MP 03 : Dynamique des fluides

11 janvier 2018

Tristan Guyomar & Ugo Petrone

Si le jury rentre pas dans ta démarche, il va attendre que le vent arrête de souffler et il va faire le bilan
Hervé Gayvallet

Commentaires du jury

2017 : Si l'évaluation du nombre de Reynolds est faite régulièrement, il est regrettable qu'un nombre de Reynolds grand devant 1 soit systématiquement associé à un écoulement turbulent. L'étude des corrections des effets de tailles finies sur certains écoulements peut être menée pour peu que ces dernières aient un sens par rapport aux erreurs expérimentales associées aux mesures. Une mesure de vitesse constante peut être effectuée très simplement, sans nécessairement faire appel à des moyens d'acquisition informatiques complexes.
2009 à 2015, 2016 : Comme recommandé par les précédents rapports, les candidats pensent à évaluer le nombre de Reynolds mais les conclusions qu'ils en tirent sont souvent incomplètes ou erronées. D'autres limitations des modèles (Stokes et Poiseuille en particulier) sont ignorées. Le principe des anémomètres utilisés doit être connu. Les viscosités mesurées doivent être comparées aux valeurs tabulées aux températures des expériences réalisées. Rendre l'expérience de l'écoulement de Poiseuille quantitative nécessite certaines précautions.
2008 : La classification des écoulements passe aussi par l'évaluation du nombre de Reynolds.
2007 : Le tube de Pitot n'est pas le seul instrument permettant de mesurer la vitesse d'écoulement d'un fluide. **2000** : L'étude de l'écoulement de Poiseuille est rarement satisfaisante, car les candidats ne savent pas où il convient de mesurer la pression. Le principe du tube de Pitot est mal connu. L'expression de la force de Stokes est connue, mais son origine (calcul, modèle, formule empirique ?) et son domaine de validité le sont moins. Est-ce vraiment une simple variante des expressions donnant la résistance de l'air à l'avancement d'une automobile ou d'une aile d'avion ?
1999 : Le candidat doit avoir à l'esprit les relations ou formules les plus importantes (Euler, Bernoulli, Navier-Stokes). Il convient également d'avoir une idée des domaines dans lesquels la résistance à l'avancement d'un fluide peut être représentée par une force d'intensité proportionnelle à la vitesse ou au carré de celle-ci.
1998 : Les mesures effectuées à l'aide du tube de Pitot ne peuvent être comparées aux mesures de vitesse données par l'anémomètre que si la zone de mesure est la même dans les deux cas. Il est nécessaire que le tube et le capteur soient fixés pour la mesure et non tenus à la main, comme c'est souvent le cas.

Bibliographie

✍ *Physique expérimentale*, **Fruchart** ⟶ Le Jolidon, le seul et l'unique, bibliographie principale pour toutes les expériences proposées ici.

Expériences

- Viscosimètre à chute de bille
- Écoulement de Poiseuille
- Mesure de la masse volumique de l'air avec le tube de Pitot

Table des matières

Introduction

La mécanique des fluides est régie par l'équation de Navier-Stokes. Pour un fluide soumise à un champ $\vec{g}$, de masse volumique ρ et de viscosité dynamique η, cette équation s'écrit :

$$\rho \frac{\mathrm{D}\vec{v}}{\mathrm{D}t} = \rho \left[\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v}.\vec{\nabla})\vec{v} \right] = -\vec{\nabla}P + \rho\vec{g} + \eta\vec{\Delta}\vec{v}$$

Dans l'équation de Navier-Stokes, on voit deux sources de variation de quantité de mouvement apparaître :

- l'advection avec le terme : $\rho(\vec{v}.\vec{\nabla})\vec{v}$
- la dissipation par viscosité avec le terme : $\eta\vec{\Delta}\vec{v}$

En mécanique des fluides, on utilise un nombre sans dimension pour comparer l'influence de ces deux termes de transport, en ordre de grandeur :

$$\mathrm{Re} = \frac{\text{transfert par convection de la quantité de mouvement}}{\text{transfert par diffusion de la quantité de mouvement}}$$

