

# Examen de Méthodes Expérimentales en Mécanique des Fluides

15 décembre 2011

Durée : 3 heures - sans document.

## 1 Écoulement de vidange d'un réservoir

On s'intéresse à l'écoulement de vidange d'un réservoir cylindrique, tel que celui de la Figure 1. Le diamètre du récipient est de  $2R = 50$  cm, et la plaque du fond est percée d'un trou par lequel l'eau peut s'évacuer lorsqu'on ouvre une vanne. Le volume d'eau est initialement en lente rotation solide puis la vanne est ouverte et la trombe se forme très rapidement. On note  $\rho_e$  la masse volumique de l'eau dans les conditions de l'expérience.



Figure 1: Prise de vue du réservoir et du cœur de tourbillon de vidange, en son centre.

1. On désire mettre en évidence la structure de l'écoulement. Pour cela on utilise un colorant que l'on injecte en un point de l'écoulement.
  - (a) Lorsqu'on injecte continûment un colorant, en un point d'un écoulement *instationnaire*, à l'aide d'une seringue, matérialise-t-on *i*) une trajectoire de particule, *ii*) une ligne de courant ou *iii*) une ligne d'émission? Rappeler la définition de chacune d'elle.
  - (b) L'écoulement de vidange est en fait *stationnaire*. Le colorant dessine un cercle, centré sur le cœur de la trombe, qui se referme à peu près sur lui même. Représenter, sur un dessin, le champ de vitesse le long de cette ligne, en le justifiant.
  - (c) Rappeler à quelle condition le champ de vitesse peut être décrit comme le gradient d'une fonction scalaire,  $\phi$  (potentiel des vitesses). De quelle manière pourrait-on révéler le caractère potentiel de l'écoulement, hors du cœur du tourbillon?
  - (d) Quelle ligne décrirait le colorant s'il était injecté dans le cœur?
  - (e) Qu'observe-t-on à l'injection de l'encre si la vitesse du colorant est supérieure à la vitesse (locale) du fluide?

2. On désire déterminer la loi de décroissance de la vitesse en fonction de la distance,  $r$ , au cœur du tourbillon. Pour cela, on produit une nappe de bulles de di-hydrogène,  $H_2$ , dans un plan horizontal  $(r, \theta)$ , à une altitude  $z$  fixe dans le fluide. La nappe, produite sur l'axe  $r$ , à  $\theta = 30^\circ$ , depuis  $r_1 \simeq 0$  jusqu'à  $r_2 \simeq R$ , est produite durant le temps  $\tau_{on}$ .

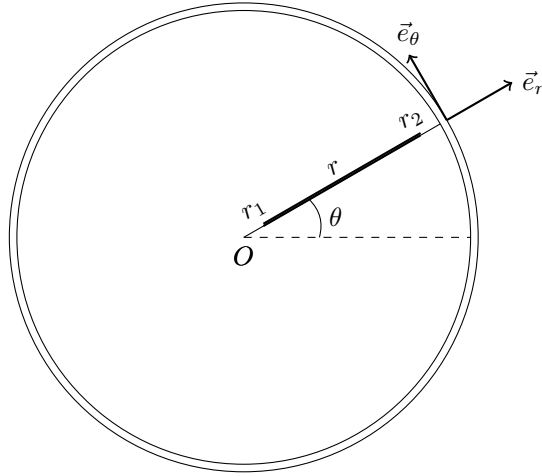


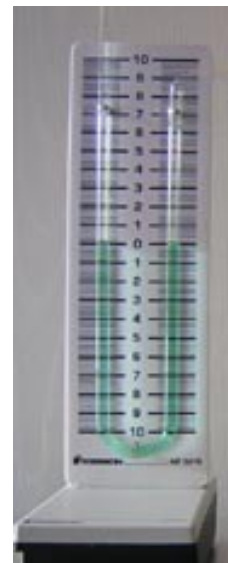
Figure 2: Plan de production de la nappe de bulles, vu de dessus. Le cœur de tourbillon se trouve en  $O$  et les bulles sont produites entre  $r_1$  et  $r_2$ .

- Décrire, en quelques lignes, le principe de cette technique. Sur quel phénomène physique repose-t-elle?
- Cette technique fonctionnerait-elle convenablement dans une eau distillée?
- Pour quelle raison ne souhaite-t-on généralement pas utiliser les bulles de di-oxygène,  $O_2$ ?
- La loi de décroissance de la vitesse est sensiblement en  $1/r$ , entre  $r_1$  et  $r_2$ :

$$\vec{v}(r) = \frac{A}{r} \vec{e}_\theta. \quad (1)$$

Dans une vue de dessus, comment une nappe de bulles, produite durant  $\tau_{on}$ , occuperait-elle l'espace?

3. On désire mesurer la pression sur les parois latérales du récipient. On pratique pour cela un petit trou à la paroi. Le trou est connecté à un tube souple de petit diamètre, que l'on relie à l'une des branches d'un tube en U (*cf* figure). L'autre branche du tube en U est ouverte à l'air libre (pression  $P_{atm}$ ). Le tube en U contient de l'alcool, de masse volumique  $\rho_a$ , mais la colonne est graduée en millimètres d'eau.



