

MP03 - Dynamique des fluides

Gauthier Legrand et Francis Pagaud

6 Février 2020

Bibliographie

- ♣ *Physique expérimentale*, **Jolidon** → Mesure force de traînée, Poiseuille, viscosimètre, ondes gravito-capillaire.
- ♣ *Hydrodynamique*, **Guyon, Hulin, Petit** → Effet Magnus, viscosité, fluides non newtonien.
- ♣ *Instabilités, Chaos et turbulence*, **Manneville** → Faraday n'y est pas traité à proprement parler mais les chapitres 1 et 5 sont intéressants à lire au sujet des instabilités hydrodynamique.

Expériences

- ♣ Mesure force de traînée en fonction de la vitesse (régression linéaire)
- ♣ Mesure débit massique en fonction du gradient de pression (régression linéaire)
- ♣ Relation de dispersion pour des ondes gravito-capillaires en eau peu profonde (régression linéaire)

L'idée c'est de varier les régimes (nombres Reynolds grands et petits) et de varier les fluides (la dernière expérience peut se faire avec de l'eau, du glycérol ou plutôt une huile silicone).

Table des matières

1	Frottements fluide	2
2	Écoulement d'un fluide visqueux	4
3	Ondes de surface	4
4	Questions	6
5	Remarques	7

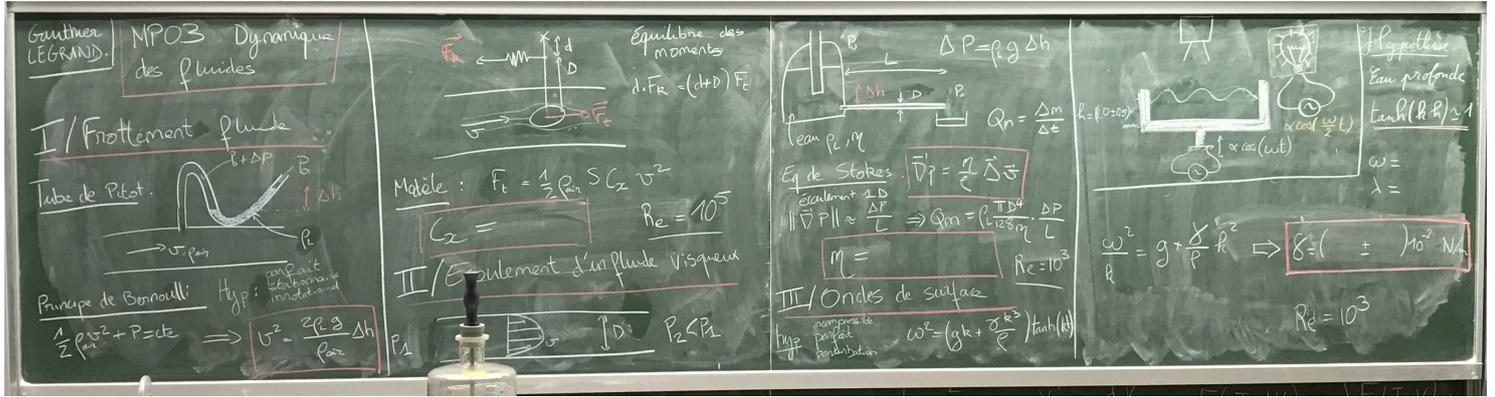


FIGURE 1 – Tableau présenté

Intro

En mécanique du point on avait l'habitude de négliger les frottements, pourtant l'écoulement d'un fluide autour d'un objet peut modifier énormément sa dynamique. Par exemple c'est beaucoup plus sympa de faire du vélo quand on a le vent de dos.

1 Frottements fluide

Diapo pour expliquer la recirculation de l'air autour d'un objet (figure 2). C'est bien le mouvement de l'air autour de l'objet qui modifie la pression et qui résulte en une force qui retient le mouvement (il ne s'agit pas du transfert de quantité de mouvement entre le fluide et l'objet).



FIGURE 2 – Tiré de *An album of fluid motions* Van Dyke

On cherche alors la relation entre la force qui s'applique sur l'objet et la vitesse relative du fluide par rapport à l'objet.

Cela permet d'expliquer le principe de Bernoulli (que l'on peut illustrer avec le dispositif Venturi) que l'on utilise pour expliquer le principe du tube de Pitot servant à mesurer la vitesse du fluide dans la soufflerie.

Force de traînée

🔗 Jolidon, p.454

⌚ 5 minutes

On utilise la soufflerie et on mesure la vitesse du fluide avec le tube Pitot (physique plus riche que c'est du fil chaud et perturbe moins l'écoulement). Il faut bien penser à mesurer la vitesse après avoir retiré l'objet d'étude dans la soufflerie (sa présence change pas mal l'écoulement, et le tube de Pitot est placé en aval de l'objet). En préparation on a mesuré la force pour plusieurs vitesses, on fait un autre point en live. On remonte au coefficient de traînée C_x .