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho|\vec{v}.\vec{\nabla})\vec{v}|}{\eta|\vec{\Delta}\vec{v}|} = \frac{\rho UL}{\eta} = \frac{UL}{\nu}$$

où U et L sont les vitesses et grandeurs caractéristiques de l'écoulement et ν est la viscosité cinématique du fluide. En fonction de la valeur du nombre de Reynolds, l'équation de Navier-Stokes peut donner lieu à plusieurs solutions différentes :

- $\mathrm{Re} \ll 1$: on a des écoulements rampants, pour lesquels l'inertie du fluide est négligeable. On résout alors l'équation de Stokes : $-\vec{\nabla}P + \nu\vec{\Delta}\vec{v}$. On rencontre ce type d'écoulement pour des fluides très visqueux ou des échelles caractéristiques très petites.
- $\mathrm{Re} \gg 1$: on a des écoulements laminaires tant que le nombre de Reynolds ne devient pas très élevé (dans ce cas, on a alors des écoulements turbulents). La viscosité n'intervient alors pas dans l'équation de Navier-Stokes, on doit considérer la couche limite pour faire apparaître la viscosité du fluide (bien au-delà du cadre de notre montage, se référer à la leçon LP09).

1 Viscosimètre à chute de bille

✍ Jolidon p.432

On considère tout d'abord l'exemple d'un **écoulement rampant** ($\mathrm{Re} \ll 1$). La viscosité est ici le moteur du transport diffusif de quantité de mouvement.
On étudie la chute d'une bille sphérique de rayon r (de volume V_b) et de masse volumique ρ_b dasns une éprouvette remplie de fluide visqueux de masse volumique ρ_f. On fait plusieurs hypothèses ici :

- le régime permanent est atteint avant de réaliser la mesure.
- le fond du tube n'a pas d'influence sur l'écoulement.
- l'écoulement est visqueux (ce qui revient à dire que le nombre de Reynolds de l'écoulement est petit devant 1).
- pour la plupart des billes (tant que leur rayon n'est pas trop grand, cf remarque nombre de Reynolds), on peut négliger les effets des parois du tube, cependant on écrira quand même la force de Stokes corrigées.

On veut maintenant modéliser la force de frottement fluide que va subir la bille pendant sa chute. On utilise habituellement la formule de Stokes : $\vec{F} = 6\pi\eta r\vec{v}$. Il faut ici prendre en compte le fait que le milieu n'est pas infini et que les parois induisent des recirculations de fluide lorsque la bille se déplace. On a donc une correction non négligeable à la formule précédente. On a donc :

$$\vec{F} = -6\pi\eta \frac{r}{1 - 2.1\frac{r}{R}}\vec{v}$$

où η est la viscosité dynamique du fluide et R le rayon du tube. On a donc une dépendance non triviale de la force en le rayon de la bille.

La bille est soumise durant sa chute à son poids, la poussée d'Archimède et à la force de Stokes. Le théorème de la résultante dynamique donne alors :

$$m\frac{\mathrm{d}\vec{v}}{\mathrm{d}t} = \rho_b V_b \vec{g} - \rho_f V_b \vec{g} - 6\pi\eta\frac{r}{1-2.1\frac{r}{R}}\vec{v}$$

La vitesse de la bille suit un régime transitoire d'échelle caractéristique de temps τ avant d'atteindre une vitesse limite $\vec{V}$:

$$\vec{v}(t) = \vec{V}\left[1-\exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)\right]$$

avec

$$\tau = \frac{2}{9}\frac{\rho_b}{\eta}r^2 \quad \text{et} \quad \vec{V} = \frac{2}{9}\frac{\rho_b-\rho_f}{\eta}r^2\left(1-2.1\frac{r}{R}\right)\vec{g}$$

On modélise les résultats obtenus par $V = ar^2 + br^3$ et on a donc :

$$\eta = \frac{2}{9}\frac{\rho_b-\rho_f}{a}g \quad \text{et} \quad \nu = \frac{2}{9}\frac{\rho_b-\rho_f}{a\rho_f}g$$

