La lumière au bout du tunnel, ou comment concentrer et séparer des microalgues en combinant lumière et écoulement

Salima Rafai (salima.rafaï@univ-grenoble-alpes.fr) et Philippe Peyla

Laboratoire Interdisciplinaire de Physique (UMR5588 CNRS-Université Grenoble Alpes),
Domaine Universitaire, BP 87, 38402 St Martin d'Hères Cedex

La microalgue verte

Chlamydomonas reinhardtii

(*Chlamy*) est capable

de se déplacer au sein de son environnement liquide à l'aide de ses deux flagelles. *Chlamy* possède un « stigma » – l'œil le plus simple du monde biologique – qui lui permet d'être phototactique, c'est-à-dire de pouvoir se diriger vers une source lumineuse.

Nous décrivons ici le phénomène de photofocalisation par lequel, grâce à un écoulement et de la lumière, les microalgues sont amenées à se concentrer spontanément au centre d'un canal. En outre, nous montrerons comment les propriétés de ce micronageur peuvent être généralisées à d'autres systèmes et ainsi contribuer à une compréhension plus globale des écoulements de matière active.

La nage de *Chlamy*

Chlamy (photo p. 26), ce micro-organisme unicellulaire, utilise ses deux flagelles pour produire un mouvement qui ressemble à une brasse ultrarapide (plusieurs dizaines de battements par seconde). Son diamètre de dix micromètres en fait ce qu'on appelle un micronageur. Des observations au microscope, couplées à de l'analyse d'images et du suivi des particules, permettent de montrer que *Chlamy* adopte une marche aléatoire avec persistance (voir l'article d'introduction), avec une vitesse de l'ordre d'une centaine de microns (soit dix fois sa taille) par seconde [1, 2]. Environ toutes les cinq secondes (temps de persistance) et en l'absence de lumière, *Chlamy* change de direction aléatoirement.

Il est intéressant de noter que ce mode de nage est commun à de nombreux micronageurs comme par exemple les bactéries, les globules blancs, les spermatozoïdes ou même les nageurs artificiels fabriqués à partir de colloïdes actifs ; ceci fait de *Chlamy* un système représentatif de toute une classe de micronageurs.

À l'instar de la bactérie *Escherichia coli* (*E. coli*), *Chlamy* est un système très bien caractérisé par les biologistes et présente des particularités intéressantes par rapport à son homologue procaryote. *Chlamy* possède une forme sphérique simple à modéliser, sa taille dix fois plus importante la rend insensible aux fluctuations thermiques et, enfin, les systèmes de propulsion de ces

deux micronageurs sont opposés. Alors que *Chlamy* tire le fluide devant elle pour avancer, *E. coli* le pousse à l'arrière (voir introduction). Ainsi, ces deux systèmes aux particularités complémentaires représentent deux micronageurs du monde vivant servant de modèles aux différentes communautés de scientifiques qui s'attachent à étudier la matière active.

Le phototactisme

Chlamydomonas reinhardtii possède un « stigma » sur le côté de la cellule. Il s'agit d'un photorécepteur qui représente « l'œil » le plus simple du monde biologique. Une fois un signal lumineux capté par le stigma, une cascade biochimique s'ensuit au sein de la cellule et induit une modification des battements de flagelles qui mène finalement à une réorientation de la microalgue vers la source lumineuse. Ce « capteur photosensible » permet ainsi à *Chlamy* d'orienter sa nage vers une source lumineuse. Cette propriété, appelée **phototactisme (positif)**, permet à la cellule de se déplacer vers des zones optimales pour la photosynthèse en journée. Au contraire, durant la phase nocturne de son cycle circadien, le phototactisme négatif permet à la cellule de s'éloigner des éventuelles sources lumineuses. Ainsi, la nage qui était aléatoire en l'absence de lumière devient directionnelle – on dit encore « balistique » – en présence d'une source lumineuse. Autrement dit, le temps de persistance de la nage de *Chlamy*

(voir l'article d'introduction) tend vers l'infini en présence de lumière. Le fait d'orienter sa nage dans un gradient quelconque est assez répandu chez les micro-nageurs du monde vivant. Ces organismes testent périodiquement leur environnement en molécules chimiques, lumière, oxygène, sels ou autres substances, et ensuite traitent l'information à travers un réseau de protéines capables de provoquer la rotation des flagelles.

