

Examen de Méthodes Expérimentales en Mécanique des Fluides

30 octobre 2012

Durée : 3 heures - sans document.

Écoulement de Couette-Taylor

On s'intéresse à l'écoulement d'un fluide confiné entre deux cylindres concentriques, le cylindre intérieur tournant à la vitesse angulaire Ω (Figure ci-contre). Le montage est supposé rigoureusement axisymétrique. La base et le couvercle du dispositif sont hermétiquement scellés.



Figure: dispositif expérimental (GIT, CEA).

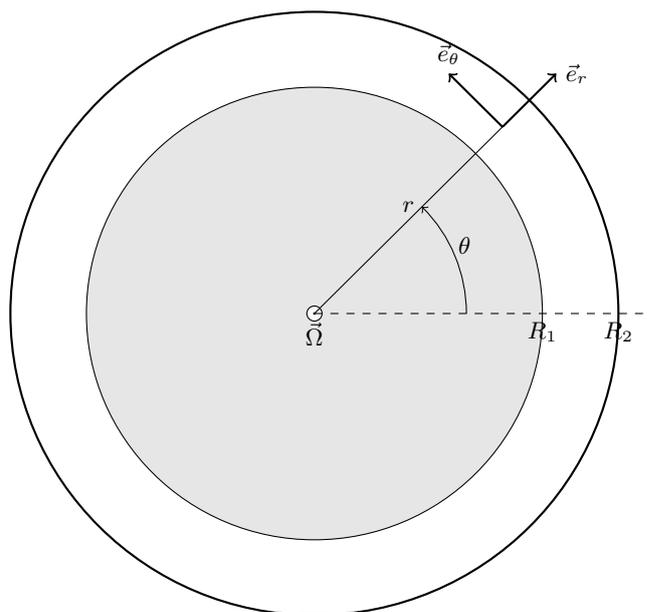


Figure: vue de dessus du dispositif expérimental de Couette-Taylor. Le cylindre interne, qui tourne à vitesse angulaire constante Ω , est grisé sur la figure (rayon R_1). Un point de l'espace est référencé par ses coordonnées polaires (r, θ) .

1. État de base

Lorsque la vitesse de rotation du cylindre intérieur est inférieure à une valeur critique, l'état de base est stationnaire et uniforme. Dans la limite d'un petit entrefer ($R_2 - R_1 \ll R_1$), le champ de vitesse peut être approximé par l'expression:

$$\vec{u}(r, t) = R_1 \Omega \left(1 - \frac{r - R_1}{R_2 - R_1} \right) \vec{e}_\theta. \quad (1)$$

1. Représenter la trajectoire d'une particule fluide qui serait située *i*) au centre de l'entrefer, *ii*) proche de la paroi du cylindre intérieur, *iii*) proche de la paroi du cylindre extérieur.
2. Après en avoir rappelé la définition, représenter quelques lignes de courant de l'écoulement.
3. L'écoulement est-il irrotationnel¹?

¹On rappelle l'expression du rotationnel en coordonnées cylindriques:

$$\text{rot} \vec{u} = \left(\frac{1}{r} \frac{\partial u_z}{\partial \theta} - \frac{\partial u_\theta}{\partial z} \right) \vec{e}_r + \left(\frac{\partial u_r}{\partial z} - \frac{\partial u_z}{\partial r} \right) \vec{e}_\theta + \left(\frac{1}{r} \frac{\partial (r u_\theta)}{\partial r} - \frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} \right) \vec{e}_z$$

4. Le champ de vorticité est-il modifié par un changement de référentiel inertiel?
5. Le champ de vorticité mesuré dans le référentiel du laboratoire est-il identique au champ de vorticité mesuré dans le référentiel du cylindre intérieur? Si non, en quoi diffère-t-elle?
6. Les écoulements caractérisés par une courbure des trajectoires de particules fluides peuvent-ils être irrotationnels? Si oui, existe-t-il des exemples?
7. Par quel(s) moyen(s) produiriez-vous des lignes d'émission dans l'écoulement?
8. Quelle technique proposeriez-vous d'utiliser pour mesurer la pression à la surface du cylindre extérieur?
9.   votre avis, la pression mesurée à la paroi du cylindre extérieur varie-t-elle, et si oui de quelle manière, lorsque le cylindre intérieur est mis en rotation? Vous expliquerez pourquoi.
10. Quels aménagements expérimentaux proposeriez-vous pour imposer, en plus de la rotation du cylindre intérieur, un gradient thermique radial dans le fluide, tout en conservant des surfaces externes transparentes pour l'observation?
11. Est-il possible d'accéder au champ de température à l'intérieur du fluide?

