

Viscosimètre de Couette et écoulement de Poiseuille : deux expériences d'introduction à la viscosité

par M. FERMIGIER

Laboratoire PMMH - ESPCI

10, rue Vauquelin - 75231 Paris Cedex 05

P. JENFFER

Physique PCEM M2D

Bâtiment 336 - Université Paris sud - 91405 Orsay

et V. JEUDY

Palais de la Découverte

avenue Franklin D. Roosevelt - 75008 Paris

INTRODUCTION

Le saut en parachute, la circulation de gaz ou d'eau dans une conduite, la sédimentation... nombreuses sont les expériences quotidiennes où intervient le phénomène de viscosité.

Dans ses Principia, Newton discute de l'affaiblissement progressif de l'amplitude d'oscillation de pendules de torsion placés dans divers liquides. Son analyse le conduit à exprimer la résistance opposée au déplacement d'un corps en fonction de sa vitesse et à montrer l'influence de la masse volumique du liquide. Au cours du XVIII^e siècle, des scientifiques et des ingénieurs, comme B. Foreste de Belidor, attribuent le désaccord entre les prédictions théoriques et les mesures des vitesses d'écoulements dans des conduites au fait qu'on ne sache pas tenir compte des frottements entre les particules des fluides et contre les parois qui guident l'écoulement. C'est au siècle suivant que J. Weisbach écrit l'équation de la perte de charge sous sa forme définitive et que Sir G. G. Stokes introduit le coefficient de viscosité dynamique.

Nous proposons, dans cet article, deux expériences qui présentent la notion de viscosité. La première utilise un appareil à cylindres coaxiaux appelé «viscosimètre de Couette», du nom de son inventeur. Elle permet d'introduire les viscosités dynamique et cinématique et de

comparer la viscosité de deux fluides : l'air et l'eau. Une illustration de l'effet de la viscosité sur l'écoulement des liquides dans les capillaires est fournie par un écoulement dans un tube de faible diamètre (écoulement de Poiseuille, du nom du médecin français qui découvrit expérimentalement la loi d'écoulement dans les tubes, au milieu du XIX^e siècle). Cette expérience permet d'aborder les notions de perte de charge et de montrer l'influence de la section du capillaire sur le débit d'un liquide.

Ces deux expériences ont été utilisées pendant des séances de travaux pratiques et en démonstration pendant des cours, pour des étudiants de première année de PCEM et de DEUG SNV. Elles ont également servi à des démonstrations pour les visiteurs du Palais de la Découverte. Les calculs des expressions utilisés dans l'article sont rappelés dans l'annexe «théorique».

1. ASPECTS MACROSCOPIQUES DE LA VISCOSITÉ

Enfermons un liquide entre deux plaques infinies, parallèles et distantes de h et déplaçons la plaque supérieure à la vitesse constante V (régime stationnaire). La force de cisaillement qui s'exerce sur la plaque inférieure, ramenée à l'unité de surface en contact avec le liquide (F/S) est proportionnelle à V/h , soit :

$$\frac{F}{S} = \eta \frac{V}{h}$$

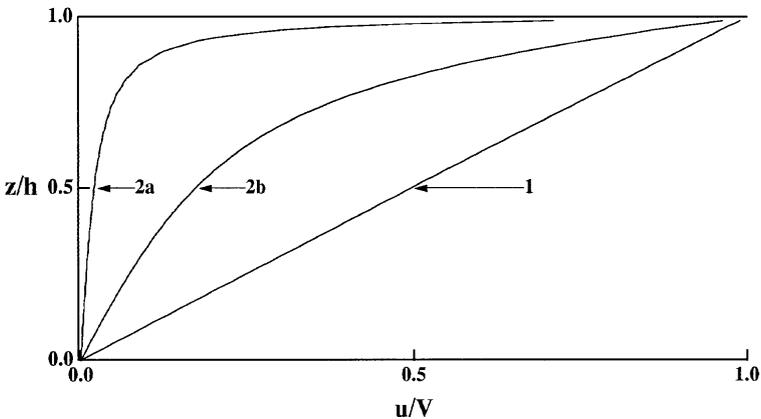


Figure 1 : Profil des vitesses d'écoulement (1) en régime permanent, (2a) en régime transitoire à un instant t donné et (2b) à un instant ultérieur. u est la vitesse d'écoulement à l'altitude h .

Le coefficient de proportionnalité η est appelé *viscosité dynamique* du fluide. F/S est la *contrainte de cisaillement* et a la dimension d'une pression. V/h est le gradient de vitesse présent dans l'écoulement. La viscosité dynamique η a la dimension du produit d'une pression par un temps. Dans le Système International de mesures, elle s'exprime en Poiseuille (1 Poiseuille = 1 Pa s = 1 kg m⁻¹ s).

Comme le montre la figure 1, les couches de fluide au voisinage immédiat de la paroi solide sont mises en mouvement. Cet effet est dû à l'échange de quantité de mouvement entre le solide et le fluide. Dans tous les fluides visqueux, il n'y a pas de mouvement relatif à une interface entre un solide et fluide visqueux. Les couches de fluide de plus en plus éloignées de la paroi sont mises progressivement en mouvement.

