

La mécanique des toiles d'araignées

Thèse expérimentale

Sébastien Neukirch et Pr. Arnaud Antkowiak (Institut d'Alembert UMR 7190 – UPMC - CNRS, Paris Jussieu)
Christine Rollard (Institut de Systématique, Evolution, Biodiversité «ISYEB» UMR 7205 - CNRS – MNHN – UPMC – EPHE - UA)
Pr. Fritz Vollrath (Zoology Dept. Oxford University, UK)

Le fil de capture des toiles d'araignées

Les araignées produisent différents types de fibres de soie, chacune ayant des propriétés chimiques, physiques, et mécaniques adaptées à la fonction recherchée : toile, cocon, câble d'ancrage, fil de détection, filet de capture, etc. Certains fils de soie d'araignée ont une tenue mécanique exceptionnelle : la ténacité (énergie dépensée pour rompre la fibre) des meilleures fibres est dix fois celle du Kevlar. La grande variabilité des propriétés de ces fils de soie d'araignée fait qu'ils sont très étudiés de nos jours. Certains chercheurs essaient d'en comprendre la structure protéinique (organisée autour de feuilletés beta) afin de produire, par bio-mimétisme, de nouvelles fibres synthétiques ultra-performantes. D'autres utilisent le génie génétique pour produire la soie d'araignée en grande quantité car l'araignée ne peut être domestiquée (au contraire du ver à soie) à cause du cannibalisme chez la plupart des espèces. Les gènes codant la protéine ont été isolés et réimplantés sur plusieurs hôtes tels que la levure, certaines plantes, des chèvres, et plus récemment des vers à soie [Teu12]. Nous nous intéressons dans ce projet exclusivement au fil de capture des araignées tisseuses de toile écrabellées [Bla09]. C'est ce fil, posé en spirale dans la toile, qui capture les proies volantes, voir Figure 0.

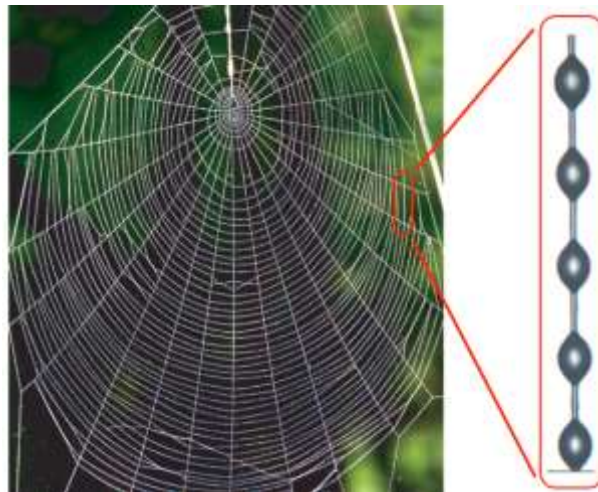
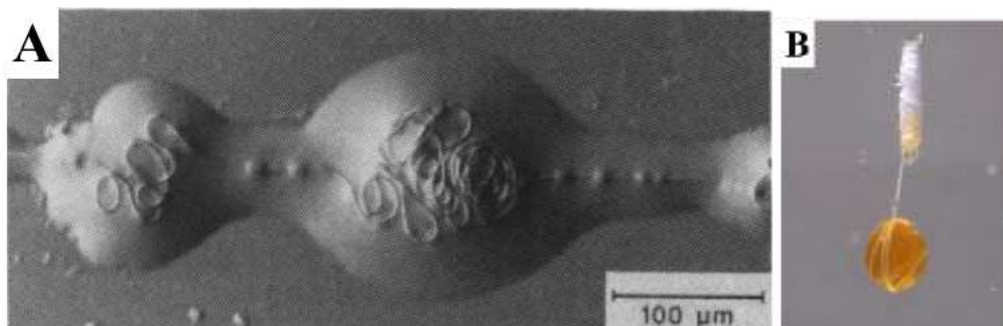


Figure 0 : Une toile géométrique, composée de (i) fils de cadre, (ii) de fils radiaux, et (iii) de fil spiraux ou fils de capture. Encadré rouge : un fil de capture décoré de gouttelettes liquides. Figure tirée de [Bla09].

Mécanisme tendeur dans les toiles d'araignées



Sujet de thèse en bio-physique-mécanique

Figure 1 : A : cliché d'un fil d'araignée lors d'une super-contraction [Vol89]. B : filament élastique s'enroulant autour d'une goutte (centimétrique) [Rom10].

