

## TP N°4 Viscosité à chute de bille

### I. But

Le but de cette manipulation consiste à déterminer la viscosité pour différents liquides. Le but secondaire est de comprendre le principe et savoir mesurer la viscosité d'un fluide donné à l'aide des moyens simples (bouteille, chronomètre, une bille de diamètre et de poids connus).

### II. Théorie

Un fluide est le plus souvent décrit comme un milieu continu, déformable et qui se déplace en s'écoulant.

La viscosité c'est une grandeur qui caractérise les frottements internes du fluide. Elle caractérise la résistance d'un fluide à son écoulement lorsqu'il est soumis à l'application d'une force.

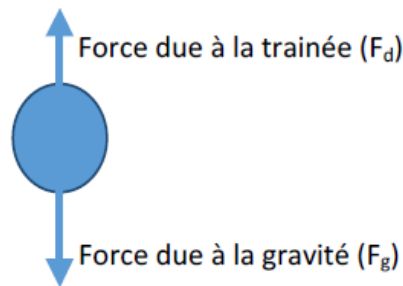
Les fluides de grande viscosité résistent à l'écoulement et les fluides de faible viscosité s'écoulent facilement.

#### II-1 Expérience de Reynolds (Re)

Reynolds a effectué des expériences sur les écoulements. Ses expériences l'ont mené à définir un rapport sans dimension appelé nombre de Reynolds qui permet de connaître la nature du régime d'écoulement.

$$Re = \frac{\rho_f V_f D}{\mu} \quad (1)$$

Dans les expériences de Reynolds, la valeur de  $D$  représente le diamètre d'un tuyau dans lequel le fluide s'écoule à une vitesse  $V$ . dans le viscosimètre à chute de bille, elle peut être directement substituée par le diamètre de la bille qui traverse le liquide à une vitesse limite de chute  $V_t$  et  $\rho_f$  étant la masse volumique du fluide.



Lorsqu'un objet se déplace dans un liquide et que sa vitesse devient constante du fait de la relation entre la traînée due aux propriétés du fluide et la force poussant l'objet (généralement son propre poids), alors il a atteint sa vitesse limite de chute.

$$F_g = F_d \quad F_d = C_d \left( \frac{1}{2} \rho V_t^2 R^2 \right)$$

$C_d$  étant le coefficient de traînée qui dépend du nombre de Reynolds,  $R$  le rayon de la bille et  $V_t$  c'est la vitesse limite de chute.

## II-2 Equations de Stokes (Re < 0,1)

Stokes a réalisé des expériences sur la dynamique des fluides, en donnant son nom aux unités de viscosité cinématique. Il a créé une expression pour calculer la force de traînée due au frottement sur de petites billes traversant des liquides.

A faible nombre de Reynolds  $C_d = \frac{24}{Re}$  donc  $F_d = 6\pi R V_t \mu$  (2)

La force vers le bas ( $F_g$ ) n'est pas simplement liée à l'action de gravité sur la bille. Elle dépend du poids de la bille et de sa flottabilité dans le liquide (ou force ascendante ou poussée d'Archimède dans le liquide) et la force résistante provoquée par l'écoulement autour de la bille.

A la vitesse limite de chute, les forces vers le bas peuvent également être prédites, en utilisant :

$$F_g = \frac{4}{3}(\rho_b - \rho_f)\pi g R^3 \quad (3)$$

Avec  $R$  étant le rayon de la bille et  $\rho_b, \rho_f$  sont respectivement les masses volumiques de la bille et du fluide. A partir des équations et à la vitesse limite de chute :

$$\frac{4}{3}(\rho_b - \rho_f)\pi g R^3 = 6\pi R V_t \mu \quad (4)$$

Qui se simplifie en :

$$V_t = \frac{2(\rho_b - \rho_f)}{9\mu} g R^2 \quad (5)$$

A partir de cette équation, on obtient :

$$\mu = \frac{2(\rho_b - \rho_f)}{9V_t} g R^2 \quad (6)$$

Du fait de la densité relative du liquide et des petites billes, elles atteignent la vitesse limite de chute après quelques centimètres même dans les liquides de viscosité faible tels que l'eau.

Les expériences permettent une courte chute de 150 mm à 200 mm dans le liquide avant de pouvoir mesurer la vitesse, nous pouvons donc être certains que la bille est déjà à la vitesse limite de chute lors de vos mesures.

