

Travaux Pratiques de Mécanique Mécanique des Milieux Continus 3A004 (Fluides)

Année Universitaire 2019-2020.

Informations pratiques

— Les TP ont lieu de **9h à 12h** et de **13h à 16h**.

Ils se déroulent sur le site de Jussieu **salle 111** (1^{er} étage), **couloir 45-46**.

— Les retards non justifiés seront sanctionnés dans l'évaluation des étudiants. Tout retard conséquent sera considéré comme une absence. En cas d'absence en TP, il est nécessaire de contacter le responsable des travaux pratiques au plus vite afin d'être réaffecté à une nouvelle séance de TP.

— Ce TP représente 15% de la note globale de l'unité d'enseignement. Pour vous aider dans votre rédaction, une aide est proposée en annexe. Le compte rendu doit être déposé au format PDF sur la plateforme Moodle. Tout document déposé après le délai stipulé par l'encadrant ne sera pas évalué.

— Une note individuelle qui tient compte de votre préparation au préalable, participation active, capacité de travailler en groupe, etc, est aussi ajoutée. Chaque intégrant d'un trinôme peut donc avoir une note différente.

TP 1 : Viscosimètre à écoulement

On considère un viscosimètre à écoulement, constitué d'un récipient cylindrique de diamètre D relié à un tube horizontal fin de diamètre d_0 et de longueur L (voir figure 1), et contenant un liquide visqueux et incompressible, de viscosité dynamique μ et de masse volumique ρ . Le liquide est surmonté d'air à la pression atmosphérique. En laissant s'écouler le liquide par le tube horizontal, le niveau de celui-ci dans le récipient baisse d'une hauteur $h_0 - h$. L'écoulement dans le tube est supposé permanent (les variations du débit et de la pression dans le temps sont très faibles) et les effets dus aux extrémités du tube sont supposés négligeables.

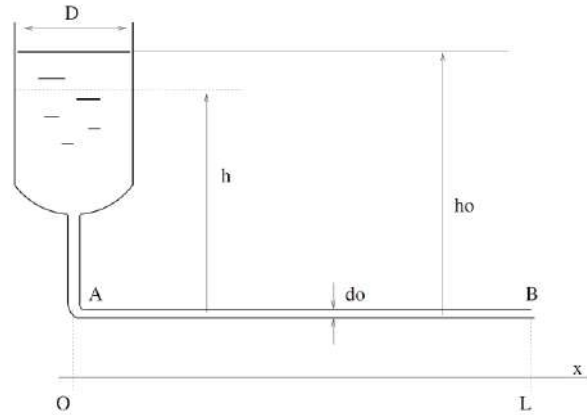


Figure 1 – Viscosimètre

On rappelle que dans l'hypothèse d'un écoulement permanent s'effectuant dans une conduite cylindrique et présentant une symétrie de révolution autour de l'axe de celle-ci, le débit volumique dans la conduite dans la direction \vec{e}_x s'écrit sous la forme :

$$q_v = \frac{\pi d_0^4}{128\mu L} \Delta P$$

En supposant que l'écoulement dans le récipient soit très lent, et que la pression à l'extrémité du tube horizontal diffère très peu de la pression atmosphérique, calculer la différence de pression ΔP en fonction de la hauteur du liquide h (on négligera la cote du liquide dans le tube horizontal devant la hauteur h). Déduire des questions précédentes l'équation différentielle en h régissant la variation de hauteur en fonction du temps t . Intégrer cette équation et montrer que l'expression de h peut se mettre sous la forme :

$$h = h_0 e^{-\frac{\Delta t}{\tau}}$$

où $\Delta t = t - t_0$, t_0 étant l'instant initial, h_0 est la hauteur initiale et τ est la constante de temps du système définie par :

$$\tau = \frac{32D^2\mu L}{\rho g d_0^4}$$

Travail demandé

Questions préliminaires

Des points qui vous aideront dans votre démarche

- Quelle est la dimension de τ ? Comment varie h dans les deux cas limites suivants : τ tend vers l'infini et τ tend vers zéro, quel est le rapport avec les paramètres physiques et géométriques du problème ?
- Pour chaque paire (L, r_0) vérifier que h (niveau d'eau) en fonction du temps suit bien une fonction exponentielle décroissante.
- Vérifier les lois d'échelle $\tau \sim L$ et $\tau \sim \frac{1}{r_0^4}$.
- Vérifier que l'écoulement dans le tube est laminaire, justifier ?