Si la vitesse u varie au cours du temps, il faut tenir compte de la masse à entraîner. L'équation du mouvement du fluide :

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\eta}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \nu \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}$$

est obtenue en appliquant la relation fondamentale de la dynamique à un volume élémentaire de fluide (annexe). Le coefficient $\nu = \eta/\rho$ s'appelle la *viscosité cinématique* et tient compte de la densité ρ du fluide.

Le profil des vitesses dépend des conditions aux limites. En régime permanent, la vitesse d'écoulement est une fonction linéaire de la distance à la plaque en mouvement (figure 1, courbe 1). En régime transitoire, le profil des vitesses a une forme indiquée sur la figure 1 (courbes 2a et 2b).

2. VISCOSIMÈTRE DE COUETTE

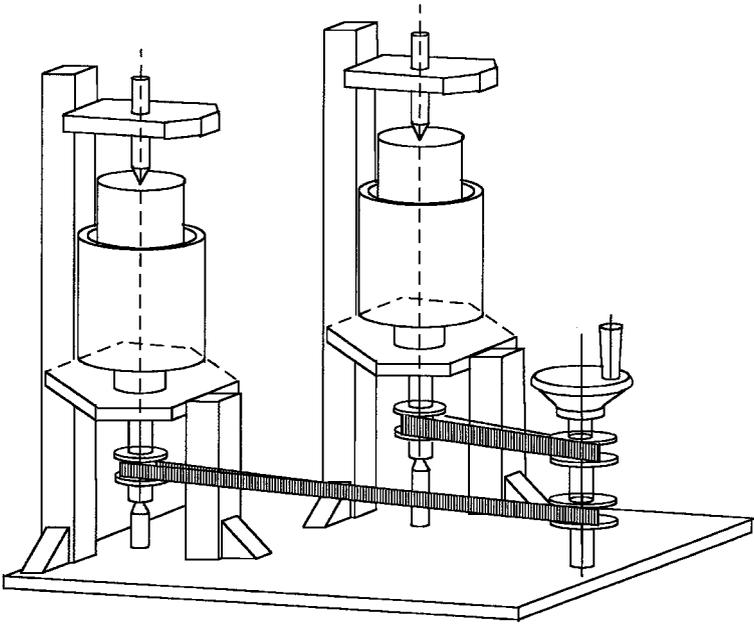


Figure 2 : Viscosimètre de Couette le dispositif est constitué de deux éléments identiques. Les cylindres extérieurs sont mis en rotation à une vitesse imposée par l'intermédiaire d'un ensemble poulies, courroies, crantées actionnées par une manivelle. Ils induisent par l'intermédiaire du fluide placé entre les cylindres la rotation des cylindres intérieurs.

La mesure de viscosité s'effectue dans une géométrie circulaire, à l'aide du viscosimètre développé par M. Couette. Celui-ci est composé de deux cylindres coaxiaux de rayons légèrement différents entre lesquels est confiné un fluide. Le cylindre externe est entraîné par l'intermédiaire d'une manivelle. La rotation du cylindre interne est libre. Si un couple résistant constant s'exerce sur le cylindre interne, en régime permanent, la différence de vitesse de rotation des deux cylindres est proportionnelle à la viscosité dynamique du fluide.

Ce type d'écoulement entre deux cylindres coaxiaux de diamètres proches est utilisé couramment pour la mesure des viscosités. La réalisation d'un viscosimètre de Couette est très délicate mécaniquement : il faut assurer une parfaite concentricité des deux cylindres et éliminer les frottements au maximum. Il faut également apporter des

corrections empiriques aux expressions données dans l'annexe théorique, pour tenir compte des effets de l'écoulement à l'extrémité des cylindres. Les appareils les plus sophistiqués peuvent travailler à vitesse de rotation imposée ou à contrainte imposée.

D'un point de vue qualitatif, c'est donc à travers la vitesse de rotation du cylindre interne que la viscosité du fluide est appréciée. Le viscosimètre de Couette montre que le frottement visqueux permet, à lui seul, d'entraîner la rotation du cylindre interne. Dans le cas où le fluide est de l'air, cet effet d'entraînement est frappant, pour certains élèves et visiteurs. Ils ont tendance à assimiler l'air à du vide et, par conséquent à lui attribuer une viscosité nulle.

La comparaison entre les viscosités dynamiques de l'eau et de l'air est effectuée en animant le cylindre externe d'une vitesse constante. La viscosité dynamique de l'eau étant environ cinquante fois plus grande que celle de l'air :

$$\left[\eta(\text{air}) = 1,8 \cdot 10^{-5} \text{ Poiseuille}, \eta(\text{eau}) = 10^{-3} \text{ Poiseuille} \right]$$

le cylindre intérieur tourne plus vite lorsque l'interstice est rempli par de l'eau.

En régime accéléré, c'est le contraire qui se produit : le cylindre intérieur est plus rapidement entraîné avec l'air qu'avec l'eau. La viscosité cinématique de l'air est, paradoxalement, environ quinze fois plus grande que celle de l'eau :

$$\left[\nu(\text{air}) = 1,5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}, \nu(\text{eau}) = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} \right]$$

Cet effet permet de souligner le rôle de la masse volumique dans la notion de la viscosité cinématique. La différence des viscosités cinématiques est parfois plus facilement appréciable lorsqu'après le régime stationnaire, le cylindre externe est arrêté brutalement : le temps d'amortissement du cylindre interne est plus court avec l'air qu'avec l'eau.