- (a) Lorsque la différence de hauteur de fluide,  $\Delta h$ , entre les deux branches du tube en U, est de 1 mm d'eau, quelle valeur mesurerait-on, pour  $\Delta h$ , avec une règle graduée en millimètres "vrais"?
  - (b) Sur un dessin, indiquer de quelle manière le volume d'eau serait déplacé dans le tube en U, si la pression à la paroi était supérieure à  $P_{atm}$ .
  - (c) On incline le bras du tube en U, ouvert à l'air libre, d'un angle  $\alpha$  avec la verticale. En quelle proportion est augmentée la précision sur la mesure?
  - (d) On mesure le différentiel du niveau d'eau,  $\Delta h$ , entre les deux branches du tube en U. Comment en déduit-on alors la pression à la paroi de la cuve,  $P_{cuve}$ , en Pa?
4. On désire mesurer la température du fluide à la paroi. On insère pour cela un thermocouple de type K au point désiré.

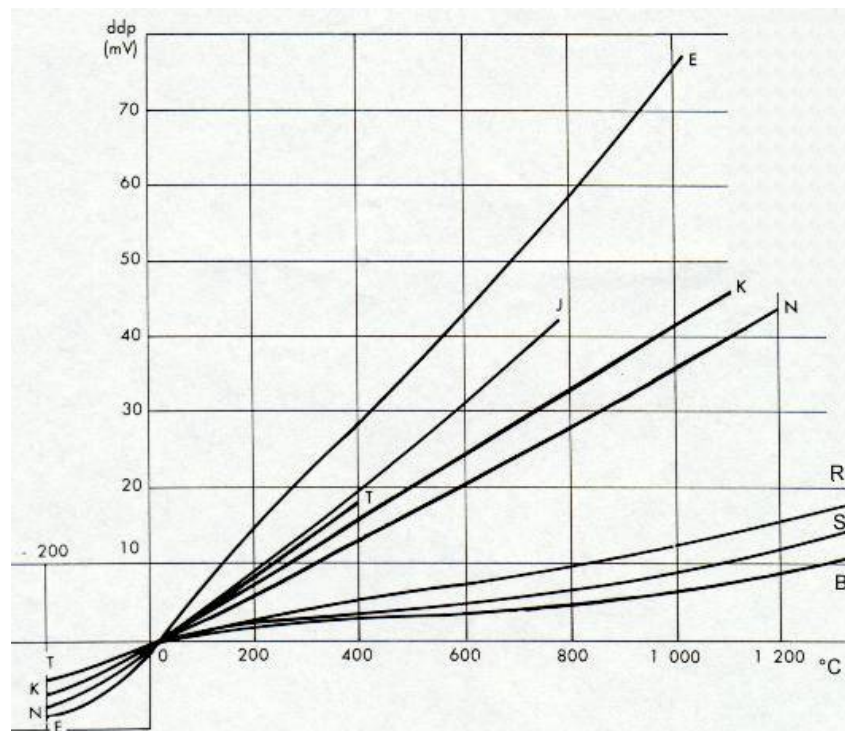


Figure 3: Courbes de réponse pour différents types de thermocouples.

- (a) Rappeler le principe physique sur lequel repose le thermocouple.
- (b) À partir des courbes de réponse de différents types de thermocouples, présentées sur la Figure 3, indiquer l'un des avantages qu'il y a à travailler avec un thermocouple de type K. Est-ce crucial dans la présente expérience?
- (c) Quel type de thermocouple faudrait-il choisir pour avoir une plus grande sensibilité à la mesure?
- (d) Les thermocouples de type B,R,S, sont à base de Platine. Citer un avantage et un inconvénient associés à ce type de thermocouples.

## Exercice 2 : Anémomètre Doppler Ultrasonore

Le principe de base de l'Anémomètre Doppler Ultrasonore (UDV) est le même que celui de l'Anémomètre Laser Doppler (LDV) : on mesure le décalage Doppler subi par une onde diffusant sur des petites particules ensemençant l'écoulement. Un transducteur, pouvant fonctionner alternativement en émetteur ou en récepteur, envoie une brève impulsion acoustique de quelques longueurs d'onde, puis mesure l'écho diffusé par les particules en mouvement situées le long de l'axe acoustique. Cette technique est souvent utilisée lorsqu'un accès optique n'est pas réalisable.

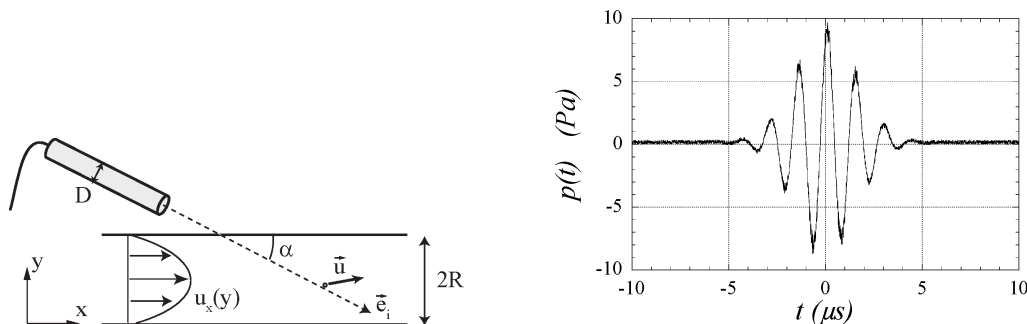


Figure 4: Dispositif de mesure de profil de vitesse à l'aide d'un vélocimètre Doppler ultrasonore, et impulsion acoustique émise par le transducteur.