Manipulations

Vous avez à votre disposition :

1. des tubes en verre de longueurs et diamètres différents,
2. un récipient cylindrique,
3. une règle, un pied à coulisse,
4. un chronomètre,
5. des statifs et des supports élévateurs, ...

Protocole expérimental

Il s'agit de faire un montage pour mesurer les temps caractéristiques en fonction de la longueur et du diamètre des tubes.

- Il est possible d'ajouter les tubes un à un avec des joints en caoutchouc pour faire varier la longueur L .
- La règle sert à mesurer le niveau d'eau h dans le récipient.
- Il est plus simple de donner des "tops" à des temps fixes et noter les hauteurs d'eau que l'inverse.
- Tenir compte des erreurs de mesure (Annexes)
- Tracer les courbes h vs t , τ vs L , τ vs $\frac{1}{r_0^4}$, ... et toute autre information nécessaire pour le compte rendu.
- La valeur de viscosité trouvée est-elle acceptable ? Justifier.

TP 2 : Viscosimètre à bille et Rhéométrie

Objectif : Mesurer la viscosité dynamique de différents fluides à l'aide d'un viscosimètre à bille et d'un rhéomètre et les comparer. Tenir bien compte des erreurs de mesure.

Les deux parties peuvent être traitées séparément.

Partie 1 : Viscosimètre à bille

On considère une bille de rayon R_b et de masse volumique ρ_b . On laisse tomber cette bille (sans vitesse initiale) dans un récipient rempli d'un liquide visqueux de masse volumique ρ_l et de viscosité dynamique μ_l . La dynamique de la chute montre qu'après une phase d'accélération, la bille atteint une vitesse constante appelée vitesse limite ou de sédimentation V_∞ . Pendant ce régime stationnaire, l'accélération est nulle et les forces en présence (pesanteur, Archimède et force de frottements du liquide) se compensent.

En régime laminaire, la force de freinage exercée par le liquide sur la bille est proportionnelle à la vitesse et se note :

$$\vec{F}_f = -6\pi\mu_l R_b V_\infty \vec{e}_z$$

Manipulations

Vous étudierez la chute de la bille dans différents fluides :

- eau
- glycérine pure
- 95% glycérine / 5% eau
- 90% glycérine / 10% eau
- 85% glycérine / 15% eau
- huile de tournesol

Vous avez à votre disposition :

1. des récipients cylindriques de différents diamètres et hauteurs
2. des billes de différents matériaux et diamètres
3. une règle et un pied à coulisse
4. une balance de précision Roberval et une balance électronique
5. un chronomètre
6. différents fluides : de l'huile de tournesol, de la glycérine et de l'eau.

Choisir un contenant de diamètre très grand devant le diamètre de la bille pour éviter les effets de bords.

IMPORTANT :

Penser à bien refermer le robinet d'arrêt du bidon de glycérine!!!

Travail demandé

- Etablir un protocole.
- Réaliser l'expérience avec de l'eau. Qu'observe-t-on ?

Questions préliminaires

La vitesse de chute de la bille notée $v(t)$ s'écrit sous la forme

$$v(t) = Ke^{-\frac{t}{\tau}} + \tau(1 - \alpha)g$$

- Retrouver l'expression de $v(t)$ et donner les expressions de τ , α et K en fonction des masses volumiques de la bille ρ_b et du fluide ρ_l , du rayon de la bille R_b , de la vitesse de sédimentation V_∞ et de la viscosité dynamique du fluide μ_l .
- Dans un tableau, calculer τ et V_∞ pour des billes de rayon $R_b = 5\text{mm}$ en verre et en acier en chute libre dans de la glycérine pure. Préciser en justifiant si le régime laminaire est atteint.