3. ÉCOULEMENT DE POISEUILLE

L'écoulement dans un tube de section circulaire est évidemment très fréquemment utilisé pour l'acheminement des fluides, que ce soit pour les tuyaux de chauffage central ou bien pour la circulation

sanguine. Ainsi, l'écoulement de Poiseuille constitue une conséquence directe du frottement liquide.

Le dispositif présenté est composé de trois tubes horizontaux, de longueur et de section différente, alimentés par une cuve à niveau constant remplie d'eau colorée. L'eau est récupérée par trois récipients de section et de hauteur identique.

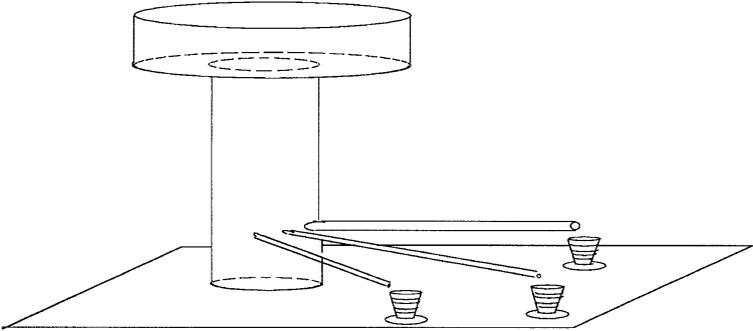


Figure 3 : Écoulement de Poiseuille. Le dispositif est composé de trois tubes dont deux sont de même section mais le longueur différente, le troisième a la même longueur qu'un des deux précédents mais est de section double.

La vitesse d'écoulement au contact d'une paroi solide est nulle. La vitesse du fluide va augmenter progressivement depuis la paroi vers le centre du tube. Les calculs développés dans l'annexe théorique montrent que le profil de vitesse suit une loi parabolique :

$$u_x = \frac{\Delta p}{\eta L} \left(\frac{r^2 - R^2}{4} \right)$$

où u_x est la vitesse d'écoulement à une distance r de l'axe du tube, R et L sont respectivement le rayon et la longueur du tube, Δp est la différence de pression entre l'entrée et la sortie du tube débit, et η la viscosité dynamique du liquide. La vitesse d'écoulement est nulle au contact de la paroi ($r = R$). Elle atteint sa valeur maximale suivant l'axe du tube ($r = 0$). Le calcul du débit aboutit à la «loi de Poiseuille» :

$$Q = \frac{\pi R^4}{8\eta} \frac{\Delta p}{L}$$

Cette loi montre que le débit est proportionnel au gradient de pression $\Delta p/L$ et inversement proportionnel à la viscosité dynamique du fluide. Il dépend très fortement du diamètre du tube. La dépendance en puissance quatrième du diamètre est une conséquence du profil de vitesse parabolique qui est lui-même une conséquence de la condition de non glissement sur la paroi du tube.

La présentation de cette expérience s'effectue en deux temps. Tout d'abord, l'utilisation simultanée des deux tubes de même rayon mais de longueur différente permet d'aborder la notion de perte de charge. Comme le montre l'équation précédente, le débit est inversement proportionnel à la longueur du tube. Ce phénomène est directement appréciable en comparant le remplissage de deux récipients de même forme. La perte de charge s'observe de la même manière dans les conducteurs électriques pour lesquels la résistance au passage du courant est proportionnelle à la longueur du fil utilisé.

L'utilisation simultanée de tube de même longueur et de section différente permet d'observer la dépendance en puissance quatrième du rayon du débit. Ce comportement est spécifique à l'écoulement des fluides. En effet, une situation physique très différente est le transport des électrons dans un conducteur électrique : la vitesse moyenne des électrons est la même dans toute la section du conducteur ; pour une différence de potentiel donné, le courant circulant dans un conducteur est proportionnel à sa section (πR^2).

CONCLUSION

Ces deux expériences constituent une introduction visuelle directe de la notion de viscosité, trop souvent abordée de manière abstraite. En ce sens, elles conviennent aux visiteurs de musées comme aux élèves et aux étudiants. Pour ces derniers, une approche plus quantitative peut être proposée. Dans le cas du viscosimètre de Couette, d'autres fluides beaucoup plus visqueux, comme le glycérol, peuvent être placés dans l'interstice. La viscosité relative de chacun des fluides est mesurée par l'intermédiaire de la différence des vitesses de rotation des deux cylindres. Dans le cas de l'écoulement de Poiseuille, la variation de débit avec la longueur et la section des capillaires est directement déduite de la quantité de fluide écoulé.

BIBLIOGRAPHIE

- M. CARLIER : «*Hydraulique générale et appliquée*», Eyrolles 1972.
- E. GUYON, J.-P. HULIN et L. PETIT : «*Hydrodynamique physique*», InterEditions/CNRS, 1994.
- H. MARKOVITZ : «*The emergence of rheology*», Physics Today 21, 23, 1968.
- G. MARTEAU, P. JENFFER et E. GUYON : «*Mesure d'une viscosité, loi de Poiseuille, loi de Darcy*», B.U.P. n° 769 (1994).

Annexe théorique

VISCOSITÉ DYNAMIQUE ET VISCOSITÉ CINÉMATIQUE

Quel est l'effet des contraintes de cisaillement sur un élément de volume fluide parallélépipédique d'épaisseur dz et d'aire dS dans le plan xy parallèle à la plaque en mouvement ?

