

Construction d'un viscosimètre à chute de bille pour la détermination de la viscosité de liquides visqueux

Objectifs expérimentaux

- Montage d'un viscosimètre à chute de bille.
- Détermination de la viscosité de la glycérine.

Notions de base

Une force de frottement opposée à la direction du mouvement agit sur un corps en déplacement dans un liquide. Sa valeur dépend de la géométrie du corps, de sa vitesse et du frottement interne du liquide. La viscosité dynamique η caractérise le frottement interne. *G. Stokes* calcula comme suit la force de frottement pour une bille de rayon r et de vitesse v dans un liquide infiniment dilaté de viscosité dynamique η

$$F_1 = 6\pi \cdot \eta \cdot v \cdot r \quad (I)$$

Si la bille tombe à la verticale dans le liquide, elle se déplace alors au bout d'un certain temps à une vitesse v constante et toutes les forces agissant sur la bille sont en équilibre: la force de frottement F_1 qui agit vers le haut, la force portante

$$F_2 = \frac{4\pi}{3} \cdot r^3 \cdot \rho_1 \cdot g \quad (II)$$

agissant elle aussi vers le haut et le poids

$$F_3 = \frac{4\pi}{3} \cdot r^3 \cdot \rho_2 \cdot g \quad (III)$$

qui agit vers le bas.

ρ_1 : densité du liquide

ρ_2 : densité de la bille

g : accélération de la pesanteur

On a:

$$F_1 + F_2 = F_3 \quad (IV)$$

D'où la possibilité de déterminer la viscosité en mesurant la vitesse de chute v .

$$\eta = \frac{2}{9} \cdot r^2 \cdot \frac{(\rho_2 - \rho_1) \cdot g}{v} \quad (V)$$

La vitesse de chute est ici déterminée à partir du parcours de chute s et du temps de chute t . Pour la viscosité, on obtient alors

$$\eta = \frac{2}{9} \cdot r^2 \cdot \frac{(\rho_2 - \rho_1) \cdot g \cdot t}{s} \quad (VI)$$

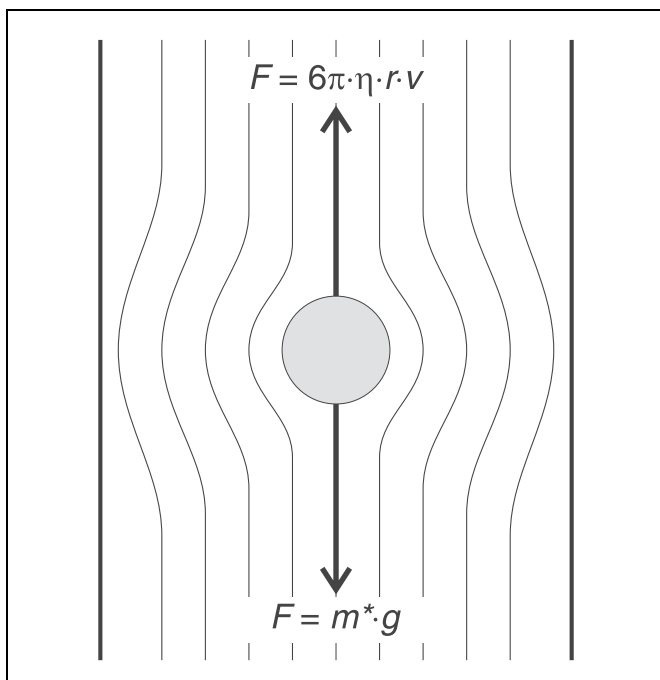
Dans la pratique, l'équation (I) doit être corrigée étant donné que l'hypothèse d'un liquide infiniment dilaté est irréaliste et que la distribution des vitesses des particules de liquide par rapport à la surface de la bille est influencée par les dimensions finies du liquide. C'est ainsi que l'on a pour le déplacement de la bille le long de l'axe d'une colonne de liquide infiniment grande de rayon R

$$F_1 = 6\pi \cdot \eta \cdot r \cdot v \cdot \left(1 + 2,4 \cdot \frac{r}{R}\right) \quad (VII)$$

L'équation (V) devient alors

$$\eta = \frac{2}{9} \cdot r^2 \cdot \frac{(\rho_2 - \rho_1) \cdot g \cdot t}{s} \cdot \frac{1}{1 + 2,4 \cdot \frac{r}{R}} \quad (VIII)$$

Si on tient compte de la longueur L finie de la colonne de liquide, d'autres corrections d'un ordre de grandeur de $\frac{r}{L}$ sont à ajouter.