Les questions qui suivent concernent **tous les fluides sauf l'eau**.

- Tracer l'évolution de la hauteur de la bille en fonction du temps puis la vitesse de chute en fonction du temps.
- A l'aide de la formule de Stokes, donner la valeur de la viscosité dynamique des fluides utilisés et commenter.
- Tracer la viscosité en fonction du pourcentage de glycérine dans la solution. Qu'observe-t-on ?

Partie 2 : Rhéométrie

Dans cette partie la viscosité dynamique va être déterminée en utilisant le principe d'un rhéomètre de Couette.

La rhéologie est l'étude de la déformation et de l'écoulement de la matière. La caractéristique principale qui traduit le comportement dynamique d'un fluide est sa courbe rhéologique : contrainte de cisaillement $\tau = dF/dS$ en fonction du gradient normal de vitesse $D = dV/dn$ (taux de cisaillement).

On définit la viscosité dynamique apparente μ du fluide par :

$$\mu = \frac{\tau}{D}$$

Précautions particulières

Les instructions spécifiques d'utilisation de chaque rhéomètre sont fournies en séance mais d'une manière générale, il faut savoir que tous ces appareils sont très fragiles et demandent beaucoup de soin. A aucun moment, il ne faut forcer (certains pas de vis sont inversés). Il faut veiller à ne pas heurter les mobiles et les vases, à bien les laver et les sécher entre chaque manipulation et à la fin de la séance.

Travail demandé

Pour chaque fluide, le mode opératoire est le même : on impose la vitesse de rotation N (tr/min) (et donc le taux de cisaillement D) et on relève la contrainte τ et /ou la viscosité dynamique μ .

- A l'aide du rhéomètre de votre choix et de la notice correspondante, mesurer la viscosité dynamique de l'huile de tournesol, de l'eau et de la glycérine pure. Pour chaque fluide, imposer trois vitesses de rotations N différentes et relever également la température de l'échantillon. Préciser la température ambiante. Dans un graphe, tracer la viscosité dynamique en fonction de la vitesse de rotation de chaque fluide. Commenter les courbes.

Principe de fonctionnement des rhéomètres de Couette à cylindres coaxiaux.

Un vase immobilisé en rotation, contient le liquide dont on veut mesurer la viscosité. Un mobile M, entraîné par un moteur électrique à vitesse **constante**, tourne au sein du liquide. Le stator S, solidaire d'un capteur mesurant une déviation angulaire (symbolisée ici par une aiguille A), est relié au bâti par un ressort de torsion B. Dans les modèles utilisés pour le TP, plusieurs vitesses de rotation peuvent être sélectionnées. Lors de la rotation du moteur à une de ces vitesses, le stator est en équilibre, d'une part sous l'action du couple de frottement appliqué par le liquide sur le mobile M, d'autre part sous l'action du couple de torsion du ressort B. Ce couple est mesuré par la déviation angulaire (aiguille A). La relation entre la déviation angulaire du ressort et le couple est donnée par un étalonnage réalisé par le constructeur de l'appareil. A partir du couple exercé et de la géométrie du système de mesure (vase et mobile), on déduit la contrainte de cisaillement τ et ainsi la valeur du coefficient de viscosité dynamique μ . Le gradient normal de vitesse D a été préalablement calculée en fonction de la vitesse de rotation choisie et de la géométrie du mobile. Le lien entre la géométrie, la vitesse de rotation et D est à faire dans les questions préliminaires.

Spécifications techniques des différents rhéomètres disponibles

Nous disposons de trois viscosimètres : un rhéomètre RVDVII+ (S18) de Brookfield, un rhéomètre Myr VR3000 (TL5) de Viscotech et un rhéomètre RM 100 de Lamy équipé de deux systèmes de mesure D11 ou D33 (vase + mobile).

