

BULLETIN TECHNIQUE

**VISCOSIMETRE A CHUTE DE BILLE
EH 101**

DELTA  **LAB**

38340 VOREPPE - FRANCE

TEL 33 / 04 76 50 04 54 - FAX 33 / 04 76 56 74 36 - e-mail : deltalab@compuserve.com

HYDRAULIQUE

VISCOSIMETRES

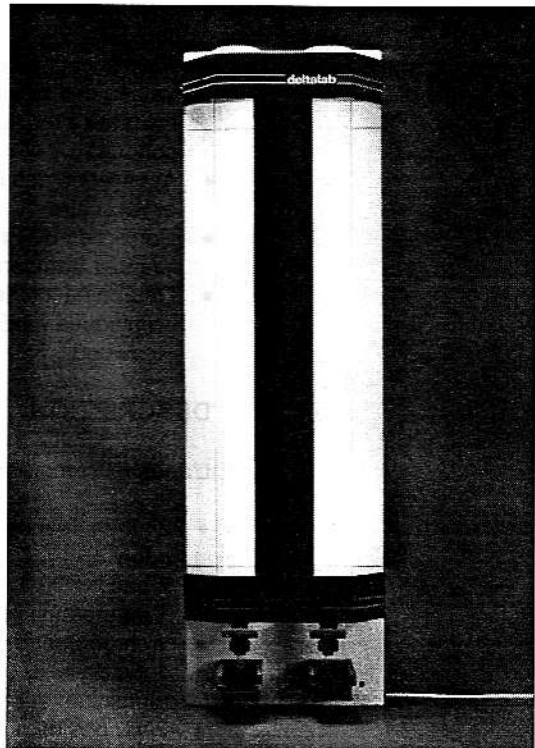
A CHUTE DE BILLE : EH 101

A CAPILLAIRE : EH 105

Lorsqu'un fluide se déplace parallèlement à un plan fixe, relativement lentement, son mouvement peut être considéré comme résultant du glissement des couches les unes sur les autres.

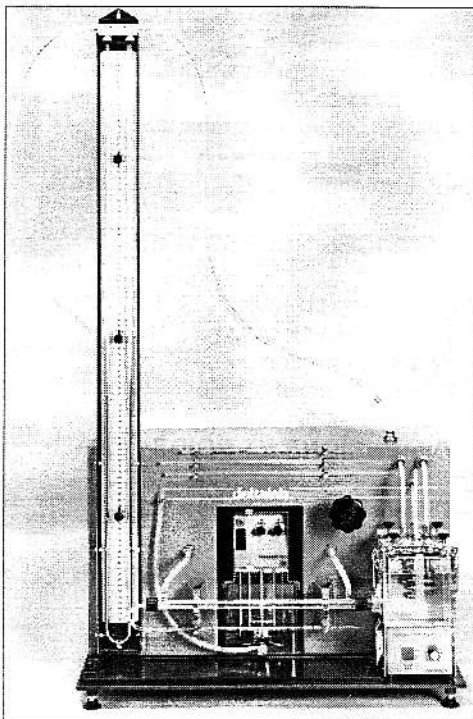
On constate que la vitesse de ces couches est fonction de la distance de la couche mobile au plan fixe. La vitesse de la couche superficielle est maximale tandis que celle de la couche tangente à la paroi est nulle par suite des forces de frottement qui s'exercent entre deux couches d'aire S .

Cette force est proportionnelle à cette aire S et au gradient de vitesse. Le coefficient de proportionnalité s'appelle la viscosité.



Pour mesurer la viscosité des liquides, qu'elle soit dynamique ou cinématique, DELTALAB propose deux appareils :

- Le viscosimètre à chute de billes, EH 101
- Le viscosimètre à capillaire, EH 105.