Les toiles d'araignées, qui servent à capturer les proies, sont tissées avec des fibres d'une soie spéciale qui allie grande extensibilité et haute résistance à la rupture. Il semble de plus que les fils de capture sont naturellement sous tension et que si l'on en rapproche les extrémités ils ne fléchissent pas mais restent rectilignes. Il a été proposé que les gouttelettes liquides (colle et eau) présentes le long du fil agissent comme un treuil pour tendre le fil, voir [Vol89] et Fig.1A. Ce mécanisme aiderait par exemple à dissiper l'énergie cinétique de l'insecte venant heurter la toile. C'est la modélisation, la caractérisation mécanique et physique, ainsi que l'étude de la variabilité zoologique de ce mécanisme de treuil qui constitue l'objet de ce projet.

Contexte

La problématique cadre est le comportement d'un film d'eau mouillant un cylindre. Les configurations possibles sont multiples et dépendent des paramètres (tailles respectives, modules élastiques, tension de surface, poids, ...). Sur un cylindre rigide, le film se morcelle en gouttes (instabilité de Plateau-Rayleigh), mais si le cylindre est un filament élastique souple le minimum d'énergie peut être tout autre : le liquide se met sous forme sphérique et le filament reste piégé à l'intérieur de la goutte devenue 'géante'. Le problème est maintenant celui de l'empaquetage d'un filament élastique dans une boîte souple, analogue à celui de l'empaquetage de l'ADN dans les capsides virales. Nous avons déjà étudié ce phénomène dans le cas 'synthétique' (fil d'élastomère et huile silicone) où le fil est totalement mouillé, où les extrémités du filament sont tenues en tension (peut-être faible) et torsion (le filament ne peut libérer le twist) dans le cadre de deux thèses (H. Eletto 2015 et P. Grandgeorge 2018, voir publications et brevets d'ingénierie inspirés de la biologie du fil d'araignée). Le but est maintenant de revenir au système naturel pour confirmer ou infirmer l'existence du phénomène de treuil dans les toiles (certains zoologistes le remettent en question) et comprendre son intérêt évolutif pour l'araignée. Nous chercherons par exemple à répondre aux questions suivantes : quelles sont les conditions pour obtenir l'enroulement du fil ? Quelle est l'influence des propriétés interfaciales et viscoélastiques des gouttes sur le phénomène ? Comment varie la taille des gouttes en fonction de l'humidité (cela suit-il le modèle de [Edm92] ?) Comment est déterminée la distance de séparation des gouttes sur la fibre (instabilité de Rayleigh-Plateau ou distance liée aux granules présentes sur les fils?) Variabilité inter-espèces de la visibilité du fil dans les gouttes ? Sachant que la fibre de soie peut être microporeuse, quelle est la dépendance de la visibilité par rapport à l'âge de la fibre ? Présence du treuil dans une toile fraîchement tissée ?

La proximité géographique avec le MNHN dans lequel travaille Christine Rollard nous permet une collaboration plus aisée. Pour l'instant, les expériences sont faites sur l'araignée *Trichonephila inaurata madagascariensis* que C. Rollard élève. C. Rollard apporte à la collaboration son expertise sur la biologie, les conditions d'élevage (taille de la cage de maintien, hygrométrie, température...) et la compréhension des comportements de tissage de cette espèce.

Tests mécaniques sur le fil de capture

Le but est de visualiser sur des fibres d'araignées « in-vivo » le mécanisme de treuil et de mesurer la réponse mécanique du système. Les observations expérimentales de l'enroulement de fibre au sein des gouttes de glu seront conduites grâce à la plateforme d'imagerie submillimétrique rapide développée à l'Institut d'Alembert. Nous souhaitons par ailleurs effectuer des tests mécaniques sur des fils de capture naturels de différentes espèces d'araignées tisseuses de toile. Le fil sera étiré progressivement et la déformation sera mesurée à l'aide de fibres de verre et de micro-capteurs à déflexion capacitifs. Les mesures seront faites en quasi-statique et en dynamique (vitesse imposée). Nous souhaitons ainsi mesurer le module d'Young du matériau (réponse linéaire) ainsi que ses caractéristiques élastiques non-linéaires, mais aussi ses propriétés viscoélastiques (dissipation d'énergie lors de la déformation) et élasto-plastiques (apparition d'une déformation permanente lors d'un étirement trop fort). D'autre part, étant donné que les caractéristiques mécaniques de la soie d'araignée dépendent des conditions sous lesquelles la fibre est tissée [Bou11, Vol00], nous voulons répéter ces tests à différentes températures (le fil de capture subissant une transition vitreuse pour $T > T_v$) ainsi qu'à différentes humidités relatives (T_v dépend du taux d'humidité). De telles mesures ont déjà été effectuées par le groupe d'Oxford sur les fils radiaux [Gua12], mais pas sur les fils de capture.