Les caractéristiques correspondant aux quatre systèmes de mesure sont données dans le tableau 1. La contrainte minimale détectable de façon fiable est fixée à environ 10% de la valeur maximale. En deçà, la déviation du ressort est trop faible pour donner une mesure reproductible.

On peut montrer qu'il existe une relation simple entre la vitesse de rotation N en Tr/min et le taux de cisaillement moyen dans l'entrefer D , telle que $D = \alpha N$ avec α une constante géométrique fournie par le constructeur. Celle-ci est donnée dans le tableau 1.

Système	RVDVII+ / S18	VR3000 / TL5	RM 100 / D11	RM 100 / D33
R_2 (mm)	9.5	9.5	16.25	7.5
R_1 (mm)	8.75	8.75	15	7.0
$e = R_2 - R_1$ (mm)	0.9	0.9	1.25	0.5
l (mm)	32	32	36.5	21.5
nbre de vitesses	18	21	34	34
plage de N (Tr/min)	0.3 - 100	0.1 - 200	0.3 - 1500	0.3 - 1500
plage de D (s^{-1})	0.396-132	0.132 - 264	0.387 - 1936	0.387 - 1936
$\tau_{pl.ech}$ (Pa)	42.24	3.96	387	1625
α (min/s/Tr)	1.32	1.32	1.29	1.29

TABLE 1 – Caractéristiques géométriques et valeurs de contraintes maximales des systèmes de mesure

Annexe A : Guide de rédaction des compte-rendus de TP

Le compte-rendu a pour objectif de synthétiser des expériences, développements théoriques ou expérimentaux qui ont été menés par une ou plusieurs personnes. Il peut être destiné par exemple à constituer un document exploitable par des collaborateurs dans le cadre d'un projet ou encore à permettre l'évaluation d'un étudiant dans sa compréhension d'un phénomène physique. Dans tous les cas, le compte-rendu doit être clair et concis et pour cela le fond et la forme du document doivent être de qualité.

Le fond

Tout d'abord, l'introduction doit présenter le contexte de l'expérience (cadre général, intérêt) ainsi que les objectifs des mesures. Il ne s'agit pas de recopier l'introduction de l'énoncé. Les éléments du travail expérimental doivent également être exposés, c'est-à-dire le système "physique" (éprouvette, structure, ...), les moyens de mesure (capteurs, montages et méthodes) et les modèles théoriques éventuellement impliqués.

Les résultats doivent ensuite être présentés avec clarté. Les unités ne doivent surtout pas être oubliées. Le nombre de chiffres significatifs doit être pertinent et en rapport avec l'incertitude du résultat. L'incertitude et l'erreur relative doivent également être calculées (annexe). Les résultats doivent ensuite être présentés sous forme de tableaux et/ou de courbes donnant toutes les indications requises (titres, unités, barres d'erreur, ...). L'interprétation et le commentaire constituent le résultat de l'expérience et ne doivent absolument pas être négligés. Enfin, une conclusion doit être rédigée afin de résumer les points positifs et les points négatifs du travail, de souligner un résultat très intéressant ou encore donner des perspectives au TP.

La forme

Afin que le message contenu dans le compte-rendu soit compréhensible et exploitable par le lecteur, la forme de sa rédaction est fondamentale. La forme comprend les éléments suivants :

- **La présentation.** Elle doit faciliter la lecture en soignant l'aspect esthétique du document.
- **Des schémas.** Lorsqu'il faut présenter une expérience et le matériel qu'elle utilise, un schéma peut avantageusement illustrer un paragraphe descriptif.
- **Des tableaux et/ou des graphiques.** Ils doivent permettre de faire comprendre rapidement au lecteur l'évolution d'une grandeur et/ou la confrontation pertinente de résultats.
- **L'orthographe et la grammaire irréprochables.** Afin de ne pas déconcentrer le lecteur, un soin particulier doit être apporté à l'orthographe et à la grammaire pour éviter les contresens et faciliter la compréhension du lecteur. Elles sont prises en compte dans la notation.