Les incertitudes sur ν et η sont données par :

$$u(\eta) = \eta\sqrt{\left(\frac{u(\rho_b)}{\rho_b-\rho_f}\right)^2 + \left(\frac{u(\rho_f)}{\rho_b-\rho_f}\right)^2 + \left(\frac{u(a)}{a}\right)^2} \quad \text{et} \quad u(\nu) = \nu\sqrt{\left(\frac{u(\rho_b)}{\rho_b-\rho_f}\right)^2 + \left(\frac{u(\rho_f)}{\rho_b-\rho_f}\right)^2\left(\frac{\rho_b}{\rho_f}\right)^2 + \left(\frac{u(a)}{a}\right)^2}$$

D'après nos résultats, on a :

$$a = (15.4 \pm 0.7)\times 10^{-3}\mathrm{m}^{-1}.\mathrm{s}^{-1} \quad \text{donc} \quad \eta = 0.97 \pm 0.05 \text{ Pa.s} \quad \text{et} \quad \nu = (1.00 \pm 0.05)\times 10^3 \text{ mm}^2.\mathrm{s}^{-1}$$

On compare la valeur de ν à la valeur tabulée donnée par le constructeur : $\nu = (1.00 \pm 0.05)\times 10^3$ mm^2.s^{-1}

Effectuons un traitement des différentes incertitudes dans nos mesures :

- l'incertitude sur la mesure de la hauteur h est : $u(h) = 0.1$ cm, donnée par la lecture.
- l'incertitude sur le diamètre $2r$ des billes est : $u(2r) = 12.5$ µm, donnée par le constructeur.
- l'incertitude sur la masse volumique ρ_f du fluide est : $u(\rho_f) = 1$ kg.m^3, donnée dans le Jolidon.
- l'incertitude sur le temps t de mesure est : $u(t) = 0.2$s, donnée par la mesure du temps par l'expérimentateur. On réalise ici 5 mesures.

Revenons sur les hypothèses formulées en début de partie :

- On peut considérer que le régime est permanent au bout de 5τ, avec la valeur de τ calculée pour la plus grosse bille : $\tau = 1.6$ms donc au bout d'une distance parcourue de 0.16mm. On se place ici à 11cm du haut de l'éprouvette donc on peut supposer que le régime est bien permanent.
- La présence du fond du tube change l'expression de la force de Stokes qui devient : $\vec{F} = -6\pi\eta r\left(1+\frac{r}{h}\right)\vec{v}$. Or ici : $\frac{r}{H} \sim 0.01 \ll 1$ donc cette correction est négligeable.
- Le nombre de Reynolds est ici de $\mathrm{Re} = \frac{2\rho_f V r}{\eta} \leq 0.5 \ll 1$ donc l'écoulement est bien visqueux.
- L'effet des parois sur l'écoulement change l'expression de la force de Stokes qui devient : $\vec{F} = -6\pi\eta r\left(1-2.104\frac{r}{R}\right)^{-1}\vec{v}$ où R est le rayon de l'éprouvette. Dans notre cas, $2.1\frac{r}{R} \sim 0.1 \ll 1$ donc cette correction est ici négligeable sauf pour les grandes billes, on le montre en utilisant une modélisant de V en ar^2 puis en $ar^2 + br^3$.

2 Écoulement de Poiseuille dans un cylindre

✍ Jolidon p.441

On a étudié auparavant un écoulement où l'on considérait un fluide visqueux (l'huile Rotitherm) mais on ne s'attend généralement pas à avoir un comportement de fluide visqueux pour l'eau en général. Ce comportement apparaît lorsque l'on considère un écoulement confiné sur une faible distance caractéristique.