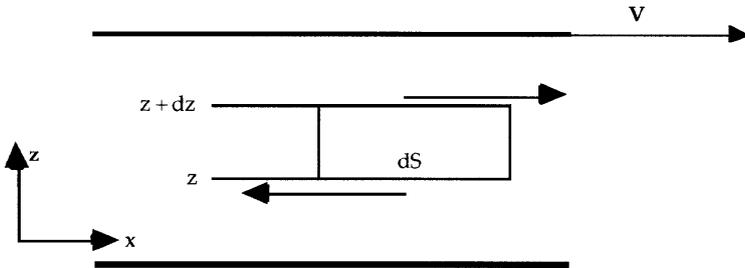


Figure 4

La force horizontale exercée sur la face supérieure est :

$$\eta \left[\frac{\partial u}{\partial z} \right]_{z+dz} dS$$

et la force sur la face inférieure est :

$$- \eta \left[\frac{\partial u}{\partial z} \right]_z dS$$

La résultante de ces deux forces est égale à la variation temporelle de quantité de mouvement de l'élément de fluide :

$$\rho dz dS \frac{\partial u}{\partial t}$$

où ρ est la masse volumique du fluide. La relation fondamentale de la dynamique conduit donc à l'équation suivante :

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\eta}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \nu \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}$$

où ν est la *viscosité cinématique* du fluide, définie comme le rapport entre la viscosité dynamique et la masse volumique. L'équation ci-dessus est une *équation de diffusion* de la quantité de mouvement.

ÉCOULEMENT DE COUETTE

Un autre écoulement simple est celui réalisé dans l'espace compris entre deux cylindres coaxiaux animés d'une vitesse de rotation constante dans le temps.

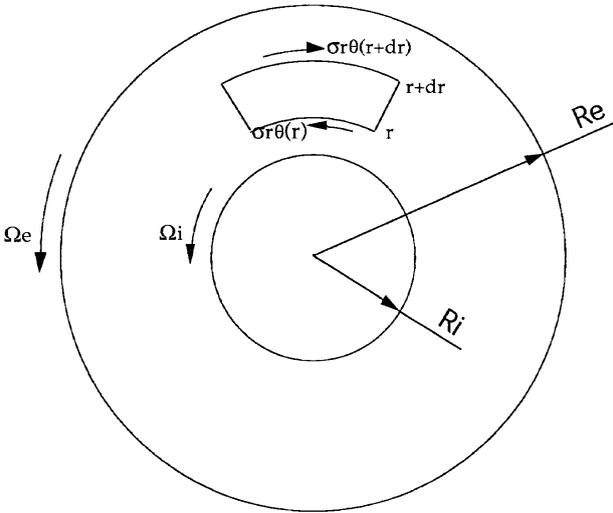


Figure 5

Le cylindre extérieur (resp. intérieur) a un rayon R_e (resp. R_i) et il est entraîné à la vitesse angulaire Ω_e (resp. Ω_i). Nous supposons que les cylindres sont suffisamment longs (dans la direction axiale) pour que les effets dus aux extrémités soient négligeables et pour qu'il n'y ait pas de composante axiale de la vitesse (le problème, tridimensionnel dans la réalité, est ramené à un problème plan). Si l'écoulement reste stable, nous pouvons supposer que le champ de vitesse conserve la symétrie cylindrique : la vitesse est indépendante de la coordonnée azimutale θ . La condition d'incompressibilité impose alors que la composante radiale de la vitesse soit nulle. Considérons en effet un élément de volume délimité par les rayons θ et $\theta + d\theta$ et par les cercles

r et $r+dr$. Le volume net de fluide qui entre dans cet élément de volume est :

$$u_r(r) r d\theta - u_r(r + dr) (r + dr) d\theta + u_\theta(\theta) dr - u_\theta(\theta + d\theta) dr$$

Lorsque le fluide est incompressible, cet accroissement de volume est nul, ce qui conduit à :

$$\frac{\partial(r u_r)}{\partial r} + \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} = 0$$

Le champ de vitesse étant indépendant de θ pour une raison de symétrie, l'équation ci-avant conduit à : $u_r = C/r$. Sur les parois solides en $r = R_e$ et $r = R_i$ la vitesse radiale est nulle (le fluide ne peut traverser ces parois), elle est donc nulle dans tout l'écoulement. Nous pouvons maintenant écrire l'équilibre des forces qui s'exercent sur l'élément de volume que nous avons considéré ci-avant. Si l'écoulement reste stable, nous pouvons supposer que chaque élément de fluide se déplace avec une vitesse tangentielle constante sur une trajectoire circulaire. Un tel élément a une accélération centripète égale à u_θ^2/r . Dans la direction radiale, le gradient de pression équilibre cette accélération centripète. Écrivons la résultante des forces sur l'élément de volume projetée sur la direction radiale :

$$- p(r + dr) (r + dr) d\theta + p(r) r d\theta + 2 p(r) dr d\theta/2 = - \rho (u_\theta^2/r) r dr d\theta$$