HYDRAULIQUE

EH 101 - EH 105

EH 101

EXPERIENCES

- Détermination de la viscosité des liquides
- Détermination du coefficient de traînée des billes ou d'autres modèles avec fluide de viscosité connue
- Application des lois de Stokes, Oxen et Klyachtro
- Correction de Brenner (vitesse) et de Walther (température)
- Détermination des viscosités empiriques de Engler, Seybolt et Redwood

DESCRIPTION

L'appareil comprend :

- 2 tubes de mesure éclairés par un néon
- 2 bacs
- 1 panneau support
- 1 chronomètre
- 1 jeu de billes (acier inoxydable, aluminium et plastiques)
- 2 vannes de récupération de billes et de vidange des tubes

SERVICES NECESSAIRES

Alimentation électrique : 220 V, 50 Hz

DIMENSIONS

Dimensions : 150 x 45 x 20

EH 105

EXPERIENCES

- Détermination de la viscosité des liquides
- Variation de la viscosité d'un liquide en fonction de la température
- Etude des contraintes de cisaillement pour des fluides visqueux
- Etude des forces de frottement en régime laminaire
- Détermination du diamètre des tubes capillaires
- Etude de l'écoulement d'un liquide de viscosité connue

DESCRIPTION

L'appareil comprend :

- 1 tube capillaire
- 1 plateau de récupération
- 1 agitateur magnétique
- 1 enceinte pressurisée contenant un serpent
- 1 manomètre à mercure
- 1 thermomètre
- 1 régulateur de température
- 1 pipette graduée
- 1 détendeur

SERVICES NECESSAIRES

Alimentation électrique : 220 V, 50 Hz

Alimentation air comprimé :

- pression minimale 1 bar,
- pression maximale 3 bars

DIMENSIONS ET POIDS

Dimensions : 370 x 650 x 1200

Poids : 20 kg

TABLE DE MATIÈRES

1.	PRINCIPE DE LA MÉTHODE DE MESURE DES VISCOSITÉS.....	1
1.1	Équation du mouvement.....	1
1.2	Force de traînée.....	1
1.3	Calcul de la viscosité.....	2
1.4	Correction de la vitesse de descente.....	3
1.5	Correction de l'effet de la température.....	3
2.	APPLICATIONS AU VISCOSIMÈTRE À CHUTE DE BILLE.....	5
2.1	Repérage utilisé et chute libre dans l'air.....	5
2.2	Mouvement transitoire dans le liquide.....	5
3.	PRINCIPE DE LA MÉTHODE DE MESURE DE LA TRAÎNÉE DE BILLES.....	8
4.	CONDUITE DE L'EXPÉRIENCE.....	8
4.1	Description de l'appareil (voir schéma ci-contre).....	8
4.2	Préparation des billes.....	10
4.3	Mesures.....	10
4.4	Manipulations types.....	10
5.	RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX.....	11
5.1	Exemple 1 - Huile fluide Shell CS5.....	11
5.2	Exemple 2 - Eau.....	12
6.	INSTALLATION DU VISCOSIMÈTRE À CHUTE DE BILLE.....	14
6.1	Récupération des billes.....	14
6.2	Vidange du tube.....	14
6.3	Remplacement du tube néon.....	14
6.4	Remplissage des tubes d'Altuglass.....	14
	ANNEXE 1 Propriétés chimiques.....	A1
	ANNEXE 2 - Diamètre optimal des sphères en fonction de la viscosité dynamique.....	A6

1. PRINCIPE DE LA MÉTHODE DE MESURE DES VISCOSITÉS

Pour déterminer les viscosités dynamique et cinématique d'un liquide, on mesure la vitesse de descente d'une bille sphérique dans un tube vertical, rempli du liquide étudié, pendant la phase du mouvement rectiligne uniforme qui correspond à l'équilibre entre les forces de pesanteur, la poussée d'Archimède et les forces de frottement visqueux.