Le régime attendu de Poiseuille est parabolique et il nécessite une certaine distance d'écoulement pour s'établir. On sait que l'épaisseur δ de la couche limite s'exprime en fonction du temps comme : $\delta(x)\ \alpha\ \sqrt{\nu t}$. On note U la vitesse de l'écoulement uniforme dans le capillaire, on a donc :

$$\delta(x) = \sqrt{\frac{\nu x}{U}}$$

La longueur d'établissement l est telle que : $\delta(l) = R$ où R est le rayon du capillaire. On a donc :

$$l\ \alpha\ \frac{UR^2}{\nu}$$

On définit alors le nombre de Reynolds de l'écoulement :

$$\text{Re} = \frac{UD}{\nu} = \frac{4|Q_v|}{\pi\nu D}$$

On suppose que pour cet écoulement la longueur d'établissement de l'écoulement de Poiseuille est faible devant la longueur totale du tube. On ne peut en effet pas faire de discussion sur le nombre de Reynolds car le terme advectif est identiquement nul dans notre modèle, comme on va le voir.
On considère un écoulement laminaire stationnaire d'un fluide incompressible (ici l'eau, de masse volumique ρ_{eau}) dans un capillaire de diamètre D et de longueur L. La symétrie de révolution du cylindre impose un champ de vitesse de la forme $\vec{v} = v(r)\vec{e_x}$. Le terme convectif de Navier-Stokes est alors égal à 0 et l'équation de Navier-Stokes est :

$$\vec{0} = -gr\vec{a}dP + \eta\vec{\Delta}\vec{v}$$

On note ici qu'on ne peut pas négliger l'influence de la viscosité sur l'écoulement car le nombre de Reynolds est petit devant 1. On aboutit au système d'équations :

$$\begin{cases} \frac{\partial P}{\partial r} = 0 \\ \frac{\partial P}{\partial \theta} = 0 \\ \frac{\partial P}{\partial x} = \frac{\eta}{r}\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}r}\left(r\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}r}\right) \end{cases}$$

C'est donc le gradient de pression qui est le moteur de l'écoulement. On obtient également la valeur du débit massique :

$$Q = \frac{\pi}{128\nu}\frac{\Delta P}{L}D^4$$

On utilise ici un vase de Mariotte et on considère une ligne de courant allant de l'extrémité du bouchon à l'entrée du capillaire, on a donc :

$$\Delta P = \rho_{eau} g h_{eau} - \frac{1}{2}\rho_{eau}U^2$$

avec U la vitesse du fluide supposée uniforme en entrée du tube et h_{eau} la hauteur entre l'extrémité basse du bouchon enfoncé dans le tube de Mariotte et l'entrée du capillaire dans lequel se fait l'écoulement. Dans l'hypothèse où $U^2 \ll gh_{eau}$, on a alors :

$$Q = \frac{\pi}{128\nu}\frac{\rho_{eau} g h}{L}D^4$$

On se propose de vérifier cette loi. On prépare en premier leu un vase de Mariotte : ce dispositif permettant de fixer la référence du profil de pression hydrostatique dans un fluide. On monte ensuite le dispositif en prenant garde à l'horizontalité. On mesure ensuite le temps nécessaire pour qu'une certaine masse de fluide (nous avons pris 25g) coule du capillaire, en prenant garde à en prendre une assez grande mais qui permet toujours de maintenir le tube du vase de Mariotte dans l'eau. On réitère cette mesure pour différentes valeurs de h, ce qui correspond à différentes valeurs de pression. On modélise Q par $Q = a \times h + b$. On a donc :

$$\nu = \frac{\pi}{128a}\frac{g}{L}D^4$$

L'incertitude sur ν est donnée par :

$$u(\nu) = \nu\sqrt{\left(\frac{4u(D)}{D}\right)^2 + \left(\frac{u(L)}{L}\right)^2 + \left(\frac{u(a)}{a}\right)^2}$$

D'après nos résultats, on a :

$$a = (2.6 \pm 0.1) \times 10^{-6}\ \text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1} \quad \text{donc} \quad \nu = (0.9 \pm 0.2)\ \text{mm}^2.\text{s}^{-1}$$