On ne considère pas la masse ajoutée puisque l'objet est au repos.

Bilan on a une force proportionnelle au carré de la vitesse, c'est caractéristique de ce genre d'écoulement que l'on qualifie de turbulent. On peut discuter l'allure de la courbe expérimentale (figure 3). Cela permet d'introduire le nombre de Reynolds et de mentionner l'importance de la viscosité.

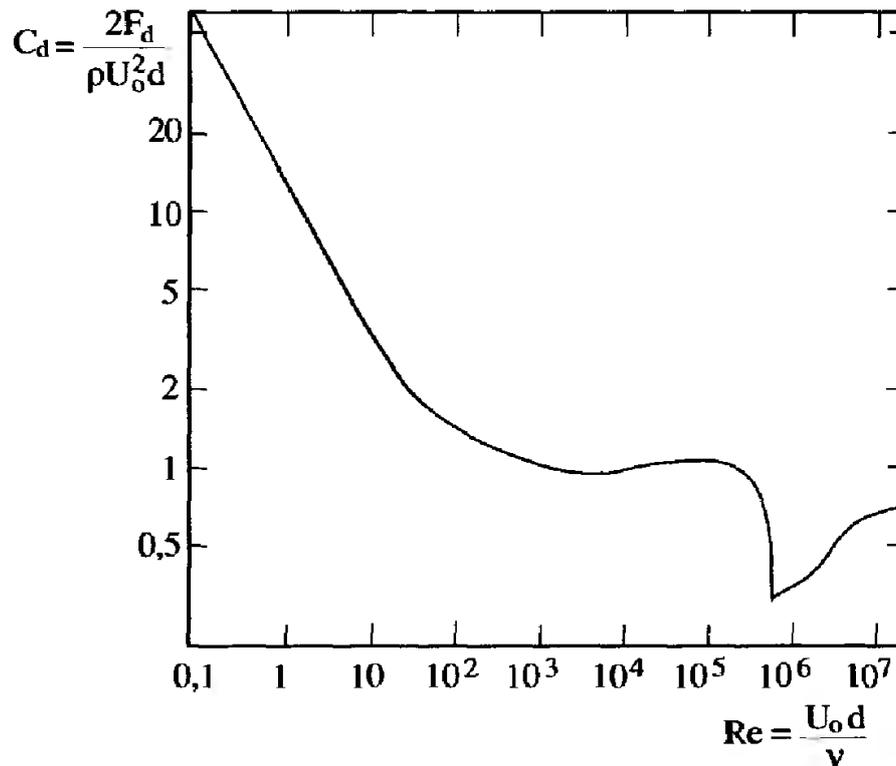


FIGURE 3 – Tiré de *Hydrodynamique* Guyon, Hulin, Petit

Transition : On lance un Magnus Glider (cf [cette vidéo](#) ou [celle-ci pour un peu plus de fun](#)). La traînée seule n'explique pas la trajectoire, il faut prendre en compte la portance. Celle-ci est reliée à un autre paramètre à prendre en compte dans l'écoulement d'un fluide : la viscosité. *Honnêtement c'est juste pour suggérer des questions sur l'effet Magnus, il faut bien être au clair dessus. Cette force est bien due à la viscosité et au fait que le fluide tend à coller à la paroi de l'objet en rotation, mais pour calculer l'expression $\vec{F} \propto \vec{v} \times \vec{\omega}$ on suppose l'écoulement irrationnel (pour utiliser le formalisme de l'écoulement potentiel) et non visqueux (pour utiliser Bernoulli). Dans le cadre de l'écoulement potentiel on introduit un artificiellement un terme tourbillon dans le développement multipolaire et c'est ce terme qui donne lieu à la force de Magnus. En effet d'après le théorème de Kelvin un fluide parfait ne peut pas créer de vorticité, donc c'est bien la viscosité qui est responsable de la circulation non nulle autour de l'objet.*

2  coulement d'un fluide visqueux

 ventuellement : commencer par présenter rapidement l'expérience du viscosimètre à bille pour montrer qu'il y a toujours des frottements mais qu'ils n'ont pas le même comportement : c'est le régime laminaire.

La viscosité ne joue pas seulement un rôle pour les frottements : elle façonne aussi comment le fluide s'écoule, c'est le cas de l'écoulement type Poiseuille.