Matériel

1 bille d'acier, \varnothing 16 mm	200 67 288
1 tube de Newton	379 001
6 glycérine, 99 %, 250 ml	672 121
1 compteur P	575 45
1 aimant de maintien	336 21
1 alimentation TBT 3, 6, 9, 12 V	522 16
1 manipulateur morse	504 52
1 pied en V	300 01
1 tige, 100 cm	300 44
1 tige, 25 cm	300 41
1 noix Leybold	301 01
1 noix avec pince	301 11
1 mètre à ruban métallique, 2 m	311 77
1 paire d'aimants cylindriques	510 48
Câbles d'expérience	500 442
<i>Supplément conseillé:</i>	
1 pied à coulisse de précision	311 54
1 éprouvette graduée, 100 ml, plastique	590 08
1 balance électronique LS 200, 200 g; 0,1 g	667 793

Montage

Le montage expérimental est représenté à la fig. 1:

- Assembler les éléments supports.
- Tenir le tube de Newton incliné, lentement verser la glycérine jusqu'au bord supérieur, en veillant à éviter la formation de bulles.

N.B.: La viscosité et la densité sont influencées par les bulles d'air dans le liquide.

Si des petites bulles d'air se sont formées lors du remplissage, attendre quelques heures avant de réaliser l'expérience.

- A l'aide de la pince (c), fixer le tube de Newton – prenant appui sur la table d'expérimentation – dans la noix.
- Visser vers le bas la vis moletée (a) de l'aimant de maintien jusqu'à la butée de telle sorte que le noyau en fer (b) dépasse du corps de la bobine.
- Brancher l'aimant de maintien à la sortie CC de l'alimentation TBT, conduire le raccord du pôle négatif via le manipulateur morse de manière à ce que la liaison soit établie lorsque le manipulateur morse est en position de repos.
- Enclencher la tension de sortie de 12 V et accrocher la bille d'acier au noyau en fer (b).
- Faire faire environ cinq tours vers le haut à la vis moletée (a).
- Positionner l'aimant de maintien avec la bille d'acier accrochée au-dessus de la colonne de liquide de manière à ce que la bille soit bien centrée par rapport à l'axe de la colonne et complètement immergée dans le liquide.
- Faire une marque sur le tube de Newton quelques centimètres au-dessus du fond du tube et mesurer la distance entre le bord inférieur de la bille et la marque; cette distance représente le parcours de chute s .

Câblage du compteur P:

- Relier le raccord de mise à la masse du compteur P à la douille d'alimentation (d) du manipulateur morse, l'entrée marche à la douille (e) et l'entrée arrêt à la douille (f).
- Sélectionner la gamme de mesure ms.

Réalisation

- Positionner le compteur P sur zéro avec la touche «0».
- Déclencher le manipulateur morse tout en observant la bille en chute.
- Dès que la bille a atteint la marque (c), relâcher le manipulateur morse.
- Relever puis noter le temps de chute t sur le compteur P.

Si la bille ne tombe pas du tout ou avec un certain retard:

- Vérifier le circuit.
- Faire tourner le noyau en fer un peu plus vers le haut.
- Choisir une tension moins élevée pour l'aimant de maintien.

Si la bille tombe sans que le manipulateur morse ait été déclenché.

- Faire tourner le noyau en fer légèrement vers le bas.