Les deux premiers termes du membre de gauche proviennent de la pression exercée sur les faces cylindriques en r et $r + dr$. Le troisième terme provient de la pression exercée sur les faces radiales en θ et $\theta + d\theta$. D'où :

$$\frac{\partial p}{\partial r} = \rho \frac{u_\theta^2}{r}$$

Dans la direction tangentielle, écrivons le couple résultant de l'action des contraintes tangentielles $\sigma_{r\theta}$, couple qui est nul puisque l'élément de volume se déplace à vitesse angulaire constante (notons que la pression est indépendante de θ , elle n'apparaît donc pas dans l'équation ci-après) :

$$- \rho_{r\theta}(r + dr) (r + dr)^2 d\theta + \sigma_{r\theta}(r) r^2 d\theta = 0$$

soit :

$$\frac{\partial(r^2\sigma_{r\theta})}{\partial r} = 0$$

Soit,

$$\sigma_{r\theta} = C/r^2$$

La contrainte tangentielle est proportionnelle à la vitesse de déformation :

$$\sigma_{r\theta} = \eta \left(\frac{\partial u_\theta}{\partial r} - \frac{u_\theta}{r} \right) = \eta r \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{u_\theta}{r} \right)$$

Il faut soustraire $\frac{u_\theta}{r}$ au gradient de vitesse pour tenir compte du fait qu'une rotation en bloc (rotation solide avec $u_\theta = \omega r$) ne provoque pas de déformation. L'intégration de l'équation de mouvement donne :

$$u_\theta = A/r + B r$$

les constantes d'intégration A et B étant déterminées par les conditions aux limites sur les parois : $u_\theta(R_i) = \Omega_i R_i$ et $u_\theta(R_e) = \Omega_e R_e$:

$$u_\theta = \frac{(\Omega_i - \Omega_e) R_i^2 R_e^2}{R_e^2 - R_i^2} \frac{1}{r} + \frac{\Omega_e R_e^2 - \Omega_i R_i^2}{R_e^2 - R_i^2} r$$

La contrainte tangentielle sur le cylindre extérieur est donc :

$$\rho_{r\theta}(R_e) = 2\eta \frac{(\Omega_e - \Omega_i) R_i^2}{R_e^2 - R_i^2}$$

et le couple induit par cette contrainte est :

$$\Gamma = 4\pi \eta \frac{(\Omega_e - \Omega_i) R_i^2 R_e^2}{(R_e^2 - R_i^2)}$$

Ce couple est proportionnel à la viscosité dynamique du fluide et à la différence de vitesse de rotation des deux cylindres. Dans le cas où le rayon des deux cylindres est très grand devant leur séparation : ($R_e - R_i = h \ll R_i$), on retrouve un écoulement identique à celui observé entre deux plaques planes parallèles, c'est-à-dire un profil de vitesse linéaire. Lorsque le cylindre extérieur est seul en mouvement

($\Omega_i = 0$), le couple exercé sur le cylindre extérieur devient alors $\Gamma = 2\pi \eta \frac{\Omega R^3}{h}$, où $\Omega = \Omega_e$ et $R_e \approx R_i \approx R$.

ÉCOULEMENT DE POISEUILLE

Considérons la géométrie idéale d'un tube rectiligne, de rayon R , dont la longueur L est très grande devant le rayon.

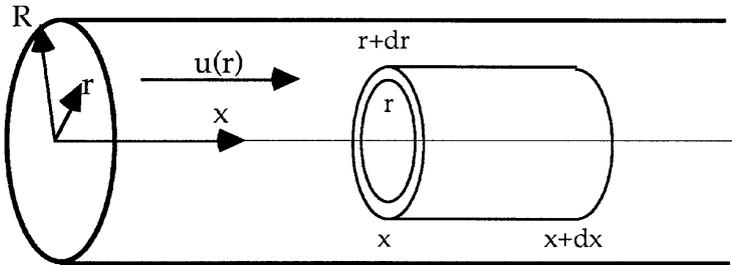


Figure 6 : Écoulement suivant l'axe d'un cylindre.

La condition $L \gg R$ permet de négliger les perturbations introduites par les extrémités du tube et de raisonner comme si le tube était de longueur infinie. Choisissons des coordonnées cylindriques : x le long de l'axe du tube, r est la coordonnée radiale et θ l'angle azimutal. La symétrie du problème suggère de chercher un champ de vitesse qui soit indépendant de θ et qui soit orienté suivant l'axe du tube, soit un champ de vitesse *unidimensionnel* : $u_\theta = 0$, $u_r = 0$, $u = u_x(x, r)$.

Si le fluide est incompressible, la condition de conservation de la masse s'écrit : $\text{div } \mathbf{u} = 0$. Dans le cas présent, une seule composante de la vitesse est non nulle et cette condition devient :

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} = 0$$

Le champ de vitesse ne dépend donc que de la coordonnée radiale r . Les contraintes de cisaillement sont proportionnelles au gradient de vitesse ; elles sont donc aussi indépendantes de la coordonnée axiale x .

Dans un fluide visqueux, la présence de la paroi solide impose que la vitesse s'annule sur cette paroi, soit $u(R) = 0$. La répartition radiale

de vitesse est obtenue en écrivant l'équilibre des forces sur un élément de volume annulaire. Cet élément de volume, représenté sur la figure 7 est délimité par les cylindres de rayon r et $r + dr$ et par les plans d'abscisse x et $x + dx$.

