

## TP 01 : Viscosimètre à chute de bille type HAAKE

### I. Introduction

Le viscosimètre à chute bille HAAKE est un instrument de mesure de laboratoire destiné à mesurer la viscosité dynamique des fluides en mesurant le temps de chute d'une bille dans un tube rempli de fluide à analyser. La viscosité est calculée en appliquant la loi de Stocks. Le tube est incliné d'un angle de  $10^\circ$  par rapport à la verticale

L'appareillage se compose d'un tube de mesure incliné (tube à chute de bille) rempli du liquide à soumettre à l'essai, en verre borosilicaté de précision, monté dans un cylindre en verre basculant sur pied d'un statif. Le cylindre en verre sert d'un bain thermostaté pour étudier la viscosité à différentes températures.

### II. Principe de la mesure :

Une bille de diamètre  $d_B$  et de masse volumique  $\rho_B$  roule et glisse à l'intérieur du tube rempli de fluide à analyser. On chronomètre par la suite le temps que met cette bille pour parcourir une distance définie entre deux repères sur le tube. La viscosité dynamique est déterminée selon la formule suivante :

$$\mu = k \cdot (\rho_B - \rho_L) \cdot t \quad (1)$$

Avec  $k$  : constante caractéristique de la bille utilisée, elle est aussi fonction du diamètre intérieur de tube et est donnée par le constructeur,  $\rho_B$  est la masse volumique de la bille,  $\rho_L$  la masse volumique du fluide à analyser et  $t$  le temps de chute de la bille. La viscosité dynamique obtenue est donnée en  $mPa \cdot s$ .

### III. Étude théorique

Lors de sa chute, la bille est freinée par des forces de frottement dues à la viscosité du liquide. La bille atteint rapidement une vitesse limite qu'elle va conserver durant son mouvement rectiligne uniforme. Cette force est donnée par l'expression suivante :

$$F = C_D A \frac{1}{2} \rho_L V^2 \quad (2)$$

Avec  $C_D$  est le coefficient de frottement ou de trainé (Drag coefficient) et  $V$  la vitesse de chute de la bille.  $A$  est le maître couple de la bille ( $A = \pi d_B^2 / 4$ ). Le coefficient de frottement est fonction du nombre de Reynolds ( $Re = \rho_L V d_B / \mu$ ).

Pour  $Re < 0.2$ , l'équation de Stocks exprime le coefficient de frottement selon:

$$C_D = \frac{24}{Re} \quad (3)$$

Pour déterminer la viscosité du fluide, on mesure la vitesse de chute d'une bille dans un tube rempli de ce fluide. Durant son mouvement rectiligne uniforme, la bille est soumise à un équilibre de trois forces, force de frottement ( $F$ ), de pesanteur ( $w$ ) et la poussée d'Archimède ( $F_A$ ) :

$$F - w + F_A = 0 \quad (4)$$

$$C_D \frac{\pi d_B^2}{4} \frac{1}{2} \rho_L V^2 - \rho_B \frac{\pi d_B^3}{6} g + \rho_L \frac{\pi d_B^3}{6} g = 0 \quad (5)$$

Après réarrangement de l'équation (5) et en remplaçant la formule de  $C_D$  on obtient l'expression de la viscosité dynamique suivante :

$$\mu = \frac{gd_B^2(\rho_B - \rho_L)}{18V} = \frac{gd_B^2(\rho_B - \rho_L)t}{18x} \quad (6)$$

Applicable pour

$$V < \left[ \frac{gd_B(\rho_B - \rho_L)}{90\rho_L} \right]^{1/2} \quad (7)$$

L'expression du coefficient de frottement est développée pour un écoulement infini autour d'un obstacle. La vitesse dans cette expression est la vitesse du fluide s'écoulant autour de la bille dans un espace illimité. Dans le cas du viscosimètre à chute de bille, cet espace est limité à la longueur et au diamètre de tube. Cependant, la vitesse mesurée durant la chute de la bille est différente, elle est corrigée par la correction de Brenner :

$$V = \left( 1 + 2.105 \frac{d_B}{d_T} + 1.95 \frac{d_B}{H_T} \right) V_m = f_{Brenner} V_m \quad (8)$$

Avec  $f_{Brenner}$  facteur de correction de Brenner.  $d_T$  diamètre de tube et  $H_T$  est la distance parcourue par la bille. La correction de Brenner est valide pour un rapport  $d_B/d_T \ll 1$ .

Dans le cas général, la constante caractéristique  $k$  est donnée par la formule suivante :

$$k = \frac{gd_B^2}{18x f_{Brenner}} \quad (9)$$

Dans le cas particulier du viscosimètre à chute de bille d'HAAKE, le rapport  $d_B/d_T$  est très proche de 1, la bille roule et glisse contre les parois de tube. Ce mouvement influence la valeur de  $k$ , l'expression (9) n'est plus applicable et  $k$  est déterminée empiriquement avec des huiles d'étalonnage.

#### IV. Mode opératoire :

- Déterminer la masse volumique de la bille choisie pour l'essai en  $g/cm^3$ .
- Déterminer la masse volumique du liquide soumis à l'essai en  $g/cm^3$ .
- Verser le liquide soumis à l'essai dans le tube intérieur du viscosimètre et y introduire la bille. Visser le bouchon pour fermer le tube.
- Chronométrer le temps mis par la bille pour parcourir la distance entre les deux repères circulaires.
- Répéter la mesure trois fois pour chaque essai.
- Pour la mesure de la viscosité à différentes températures, l'échantillon doit être maintenu à la température d'essai spécifiée au moins 10 minutes
- Calculer la viscosité dynamique en  $mPa.s$  en appliquant la formule (1). La constante caractéristique  $k$  pour chaque bille est présentée sur le tableau 01.

Tableau 01 : Constantes caractéristiques pour les billes du viscosimètre :

Bille n°	Matériaux	$d_B(mm)$	$\rho (g/cm^3)$	$k (mPa.s.cm^3/g.s)$	Plage de viscosité (mPa.s)
1	Verre borosilicaté	15.81	2.2	0.007	0.6 – 10
2	Verre borosilicaté	15.66	2.2	0.09	9 – 140
3	Nickel-fer	15.62	8.1	0.09	40 – 700
4	Nickel-fer	15.20	8.1	0.7	150 – 5000
5	Nickel-fer	14.30	8.1	7	1500 - 50000
6	Acier	11.10	7.7	35	> 7500