

Rappel

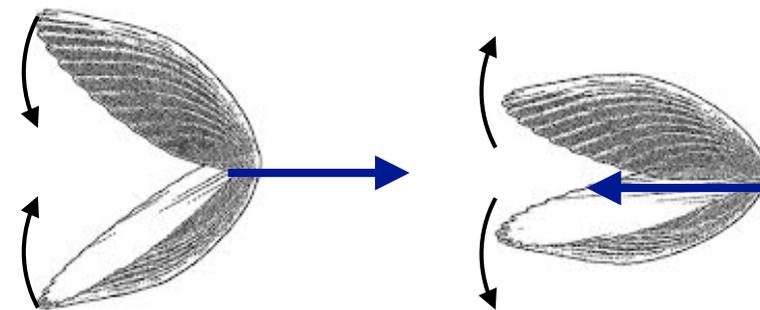
Équation de Navier & Stokes:

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\nabla p + \eta \Delta \mathbf{u} + \rho \mathbf{f}$$

$$Re \ll 1$$

Équation linéaire \Rightarrow solutions additives

Équation réversible dans le temps



“Scallop theorem”

Les écoulements à petit nombre de Reynolds

Pas d'inertie

Navier-Stokes



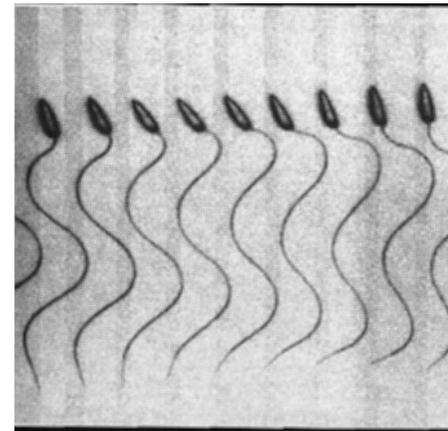
Équation de Stokes

$$\eta \Delta \mathbf{u} = \nabla p$$

Les écoulements en
couche mince et
l'approximation de
lubrification



Les forces sur les objets
solides, la réversibilité
cinématique et la
propulsion à petit
Reynolds