2.  tat convectif

Au-delà d'une valeur critique Ω_c de la vitesse angulaire, l'écoulement de base devient instable vis-à-vis de rouleaux toriques deux à deux contra-rotatifs, qui s'étendent tout autour du cylindre (Figure ci-contre). L'écoulement reste stationnaire et axisymétrique, mais la symétrie de l'état, par translation verticale continue, est brisée.

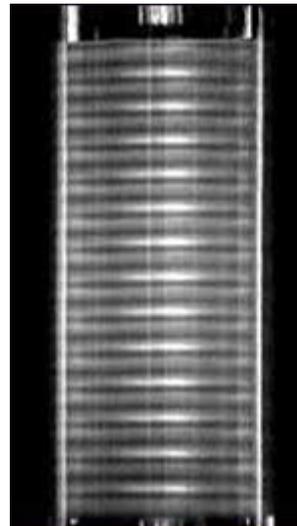


Figure: visualisation directe des structures convectives qui apparaissent dans l'écoulement lorsque la vitesse angulaire est supérieure à la vitesse critique, Ω_c .

1. Quel type d'ensemencement utilise-t-on habituellement pour mettre en évidence les structures de l'écoulement?
2. A quoi est d  du contraste optique vu sur la photographie?
3. On filme la trajectoire d'une petite pouss re dans le fluide. Quel type de ligne met-on en évidence dans cet écoulement?
4. Les lignes de courant, lignes d'émission et trajectoires de particules sont-elles confondues?
5. On introduit le nombre de Reynolds

$$Re = \frac{\Omega R_1 (R_2 - R_1)}{\nu}.$$

Pouvez-vous expliquer ce choix?

6. On relève l'amplitude du contraste optique, A , en fonction de la vitesse angulaire, Ω . Quelles précautions faut-il prendre pour l'éclairage de l'expérience?

7. L'unité d'amplitude, arbitraire, est sans signification physique. À partir de la figure ci-dessous, déterminer:

- La loi $A = A(Re)$.
- La valeur du seuil de bifurcation, Re_c , associée à Ω_c .
- Sachant que $R_1 = 32$ mm, $R_2 = 35$ mm et $\nu = 10^{-6}$ m².s⁻¹, cette valeur de Ω_c est-elle facilement réalisable?

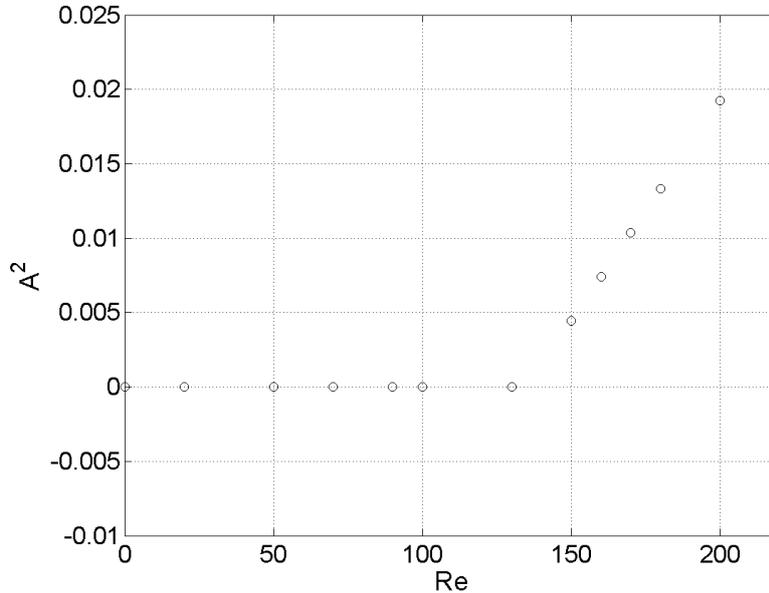


Figure: loi d'évolution expérimentale du carré de l'amplitude du contraste optique avec le nombre de Reynolds.