Poiseuille

⚡ Jolidon p. 441

⌚ 5 minutes

On mesure le débit massique en fonction du gradient de pression que l'on impose via un tube de Mariotte pour un écoulement d'eau dans un capillaire de diamètre D . Pour éviter l'effet théière (et donc ne pas avoir de pertes d'eau qui coulerait   côté du récipient) on met du scotch en téflon sur le bout du tube. On fait varier la hauteur du tube de Mariotte afin de faire varier le gradient de pression. Pour vérifier le parallélisme du tube il faut jouer avec des supports boys, des niveaux à bulles et bien vérifier ensuite que la hauteur du tube est la même au début et à la fin du Poiseuille. C'est plus précis de mesurer la hauteur du tube qui sort du vase de Mariotte avec un pied à coulisse.

On retrouve la relation $Q_m \simeq \rho \frac{\pi D^4}{128\eta} \frac{\rho g(h_{eau} - h_0)}{L} = \frac{\Delta m}{\Delta t}$.

On attend bien à ce que $h_0 \geq 0$ car la loi de Laplace donne une pression légèrement inférieure à la pression atmosphérique au niveau de l'interface dans le tube de Mariotte. La longueur L est *a priori* une longueur effective, mais comme on a choisi la longueur du tube très grande on peut considérer L sans correction. Cette relation permet d'expliquer ce qu'il se passe dans les vaisseaux sanguins (peut-être un peu compliqué vu qu'en pratique la paroi est déformable).  ventuellement analogie avec résistance hydraulique $\Delta P = R_H Q_V$.

Transition : On a mis du scotch téflon pour augmenter la tension de surface, on sent que la capillarité joue un rôle en dynamique des fluides, c'est le cas notamment quand on a une interface libre.

3 Ondes de surface

Présentation de l'instabilité de Faraday et lien avec les oscillateurs paramétriques.

On prend un fluide de tension de surface γ et masse volumique ρ que l'on met dans une cuve jusqu'à la hauteur h . La cuve est mise en mouvement verticalement et sinusoïdalement. Lorsque l'amplitude de l'accélération de la cuve est suffisante on voit des ondes apparaître en surface, c'est l'instabilité de Faraday. On a choisit la cuve rectangulaire (2cm x 30cm) de sorte que seules des ondes se propageant dans la plus grande direction puisse exister.

En négligeant la viscosité, la hauteur de la surface libre ξ est régie par l'équation

$$\frac{d^2 \xi}{dt^2} + k \tanh kh \left(\frac{k^2 \gamma}{\rho} + g - a \cos \omega t \right) \xi = 0$$

qui est bien l'équation d'un oscillateur paramétrique $\ddot{x} + \omega_0^2(t)x = 0$ (wiki). Dans ce cas où ω_0 est une fonction sinusoïdale de pulsation ω , on a alors $\omega_0^{(n)} = n\omega/2$

On peut expliquer qualitativement pourquoi dans notre cas c'est la résonance $\omega_0 = \omega/2$ qui nous intéresse. Le but de la prochaine expérience est de retrouver $\omega_0 = \omega/2$ et la relation de dispersion $\omega_0^2 = \left(gk + \frac{\gamma k^3}{\rho} \right) \tanh kh$; soit $\omega_0^2 \simeq gk + \frac{\gamma}{\rho} k^3$ en régime d'eau profonde (régression linéaire $\frac{\omega_0^2}{k}$ en fonction de k^2). On va en déduire une mesure de la tension de surface du fluide.

Régime eau profonde

🔗 Jolidon p. 503

⌚ 5 minutes

On prend une cuve remplie du fluide de sorte à être dans le régime d'eau profonde ($kh \gg 1$), en pratique comme \tanh tend très vite vers 1 prendre $h \simeq 1\text{cm}$ suffit. On place la cuve sur un pot vibrant, le stroboscope éclaire en incidence rasante et la caméra est placée verticalement au-dessus de la cuve. On mesure la fréquence avec le stroboscope et la longueur d'onde avec une caméra IDS et le logiciel uEye (on peut facilement régler les paramètres de l'image en live). Pour plusieurs fréquences d'excitation mesurer la longueur d'onde et la pulsation de l'onde en surface, on refait un point en live. Pour avoir des belles images il faut se mettre proche du seuil d'accélération. Il faut aussi bien choisir l'échelle de fréquence d'excitation de sorte à avoir des longueurs d'onde suffisamment grande pour ne pas avoir d'onde se propageant selon la petite dimension de la cuve.

On a vu au cours de cette expérience que l'onde mettait un certain temps à s'établir. L'instabilité vient en effet de la divergence de l'amplitude des oscillations. Cette divergence vient de la viscosité jusqu'ici négligée, elle tend à amortir la plupart des modes, sauf certains qui divergent alors.