Pour la rédaction d'un compte rendu de TP répondant à ces critères de forme, l'utilisation d'outils bureautiques est obligatoire. Certains sont payants mais largement utilisés, c'est le cas de la suite Microsoft Office qui intègre le traitement de texte Word et le tableur Excel. Mais il existe des alternatives gratuites et disponibles en ligne qui remplissent les mêmes fonctions : Libre Office, LaTeX, Vous avez des templates sur Sakai. L'apprentissage de ces outils est de la responsabilité des étudiants, mais les enseignants peuvent répondre à vos questions et vous orienter.

Le compte-rendu doit être exposé en un maximum de 4 pages, écrites avec une fonte standard (Times, taille 11), en simple interligne et avec des marges comprises entre 1 et 1.5 cm. Les figures, graphiques et tableaux doivent être intégrés au texte qui les explique. Le fichier doit **obligatoirement** être rendu au format **pdf** afin d'être lu par n'importe quel encadrant.

Annexe B : Le calcul d'incertitude

Le calcul d'incertitude permet d'évaluer correctement les erreurs qui se produisent lors de mesures liées à la vérification d'une relation entre différentes grandeurs physiques. Les instruments de mesure n'étant pas de précision infinie, les mesures faites pendant une expérience ne sont pas exactes. Il faut donc évaluer ces incertitudes pour répondre à la question : "la relation n'est pas vérifiée exactement parce qu'elle est fautive ou parce que les mesures sont incertaines ?" On en déduit des marges d'erreurs, en dehors desquelles la relation sera invalidée. Cela fait partie intégrante de la méthode scientifique

Définitions

Le calcul de l'incertitude sur une grandeur obtenue à partir de grandeurs mesurées dont on peut estimer l'erreur peut être présenté simplement et sans démonstration de la façon suivante : Soit les grandeurs

mesurées a et b , on note Δa et Δb les incertitudes absolues,

Si a est une grandeur mesurée, Δa est l'incertitude absolue (même unité que a) et $\frac{\Delta a}{a}$ est l'incertitude relative (en %).

La calcul de l'erreur e s'effectue très simplement à partir de la relation

$$e = \frac{A - B}{B}$$

où A est la valeur exacte et B la valeur approchée. L'erreur s'exprime donc en %. Ce calcul bien que très simplifié, est très utilisé dans l'ingénierie et la recherche pour déterminer et quantifier simplement une erreur de mesure ou de calcul.

Incertitude sur une somme ou une différence

Si la grandeur c est définie telle que

$$c = a \pm b$$

où a et b sont deux grandeurs mesurées, alors l'incertitude absolue Δc a pour expression

$$\Delta c = \Delta a + \Delta b.$$

L'incertitude absolue de la somme ou de la différence de deux grandeurs est égale à la somme des incertitudes absolues de ces grandeurs.

Incertitude sur un produit ou un rapport

Si la grandeur c est définie telle que

$$c = ab \quad \text{ou} \quad c = \frac{a}{b}$$

alors l'incertitude relative $\frac{\Delta c}{c}$ a pour expression

$$\frac{\Delta c}{c} = \frac{\Delta a}{a} + \frac{\Delta b}{b}.$$

Ainsi, l'incertitude relative sur un produit ou un rapport de deux grandeurs est égale à la somme des incertitudes relatives de ces grandeurs.

Différentielle logarithmique

Si la grandeur c est définie telle que

$$c = a^m b^n$$

le logarithme de cette expression est :

$$\log c = m \log a + n \log b.$$

On en déduit que l'incertitude relative $\frac{\Delta c}{c}$ a pour expression

$$\frac{\Delta c}{c} = |m| \frac{\Delta a}{a} + |n| \frac{\Delta b}{b}.$$