

Casques de vélo – Matériaux non newtoniens rhéoépaississants

Le port du casque permet de réduire fortement les lésions en cas de chute à vélo. Toutefois, peu de cyclistes portent un casque, principalement pour des raisons de confort ou d'esthétisme. Une problématique à laquelle les matériaux non newtoniens rhéoépaississants pourraient remédier.

Le cyclisme est une activité pratiquée aussi bien en tant que loisir qu'en tant que sport. Le casque de vélo protège la tête du cycliste. De ce fait, son étude s'inscrit dans le thème « jeux et sports ».

Ce TIPE fait l'objet d'un travail de groupe.

Liste des membres du groupe :

- PESENTI-BOLO Camille

Positionnement thématique (ÉTAPE 1) :

- *PHYSIQUE (Physique Interdisciplinaire)*

- *PHYSIQUE (Mécanique)*

- *CHIMIE (Chimie Inorganique)*

Mots-clés (ÉTAPE 1) :

Mots-clés (en français)

Matériaux non newtoniens rhéoépaississants

Maïzena

Impacts

Piézoélectricité

Fermentation alcoolique

Mots-clés (en anglais)

Shear thickening non-Newtonian materials

Cornstarch

Impacts

Piezoelectricity

Alcoholic fermentation

Bibliographie commentée

Le casque de vélo traditionnel est constitué d'une coque externe en polycarbonate protégeant des objets aiguisés et d'une doublure de protection en polystyrène, de quelques centimètres d'épaisseur, permettant d'absorber les chocs. [1] Remplacer cette dernière par un matériau non newtonien rhéoépaississant permettrait de concevoir un casque moins encombrant.

On appelle viscosité la capacité d'un fluide à résister à sa mise en mouvement. Dans le cadre d'un fluide newtonien, la viscosité est indépendante de la contrainte appliquée. En revanche, pour un fluide non newtonien rhéoépaississant, la viscosité augmente avec l'intensité de la contrainte. On quantifie la contrainte par le taux de cisaillement. [2] Ce comportement rhéoépaississant est justifié microscopiquement par le modèle de transition frictionnelle. En effet, il existe des forces répulsives de courtes portées entre les particules, d'où l'absence de contact sous une faible contrainte. Dans ces conditions, le fluide s'écoule sans difficulté. L'application d'une contrainte importante impose des frottements entre les particules (formation d'amas hydrodynamiques de particules). Le fluide résiste alors à son écoulement et on assiste à une augmentation continue de la viscosité en fonction du taux de cisaillement. [2,3] Pour certains matériaux, le rhéoépaississement est qualifié de « brutal » : le matériau se comporte comme un solide au-delà d'une contrainte critique. La courbe représentative de la viscosité en fonction du taux de cisaillement présente alors une discontinuité. C'est le cas d'une suspension d'amidon de maïs de fraction volumique en particules suffisamment élevée (à partir d'un gramme par millilitre d'eau). Microscopiquement, les amas hydrodynamiques de particules s'accumulent : on parle de *jamming point* (point de blocage). [4] Cette transition vers l'état solide est même qualifiée de « re-transition » pour l'amidon de maïs (*reentrant jamming point*). En effet, des mesures effectuées au rhéomètre montrent que la viscosité diverge également pour des taux de cisaillement extrêmement faibles : le matériau possède une limite d'élasticité. [3,4]

En utilisant l'effet piézoélectrique direct, on peut évaluer une déformation due à un impact. Un disque piézoélectrique est constitué de céramiques cristallines telles que les titano-zirconates de plomb (PZT). Il est situé entre deux électrodes. Dans des conditions normales de température, de tels cristaux sont polarisés. Soumettre le capteur à une contrainte revient à modifier ce moment dipolaire : une tension électrique apparaît entre les deux armatures. La mesure de cette tension permet de déterminer la déformation subie. [5]

Des matériaux non newtoniens rhéoépaississants tels que le D3O sont actuellement déjà utilisés pour concevoir des protections sportives efficaces et plus confortables. Le D3O est un polymère orange constitué de polyurethane et de polyborodiméthylsiloxane (PBDMS) commercialisé par l'entreprise du même nom. Un casque peut ainsi être jusqu'à deux fois moins épais. [2,6] Les chocs sont efficacement absorbés pour des températures comprises entre -30 et 50°C. [6] On peut aussi envisager de coupler les matériaux non newtoniens rhéoépaississants avec le polystyrène expansé classique. L'équipe italienne dirigée par Martino Colonna s'intéresse à l'utilisation de dérivés du PBDMS. Ce polymère non newtonien est introduit sous forme de mousse entre deux couches de polystyrène. Une telle association permet de réduire les impacts tangentiels lors d'une chute. [7]

Toutefois, la synthèse et le recyclage de ces polymères ne s'inscrivent pas dans le cadre de la chimie verte. Ainsi, on pourrait envisager de les remplacer par une suspension d'eau et d'amidon de maïs, qui possède des propriétés rhéoépaississantes analogues.