Un monde de très petites forces dans l'eau et l'air

$$Re = \frac{UL}{\nu} \leq 1$$

$$0 = -\nabla p + \eta \Delta \mathbf{u}$$

$$0 \sim \frac{p}{L} + \eta \frac{U}{L^2}$$

$$p \sim \eta \frac{U}{L}$$

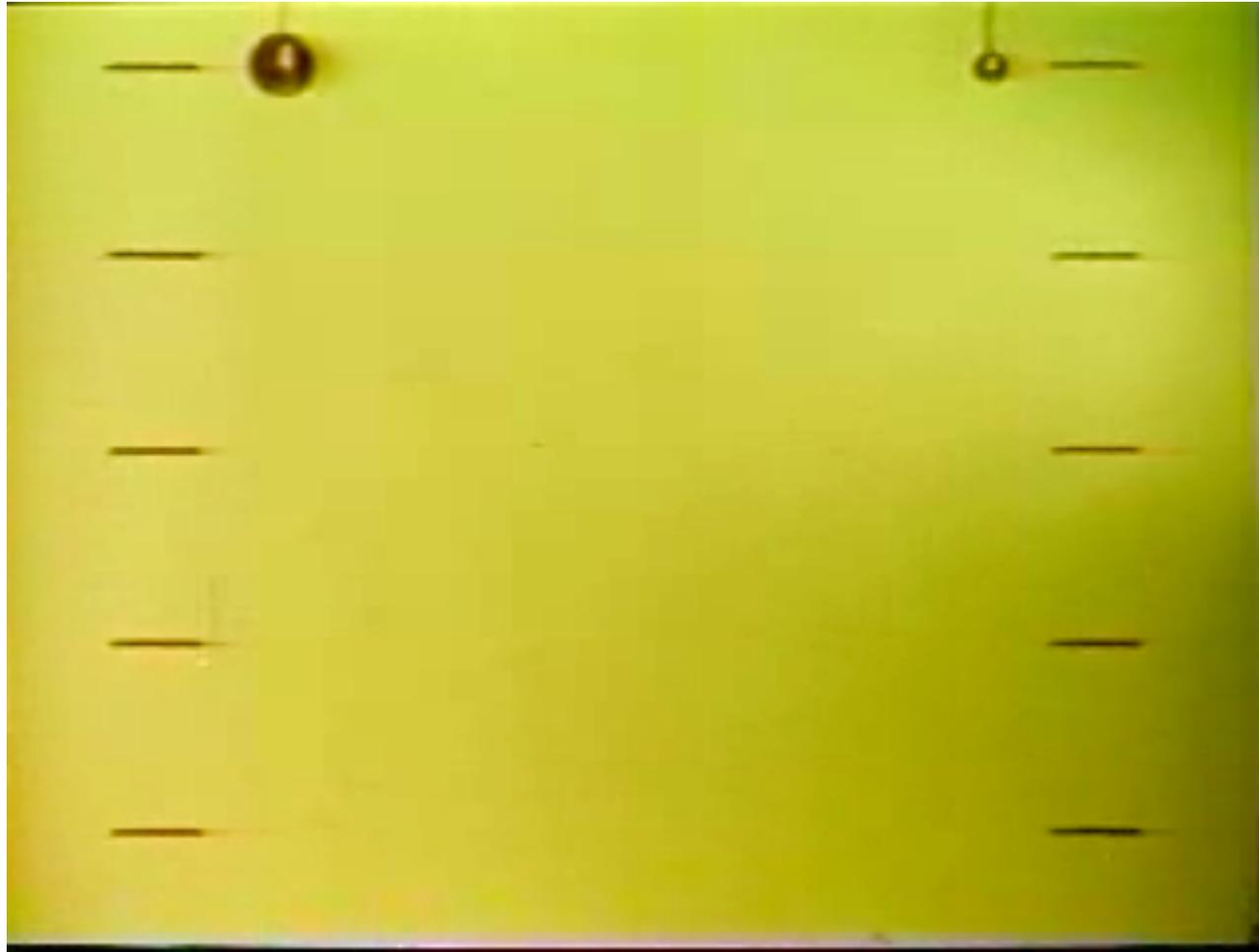
$$F \sim pL^2 \sim \eta U L$$

$$F \leq \eta \nu$$

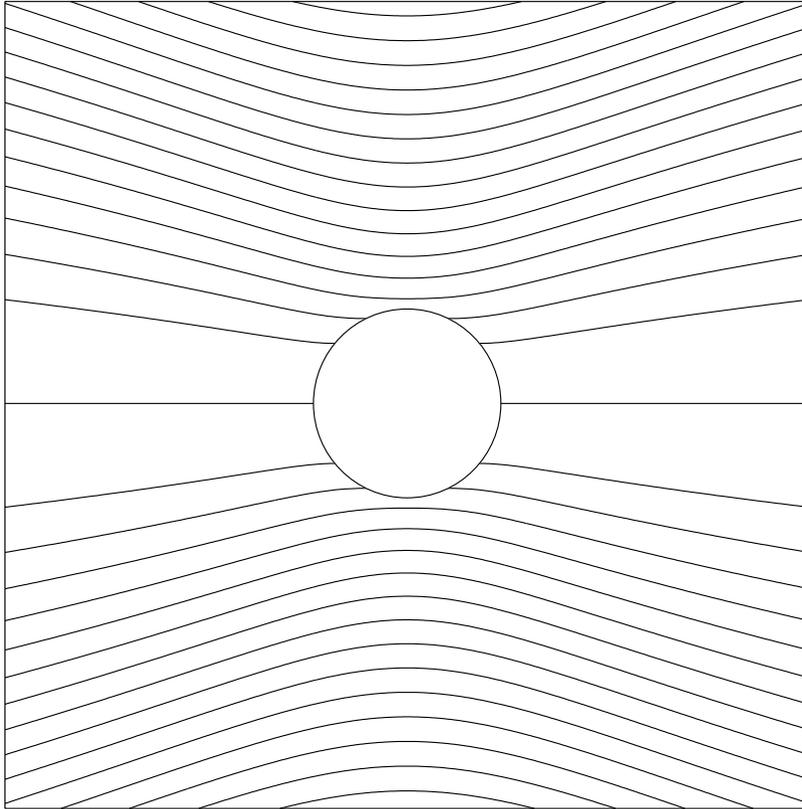
0,000000001 N
1 nN dans l'eau

0,0000000002 N
0,2 nN dans l'air

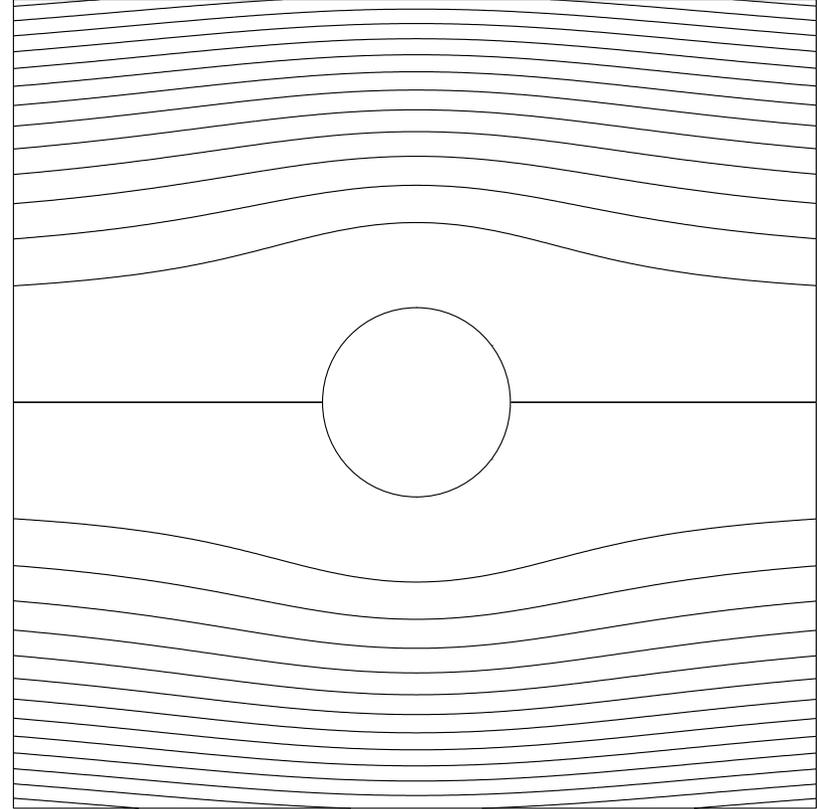
Les forces sur un objet en mouvement : la sphère