On compare avec la valeur tabulée à 20°C : $\nu = 1.00\ \text{mm}^2.\text{s}^{-1}$ Effectuons un traitement des incertitudes dans cette expérience :

- l'incertitude sur la mesure de la hauteur h est : $u(h) = O.1$cm, donnée par la lecture.
- l'incertitude sur le diamètre D est : $u(D) = 0.1$mm, donnée par le constructeur.
- l'incertitude sur la longueur L du tube est : $u(L) = 0.1$cm, donnée par la lecture.
- l'incertitude sur la masse m d'eau pesée est donnée par le constructeur : $u(m) = Q\delta t$

On a alors, avec la formule de propagation des incertitudes :

$$u(Q) = Q\sqrt{\left(\frac{u(m)}{m}\right)^2 + \left(\frac{u(\delta t}{)}\delta t\right)^2}$$

Revenons maintenant sur les hypothèses énoncées en début de partie.

- On vérifie notamment qu'on a bien un nombre de Reynolds petit devant 1. Or le terme advectif est ici identiquement nul, on va donc chercher à comparer la longueur d'établissement de l'écoulement avec la longueur totale du tube. On a ici $l \sim \frac{Q}{\pi\nu} \sim 10$cm donc on a bien $l \ll L$.
- On doit aussi vérifier que $U^2 \ll gh$, c'est-à-dire : $Q^2 \ll (\rho_{eau}^2/4)^2 gh$: c'est réalisé ici car $Q \leq 4.5 \times 10^{-7}\text{kg}^2.\text{s}^{-2}$ et $(\rho_{eau}\pi D^2/4)^2) \sim 1 \times 10^{-5}\text{kg}^2.\text{s}^{-2}$

3 Le tube de Pitot

La soufflerie que nous nous apprêtons à utiliser est un instrument permettant de comprendre les efforts exercés sur des objets plongés dans un écoulement. Elle met en mouvement l'air ambiant et produit un écoulement dans lequel on place les objets à étudier. Dans les souffleries on souhaite tester des objets qui ont une dimension bien plus petite que les objets qu'ils modélisent. C'est pourquoi il faudra veiller à conserver le nombre de Reynolds identiques à dans les deux situations afin d'interpréter les résultats obtenus. L'écoulement de notre soufflerie pouvant atteindre quelques mètres par seconde et sa section étant de l'ordre du décimètre carré, on peut y placer des objets ayant une taille caractéristique d'un centimètre et le nombre de Reynolds est alors de l'ordre de $10^3 - 10^4$. On va étudier ici un instrument qui permet de mesurer la vitesse d'un écoulement à partir d'une mesure de pression : le tube de Pitot.

Le théorème de Bernoulli impose que dans un écoulement parfait, stationnaire et incompressible, la quantité $P + \rho\frac{v^2}{2} + \rho gz$ est conservée le long d'une ligne de courant. Une sonde de Pitot est constituée de deux points d'entrée A et B, tels que $v(\text{A}) = 0$ (A est un point d'arrêt du fluide) et $v(\text{B}) = v$ (la vitesse en B est celle de l'écoulement à grande distance).

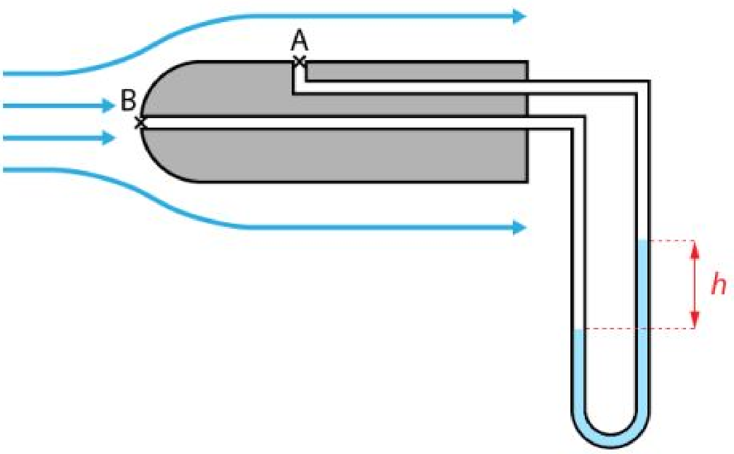

Figure 1 – Schéma d'un tube Pitot. Dans notre cas le liquide utilisé est de l'alcool.