1.1 Équation du mouvement

On fait l'hypothèse que l'étude de l'écoulement d'un fluide, animé d'une vitesse $-V$, autour d'un corps immobile, est identique à celle du mouvement du même corps animé de la vitesse V dans le fluide au repos. Si le mouvement est uniforme, la projection sur la verticale \vec{e}_3 de la résultante des forces extérieures à la bille est nulle:

$$\vec{P} + \vec{A} + \vec{T} = 0 \quad (1-1)$$

avec:

\vec{P} = poids de la bille

\vec{A} = poussée d'Archimède du fluide sur la bille

\vec{T} = force de traînée.

Si m est la masse de la bille, ρ_B la masse volumique de la bille et ρ_L la masse volumique du fluide, on a:

$$\vec{P} = mg \vec{e}_3 \quad (1-2)$$

$$\vec{A} = -mg \frac{\rho_L}{\rho_B} \vec{e}_3 \quad (1-3)$$

1.2 Force de traînée

Cette force est de la forme:

$$\vec{T} = -C_x \rho_L S \frac{V^2}{2} \vec{e}_3 \quad (1-4)$$

avec:

V = vitesse uniforme de la bille

S = maître couple de la bille de diamètre D , $S = \pi D^2/4$

C_x = coefficient de traînée fonction du nombre de Reynolds (Re) de l'écoulement

$$Re = \frac{VD}{\nu} \quad (1-5)$$

avec ν viscosité cinématique liée à μ la viscosité dynamique par la relation :

$$\mu = \rho \nu \quad (1-6)$$

Suivant les valeurs du nombre de Reynolds, on a les valeurs suivantes du coefficient de traînée :

$$\text{Pour } Re < 0,2 \quad C_x = \frac{24}{Re} \quad \text{Loi de Stokes} \quad (1-7)$$

$$\text{Pour } 0,2 < Re < 5 \quad C_x = \frac{24}{Re} \left(1 + \frac{3}{16} Re \right) \quad \text{Loi d'Oseen} \quad (1-8)$$

$$\text{Pour } 5 < Re < 850 \quad C_x = \frac{24}{Re} \left(1 + \frac{Re^{2/3}}{6} \right) \quad \text{Loi de Klyachko} \quad (1-9)$$

1.3 Calcul de la viscosité

a) Loi de Stokes

Dans ce cas, on établit que :

$$\nu = \frac{g D^2}{18V} \frac{\rho_B - \rho_L}{\rho_L} \quad (1-10)$$

formule applicable si :

$$V < \left(\frac{gD}{90} \frac{\rho_B - \rho_L}{\rho_L} \right)^{1/2} \quad (1-11)$$

b) Loi d'Oseen

Cette loi conduit à la valeur suivante de la viscosité cinématique :

$$\nu = \frac{gD^2 (\rho_B - \rho_L)}{18\rho_L V} - \frac{3}{16} D V \quad (1-12)$$

formule à utiliser si :

$$\left(\frac{gD}{90} \frac{\rho_B - \rho_L}{\rho_L} \right)^{1/2} < V < \left(\frac{40gD}{279} \frac{\rho_B - \rho_L}{\rho_L} \right)^{1/2} \quad (1-13)$$

c) Loi de Klyachko

Il est nécessaire d'appliquer cette loi, si :

$$V > \left(\frac{40gD}{279} \frac{\rho_B - \rho_L}{\rho_L} \right)^{1/2} \quad (1-14)$$

La viscosité cinématique est solution de l'équation incomplète du troisième degré :

$$v + \frac{1}{6} V^{2/3} D^{2/3} v^{1/3} - \frac{gD^2 (\rho_B - \rho_L)}{18V\rho_L} = 0 \quad (1-15)$$

équation de la forme :

$$x^3 + px + q = 0 \quad (1-16)$$

avec :

$$x = v^{1/3} \quad (1-17)$$

$$p = \frac{(V^{2/3} D^{2/3})}{6} \quad (1-18)$$

$$q = \frac{gD^2 (\rho_B - \rho_L)}{18V\rho_L} \quad (1-19)$$

dont les solutions sont de la forme ::

$x = \mu + v$ avec μ^3 et v^3 solution de

$$T^2 + qT - \frac{p^3}{27} \quad (1-20)$$

équation que l'on résout numériquement à partir des valeurs des masses volumiques ρ_B et ρ_L , du rayon et de la masse de la bille, et de la vitesse de descente.