Deux sphères de rapport de diamètre égal à 2



Fluide immobile à l'infini



Sphère immobile

Vitesse de chute d'une sphère

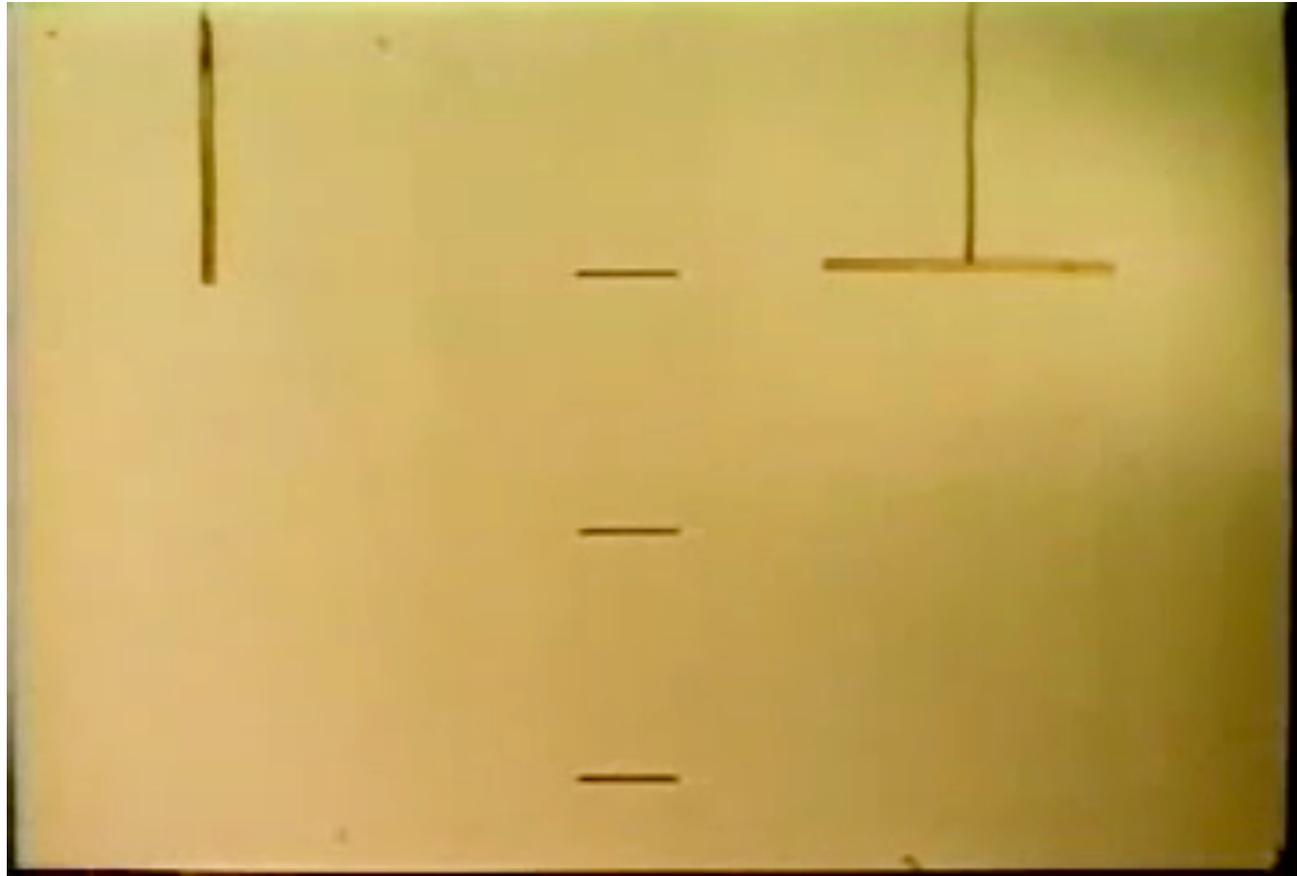
$$F \sim \eta U R$$

$$F = 6\pi\eta U R$$

$$P_{app} = \delta\rho g \frac{4}{3}\pi R^3$$

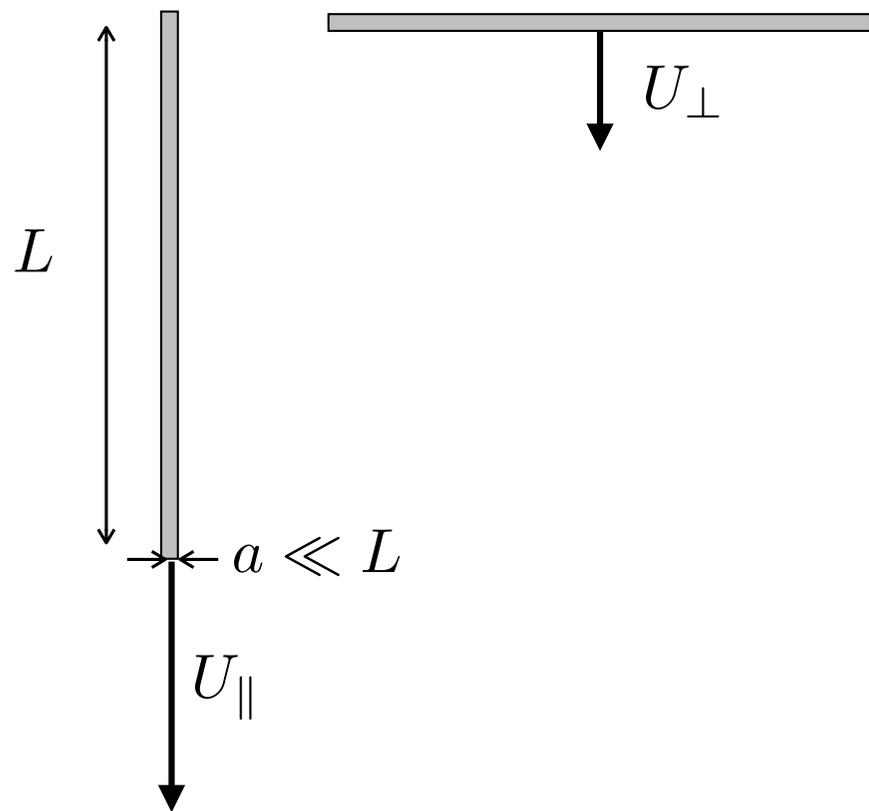
$$U_{sed} = \frac{P_{app}}{6\pi\eta R} = \frac{2}{9} \frac{\delta\rho g R^2}{\eta}$$