Sujet de thèse en bio-physique-mécanique

De cette manière nous cherchons à répondre aux questions suivantes : Quel est l'apport mécanique des gouttelettes liquides ? Le module de Young dépend-il de l'humidité relative ? Quel est l'étirement maximal avant rupture ? Quel est le taux de dissipation d'énergie ? Et enfin comment ces propriétés changent-elles entre les espèces d'araignées ? Les questions zoologiques étant : des araignées à comportement différent ont-elles des fils de capture à élasticité différentes ? Quelles sont les toiles les plus performantes (en termes de capture, longévité, ...) ? Quelles sont les différences mécaniques entre fils radiaux et fils de capture ? Energie dissipée lors d'un impact ?

Un premier test mécanique in-situ

Un premier test pour confirmer la présence de bobinage dans les gouttes décorant le fil de capture et d'étirer le fil hors du plan de la toile. Des expériences préliminaires semblent indiquer que le fil peut être étiré de plusieurs fois sa longueur native (allongement supérieur à l'allongement de rupture) sans déformer les éléments voisins de la toile, indiquant une très faible résistance à la traction. Ce test sera répété avec un capteur de force, et à la fois en statique et en dynamique.

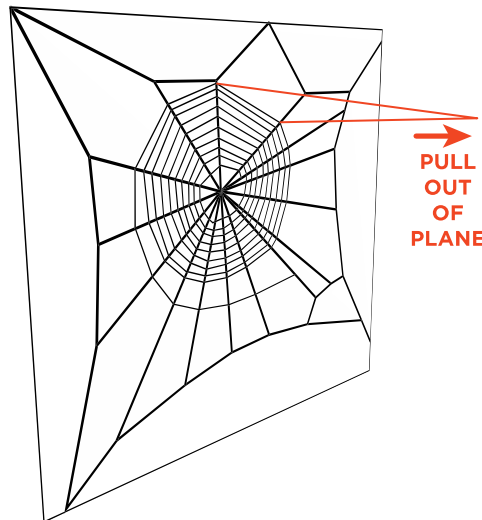


Figure 2 : Test mécanique de traction effectué in-situ sur le fil spiral d'une toile d'araignée fraîchement tissée : le fil peut être allongé de plusieurs fois sa longueur native

Exemple de références du groupe

+H. Elettro, S. Neukirch, F. Vollrath, and A. Antkowiak,

In-drop capillary spooling of spider capture thread inspires hybrid fibers with mixed solid-liquid mechanical properties, PNAS, 113 (2016) 6143-6147

+P. Grandgeorge, N. Krins, A. Hourlier-Fargette, C. Laberty-Robert, S. Neukirch, and A. Antkowiak

Capillarity-induced folds fuel extreme shape changes in thin wicked membranes

Science, 360 (2018) 296-299

+Patent FR1453960 (UPMC / CNRS / Oxford Univ.): Method and device for modifying a characteristic of a wire element, particularly the distance separating its two ends

+Patent BNT222118FR00 UPMC / CNRS / Oxford Univ.) Membrane Composite et procédé de Fabrication d'une telle Membrane

Autres références

[Bla09] T. A. Blackledge et al. Proceedings of the National Academy of Sciences, USA, 106 (2009) 5229–5234.

[Teu12] F. Teulé et al. Proceedings of the National Academy of Sciences, USA, 109 (2012) 923–928.

[Vol00] F. Vollrath. Reviews in Molecular Biotechnology, 74(2):67 – 83, 2000.

[Vol89] F. Vollrath and D. T. Edmonds. Nature, 340 (1989) 305–307.

[Rom10] B. Roman and J. Bico. Journal of Physics : Condensed Matter, 22(2010) 493101.

[Bou11] C. Boutry et al. PLoS ONE, 6(2011) :e22467.

[Edm92] D. T. Edmonds and F. Vollrath. Proc. Roy. Soc. B 248 (1992) 145–148.

[Gua12] J. Guan et al. Polymer, 53 (2012) 2717–2726.