Photofocalisation

particule dans ce type d'écoulement est sujette à une rotation, car la vitesse du fluide de chaque côté de la particule est différente (fig. 2b). Ainsi, bien que dotée de sa propre vitesse, *Chlamy* est soumise également à l'écoulement imposé et, en particulier, à une rotation. En effet, la vitesse de l'écoulement varie selon la position entre les deux parois du canal. Ces gradients de vitesse transverses induisent une vorticit qui tend mettre en rotation tout objet plac dans cet coulement. En l'absence de source lumineuse, ce simple couplage nage/coulement mne des trajectoires oscillantes de *Chlamy*. En prsence d'une

source lumineuse en amont de l'écoulement, les cellules tendent à s'orienter vers cette source. Cette orientation privilégiée vers l'amont, couplée à la vorticit de l'coulement, a pour effet que les algues se dirigent vers le centre du canal (fig. 2c). l'extinction de la lumire, les algues se dispersent nouveau dans le canal. Le phnomne est donc parfaitement rversible.

En se basant sur ce simple couplage (phototactisme/vorticit), nous avons propos une modlisation du phnomne de focalisation qui a permis une bonne description de l'exprience. En particulier, la distribution de densit de micronageurs dans le canal est prdite quantitativement, ainsi que sa variation avec la vitesse impose de l'coulement. Les ingrdients retenus pour la modlisation sont trs gnriques [4] : il s'agit de superposer l'coulement impos dans le canal avec la dynamique de nage de type marche alatoire avec persistance biaise par un tactisme. La perturbation de l'coulement par la prsence des cellules a t nglige. Ce caractre gnrique du modle nous permet de prsager une relative universalit du phnomne. C'est d'ailleurs le mme mcanisme qui a t observ pour des microalgues gravitotactiques soumises un coulement en canal vertical descendant. La photofocalisation des microalgues pourra-t-elle, par exemple, clairer les mcanismes l'uvre dans la rponse immunitaire pour laquelle des cellules motiles, les globules blancs, doivent se frayer un chemin vers les pathognes en suivant un gradient chimique tout en tant transportes par l'coulement sanguin grande vitesse ?

Chlamy, un micronageur modle ?

L'exprience prcdente illustre parfaitement bien la dmarche que nous adoptons. D'une part, nous avons montr que la nage de *Chlamy* peut tre dcrite par un modle assez gnrique de marche alatoire avec persistance. Ainsi, *Chlamy* peut tre considre comme un systme reprsentatif de toute une classe de micronageurs. D'autre part, alors que la photofocalisation est un phnomne qui peut sembler trs spcifique *Chlamy*, la modlisation que nous en proposons montre que les ingrdients minimaux ncessaires sont en ralit trs gnraux et peuvent s'appliquer des systmes de micronageurs diffrents. ■

Microalgues *Chlamydomonas reinhardtii*, observes en microscopie lectronique balayage.

2. Schma descriptif du mcanisme de photofocalisation. Une source lumineuse est place en amont de l'coulement parabolique (matrialis ici par les vecteurs vitesses en bleu). De ce fait, une microalgue, bien que transporte par l'coulement, prsente une orientation privilgie vers la source lumineuse (a). Elle est galement soumise une rotation due l'coulement (b) et, dote de sa vitesse V_0 , elle finit par migrer vers le centre du canal (c).

Rfrences

- 1• M. Polin, I. Tuval, K. Drescher, J. P. Gollub et R. E. Goldstein, "Chlamydomonas swims with two 'gears' in a eukaryotic version of run-and-tumble locomotion", *Science*, **325** (2009) 487-490.
- 2• M. Garcia, S. Berti, P. Peyla et S. Rafai, "Random walk of a swimmer in a low-Reynolds-number medium", *Physical Review E*, **83** (2011) 035301 (R).
- 3• X. Garcia, S. Rafai et P. Peyla, "Light control of the flow of phototactic microswimmer suspensions", *Physical Review Letters*, **110** (2013) 138106.
- 4• M. Martin, A. Barzyk, E. Bertin, P. Peyla et S. Rafai, "Photofocusing: light and flow of phototactic microswimmer suspension", *Physical Review E*, **93** (2016) 051101 (R).