Les forces sur un objet en mouvement : un bâtonnet



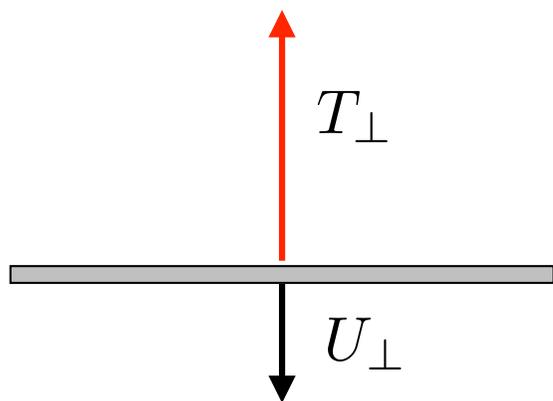
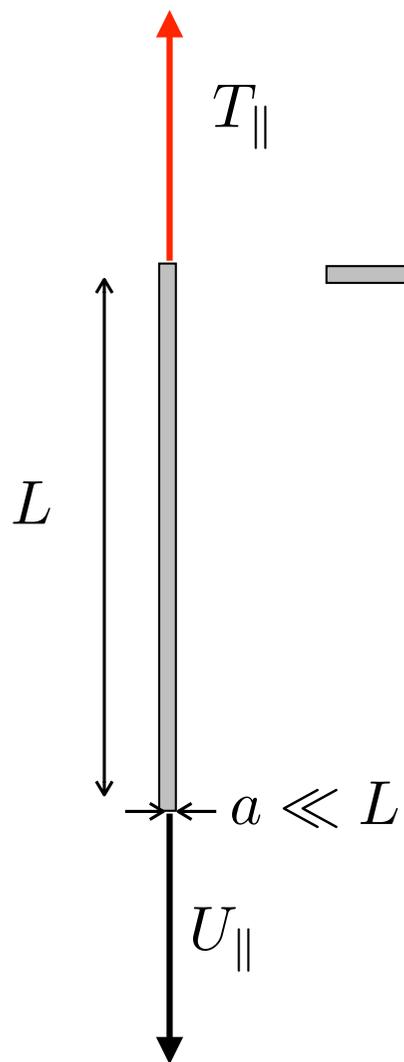
Deux bâtonnets identiques orientés perpendiculairement l'un de l'autre,
puis un bâtonnet incliné

Chute d'une tige



$$U_{\parallel} \simeq 2U_{\perp}$$

Chute d'une tige



$$U_{\parallel} \simeq 2U_{\perp}$$

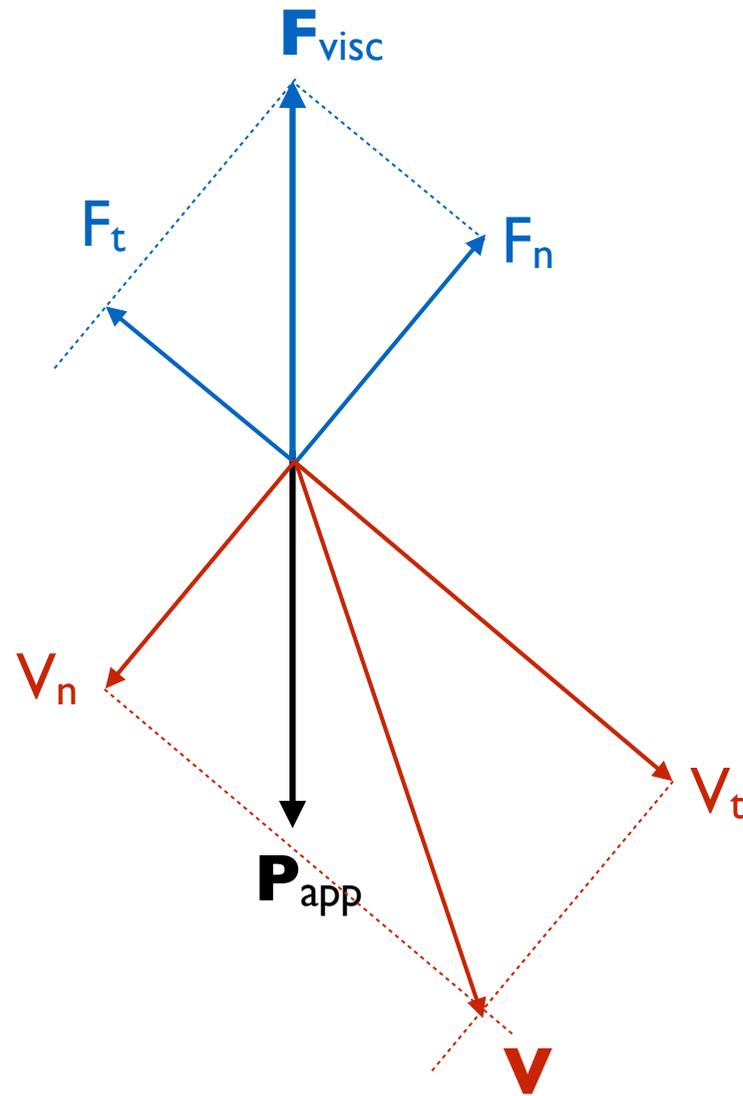
$$T_{\parallel} = -c_{\parallel} \eta L U_{\parallel}$$