On considère ici un écoulement d'eau de vitesse moyenne  $\bar{u}_x \simeq 1$  m/s, dans un tuyau de diamètre  $2R = 5$  cm. L'onde acoustique utilisée est monochromatique de fréquence  $f_0 = 1$  MHz, et se propage à la vitesse du son dans l'eau ( $c = 1480$  m/s). On suppose que le faisceau acoustique fait un angle  $\alpha = 30^\circ$  avec la direction de l'écoulement moyen, et que sa largeur est de l'ordre du diamètre du transducteur,  $D = 6$  mm. On considère dans un premier temps l'effet de la diffusion sur une seule petite particule se déplaçant à vitesse  $\vec{v}$ , située à une distance  $d = 10$  cm le long de l'axe acoustique défini par le vecteur unitaire  $\vec{e}_i$ .

1. Calculer la longueur d'onde  $\lambda_0$  de l'onde acoustique incidente. En déduire la taille optimale des particules afin d'éviter le problème de diffraction ultrasonore. Quelle est la résolution spatiale de la mesure ?
2. Une impulsion d'environ 5 longueurs d'onde est émise au temps  $t = 0$  (Figure 4). Calculer le temps de réception  $t_r$  de l'écho. Montrer que la fréquence reçue sera  $f_s = f_0 + \Delta f_D$ , où la fréquence Doppler est donnée par

$$\Delta f_D = -2 \frac{\vec{u} \cdot \vec{e}_i}{\lambda_0}.$$

Calculer l'ordre de grandeur de  $\Delta f_D$ .

3. A quelle technique a-t-on recours en LDV afin de mesurer  $\Delta f_D$  ? Est-ce nécessaire ici ? Quelle méthode proposez-vous ?
4. Y aurait-il un avantage à disposer le récepteur en face de l'émetteur (sur le même axe  $\vec{e}_i$ , de l'autre côté du tuyau ?)
5. En mesurant les échos successifs, expliquer comment l'on peut accéder au profil de vitesse le long de l'axe  $\vec{e}_i$ .
6. Quelle résolution temporelle maximale peut-on atteindre si l'on souhaite mesurer le profil de vitesse selon toute la hauteur du canal ?

### Exercice 3 : Influence de l'humidité en anémométrie à fil chaud

On cherche à mesurer les fluctuations de vitesse dans un écoulement d'air à température ambiante en soufflerie, et en particulier à caractériser l'influence de l'humidité de l'air sur la mesure. La vitesse moyenne est de 15 m/s. On dispose d'un fil chaud de 5  $\mu\text{m}$  de diamètre, de 1 mm de longueur, asservi à température constante. On rappelle l'expression de la puissance dissipée par le fil :

$$R_w I_w^2 = \pi \ell k \Delta T Nu,$$

avec  $k$  la conductivité thermique de l'air, et  $Nu$  le nombre de Nusselt, donné par

$$Nu = 0.7 + 1.2 \sqrt{Re_w}$$

( $Re_w$  est le nombre de Reynolds basé sur le diamètre du fil). On peut considérer que la conductivité thermique de l'air humide est intermédiaire entre celle de l'air sec ( $k_a = 0,02 \text{ W K}^{-1} \text{ m}^{-1}$ ) et celle de l'eau ( $k_e = 0,6 \text{ W K}^{-1} \text{ m}^{-1}$ ). On suppose que l'humidité n'a aucune influence sur la viscosité cinématique de l'air, égale à  $\nu = 15 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ .

1. Rappeler quelle est la signification physique du nombre de Nusselt, et calculer son ordre de grandeur. En déduire la puissance dissipée par le fil dans les cas sec et humide, pour fil chauffé à  $T_w = 150^\circ$ .
2. Rappeler brièvement (quelques lignes) l'intérêt du fonctionnement à température constante comparé au fonctionnement à courant constant. Rappeler la forme de l'équation  $E = f(U)$  dans le fonctionnement à température constante ( $E$  est la tension de sortie et  $U$  la vitesse).
3. Tracer sur un même graphique l'allure de la courbe de calibration  $E = f(U)$  pour des mesures dans un air très sec et très humide. Décrire le résultat d'une mesure de vitesse  $U = f(t)$  réalisée dans une soufflerie dont la vitesse est constante, dans un air dont l'humidité augmente progressivement au cours du temps.
4. Tracer l'allure du profil de température le long du fil pour un air sec ou humide. De l'air sec ou humide, lequel est le plus favorable du point de vue de l'uniformité de la température du fil ?