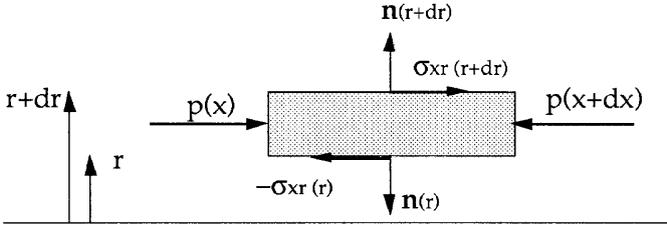


Figure 7

Les forces qui s'exercent sur cet élément de volume, suivant l'axe du tube, sont :

– la pression sur les faces perpendiculaires à l'axe :

$$p(x,r) 2\pi r dr - p(x + dx,r) 2\pi r dr = -\frac{\partial p}{\partial x} 2\pi r dr dx$$

– les contraintes de cisaillement σ_{rx} sur les surfaces cylindriques :

$$\sigma_{rx}(r + dr) 2\pi(r + dr) dx - \sigma_{rx}(r) 2\pi r dx = 2\pi \frac{\partial(r\sigma_{rx})}{\partial r} dr dx$$

Nous cherchons ici une solution indépendante du temps. Si la vitesse d'un élément de fluide est constante, la résultante des forces est nulle, soit :

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{1}{r} \frac{\partial (r \sigma_{rx})}{\partial r}$$

La contrainte de cisaillement est reliée au gradient de vitesse par :

$$\sigma_{rx} = \eta \frac{\partial u_x}{\partial r}$$

L'équation précédente devient donc :

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\eta}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u_x}{\partial r} \right)$$

Examinons maintenant la résultante des forces s'exerçant sur un élément de fluide dans la direction radiale. Prenons le même élément de volume que ci-avant, mais limité par les angles polaires θ et $\theta + d\theta$.

Si la pression ne dépend que de x et la vitesse ne dépend que de r , les deux membres de l'équation précédente sont nécessairement égaux à une constante G qui est le gradient de pression moyen le long de l'écoulement : $G = \Delta p/L$. L'équation s'intègre une première fois en :

$$\frac{\partial u_x}{\partial r} = \frac{Gr}{2\eta} + \frac{A}{r}$$

où A est une constante d'intégration. Pour assurer la continuité du gradient de vitesse (et donc, des contraintes) sur l'axe du tube, il faut imposer $A = 0$. Une seconde intégration conduit à :

$$u_x = \frac{G}{\eta} \left(\frac{r^2 - R^2}{4} \right)$$

en tenant compte de la condition aux limites $u_x(R) = 0$. Le profil de vitesse est parabolique, avec une vitesse maximale sur l'axe égale à :

$$- \frac{GR^2}{4\eta}$$

Notons que, si le gradient de pression est négatif, la vitesse est positive ; l'écoulement se fait bien de la région de forte pression vers la région de faible pression. Le débit de fluide à travers le tube est donné par l'intégration du profil de vitesse :

$$Q = \int_0^R u_x 2\pi r dr = - \frac{\pi R^4 G}{8\eta}$$

Annexe technique

Les critères qui ont déterminé le dimensionnement des deux montages présentés ci-après, sont ceux établis par l'utilisation qui leur est réservée :

- **L'aspect muséologie** : le Palais de la Découverte s'en sert sous la forme d'un mini-stand itinérant présenté par un chargé d'exposés ;
- **L'aspect démonstration de cours** : utilisation qui en est faite auprès des étudiants universitaires et lors de stages de formations de collègues enseignants du secondaire ;
- **L'aspect prototype** : étude, conception de projets en hydrodynamique (étudiants de DEUG, en option expérimentale).

Les principaux critères retenus sont les suivants : le temps de démonstration des expériences, leur présentation (esthétique), leur visibilité, leur compréhension, leur interprétation, les quantités des fluides utilisés ainsi que leurs caractères physiques (viscosité, densité, tension interfaciale, miscibilité, toxicité, etc.), leur mise en place facile et rapide, leur fiabilité, leur robustesse.

Dans les descriptions qui sont données par la suite, il ne s'agit que de schémas de principe dans lesquels nous tentons de fournir le maximum d'informations. Il n'est pas possible dans le cadre de cette revue de donner tous les détails du montage, ni les dessins de définitions. Dans le cas où vous seriez intéressés par de plus amples détails, les auteurs de cet article restent à votre entière disposition.

VISCOSIMÈTRE DE COUETTE

La réalisation d'un viscosimètre de Couette est mécaniquement très délicate. La coaxialité des cylindres doit être parfaite, la friction entre cylindres doit être réduite au maximum. L'utilisation du montage doit être fiable. Cette fiabilité dépendra de la construction qui devra être à la fois rigide, stable, précise et légère. Nous avons résolu en grande partie ces problèmes en nous inspirant d'une machine outil : le tour parallèle placé en configuration verticale. D'autre part, nous avons employé des matériaux de construction adaptés : il s'agit essentielle-

DESCRIPTION

La partie rigide

«Le bâti» (dans un tour parallèle il s'agit du banc) est constitué par un profilé d'aluminium anodisé (1) servant de référentiel, de section carrée de 25 mm possédant quatre rainures en forme de té ; sa longueur est de 400 mm. De deux flasques de forme hexagonale (2 et 3) ; il s'agit de plaques de dural d'épaisseur 15 mm dont la côte sur plat est de 200 mm, situées perpendiculairement au profilé d'aluminium (1) et entretoisés par les mêmes profilés d'aluminium anodisé (4 et 5) identiques à la pièce (1) (leur longueur est de 400 mm). L'ensemble est maintenu de façon très rigide par des équerres (6).

