

# Structures actives dans un fluide visqueux

Fabien Vergnet, MAP5, Université Paris Descartes

Dans la nature, de nombreux micro-organismes interagissent avec le milieu fluide environnant au moyen de structures allongées et déformables, appelées *flagelles* ou *cils*, dont l'activité provient de moteurs biologiques internes. Un exemple éloquent est celui des spermatozoïdes qui utilisent leur flagelle pour se déplacer. Mais des systèmes bien plus complexes existent où peuvent intervenir un grand nombre de structures, comme c'est le cas dans les poumons où les cils bronchiques jouent un rôle essentiel dans le fonctionnement du système respiratoire. Plus généralement, ce phénomène d'interaction fluide-structure se retrouve à toutes les échelles du vivant et est primordial dans le développement et le bon fonctionnement de nombreux organismes. Néanmoins, les mécanismes d'activation qui ont lieu au sein de ces structures sont encore mal connus.

De nombreux travaux se sont intéressés à l'étude de ce problème d'un point de vue de la modélisation mathématique et de la simulation numérique. Dans [2], un modèle discret est proposé en deux dimensions d'espace pour les cils, prenant en compte leur structure interne. Ils sont chacun considérés comme deux filaments inextensibles reliés par des ressorts, censés représenter des protéines induisant les déformations de la structure. Une démarche similaire est menée en trois dimensions dans [4], où l'auteur considère une description encore plus fine de la structure interne des cils. Les mécanismes internes sont reproduits en mêlant des modèles de poutres et une description continue des ressorts élastiques à l'origine de l'activité. Une toute autre stratégie est étudiée dans [3], où les cils sont modélisés par des distributions de Dirac dont les déplacements sont imposés et agissent sur le fluide environnant sans rétro-action de celui-ci sur les structures. Dans [1], les cils sont considérés comme des structures unidimensionnelles dont les déformations proviennent de la résolution d'une équation des ondes. La rétro-action du fluide sur les structures est prise en compte en modifiant la vitesse des cils en réaction des forces exercées par le fluide.

À l'inverse des travaux précédents, nous présenterons un modèle qui s'inscrit dans le cadre de la mécanique des milieux continus. Les cils sont considérés comme un matériau élastique dont la loi de comportement est divisée en deux parties : une partie passive qui vérifie la loi de Saint Venant-Kirchhoff et une partie active qui modélise des contraintes internes. Le milieu élastique vérifie alors des équations de l'élasticité modifiées par l'ajout d'un tenseur d'activité, qui sont ensuite couplées aux équations de Stokes, modélisant le fluide environnant. Sur l'interface fluide-structure, les conditions de couplage considérées sont la continuité des vitesses et la continuité des contraintes normales. Nous aborderons ensuite les aspects théoriques et numériques des problèmes mathématiques émergeant de cette modélisation et présenterons des résultats de simulations numériques.

## Références

- [1] SYLVAIN CHATEAU, JULIEN FAVIER, UMBERTO ORTONA, SÉBASTIEN PONCET, *Transport efficiency of metachronal waves in 3D cilium arrays immersed in a two-phase flow*, Journal of Fluid Mechanics, 824:931-961, 2017.
- [2] ROBERT DILLON, LISA FAUCI, *An integrative model of internal axoneme mechanics and external fluid dynamics in ciliary beating*, Journal of Theoretical Biology, 207(3):415-430, 2000.
- [3] LOÏC LACOUTURE, *Modélisation et simulation du mouvement de structures fines dans un fluide visqueux: application au transport mucociliaire*, Thèse de l'Université Paris-Saclay, 2016.
- [4] SORIN MITRAN, *Metachronal wave formation in a model of pulmonary cilia*, Computers & Structures, 11(85):763-774, 2007.