$$\simeq 2\pi + \text{correction}(a/L)$$

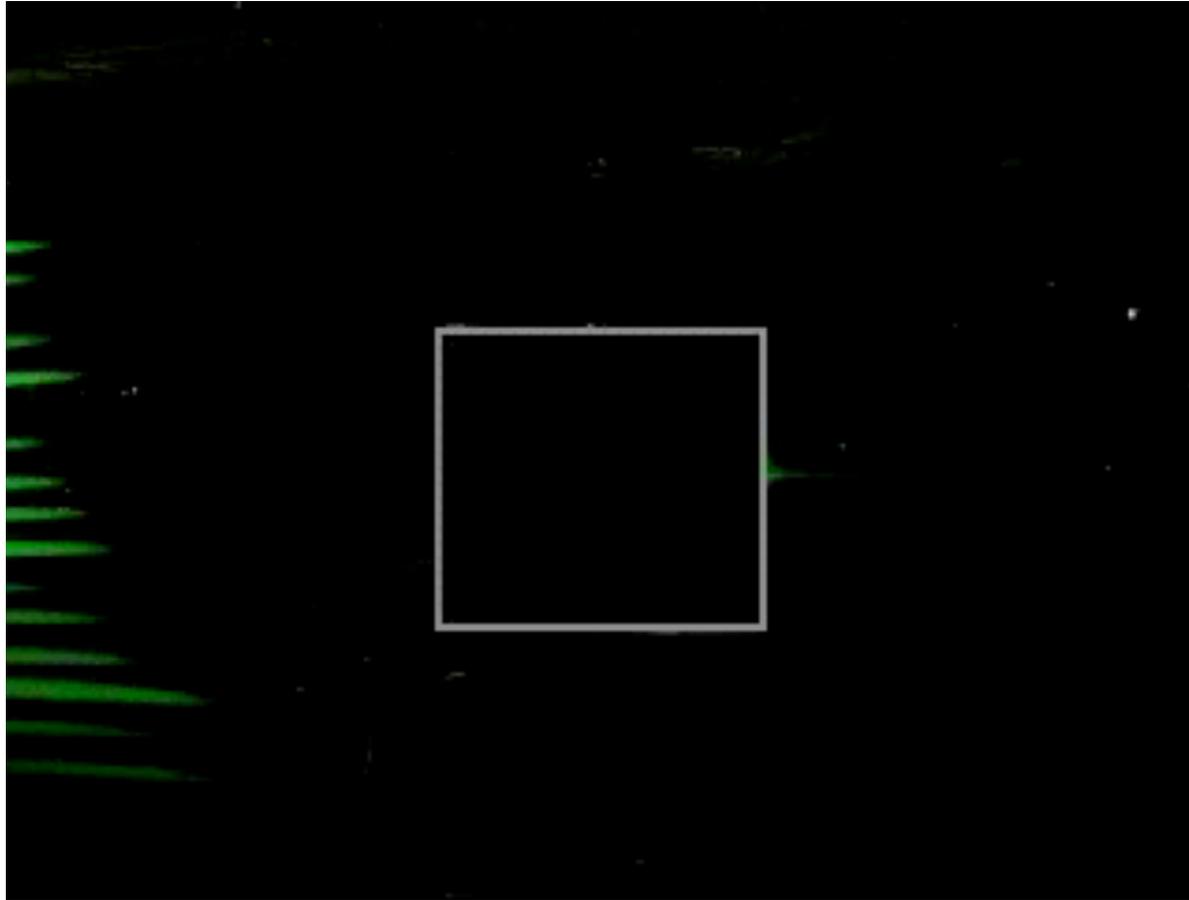
$$T_{\perp} = -c_{\perp} \eta L U_{\perp}$$

$$c_{\perp} \simeq 2c_{\parallel}$$

Forces sur un bâtonnet incliné par rapport au mouvement



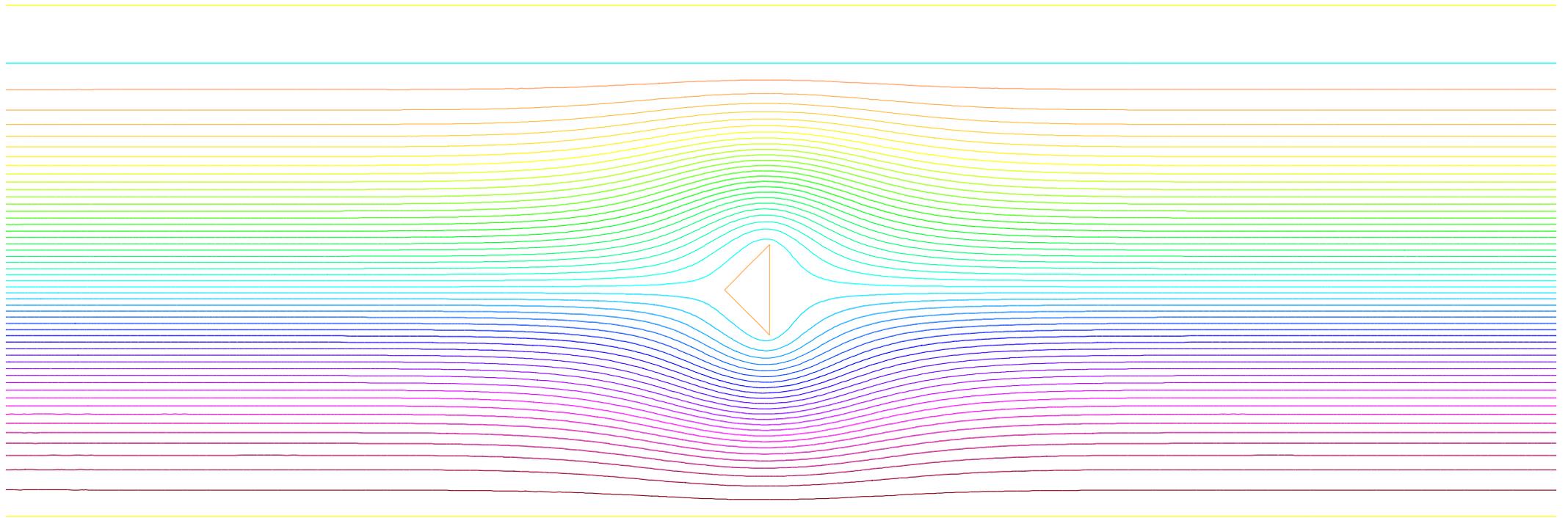
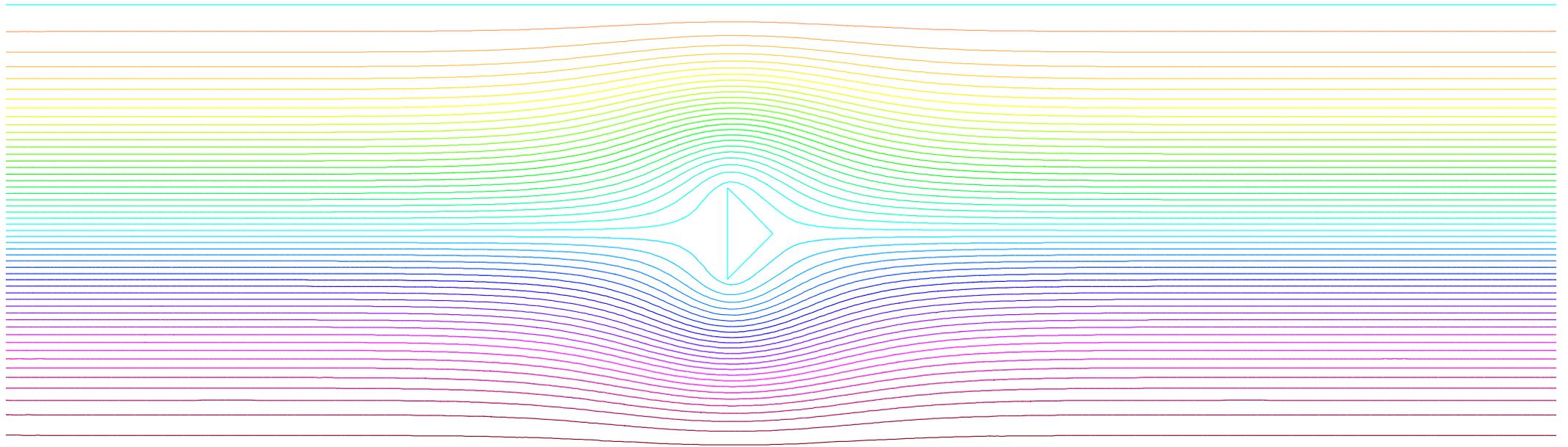
Propriétés de symétrie des écoulements de Stokes