Le système de mise en rotation

Dans le but d'atteindre cette sensation du touché, nous avons choisi un système poulies-courroies déjà décrit précédemment. Un axe-plateau (11) en laiton emmanché gras dans un roulement à billes (non représenté sur le schéma), logé en force dans le flasque (2) constitue le support de mise en rotation. Pour éviter les efforts orthogonaux (le cintrage par exemple) dus à la tension des courroies, nous avons placé un point de centrage. On peut utiliser une pointe ou une butée à billes (13) qui sera sertie dans le flasque semelle (3), (lui même fixé sur la planche support). Le flasque semelle (3) sera réglable horizontalement pour ajuster la tension de la courroie.

Le cylindre extérieur (10)

«Celui que l'on met manuellement en rotation» est un tube de Plexiglas entièrement usiné par nos soins, (les tubes de Plexiglas du commerce ne sont jamais concentriques) ses dimensions sont pour le diamètre extérieur de 70 mm, le diamètre intérieur de 60 mm et la hauteur de 150 mm, pour faciliter l'usinage, il est nécessaire de conserver une paroi relativement épaisse. Le fond (14) en Plexiglas dans lequel on a alésé de façon très précise un trou borgne de 10 mm de diamètre et de 15 mm en profondeur (toute la coaxialité dépend de cet usinage) est collé avec le tube. L'alésage recevra l'axe (17) réalisé en laiton. Le cylindre extérieur sert de réservoir au fluide (eau, huile ou air), il est positionné sur l'axe plateau (11), par l'intermédiaire de trois vis (12), facilement démontables. On peut lors d'un transport le vider de son contenu. Il est primordiale de prévoir un centrage parfait pour faciliter le remontage.

Le cylindre intérieur (15)

Il doit se mettre en rotation sous l'effet de la dissipation visqueuse ; il est en dural peint (la peinture facilite l'observation de la mise en rotation). Son diamètre extérieur est d'environ quatre millimètres inférieur à celui du diamètre intérieur du cylindre extérieur (10) ; sa hauteur est de 200 mm, il est partiellement évidé (gain de poids), et est positionné sur l'axe (17) libre en rotation grâce aux roulements à billes (18 et 19) ; il sert de centreur par l'intermédiaire de la pièce (16), qui se déplace verticalement tout en gardant rigoureusement son orientation par rapport au banc (pièce 1). Ce système correspond à un montage classique entre pointes quelque peu modifié. L'axe XX est rigoureusement parallèle au banc (pièce 1). L'utilisation de profilés d'aluminium anodisé nous permet d'utiliser les rainures en forme de té dont les dimensions sont précises (la différence de côte sur un profilé de 3 m de long est inférieure à 0,1 mm.)

ÉCOULEMENT DE POISEUILLE

Nous décrivons le montage tel qu'il est présenté aux étudiants d'université ainsi qu'aux visiteurs du Palais de la Découverte. La réalisation mécanique de ce montage ne présente aucune difficulté particulière, mais nécessite l'emploi de machines outils. Un montage pratiquement équivalent, utilisé dans le cadre de notre enseignement universitaire est décrit dans l'article cité en référence G. MARTEAU, P. JENFFER et E. GUYON, B.U.P. 1994. Ce montage n'utilise que des produits manufacturés à assembler (l'esthétique s'en ressent).

Dans la partie 3 «Écoulement de Poiseuille», nous montrons un schéma de l'ensemble sans aucun détail.

Dans la figure 9a «vue de profil» nous n'avons représenté qu'un seul capillaire, le montage des deux autres étant identique, seules leurs dispositions représentées sur la figure 9b «vue de dessus» varient. La numérotation des pièces est celle attribuée par le bureau d'étude lors de la conception.

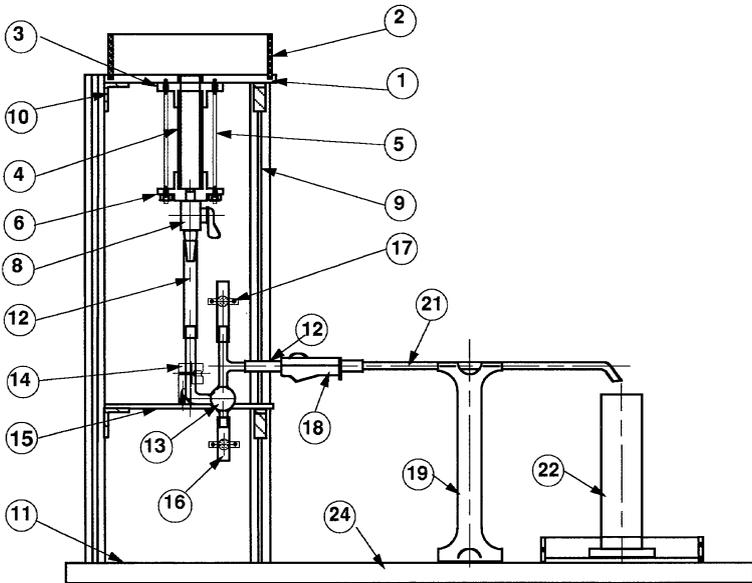


Figure 9a : Poiseuille (schéma de principe) - vue de profil.