8. Le seuil détecté pour des vitesses croissantes est égal, aux incertitudes de mesure près, au seuil relevé pour une rampe décroissante de vitesse. Comment peut-on qualifier ce type de bifurcation?

3. Mesures par LDV

On souhaite maintenant caractériser cet écoulement au moyen de mesures de vitesse par Vélocimétrie Laser Doppler (LDV). Pour cela, on dispose d'un système de LDV par rétro-diffusion, constitué d'un Laser de longueur d'onde $\lambda = 532$ nm ; le diamètre des faisceaux est de 0.5 mm, et l'angle entre les 2 faisceaux est de $\theta = 15^\circ$. On rappelle que la distance interfrange est donnée par $\Lambda = \lambda / (2 \sin(\theta/2))$. Le fluide estensemencé de billes de verre creuses, de diamètre 10 μm et de densité 1.05 g cm⁻³.

- Rappeler (en une dizaine de lignes maximum, avec schéma), le principe de la LDV selon le modèle des franges.
- Quelle est la densité optimale de particules (exprimée en nombre de particules par cm³) pour obtenir un signal de vitesse en permanence ?
- On s'intéresse dans un premier temps à l'écoulement de base, $u_\theta(r)$. Comment orienter les faisceaux Laser pour mesurer cette composante de la vitesse ?
- Calculer l'ordre de grandeur de la fréquence du signal Δf_D lumineux reçu pour $Re = 100$.
- Estimer le nombre de franges dans le volume de mesure (intersection des faisceaux), ainsi que la résolution temporelle de la mesure.

6. Donner la résolution spatiale de la mesure. Vous semble-t-il possible d'établir un profil de vitesse $u_\theta(r)$ pour $R_1 \leq r \leq R_2$ avec un tel système ?
7. On s'intéresse maintenant à la caractérisation de l'état convectif, à $Re = 200$. Pour cela, il est nécessaire de mesurer soit u_r , soit u_z (ces composantes sont nulles pour l'écoulement de base, mais non nulles dans l'état convectif). Expliquer comment orienter les faisceaux Laser afin de mesurer ces composantes, et expliquer en quoi la mesure de u_r est difficile expérimentalement.
8. On se concentre maintenant sur la composante u_z . En tenant compte de la géométrie des rouleaux toriques dans l'état convectif, à quel rayon r_0 est-il judicieux de réaliser la mesure : au centre de l'entrefer, ou bien proche de l'un des deux cylindres ?
9. On déplace le point de mesure selon la verticale z (à r_0 fixé). Tracer l'allure du profil $u_z(z)$ attendu théoriquement. Que pensez-vous de ce profil mesuré expérimentalement (discuter en particulier le changement de signe de u_z).

4. Mesures par PIV

Afin de caractériser plus finement la structure spatiale des rouleaux dans l'état convectif, on souhaite réaliser une mesure de Vélocimétrie par Images de Particules (PIV) dans le plan (r, z) . Pour cela, on dispose d'une nappe Laser d'épaisseur 0.5 mm, et d'une caméra 1024×1024 pixels cadencée à 30 Hz. La portion de fluide imagée est de 3 mm horizontalement, et 20 mm verticalement.

1. Comment orienteriez-vous la nappe laser et la caméra ? Quel technique pourrait être utilisée pour limiter les problèmes de réfraction optique dans cette géométrie ?
2. Etant donné l'ordre de grandeur de la vitesse u_θ , que pensez-vous de la fréquence d'acquisition de la caméra ?
3. Si l'on utilise des fenêtres d'interrogation de 16×16 pixels, combien de points de mesure peut-on avoir dans la direction radiale ? Qu'en pensez-vous ?