On mesure la hauteur h (cf figure ci-dessus) et on la relie à la différence de pression $\Delta P = P_A - P_B = \rho_{\text{liq}} gh$. On prendra $\rho_{\text{liq}} = \rho_{\text{eau}}$ même si en réalité le tube est rempli d'alcool. (perso j'ai du mal à comprendre ça mais c'est ce qui est marqué et ça a l'air de marcher...) D'après le théorème de Bernoulli, on a donc :

$$v = \sqrt{\frac{2}{\rho}(P_A - P_B)}$$

Pour réaliser l'étude du tube de Pitot, on place également un anémomètre à fil chaud dans la soufflerie. On essaie de le placer le plus possible au centre de la soufflerie afin d'éviter les effets de bord. De plus, on veille à ne pas bouger l'anémomètre au cours de la manip afin de ne pas changer les conditions d'écoulement entre les mesures. On n'oublie pas de vérifier que le niveau d'alcool est bien à 0 dans la sonde Pitot. On trace $\Delta P = a\frac{v^2}{2} + b$. On a alors $\rho_{air} = a$. Ici :

$$\rho_{air} = 1.33 \pm 0.03 \text{kg.m}^{-3}$$

On compare avec la valeur tabulée : $\rho_{air}^{tab} = 1.19 \pm 0.02 \text{kg.m}^{-3}$ à $T = 20 \pm 5°\text{C}$

Les incertitudes sur la valeur de la masse volumique de l'air sont celles sur la pente de la régression linéaire et sont principalement données par :

- la résolution de la mesure de la vitesse donnée par le constructeur de l'anémomètre à chaud : $\pm 3\%$ de la mesure$\pm 0.2 \text{m.s}^{-1}$.
- la résolution sur la mesure du ménisque dans le tube de Pitot : 0.2cm.

On vérifie les hypothèses de cet écoulement :

- On se trouve bien à Re $\gg 1$, c'est-à-dire dans le cas d'un fluide non-visqueux

Plusieurs facteurs peuvent expliquer l'écart à la valeur que l'on observe, notamment l'humidité de l'air et l'influence de l'anémomètre à fil chaud sur la mesure de pression dans le tube de Pitot.

Conclusion

Ce montage nous a permis de montrer la diversité des écoulements en mécanique des fluides, en utilisant des fluides de différentes propriétés (masse volumique ou viscosité) et pour différents régimes d'écoulement (souvent pour différentes géométries). Ces comportements différents sont régis ici par le nombre sans dimension de Reynolds.
Ce montage s'est focalisé sur les écoulements visqueux (l'eau dans le capillaire et la chute de la bille dans le viscosimètre) mais on peut également étudier des écoulements de fluide parfait et par exemple mesurer des forces de traînée ou de portance en soufflerie.

Questions, commentaires, opinions, idées de start-up/think tank :

Viscosimètre à bille :