1.4 Correction de la vitesse de descente

La vitesse V rentrant dans les formules précédentes, est la vitesse à l'infini 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 du tube, et la vitesse mesurée V_m est sensiblement différente de V . On se ramène à cette dernière par la correction de Brenner :

$$V = \left(1 + 2,105 \frac{D}{D_t} + 1,95 \frac{D}{H_t} \right) V_m \quad (1-21)$$

1.5 Correction de l'effet de la température

Pour comparer les valeurs de viscosités mesurées, il est nécessaire de se ramener à une température de référence. On utilise pour cela la formule de Walther :

$$\mu = e^{(T_0/T)^m} \log \mu_0 \quad (1-22)$$

avec: m = indice angulaire de viscosité absolue
 μ_0 = viscosité dynamique à la température absolue T_0 .

Pour déterminer la viscosité dynamique μ à la température absolue T , il est nécessaire de connaître aussi la masse volumique ρ à cette température absolue T de la mesure de viscosité cinématique v .

Des valeurs de référence sont données pour quelques liquides dans le tableau 1.

Tableau 1

Masse volumique, viscosités cinématique et dynamique
à 20°C de quelques liquides

Liquide	Masse volumique kg/m ³	μ en centipoises	ν en centistokes
Alcool méthylique	792	0,59	0,745
Benzène pur	877	0,65	0,742
Tétrachlorure de carbone	1594	0,97	0,609
Eau	998,2	1,006	1,008
Alcool éthylique	789,4	1,20	1,52
Glycérine	1260	800	635
Huiles de graissage	890 - 960	275 - 353	298 - 382

2. APPLICATIONS AU VISCOSIMÈTRE À CHUTE DE BILLE

Dans le cas du viscosimètre à chute de bille, les billes n'atteignent leur phase de mouvement rectiligne uniforme dans le fluide qu'après :

- Une chute libre dans l'air qui correspond en première approximation à un mouvement uniformément accéléré sous l'effet de la pesanteur seule, hypothèse d'autant mieux vérifiée que la hauteur de chute libre sera plus courte ;
- Une chute dans le liquide où la poussée d'Archimède et les forces de frottement visqueux agissent pour annuler l'accélération du mouvement accéléré qui se transforme à partir d'une certaine distance de la surface en mouvement quasi-uniforme.

Pour la mesure de la vitesse V_m , il est donc nécessaire de déterminer à partir de quelle position de la bille, cette dernière est en mouvement quasi-uniforme. Dans ce but, on étudie la phase transitoire du mouvement de la bille depuis son lâcher, jusqu'à son mouvement quasi-uniforme.

2.1 Repérage utilisé et chute libre dans l'air

On se place sur un axe vertical, tel que l'origine des positions notées z soit à la surface du liquide. L'origine des temps est considérée à l'instant du lâcher de la bille.

Le lâcher est effectué à une hauteur h par rapport à la surface du liquide ; on a donc :

$$t = 0 \quad x_0 = -h \quad v = 0$$

Quand $x = 0$, on est à l'instant t_s tel que :

$$\frac{1}{2} g t_s^2 - h = 0 \rightarrow t_s = \sqrt{\frac{2h}{g}} \quad (2-1)$$

La bille arrive à la surface du liquide, avec une vitesse :

$$v_s = g t_s = \sqrt{2gh} \quad (2-2)$$

2.2 Mouvement transitoire dans le liquide

On déplace l'origine des temps à l'instant de l'entrée de la bille dans le fluide :

$$\text{À } t = 0 \quad x = 0 \quad v = \sqrt{2gh} \quad (2-3)$$

le mouvement a pour équation :

$$P - A - T = m \frac{dv}{dt} \quad (2-4)$$

avec P , A et T déjà définies pour (1-1).