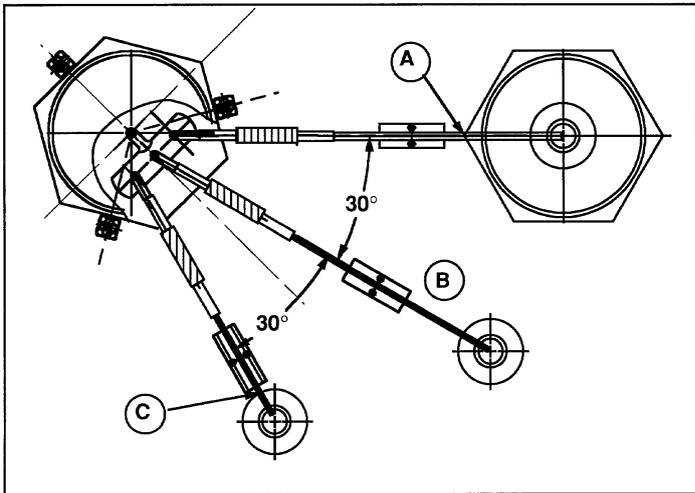


Figure 9b : Poiseuille (schéma de principe) - vue de dessus.

DESCRIPTION

L'ensemble est fixé sur une planche de bois (24) de longueur 800 mm, de largeur 600 mm et d'épaisseur 15 mm. Tous les éléments sont démontables sans utilisation d'outils. Cette expérience tout comme la précédente «Viscosimètre de Couette» fait partie d'un mini-stand itinérant appartenant au Palais de la Découverte.

La réserve d'eau (le château d'eau)

Ensemble des pièces numérotées de 1 à 7 : il s'agit essentiellement de tubes, de planches, de rondins de Plexiglas qui sont usinés puis collés entre eux. Le réservoir est constitué d'un cylindre (2), de diamètre intérieur relativement important (190 mm) dimensionné en fonction des débits imposés, il est préférable de maintenir le plus longtemps possible un niveau constant d'eau. Ce cylindre est collé sur une planche (1) de Plexiglas d'épaisseur 15 mm de forme hexagonale dont la plus grande dimension est de 240 mm, elle est percée en son centre d'un alésage de 24 mm de diamètre. Le réservoir est fermé par une vanne (8), tout ou rien, (son passage doit être supérieur à 6 mm de diamètre), elle est située à l'extrémité inférieure d'un ensemble de pièces rigides qui nous permettent de manœuvrer aisément la vanne. La partie principale de cet ensemble est un tube (4) de diamètre intérieur 24 mm et d'une hauteur de 120 mm comportant à ses extrémités des flasques (3 et 6) entretoisés (5) permettant l'assemblage avec le réservoir.

Le répartiteur fluidique (13) (en verre)

Il est situé en bout de la canalisation et permet de répartir le fluide dans les capillaires de façon homogène ; la figure 9a «vue de dessus» nous montre parfaitement cette distribution. La jonction entre éléments est assurée à l'aide de tuyaux très souples (12), de longueurs différentes, certains de ces tuyaux sont fermés par différents types de pinces ; les pinces (17) permettent l'évacuation des bulles d'air avant l'entrée dans les capillaires, tandis que la pince (16) sert de vidange. Nous trouvons également d'autres pinces (18), de type tout ou rien, utilisées lors des démonstrations. L'utilisation de tuyaux souples nous permet une grande facilité de montage et également de chasser les bulles d'air par de simples pressions. Le répartiteur fluidique est maintenu en position par une bride (14) fixée sur une planche de Plexiglas (15) d'épaisseur 5 mm de dimensions et de forme identiques à la pièce 1 du réservoir. Le réservoir ainsi que le support fluidique sont maintenus en position fixe, après un réglage du dénivelé (environ 300 mm) entre la surface libre

de l'eau colorée et la sortie des capillaires, par de petites équerres (10) coulissantes dans trois profilés (9) de section carrée (25 × 25 mm) et de longueur 600 mm. Les équerres et les profilés sont en aluminium anodisé (produits manufacturés).

Le bâti

Il est constitué de trois profilés (9) déjà mentionnés qui sont fixés sur une planche de dural (11) d'épaisseur 5 mm, de forme identique aux pièces (1 et 15), mais de dimensions légèrement supérieures : c'est l'embase du château d'eau. Lors du démontage de l'expérience, pour raison de transport, le château d'eau forme un ensemble qui sera dissocié de la planche (24) par deux vis moletées.

Les capillaires (21)

Elles sont posés sur des supports (19) fixés sur la planche (24) par des vis moletées, facilement démontables.

Les dimensions des capillaires sont les suivantes :

- *Capillaire A* : diamètre extérieur 9 mm, diamètre intérieur 2,2 mm, longueur 300 mm
- *Capillaire B* : diamètre extérieur 5 mm, diamètre intérieur 1,2 mm, longueur 300 mm ;
- *Capillaire C* : diamètre extérieur 5 mm, diamètre intérieur 1,2 mm, longueur 150 mm.

En sortie des capillaires l'eau colorée se déverse dans trois éprouvettes (22) de même dimension (visualisation qualitative des paramètres) ; des soucoupes sont disposées à leurs embases.