## II.3 Les équations d'Oseen (Re=0,2 – 5)

Oseen a effectué des expériences sur les écoulements visqueux à faibles nombres de Reynolds. Il a identifié une équation plus précise pour établir la viscosité pour des nombres de Reynolds compris entre environ 0,2 et 5.

$$C_d = \frac{24}{Re} \left(1 + \frac{3}{16} Re\right) \quad \text{donc} \quad F_d = 6\pi R V_t \mu \left(1 + \frac{3}{16} Re\right)$$

$$F_d = 6\pi R V_t \mu \left(1 + \frac{3}{16} Re\right) = 6\pi R V_t \mu + \frac{9}{4} \pi R^2 V_t^2 \rho_f = F_g = \frac{4}{3}(\rho_b - \rho_f)\pi g R^3$$

$$\mu = \frac{2(\rho_b - \rho_f)}{9V_t} g R^2 - \frac{3}{8} R V_t \rho_f \quad (7)$$

Pour les grands nombres de Reynolds, vous ne devriez pas trouver une combinaison de billes et de liquides qui excèdent des nombres de Reynolds supérieurs à 100.

## II.4 Correction de la vitesse

Les théories sur les écoulements visqueux de Stokes et d'autres s'appliquent à de petites billes dans de relativement grands volumes de liquide. La littérature indique que le diamètre du récipient contenant le liquide doit être 100 fois plus grand que celui de la bille tombante, ce qui s'avérerait impraticable pour la plupart des essais. Ce grand rapport devrait permettre au liquide de se développer librement autour de l'objet tombant. Cependant, dans un tube en verre expérimental, le liquide ne peut pas se développer librement aussi bien, celui-ci étant légèrement restreint par le diamètre intérieur du tube. Un tube plus étroit ou un objet de diamètre plus important augmentent cet effet. Pour corriger ce problème, vous pouvez multiplier votre vitesse moyenne obtenue expérimentalement par un facteur de correction qui tient compte du diamètre de la bille et des dimensions de tube. Cela vous donnera la valeur corrigée de la vitesse ( $V_{corr}$ ) et une valeur plus précise pour  $V_t$  :

$$V_{corr} = V_m \left( 1 + 2,105 \frac{D_b}{D_t} + 1,95 \frac{D_b}{l} \right) \quad (8)$$

Avec  $V_m$  c'est la vitesse moyenne de chute (mesurée expérimentalement)

$D_b$  : diamètre de la bille

$D_t$  : diamètre du tube d'essai

$l$  : la hauteur de chute.

## III. Matériels utilisés

Un viscosimètre à chute de bille se monte verticalement sur la paroi plate d'un mur adapté afin de réaliser des expériences sur la mesure du coefficient de trainée de différentes billes dans différents fluides. Il comprend des billes d'essai de différentes dimensions et densités et fonctionne avec une gamme de liquide appropriés.

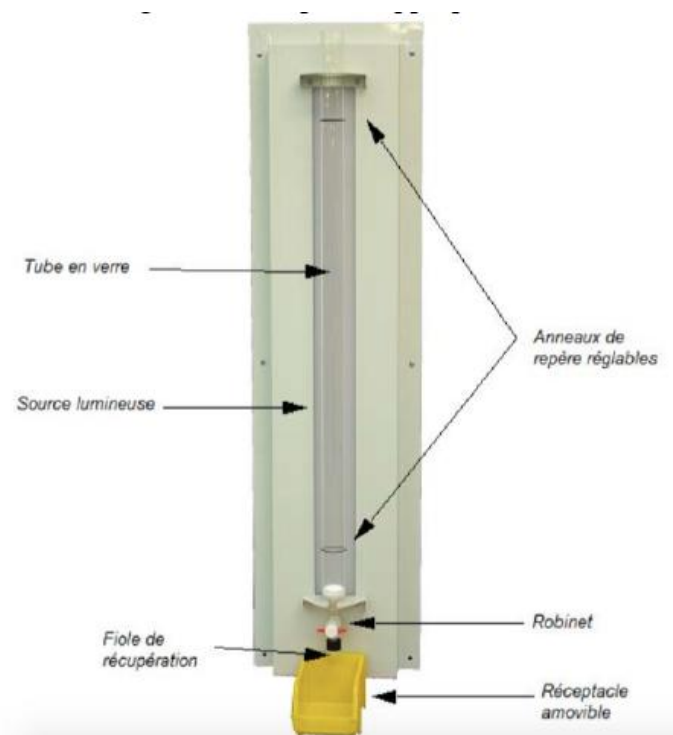


Figure I-3 Description du matériel

Ces expériences permettront de déterminer la viscosité d'un fluide à l'aide des équations citées dans la partie théorique. On dispose de plusieurs billes de tailles et de matières différentes selon le fluide étudié.

