

tutoriels sur Youtube et les précieux conseils de ma grand-mère, mes premiers tricotés étaient affreux et inutilisables pour les besoins de la recherche. Ensuite, le nombre de paramètres en jeu dans les tricotés ordinaires est très grand, parce que même les fils les plus classiques sont eux-mêmes des objets incroyablement compliqués, constitués de plusieurs fibres assemblées de façon peu régulière.

Afin de remédier aux limites de mes compétences en tricotage, j'ai contacté une école d'art voisine, qui, par chance, avait un atelier équipé de machines à tricoter manuelles et de métiers à tisser. Et surtout, le chef de l'atelier a eu l'amabilité de m'expliquer comment réaliser un tricot parfait. Avec ce savoir en poche (et une machine à tricoter d'occasion datant des années 1970 que nous avons achetée pour le laboratoire), j'étais enfin en mesure de produire des tricotés assez réguliers pour être utilisés dans nos expériences.

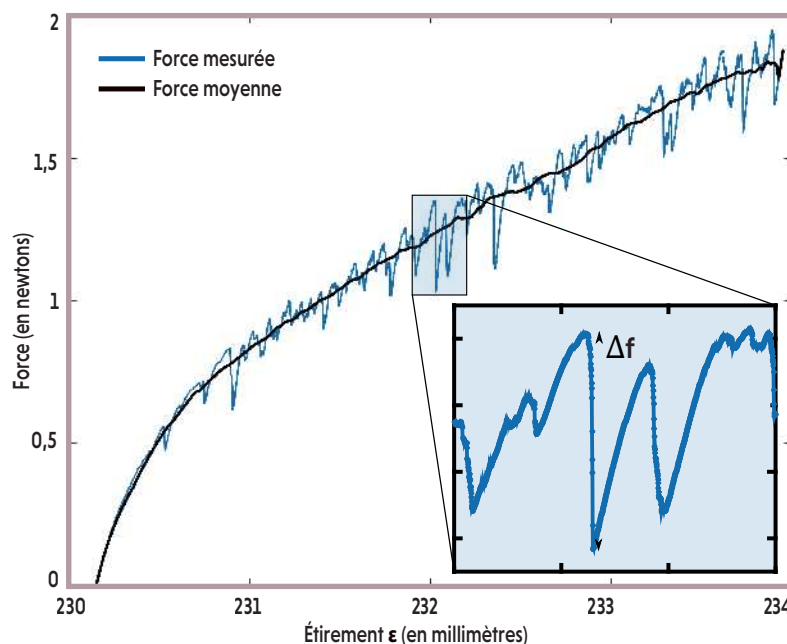
Pour résoudre le second obstacle, nous avons fait ce que font tous les physiciens : nous avons simplifié le problème autant que possible afin qu'il ne reste que les paramètres essentiels. Nous savions que ce qui définit un tricot est le réseau des points de croisement des fils, et nous avons commencé par choisir le fil le plus simple possible, du fil de pêche en nylon. Nous avons alors fait un tricot très lâche afin que le fil ne soit pas trop déformé (des courbures trop fortes auraient entraîné des déformations plus complexes à modéliser). Résultat : nous avons un matériau sans doute un peu osé s'il s'était agi d'en faire un vêtement, mais un bon point de départ pour notre étude. Ce tricot était assez simple pour être décrit à l'aide d'un nombre limité de facteurs (dont éventuellement quelques paramètres numériques) : l'élasticité du fil, la structure imposée par le motif d'entrelacs et la friction du fil sur lui-même aux points de croisement.