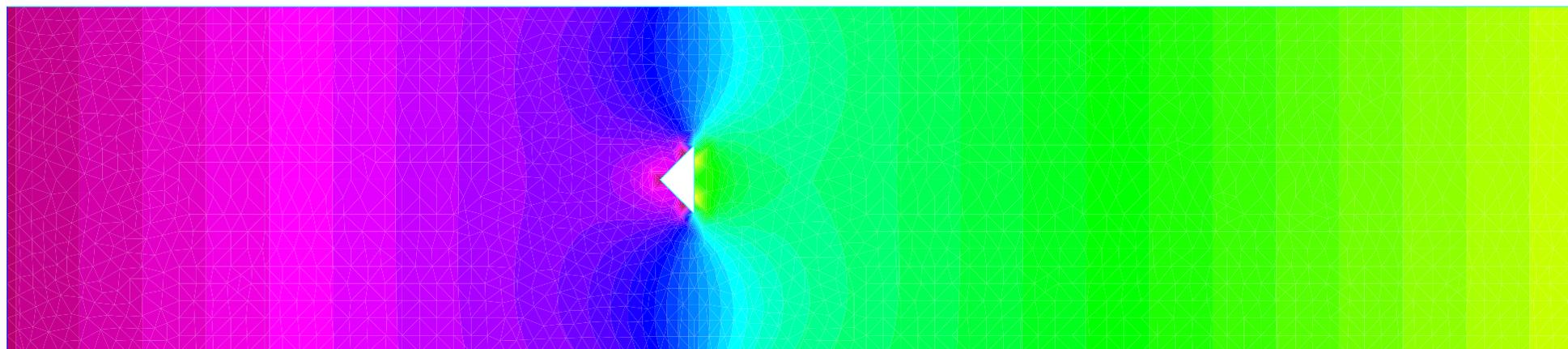
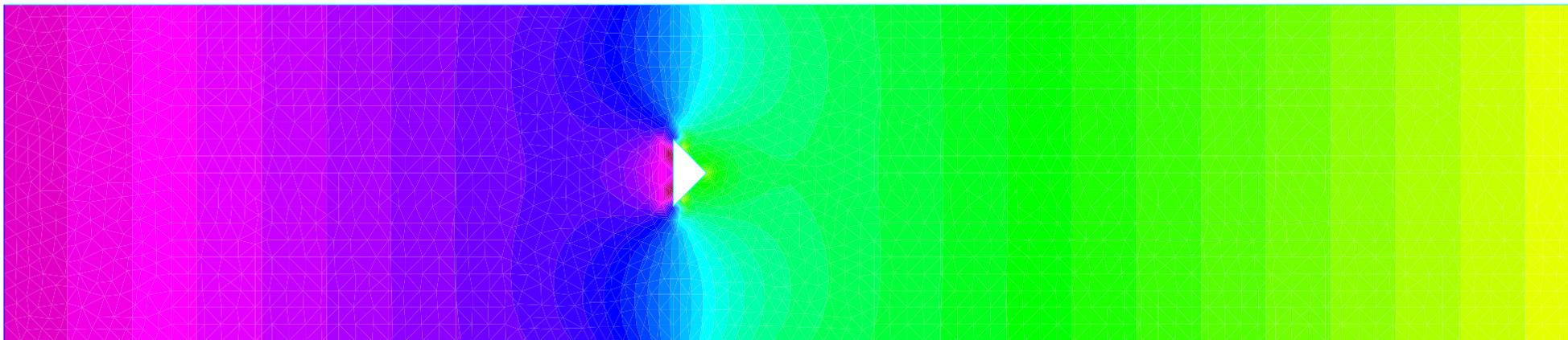