**Tableau I-1** Nature, densité et dimension des billes (Référence)

Matériau	Densité Kg/m <sup>3</sup>	Les diamètres (mm)			
		3.96	5	6	
Duralumin	2700	3.96	5	6	
Delrin	1400	5	6	7	8
Nylon	1150	3		4	
Acier inoxydable	8000	1.587	2	3	3.5
		4	4.5	5	6
		7	7.5	8	

#### **IV. Protocole expérimental**

Il existe plusieurs appareils et des techniques pour la détermination de la viscosité. Le viscosimètre capillaire permet de mesurer la viscosité d'un fluide en mesurant le temps d'écoulement d'un certain volume de fluide à une température fixe dans un tube capillaire où le régime est laminaire et la viscosité du fluide est proportionnelle à la durée d'écoulement.

Une autre manière de mesure de la viscosité consiste à étudier la résistance d'un fluide à la chute d'une bille de taille fixe, cette méthode fait l'objet de cette manipulation.

##### **IV.1 Réglage des marqueurs et de la hauteur de chute**

Avant le début des manipulations, un réglage des marqueurs et de la hauteur de chute s'impose

Réglez l'anneau du marqueur supérieur à environ 150 mm à 200 mm vers le bas du tube. Cela permet à votre bille d'essai d'atteindre la vitesse limite de chute avant que vous commenciez à mesurer la chute.

Utilisez la règle fournie pour régler l'anneau du marqueur inférieur à une distance de chute convenable, par exemple 1 mètre

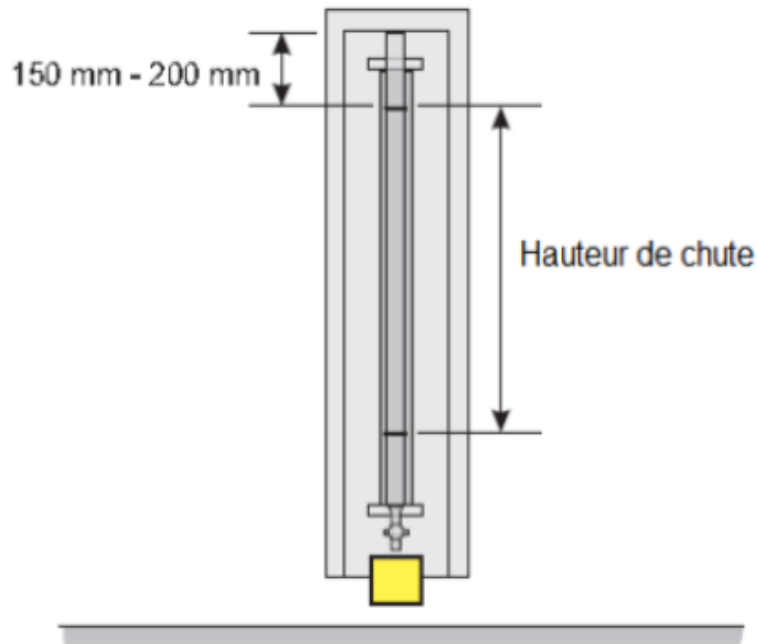


Figure I-4 Réglage des marqueurs et de la hauteur de chute

#### IV.2 Correspondance entre les billes et les types de liquides

Durant les essais, quelques erreurs pourront être dues à votre capacité à chronométrer précisément les temps de chutes. Pour obtenir de meilleurs résultats, vous aurez donc besoin d'une combinaison bille / liquide qui vous donne un temps de chute raisonnable, en améliorant votre précision de chronométrage et réduisant les erreurs de chronométrage. Les liquides de faible viscosité peuvent donner des temps de chute de moins de cinq secondes, qui peuvent être trop courts pour procéder à un chronométrage précis et les liquides de viscosité importante peuvent donner des temps de chute supérieurs à 20 minutes, qui peuvent être trop long pour des raisons pratiques.

