées (slices 1, 3 et 5), les fils se rapprochent légèrement les uns des autres par rapport aux configurations déchargées. Hormis cette différence, tous les balayages montrent une

distribution très similaire des fils, ce qui devrait faciliter la convergence de la DVC vers une bonne solution concernant la position des fils. La qualité des images permet de voir les marqueurs dans le caoutchouc et montre une séparation claire entre les fils, ce qui est nécessaire pour obtenir un champ de déplacement fiable sur les fils et dans le caoutchouc à l'extérieur du câble, même si plusieurs artefacts de reconstruction sont présents.

3. Corrélation d'image volumique

Le fait de n'avoir que 7 images, chacune aux extrémités d'un palier de charge, met à l'épreuve la capacité de convergence de la méthode de Newton que l'on trouve généralement dans la DVC. Pour de nombreuses étapes, le seul mouvement de corps rigide entre les deux étapes dépassait 400 vx, soit un tiers de la longueur de l'image (Fig. 4b). De plus, le contraste dû au câble est très dominant par rapport au contraste dû aux particules de silicate. Par conséquent, les approches pyramidales multi-échelles typiques avait tendance à résoudre d'abord le mouvement du câble, en ignorant le caoutchouc. Ensuite, dans les étapes pyramidales ultérieures, lorsque le contraste du silicate revenait, le solveur était déjà bloqué dans un minimum local. Pour résoudre ce défi, plusieurs techniques ont été adoptées. La première consistait à précalculer un champ de contrainte à partir des conditions limites mesurées, en supposant un échantillon homogène. Ensuite, une partie de l'image concernant le câble a été masquée pour l'algorithme DVC avec des corrections contraste-brillance [3]. Cela force la routine à résoudre d'abord la gomme (Fig. 4a). Il convient de noter que les nœuds entièrement supportés par les éléments du câble étaient toujours soumis à la régularisation mécanique [4] et que, bien que leur solution ne soit pas basée sur l'image, ils étaient plus ou moins répartis de manière homogène dans le masque. Après convergence sur le caoutchouc, la partie de l'image dans le câble a été réactivée pour l'étape finale. Une dernière technique qui s'est avérée essentielle a été de limiter la liberté des surfaces supérieure et inférieure de l'échantillon à un champ vectoriel polynomial du 2nd ordre. En effet, les gradients de déplacement le long de la direction z devraient être limités en raison de la nature de déformation plane de la cinématique dans ces régions. En forçant cette condition, le reste du domaine a été régularisé suffisamment pour converger vers le minimum global.

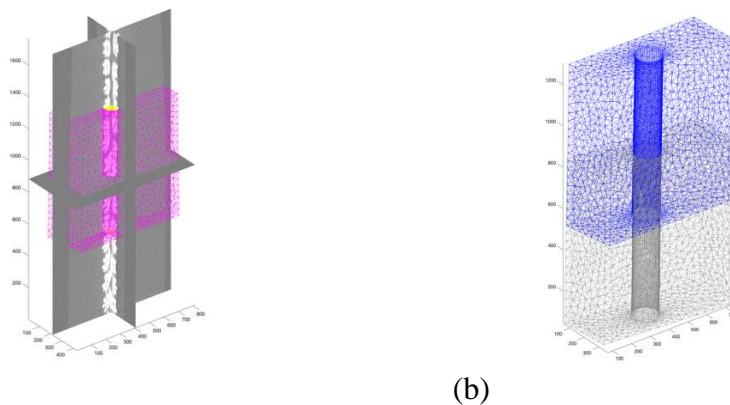


Fig. 4 : (a) Le maillage DVC, conforme à l'échantillon, à la fois la partie câble (jaune) et la partie gomme (magenta).
(b) Le maillage positionné dans l'état de référence (bleu) et l'état déformé (gris) de l'étape de charge 5.

4. Discussion

Les filaments du câble offrent un fort contraste transversal, ce qui se traduit par une grande précision des déplacements transversaux renvoyés par la DVC. Cependant, si l'image ne contenait que le câble, la DVC n'aurait pas été possible en raison de la symétrie hélicoïdale du câble qui fait que la matrice de DVC devient singulière. C'est grâce aux particules de silicate dans la gomme que cette symétrie est rompue et que l'ensemble du champ de déplacement peut être obtenu.

De plus, le câble est construit à partir de quatre brins torsadés, chacun étant constitué de 6 filaments contra-torsadés. Cela fait que l'espace ouvert au milieu du câble est parfois voisin de quatre filaments (c'est-à-dire un de chaque brins) et d'autres fois de 8 filaments (c'est-à-dire deux de chaque brins). Le premier a tendance à être plus dense que le second. Par conséquent, les déformations observées au milieu du câble oscillent sur toute la longueur du câble.