Phénoméologiquement et par des arguments de symétrie d'invariance temporelle, l'équation donnant la divergence de l'amplitude est caractérisée par un temps τ_0 , $\epsilon = \frac{a}{a_c} - 1$ et un coefficient b donnant la saturation due aux non-linéarités.

$$\tau_0 \frac{d \xi}{dt} = \epsilon \xi - b |\xi|^2 \xi$$

Instabilité de Faraday

🔗

⌚ 5 minutes

Avec un montage laser on montre l'amplitude des oscillations en fonction du temps, jusqu'à la saturation. On montre la bifurcation fourche de cette instabilité en faisant varier ϵ et en mesurant l'amplitude à saturation. On peut éventuellement mesurer le temps caractéristique τ_0 en

mesurant la pente initiale sur la courbe $\xi(t)$.

Conclusion

Bilan des expériences réalisées. Ouverture sur les fluides non newtoniens et la rhéologie (faut se renseigner un peu sur le sujet, la lecture du chapitre concerné dans le Guyon-Hulin-Petit donne de bonnes pistes).

4 Questions

-Pourquoi on met de l'éthanol dans le tube de Pitot ? Si le fluide est moins dense ? A cause de la tension de surface plus faible, le ménisque est mieux défini et on a une mesure plus précise.

-Pourquoi tu mets l'objet dans la soufflerie au niveau de l'endroit étroit ? Afin d'avoir des vitesses plus grandes.

-Utilité de la grille ? On veut rendre la chose un minimum "laminaire". On va couper un max de perturbations pour avoir moins de turbulence, ce qui modifie la répartition de pression autour de l'objet.

-ODG de la couche limite : $\delta = \frac{L}{\sqrt{Re}}$. Est-ce que l'ODG de $1 \mu m$ est crédible ? Ça dépend pas mal de la rugosité, les parois de la soufflerie peuvent aussi avoir un effet.

-Pourquoi avoir choisi cette incertitude pour la mesure de la force du ressort ? Quelle type d'incertitude ? Autres sources d'incertitude ? Humidité, température, autres valeurs mesurées... On a propagé les incertitudes sur certaines d'entre elles.

-Quelle utilité du tube de Pitot dans la vraie vie véritable ? Les avions. Quel autre type de système ? Le fil chaud.

-Sur la seconde manip : Ecoulement en goutte à goutte, pourquoi ? (Je pense qu'il faut parler de Rayleigh-Plateau).

-Quelle longueur et rayon du capillaire ? Il le faut long pour surpasser le régime transitoire, pour établir la couche limite.

Redétaille hypothèses parfait, stationnaire, irrotationnel.

-Pourquoi on veut un tube horizontal ? Pas d'influence de la gravité.

-Où c'est qu'on retrouve des écoulements de Poiseuille ? Vaisseau sanguin.

-Comment change la viscosité en fonction de la température pour les liquides et les gaz ? La viscosité augmente avec T pour les gaz, diminue avec T pour l'eau.

-Quelle est la plus grande source d'incertitude ? D est à la puissance 4.

-C'est quoi l'effet du scotch de Téflon ? Pour éviter l'effet Coanda.

-Sur la troisième manip : Quelles conditions aux limites ? Au fond de la cuve et à la surface, on a des conditions sur les vitesses. Sur les bords il y a aussi non-pénétrabilité et le ménisque.

-Pourquoi les ondes ne sont pas droites ? Ondes transverses.

-C'est quoi les zones plus brillantes ou plus sombres ? C'est la réflexion de la lumière.

-Reviens sur la justification de l'eau profonde. On peut le voir aussi comme le rapport amplitude de la perturbation et profondeur de l'eau.

-En quoi la dernière manip rentre dans le thème ? On excite un fluide, qui répond via Navier-Stokes, ça rentre en compte.

Montage surprise : Trouver autant de manières possibles pour mesurer g ?

→ La chute d'une balle

- Dynamomètre + masse à l'équilibre. Mesure sur le dynamo et pesée de la masse.
- Idem en dynamique, pas fait.
- Période d'un pendule simple.

Quelle est la plus précise des méthodes ? Comment tu ferais faire la mesure à des élèves ?

5 Remarques

-Si un point est raté, on peut en faire un autre pour raisonner plus correctement sur les sources d'erreur.

-Quand on dit que l'on utilise un niveau à bulles, c'est bien de checker le niveau rapidement.

-Tu est allé trop lentement, tu as 4 min. de trop. Peut-être que tu peux gagner du temps sur l'explication de l'instabilité de Faraday.

-C'était très bien de préciser toujours les hypothèses, les Reynolds, les régimes...

-Tes courbes étaient super claires, les incertitudes aussi.

-Dans les tables, la viscosité est empirique. En théorie, les calculs sont plus compliqués

-Pour l'instabilité de Faraday, ça peut être bien de faire les mesures ImageJ en utilisant un PlotProfile plutôt que de regarder les maximas à l'oeil.