La solution de cette équation différentielle dépend de l'expression de la traînée T:

$$\text{Loi de Stokes} \quad \vec{T} = -3 \pi \rho_2 v VD \vec{e}_3 \quad (2-5)$$

$$\text{Loi d'Oseen} \quad \vec{T} = -3 \pi \rho_2 v VD \left(1 + \frac{3VD}{16v}\right) \vec{e}_3 \quad (2-6)$$

$$\text{Loi de Klyachko} \quad \vec{T} = -3 \pi \rho_2 v VD \left(1 + \frac{1}{6} \left[\frac{VD}{v}\right]^{2/3}\right) \vec{e}_3 \quad (2-7)$$

On fait le calcul pour la solution la plus défavorable, c'est-à-dire quand la phase transitoire dure le plus longtemps. Deux cas sont en pratique possibles :

- Si la vitesse d'entrée v_s est supérieure à V_m , la phase transitoire sera la plus longue pour la loi de STOKES, vu que la traînée est dans ce cas la plus faible, quelle que soit la valeur de V_m ;
- Si la vitesse d'entrée v_s est inférieure à V_m , la phase transitoire sera la plus longue pour la loi de KLYACHKO qui donne la traînée la plus forte si V_m est supérieure à la valeur définie en (2-14).

On calcule dans chaque cas la hauteur H comptée depuis le lâcher et telle que :

$$\frac{|V - v|}{V} < 1\% \quad (2-8)$$

Cas de la loi de STOKES

On prend pour valeur de la traînée :

$$T = -3 \pi \rho_2 v Dv = -kv \quad (2-9)$$

L'équation différentielle du mouvement est donc :

$$mg - mg \frac{\rho_F}{\rho_B} - kv = m \frac{dv}{dt} \quad (2-10)$$

dont la solution est :

$$v = C e^{-kt/m} + \frac{mg}{k} \frac{(\rho_B - \rho_F)}{\rho_B} \quad (2-11)$$

La condition à l'instant initial impose :

$$C = v_s - \frac{mg}{k} \frac{(\rho_B - \rho_F)}{\rho_B} \quad (2-12)$$

Au bout d'un certain t, on a par ailleurs :

$$v = \frac{mg}{k} \frac{(\rho_B - \rho_F)}{\rho_B} = V \quad (2-13)$$

vitesse dans un espace non limité.

Comme dans ce cas on atteint V , par valeurs supérieures à la hauteur, H correspond au temps t_1 tel que $v = 1,01 V$.

$$1,01 V = (v_s - V) e^{-kt_1/m} + V \quad (2-14)$$

$$t_1 = \frac{m}{k} \ln \frac{v_s - V}{0,1V} \text{ pour } v_s > V \quad (2-15)$$

L'intégration de (2-11) donne, comme équation des espaces:

$$y = \frac{m}{k} (v_s - V) (1 - e^{-kt_1/m}) + Vt \quad (2-16)$$

d'où :

$$H - h = \frac{m}{k} (v_s - 1,01V) + V \ln \frac{v_s - V}{0,01V} \quad (2-17)$$

Le calcul de H conduit, dans la majorité des cas, à une valeur inférieure à la cote du premier repère de l'appareil **deltalab**, mais il est néanmoins conseillé de le vérifier. De même, il est recommandé de vérifier que la vitesse d'arrivée v_s est bien supérieure à V , c'est-à-dire :

$$h > \frac{V^2}{2g} \quad (2-18)$$

En pratique, les vitesses mesurées ne dépassant pas 0,1 m/s, une hauteur h de 0,5 mm est suffisante. Cette constatation rend inutile l'étude du cas b) dans le cas de cet appareil.