- Pourquoi ce fluide, le rotitherm ? *Ce fluide ne s'hydrate pas à l'air comparé au glycérol qui est aussi présent dans la collection. Cette discusion est faite dans le Jolidon.*
- Sur la courbe, on a plusieurs mesures sur ces points, que fait Regressi avec ça ? *Ici, on aurait dû faire une incertitude de type A, donc statistique. C'est à dire qu'on calcule la valeur moyenne (valeur vraie), puis l'écart-type. L'incertitude sur la valeur moyenne est donnée par l'écart type divisé par $\sqrt{N-1}$ où N est le nombre de mesures. Comme ce nombre N n'est pas grand dans ce cas, il faut ensuite prendre l'incertitude multipliée par un coefficient de Student pour avoir soit un intervalle de confiance à 68 % ou à 95 %.*
- Tu as rajouté un terme cubique avec un coefficient b, un commentaire sur sa valeur ? *On peut essayer de le calculer. Déjà on avait bien le signe négatif, ce qui est rassurant. De façon théorique on obtient une valeur qu'il convient de comparer, ça marche bieng.*
- Tu calcules un τ, pour quelles conditions initiales ? *Pour une vitesse nulle. On pourrait discuter cette hypothèse car la bille n'arrive pas avec une vitesse nulle sur l'huile.*
- Tu as commencé à parler de nombre de Reynolds mais tu ne l'as pas déterminé. Peux-tu le faire ici ? Et justifier pourquoi la distance caractéristique est le diamètre de la bille ? *On le calcule comme c'est fait dans le poly ou le Jolidon.*
- Tu peux refaire le calcul de τ et commenter vis-à-vis de l'expérience ? *Il faut le faire et calculer la longueur sur laquelle il se passe* 5τ.
- Comment est-ce que tu ferais pour observer ce régime transitoire ? *Il faudrait utiliser un autre fluide tout en gardant le Reynolds identique. Donc c'est pas simple. Et changer le mode opératoire pour traquer la bille.*

Ecoulement de Poiseuille :

- Alors, tu as galéré sur l'expérience du Poiseuille ? Pourquoi ? *Il faut faire attention que le vase de Mariotte soit bien en régime stationnaire. (plus d'air dans le tube)*
- Et donc commentaire sur le temps plus court observé ? *Tant que le régime stationnaire n'est pas en place dans le Mariotte, la pression est supérieure à la pression qu'on voudrait imposer. Donc le débit est plus important. D'où les valeurs.*
- Calculer le Reynolds ? *Ici c'est plus complexe.* $R_e = \frac{UD}{\nu} = \frac{4|Q|}{\pi\nu D}$ *Pour le retrouver il suffit de repenser à la définition du débit volumique et de traduire* U *en fonction de* Q*. Attention c'est ici la géométrie qui impose la viscosité ! Donc bien que le Reynolds soit élevé on a quand même un écoulement visqueux.*
- Tu t'attendrais à quelle genre de loi pour un fluide parfait ?
- A quoi ça sert d'avoir un tube aussi long ? *Notion de longueur d'établissement.*
- A quoi ça sert d'utiliser un niveau ? *On veut que l'écoulement dans le tube soit horizontal.*
- Tu as parlé de suie pour mettre au bout du tuyau ? *La suie va augmenter l'angle de contact car c'est hydrophobe. Cela va empêcher une goutte qui s'écoulerait dans l'autre sens et modifierait le débit.*
- Tu modélises le débit comme étant proportionnel à une certaine hauteur, mais dans ton fit tu utilises une loi affine ? Pourquoi ?

Tube de Pitot.

- Quels commentaires sur le χ^2 ? La valeur de a et b ? *Ici* χ^2 *est très grand mais c'est parce qu'une valeur d'incertitude était mal rentrée et était bien trop grande donc* χ^2 *était trop petit (donc surestimation des incertitudes). Pour la régression affine plutôt que linéaire on peut faire affine et montrer que* 0 *est dans l'intervalle de confiance de* b*.*
- Nombre de Reynolds ? Conséquence sur l'écoulement ?
- Parle moi des lignes de courant.

Commentaires généraux :

- Il faut que le nombre de Reynolds soit présent tout au long du montage. Nature d'écoulements, hypothèses faites... Par exemple dans Poiseuille, il ne faut pas uniquement vérifier la loi mais aussi donner les limites et revenir sur les hypothèses.
- Il restait du temps si tout c'était bien passé : on pourrait rajouter les expériences sur la soufflerie avec le calcul des coefficients de traînée.
- Ce montage repose sur des manips classiques, donc il faut bien savoir les faire. Et surtout être très solide sur la théorie.
- Dans la première manip, calculer $\frac{b}{a} = \frac{-2.1}{R}$ et vérifier.
- Pour le Poiseuille, il faut bien maîtriser la longueur d'établissement ! C'est fait dans le Jolidon !