De plus, l'espacement entre les brins n'est pas homogène le long du câble. Dans certaines zones, les quatre espacements entre les brins sont égaux, tandis que dans d'autres, un espacement a tendance à être beaucoup plus grand. La traction sur le câble a tendance à rapprocher les brins les uns des autres, ce qui donne un câble plus compact. Cela a à son tour tendance à forcer la gomme hors du câble, ce qui entraîne de très grandes déformations dans ces espacements entre les brins. En raison de la taille relativement importante des particules de silicate, il n'y avait peu ou pas de particules dans ces espacements entre brins. Par conséquent, les mesures de déformation dans ces zones ne sont pas suffisamment fiables pour être quantitatives. Cependant, à partir du seul mouvement transversal du brins et du filament, on estime que les déformations dans ces zones dépassent 300 %. Un phénomène intéressant est observé lorsqu'il y a un grand espacement entre les brins. Ce dernier a tendance à permettre à la gomme de migrer hors du câble, ce qui provoque son ouverture même lorsqu'il est localement en compression. Inversement, cela provoque la fermeture des petits espacements entre les brins. Cette interaction entre la géométrie de l'architecture locale et la mécanique est très intéressante et offre un terrain fertile pour les analyses.

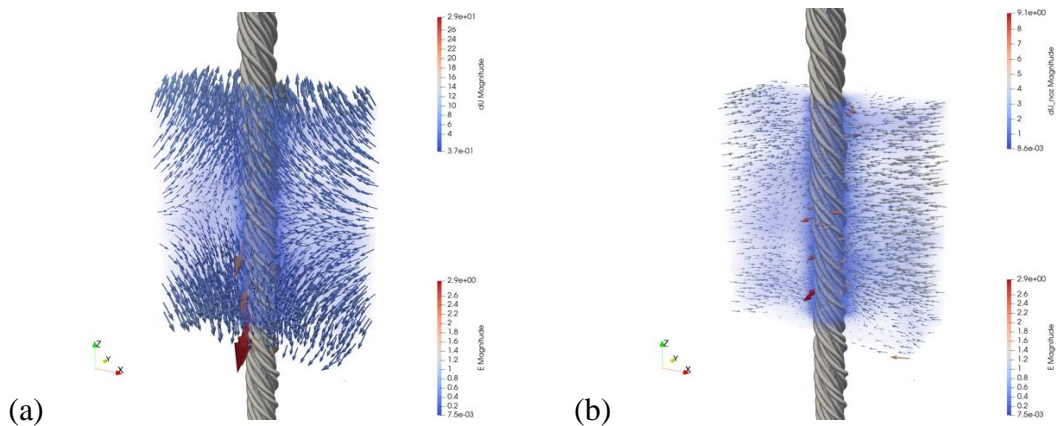


Fig. 5 : (a) Le champ de déplacement avec les déplacements du corps rigide supprimés. (b) Le même champ mais avec la composante z annulée de sorte que le déplacement transversal devient visible.

5. Conclusion

Les tests sur câbles sont difficiles, et les tests in-situ dans un tomographe encore plus. Dans ce travail, un montage spécifique a été développé pour permettre ces tests. De plus, l'ajout de particules de silicate à l'intérieur de la matrice en caoutchouc a permis des mesures DVC en plein

champ. De telles mesures sont difficiles en raison des grandes différences de déplacement entre le nombre limité de scans qui peuvent raisonnablement être capturés à l'aide de la tomographie. À ce titre, un certain nombre de techniques de régularisation spécialisées ont été adoptées pour permettre à la méthode DVC de converger vers le minimum global.

L'accès aux déplacements en plein champ offre des opportunités d'analyse riches qui sont actuellement explorées. La mécanique du câble est contrôlée par des mécanismes très subtils. Les degrés de libertés à l'échelle locale ont un impact significatif sur la mécanique macroscopique. Ce travail met en évidence deux d'entre eux. Le premier est une interaction entre la torsion et l'anti-torsion des brins qui fait varier le volume de la zone de gomme du noyau le long du câble, où un volume plus grand correspond à des déformations observées plus grandes. Le second est une observation selon laquelle de petites variations d'espacement entre les brins peuvent avoir de grandes conséquences sur la quantité de matériau en gomme qui traversera ces espaces étroits lorsque le noyau est soumis à une forte pression en raison de la traction du câble. Il y a sans aucun doute de nombreux autres mécanismes intéressants à révéler dans un avenir proche en explorant plus en détail ces riches champs de déplacement.

Références

- [1] Bonneric M., Aubin V., Durville D., “Finite element simulation of a steel cable-rubber composite under bending loading: Influence of rubber penetration on the stress distribution in wires”, *International Journal of Solids and Structures*, Vol.160, pp. 158-167, 2019.
- [2] Buljac, A., Jailin, C., Mendoza, A., Neggers, J., Taillandier-Thomas, T., Bouterf, A., Smaniotto, B., Hild, F., & Roux, S. “Digital Volume Correlation: Review of Progress and Challenges”. *Experimental Mechanics*, 58(5), 661–708, 2018. <https://doi.org/10.1007/s11340-018-0390-7>
- [3] Mendoza, A., Neggers, J., Hild, F., & Roux, S. “Complete mechanical regularization applied to digital image and volume correlation”. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 355, 27–43, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2019.06.005>
- [4] Sciuti, V. F., Canto, R. B., Neggers, J., & Hild, F. “On the benefits of correcting brightness and contrast in global digital image correlation: Monitoring cracks during curing and drying of a refractory castable”. *Optics and Lasers in Engineering*, 136(April 2020), 106316, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2020.106316>