Pour vérifier expérimentalement que la vitesse mesurée est celle du mouvement uniforme à considérer, on sait que pour $y > H - h$, le terme en exponentielle de (2-11) est négligeable, donc :

$$y \simeq V T \quad (2-19)$$

La vitesse mesurée doit donc être indépendante de la distance parcourue entre les instants de mesure du temps écoulé, avec pour instant initial celui où la bille passe par $y = H - h$.

3. PRINCIPE DE LA MÉTHODE DE MESURE DE LA TRAÎNÉE DE BILLES

Mouvement vertical uniforme :

$$\vec{P} + \vec{A} + \vec{T} = 0$$

\vec{P} = poids de la bille

\vec{A} = poussée d'Archimède du fluide sur la bille

\vec{T} = force de traînée.

$$\vec{P} = mg \vec{e}_3$$

$$\vec{A} = -mg \frac{\rho_L}{\rho_B} \vec{e}_3$$

$$\vec{T} = -C_x \rho_L S \frac{V^2}{2} \vec{e}_3$$

$$mg - mg \frac{\rho_L}{\rho_B} - C_x \rho_L S \frac{V^2}{2} = 0$$

$$C_x S \frac{1}{2} \rho_L V^2 = mg \left(\frac{\rho_B - \rho_L}{\rho_B} \right)$$

$$C_x = \frac{2mg}{SV^2} \left(\frac{\rho_B - \rho_L}{\rho_L \rho_B} \right)$$

Cette valeur, obtenue à partir de la vitesse V , est à comparer en fonction du nombre de Reynolds aux valeurs prévues par les lois de STOKES, OSEEN, et KLYACHKO, quand on connaît avec précision la valeur de la viscosité du fluide utilisé.