$$\eta \Delta \mathbf{u} = \nabla p$$

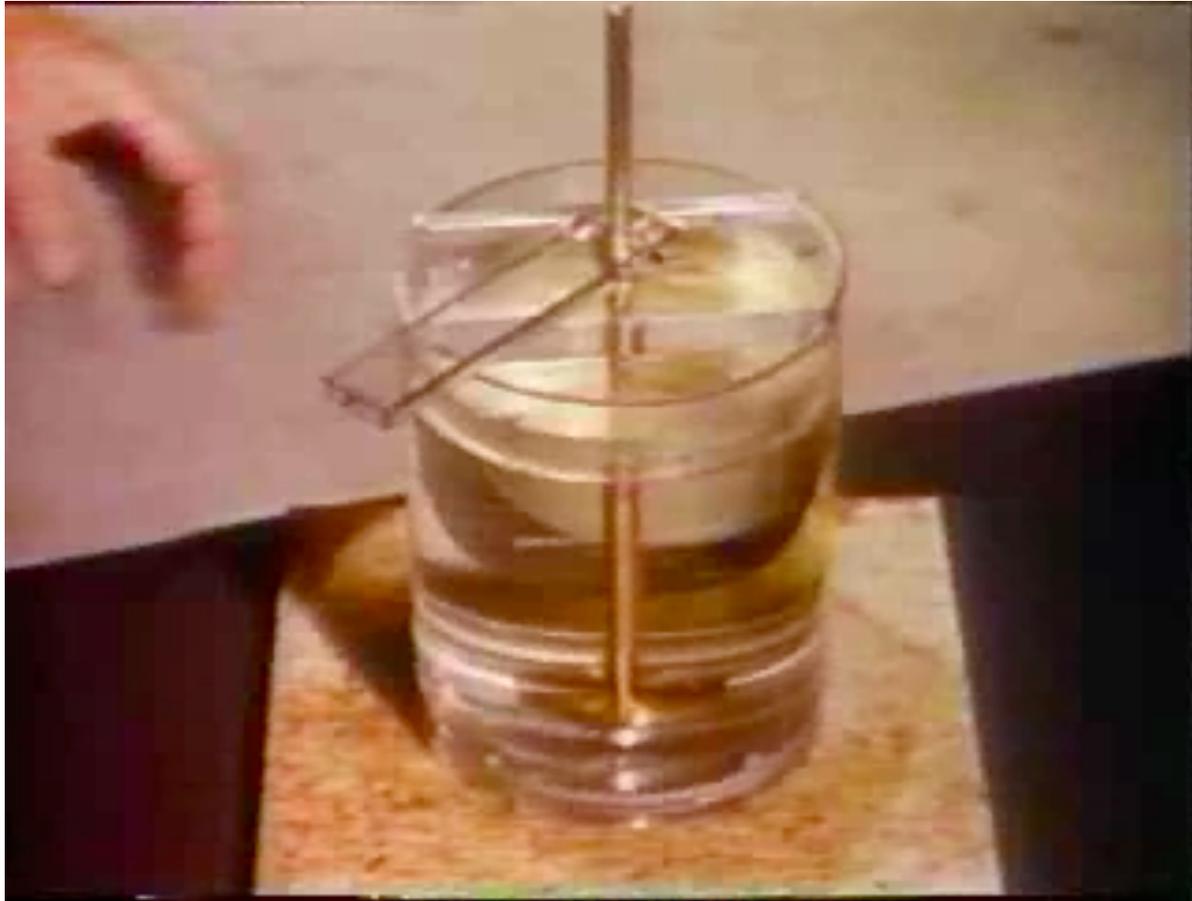
$$\nabla p \rightarrow -\nabla p$$

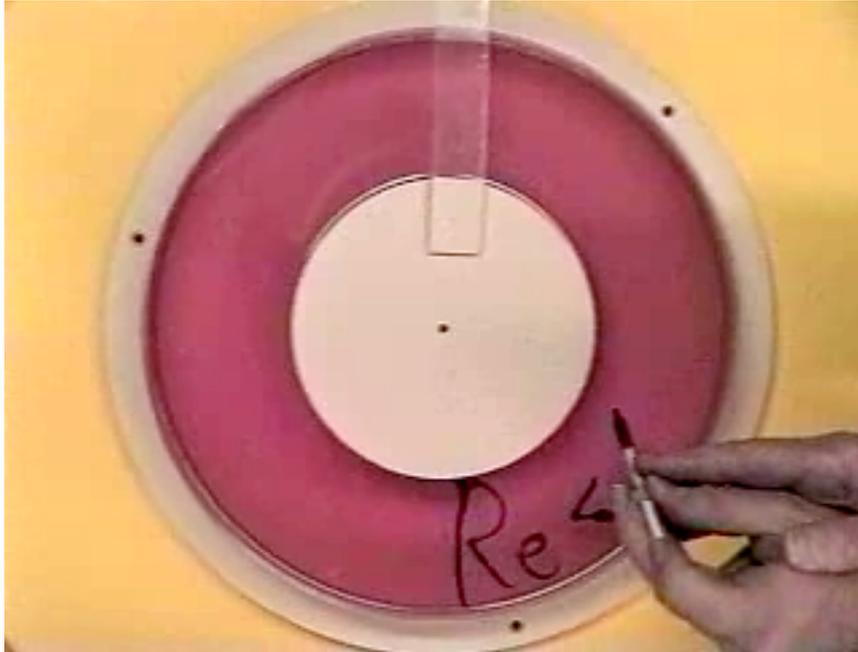
$$\mathbf{u} \rightarrow -\mathbf{u}$$





Réversibilité cinématique





$$Re \ll 1$$

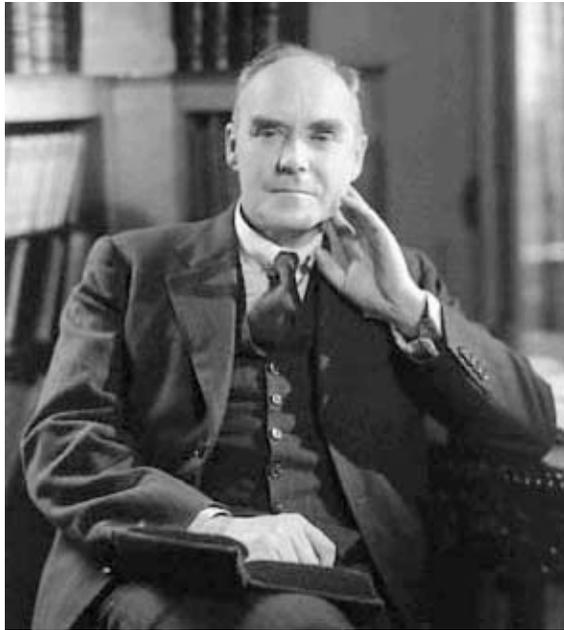
Réversibilité cinématique



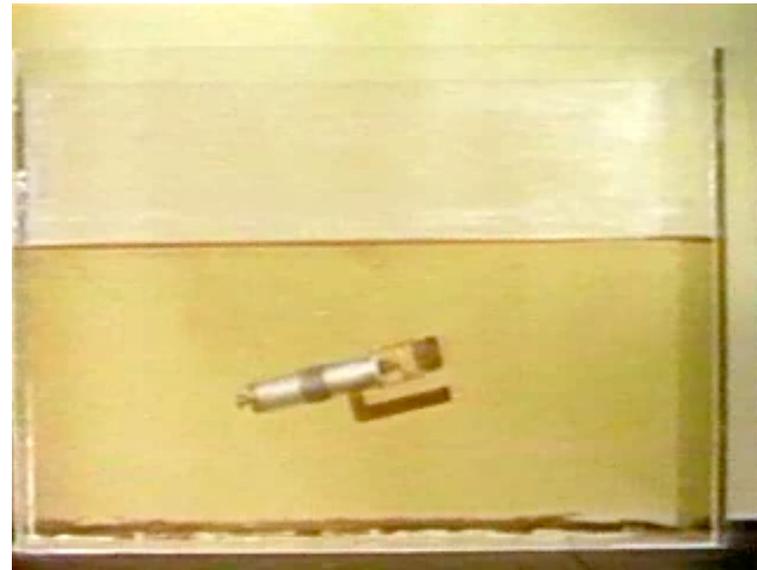
$$Re \gg 1$$

Irréversibilité cinématique

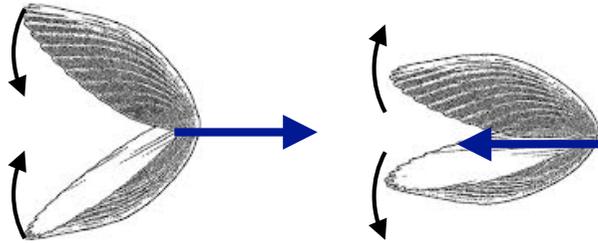
Réversibilité cinématique et propulsion