ÉLASTICITÉ ET TREMBLEMENTS

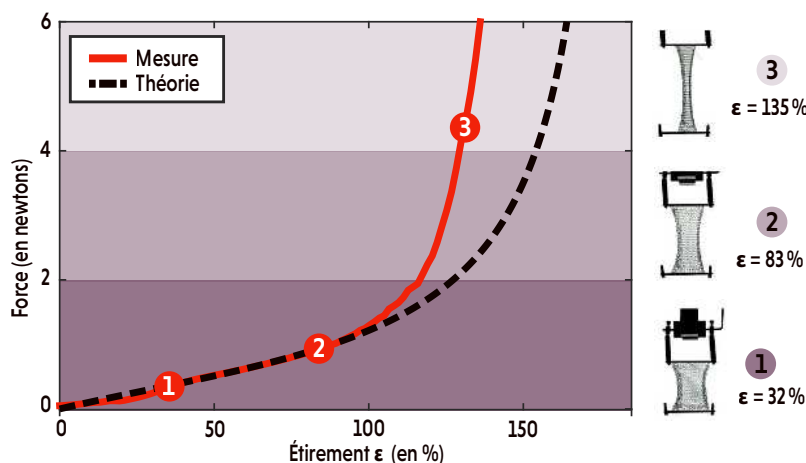
Afin d'évaluer la réponse mécanique de notre tricot, nous avons mesuré la force appliquée pour l'étirer, et nous avons pris des photos pour évaluer la déformation locale au niveau des mailles. Le résultat de la force à appliquer en fonction de l'étirement (voir la figure ci-contre, en haut) n'était pas aussi simple que nous l'avions anticipé. La réponse mécanique du tricot avait deux caractéristiques, l'une liée à l'élasticité et l'autre à du bruit. La composante élastique était simple à identifier et correspond à une augmentation régulière de la force à appliquer pour accroître l'étirement. En revanche, la réponse bruitée (de petites perturbations venant se superposer à la réponse élastique) était aléatoire et il fallait donc l'envisager d'un point de vue statistique.

Une fois ces deux composantes identifiées, nous les avons étudiées séparément.

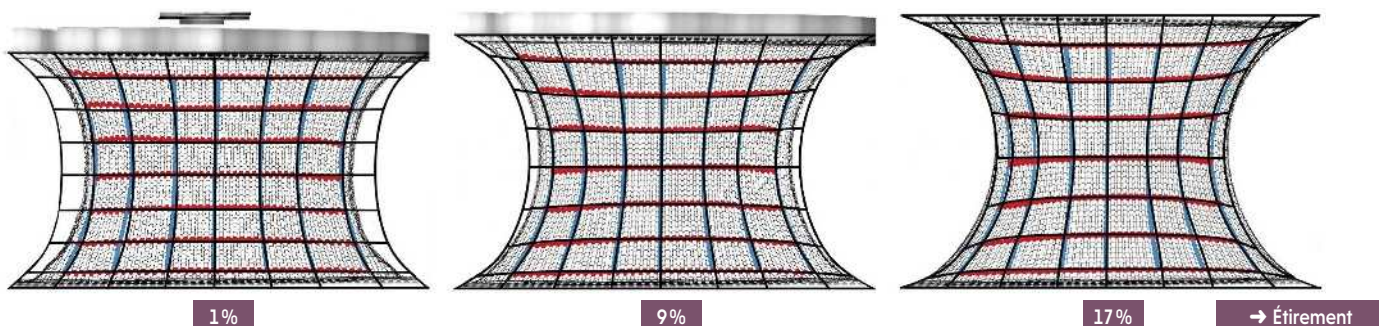
L'élasticité d'un tricot découle naturellement de celle du fil et des boucles périodiques du réseau de mailles, mais nous devons définir comment ces facteurs interagissent. Concrètement, nous avons déterminé comment l'énergie élastique du fil varie lorsque le tricot est déformé. Au lieu de fonder notre modèle sur le fil lui-même, comme dans les études mécaniques précédentes, nous avons considéré le tricot comme un réseau de >



La force appliquée en fonction de l'étirement du tricot caractérise le comportement mécanique du matériau. La réponse globale (en bleu) se décompose en deux parties, une composante moyenne (en noir) et des fluctuations. La première est liée à l'élasticité de la structure. Les propriétés de la seconde (dans le zoom), qui présente une série d'accroissements lents entrecoupés d'une baisse brutale, sont typiques de frottements.



Tant que l'étirement est inférieur à environ le double de la longueur initiale du tricot, le modèle théorique de l'auteur (en noir) rend parfaitement compte des observations (en rouge). Pour un étirement plus important, la force est sous-estimée, car le modèle ne prend pas en compte l'étirement et la compression du fil lui-même.



Quand on suit le comportement spécifique des mailles (certaines lignes en rouge et en bleu) pour différents étirements et que l'on compare au modèle (en noir), le résultat est plutôt satisfaisant.

Mais à faible étirement, les mailles latérales sont mal restituées à cause du phénomène d'enroulement que l'on observe parfois sur des pulls : les mailles moins contraintes sur les extrémités des manches tendent à s'enrouler sur elles-mêmes.

> sous-unités, à savoir les mailles. Cette approche à l'échelle intermédiaire, entre le fil et le tricot, simplifie le problème parce qu'une maille est caractérisée seulement par la distance et l'orientation des mailles voisines, et non par toute la trajectoire du fil. La difficulté est d'exprimer l'énergie du fil en fonction de la géométrie de la maille.