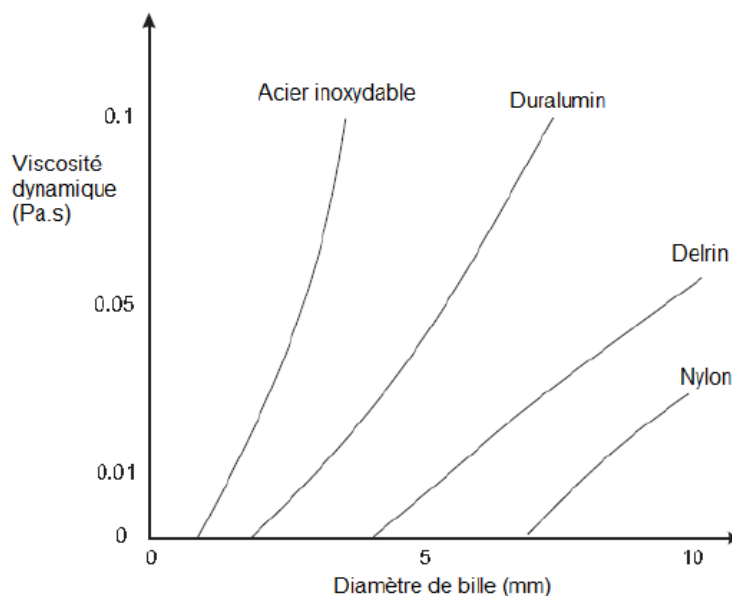


Figure I-5 Correspondance entre les billes et les types de liquides

La procédure à suivre afin de déterminer la viscosité d'un fluide à l'aide d'une chute de bille est la suivante :

1. Créez un tableau de résultats vierge similaire au tableau **I.2** ci-dessous.
2. Raccordez l'alimentation électrique au secteur pour alimenter la lampe à basse tension.
3. Assurez-vous que la bille que vous avez choisie correspondant à peu près à la viscosité attendue du liquide pour de meilleurs résultats.
4. Relevez la température ambiante à l'endroit où vous vous situez.
5. Préparez au moins trois billes d'essai identiques pour vous aider à déterminer une bonne vitesse moyenne et mesurer précisément le diamètre frontal des billes.

**Tableau I-2 : Tableau de résultats vierge**

<u>Bille d'essai</u>		Liquide d'essai
Matériau :		Description :
Diamètre $D_b$ :		Température :
Densité $\rho_b$		Densité $\rho_f$ :
Essai	Temps de chute (s)	Vitesse ( $m.s^{-1}$ )
1		
2		
3		
<b>Moyenne :</b>		

6. Réglez les marqueurs à une hauteur de chute convenable - par exemple un mètre.
7. Maintenez la bille d'essai directement au-dessus du centre du tube aussi près que possible de la surface de votre liquide d'essai. Cela permet d'éviter que la bille ne vienne heurter la paroi intérieure du tube et affecter vos résultats et réduit l'accélération de la chute libre dans l'air avant que la bille n'entre en contact du liquide.
8. Préparez votre chronomètre et libérez délicatement la bille, en faisant attention à ne pas lui permettre de tourner sur elle-même. Démarrez votre chronomètre lorsque la bille franchit l'anneau du premier marqueur, arrêtez-le lorsqu'elle franchit le deuxième marqueur.
9. Répétez l'opération au moins trois fois et déterminez un temps moyen correct et donc une vitesse moyenne ( $V_m$ ).

10. Répétez l'opération pour différentes dimensions et densités de billes dans différents liquides.
11. Finalement vous pouvez récupérer les billes à l'aide du robinet du dessous du tube.

### **V. Exploitation des résultats**

1. Multipliez votre vitesse moyenne par le facteur de correction pour obtenir une vitesse plus précise (voir le paragraphe de correction de la vitesse).
2. Utilisez cette vitesse pour déterminer laquelle des équations de Stokes ou d'Oseen s'appliquent en calculant le nombre de Reynolds
3. Utilisez l'équation adaptée pour déterminer la viscosité
4. Comparez vos valeurs calculées de viscosité avec les valeurs théoriques issues de la littérature.

**Tableau I-3 : La viscosité de quelques fluides**

Liquide	Densité ( $\text{kg.m}^{-3}$ )	Viscosité dynamique (Pa.s ou N.s/m <sup>2</sup> )	Viscosité cinématique $\nu$ (m <sup>2</sup> .s)
Eau à 20°C	998.2	0.001002	0.000001004
Huile de moteur (SAE 40)	900	0.319	0.0003544