Répétition de la mesure:

- Régler la tension pour l'aimant de maintien sur 12 V puis faire tourner la vis moletée (a) vers le bas jusqu'à la butée.
- Récupérer par l'extérieur la bille d'acier avec la paire d'aimants (marque rouge vers l'extérieur) au fond du récipient, la faire remonter le long de la paroi du récipient jusqu'à l'aimant de maintien et la pousser juste sous le noyau en fer par ex. à l'aide d'un fil métallique recourbé (voir fig. 2).
- Faire à nouveau tourner la vis moletée vers le haut, positionner le compteur P sur zéro et recommencer la mesure du temps de chute.

Si le matériel conseillé en supplément est disponible (voir précédemment):

- déterminer le diamètre intérieur D du tube de Newton, le diamètre d et la masse m_2 de la bille d'acier.
- placer l'éprouvette graduée sur la balance électronique et procéder au tarage de la balance.
- verser dans l'éprouvette graduée 100 ml de la glycérine contenue dans le flacon et en déterminer la masse.

Exemple de mesure

Tab. 1: Temps de chute t

n	$\frac{t}{ms}$
1	2084
2	2110
3	2104
4	2036

Parcours de chute: $s = 66,6$ cm

Diamètre de la bille: $d = 16,0$ mm*)

Diamètre du tube de Newton: $D = 44$ mm*)

Masse de la bille: $m_2 = 16,7$ g*)

Masse de 100 ml de glycérine: $m_1 = 125,4$ g*)

*) Au cas où ces grandeurs ne seraient pas mesurées, utiliser les valeurs suivantes pour procéder à l'exploitation ultérieure:

$r = 8$ mm, $R = 22$ mm, $\rho_1 = 1260$ kg m⁻³, $\rho_2 = 7790$ kg m⁻³

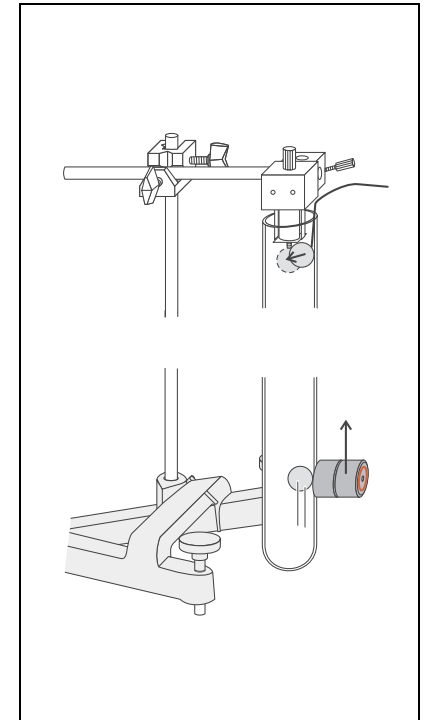
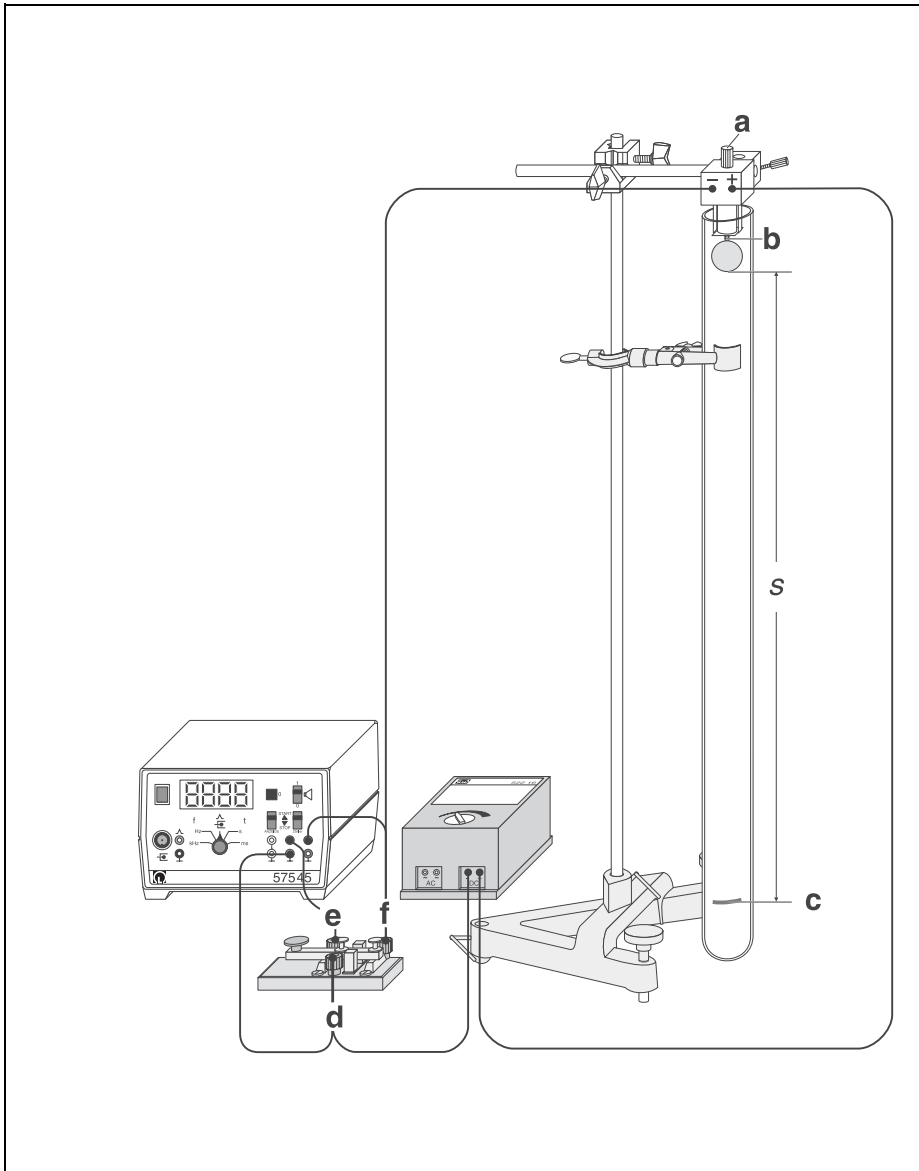