Quand on étire notre tricot simplifié, le fil se déforme surtout en se courbant, parce que l'étirement du fil lui-même a un coût énergétique beaucoup plus élevé. Et la courbure du fil est étroitement liée à la forme de la maille. Par exemple, plus une maille est petite, plus la courbure du fil croît ; et l'énergie associée augmente en conséquence. On a donc une relation simple entre l'énergie et les paramètres du réseau de mailles. Par ailleurs, si on considère le fil comme inextensible, un lien très simple relie la taille de la maille et la longueur de fil dans celle-ci. Si une maille est étirée dans toutes les directions, la longueur de son fil augmente. Et, comme la longueur totale du fil est constante, si le tricot est étiré dans une direction, la déformation doit être compensée par un rétrécissement dans une autre direction.

À partir de ces remarques, nous avons établi une formule mathématique donnant la réponse mécanique d'une maille, et, par extension, celle du tricot où toutes les mailles sont déformées de la même façon. Le modèle rend parfaitement compte de la réponse élastique d'un tricot étiré (voir la figure page 41, en bas), et cela jusqu'à deux fois sa longueur initiale. Mais quand on étire au-delà, les mailles ne peuvent plus se resserrer latéralement, car elles sont limitées par l'épaisseur du fil. Ce dernier commence alors à s'étirer et se comprimer, type de comportement que notre modèle ne prend pas en compte. Par conséquent, celui-ci sous-estime la force de traction pour un étirement très important.

L'hypothèse de mailles qui se déforment toutes de la même façon suffit pour rendre compte du comportement global du tricot. Mais

il est plus réaliste de supposer que la déformation est hétérogène, c'est-à-dire que toutes les mailles du tricot ne se déforment pas de façon identique. Pour modéliser cette situation, nous avons gardé la même approche que précédemment, mais nous avons dû imposer une contrainte supplémentaire : la déformation d'une maille ne peut se faire indépendamment de ses voisines. Les mathématiques se compliquent alors un peu parce que la géométrie des mailles n'est plus décrite par de simples nombres, mais par des fonctions qui varient selon la position de la maille dans le textile. En se limitant à de faibles déformations du fil, les équations restent résolubles et fournissent une prédiction de la forme globale du textile et des mailles individuelles. Dans une expérience où nous avons étiré le tricot de façon à produire des déformations très hétérogènes (voir les figures ci-dessus), nous avons constaté un bon accord entre les mesures et notre modèle.

DU BRUIT DANS LE TRICOT

Revenons maintenant au bruit aléatoire, la seconde composante qui se manifeste lorsqu'on étudie la force à appliquer pour étirer un tricot. En analysant de près cette composante, nous avons remarqué que les fluctuations suivent un comportement particulier : elles augmentent lentement et de façon linéaire avec l'étirement avant de subir une chute soudaine et importante. Ce bruit n'est pas lié à notre dispositif de mesure (dont la sensibilité est 100 fois supérieure à celle nécessaire pour mesurer ces fluctuations) ; il est donc intrinsèque au tricot. Quelle est son origine ? Il est lié à la friction du fil. Quand on pousse un objet sur une surface, les frottements s'opposent à la force de poussée. Si celle-ci est inférieure à une valeur critique, le frottement domine et l'objet reste immobile ; au-dessus de ce seuil, la poussée prend le dessus et l'objet commence à glisser.

Ce phénomène de frottement avec un seuil est à l'œuvre à chaque point de croisement du fil avec lui-même dans les mailles du tricot. Quand vous tirez sur le tricot, certains contacts vont brusquement glisser quand le rapport des forces de poussée et de frottement atteint la valeur critique. On explique ainsi l'augmentation lente de la force entrecoupée de baisses

Article publié avec l'aimable autorisation de la revue *American Scientist*.

BIBLIOGRAPHIE

F. Connolly et al., **Sew-free anisotropic textiles composites for rapid design and manufacturing of soft wearable robots**, *Extreme Mechanics Letters*, vol. 27, pp. 52-58, 2019.

S. Poincloux et al., **Crackling dynamics in the mechanical response of knitted fabrics**, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 121, article 058002, 2018.

S. Poincloux et al., **Geometry and elasticity of a knitted fabric**, *Phys. Rev. X*, vol. 8, article 021075, 2018.

S. M. Belcastro, **Le tricot mathématique**, *Pour la Science*, n° 429, juillet 2013.

C. Yuksel et al., **Stitch meshes for modeling knitted clothing with yarn-level detail**, *ACM Transactions on Graphics*, vol. 31(3), article 37, 2012.