Cependant, l'apparition de moisissures (*aspergillus niger*) dans le mélange eau/amidon conduit à la production de l'enzyme *amylase* : l'amidon est hydrolysé en glucose. La structure du matériau est alors modifiée : l'absorption des chocs est altérée. En conditions d'anaérobiose, ce glucose est utilisé par les levures *saccharomyces cerevisiae* pour la fermentation alcoolique. [8] On peut quantifier la modification de structure du matériau en exploitant cette réaction de fermentation. Les produits de cette réaction sont le dioxyde de carbone et l'éthanol. Macroscopiquement, la fermentation se manifeste par la présence de bulles à la surface du mélange et par une forte odeur nauséabonde.

Problématique retenue

Les matériaux non newtoniens pourraient révolutionner le domaine du sport. Dans quelle mesure un mélange d'eau et de maïzena pourrait-il être utilisé pour concevoir un casque de vélo ?

Objectifs du TIPE du candidat

- Vérifier la capacité du mélange d'eau et de maïzena à amortir les chocs
- Étudier la durabilité du mélange sur le long terme

Références bibliographiques (ÉTAPE 1)

- [1] MARION FOURNIER : “Étude biomécanique des chutes à trottinette électrique” : (2022), https://espace.etsmtl.ca/id/eprint/3026/1/FOURNIER_Marion.pdf, page 32 : éléments protecteurs d'un casque
- [2] CÉCILE CLAUDAUD, ANTOINE BÉRUT, BLOEN METZGER, YOEL FORTERRE : “Suspensions rhéoépaississantes - Principes et applications” : *Techniques de l'ingénieur*, n°3310 (2018), DOI : 10.51257/a-v1-n3310
- [3] A. FALL, N. HUANG, F. BERTRAND, G. OVARLEZ, D. BONN : “Shear Thickening of Cornstarch Suspensions as a Reentrant Jamming Transition” : *Physical Review Letters (PRL)*, Vol. 100 No.1 018301 (2008), <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.100.018301>
- [4] ERIC BROWN, HEINRICH M. JAEGER : “A dynamic jamming point for shear thickening suspensions” : *Physical Review Letters (PRL)*, Vol. 103 No. 8 086001 (2009), <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.103.086001>
- [5] S.O. REZA MOHEIMANI, ANDREW J. FLEMING : Piezoelectric Transducers for vibration control and damping : *Springer London* (2006), ISBN : 978-1-84628-331-4, chapitres 1 à 3

- [6] M. JACHOWICZ, G. OWCZAREK : “Analysis of selected mechanical parameters for foamed materials with non-Newtonian liquid characteristics in terms of their use in aspects of protective helmets” : *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics (JOSE)*, Vol. 26 No. 3 (2020), DOI : 10.1080/10803548.2019.1667112, pages 617–623
- [7] G. LA FAUCI, M. PARISI, A. NANNI, L. CROSETTA, N. M PUGNO, M. COLONNA : “Design and proof-of-concept of an advanced protective system for the dissipation of tangential impact energy in helmets, based on non-Newtonian fluids” : *Smart Materials and Structures*, Vol. 32 No. 4 044004 (2023), DOI : 10.1088/1361-665X/acc148
- [8] M. ABOUZIED, C.A. REDDY : “Direct fermentation of potato starch to ethanol by cocultures of *Aspergillus niger* and *Saccharomyces cerevisiae*” : *Applied and environmental microbiology*, Vol. 52 No.5 1055-9 (1986), DOI : 10.1128/aem.52.5.1055-1059.1986

DOT

- [1] : Avril 2023 - Première expérience : mise au point d'un montage permettant d'évaluer la capacité de la suspension rhéoépaississante à absorber les chocs. But : mesurer la force exercée par la chute d'une bille sur un capteur piezoélectrique recouvert du mélange. Comparaison avec le cas d'un fluide newtonien : l'eau
- [2] : Mai 2023 - Première expérience : choix du capteur piezoélectrique
- [3] : Mai 2023 - Première expérience : optimisation du montage (ajout d'un interrupteur pour faciliter les mesures, correction du défaut de fuite)
- [4] : Mai, Juin et Septembre 2023 - Première expérience : mesures
- [5] : Juin 2023 - Seconde expérience : mettre en évidence une modification de la structure du matériau sur le long terme. Pour cela, on étudie la formation d'éthanol dans le mélange en effectuant des titrages à différentes dates. Détermination des concentrations appropriées pour effectuer le titrage conductimétrique
- [6] : Octobre, Novembre 2023 - Première expérience : incertitudes de type A sur les forces mesurées
- [7] : Juin, Octobre, Novembre, Décembre 2023 - Seconde expérience : mesures
- [8] : Décembre 2023, Janvier 2024 - Pour les deux expériences : exploitation des résultats avec Python