G. I. Taylor



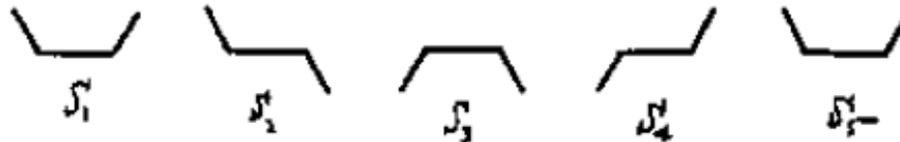
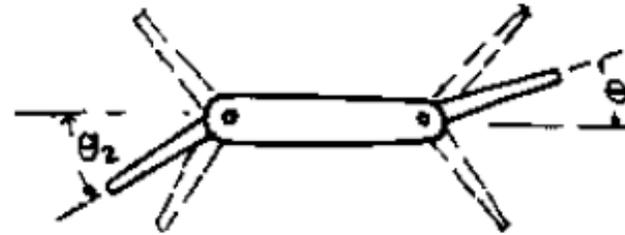
Le théorème de la coquille St Jacques



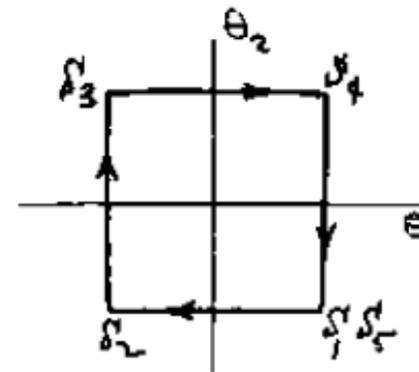
“Scallop theorem”

Qui et al., *Nature Communications* (2014)

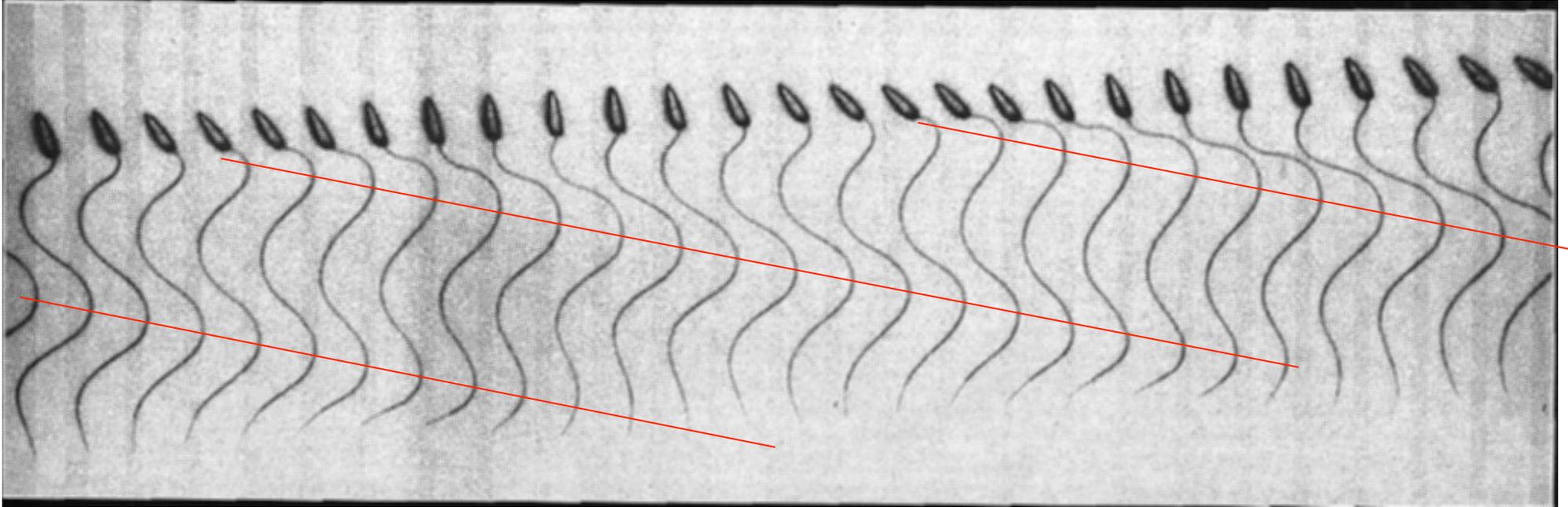
1 seul degré de liberté :
réversibilité imposée



2 degrés de liberté :
possibilité de briser la
symétrie +t/-t



E. Purcell, life at low
Reynolds number



Mouvement collectif des cils