Fig. 2 Remise en place de la bille d'acier ▲

◀ Fig. 1 Montage expérimental pour la détermination de la viscosité de la glycérine

Exploitation et résultat

Temps de chute:

Moyenne des résultats de mesure du tab. 1: $t = 2,090$ s

Densité de la bille:

D'après les résultats de mesure, on calcule

$$V_2 = 2,14 \text{ cm}^3 \text{ et } \rho_2 = \frac{m_2}{V_2} = 7787 \text{ kg m}^{-3}$$

Densité de la glycérine:

$$\rho_1 = 1254 \text{ kg m}^{-3}$$

On obtient ainsi pour la viscosité conformément à l'équation (VIII):

$$\eta = 1,53 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$$

Valeur littéraire pour $\vartheta = 20$ °C:

$$\eta = 1,480 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$$

Lors de la comparaison avec la valeur littéraire, il faut tenir compte du fait que la viscosité de la glycérine dépend fortement de la température.

Information supplémentaire

A l'appui des équations (II), (III) et (VII), l'équation du déplacement de la bille en chute

$$m \cdot \frac{dv}{dt} = F_3 - F_2 - F_1$$

peut être transformée en l'équation différentielle suivante:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2} \cdot g - \frac{v}{\tau}$$

$$\text{avec la constante de temps } \tau = \frac{2}{9} \cdot \frac{r^2 \cdot \rho_2}{\eta} \cdot \frac{1}{1 + 2,4 \cdot \frac{r}{R}}$$

Sa solution pour la condition initiale $v(t=0) = 0$ est la suivante:

$$v = \frac{2}{9} \cdot \frac{r^2 \cdot (\rho_2 - \rho_1) \cdot g}{\eta} \cdot \frac{1}{1 + 2,4 \cdot \frac{r}{R}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$$

Avec les paramètres de la mesure, on obtient $\tau = 39$ ms; le temps de chute global est de 2,1 s. La supposition d'une vitesse de chute constante se justifie donc en bonne approximation.