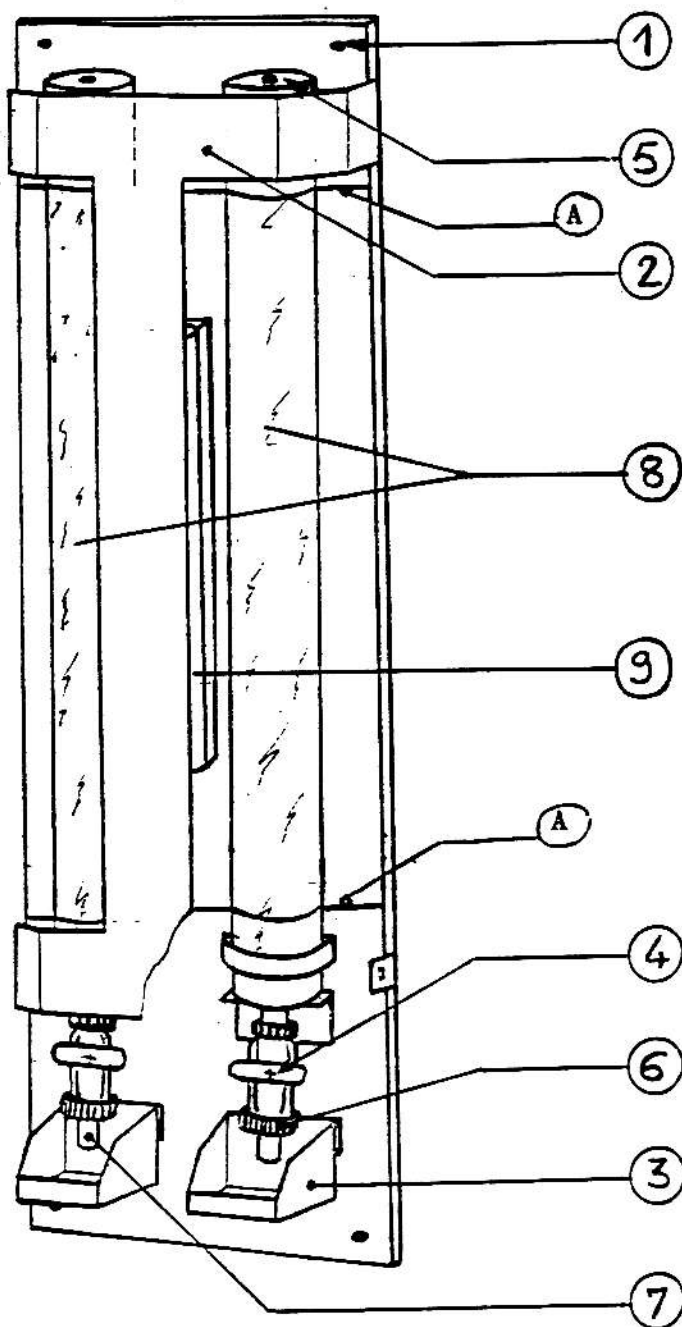
4. CONDUITE DE L'EXPÉRIENCE

4.1 Description de l'appareil (voir schéma ci-contre)

L'appareil comprend :

- 2 tubes de mesure (8) éclairés par un néon (9) disposés devant un panneau avec 2 repères (A) délimitant une distance d'un mètre.
- 2 vannes (4) de récupération des billes et de vidange des tubes
- 2 bacs de récupération (3)
- 1 chronomètre
- 1 jeu de billes d'acier inoxydable, d'aluminium et de plastique, dont les diamètres sont donnés au tableau ci-après.

Matériau→ ϕ (mm) ↓ ρ (g/cm ³)→	Inox 7,83	Dural 2,7	Polyamide 1,13	Hostaform C 1,45
1,587	X			
2	X			
2,5	X			
3	X	X	X	
3,5	X			
3,969		X		
4	X		X	
4,5	X			
5	X	X		X
6	X	X		X
7	X			X
7,30				
8	X	X		X



L'appareil expérimental

4.2 Préparation des billes

Afin de ne pas avoir à mesurer des temps de descente inférieurs à 15 secondes pour avoir une bonne précision, il faut déterminer le diamètre des billes du matériau utilisé en fonction de la viscosité supposée du liquide. Si cette viscosité est inconnue, on cherchera les billes qui descendent effectivement sur 1 mètre en plus de 15 secondes. L'abaque de l'annexe 2 donne les diamètres minima de billes de différents matériaux en fonction de la viscosité dynamique du liquide.

Avant d'être placées dans le tube, les billes doivent être nettoyées pour éviter toute formation de bulle. Il est conseillé de les essuyer avec un tissu sans peluche imbibé d'alcool. Une mesure effectuée avec apparition de bulles sur la bille, lors de la descente, ne doit pas être prise en considération. Il est nécessaire de la refaire, après un nettoyage soigneux de la bille, et éventuellement on plongera la bille dans le liquide avant de la lâcher.

4.3 Mesures

On relève au chronomètre le temps de parcours entre les repères (A) distants de 1 mètre. Cette opération est à répéter 7 à 10 fois pour obtenir une valeur moyenne du temps de descente sur 1 mètre.

Dans le cas des mesures effectuées avec les billes plastiques, il est nécessaire de vérifier au micromètre les diamètres de ces billes qui sont sensibles à la température.

4.4 Manipulations types

Le viscosimètre **deltalab** permet de déterminer, à partir de la vitesse de descente :

- soit la viscosité d'un liquide à étudier pour des billes géométriquement définies,
- soit le coefficient de traînée de corps sphériques ou profilés dans un liquide de viscosité uniforme.

Ces deux études peuvent être conduites successivement.

À partir de la viscosité cinématique, on peut également déduire les différentes viscosités "empiriques", type ENGLER, SEYBOLT, REDWOOD. Les formules de passage sont les suivantes :

a) *Degré Engler (°E)*

$$v = 7,32^\circ E - 6,31/^\circ E \quad v \text{ en centistokes}$$

b) *Secondes Seybolt (S)*

$$v = 0,0022 S - 1,80/S \quad v \text{ en stokes}$$

c) *Secondes Redwood (R)*

$$v = 0,26 R - 179/R \quad v \text{ en centistokes}$$

5. RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

À partir des mesures de temps de parcours sur un mètre, on calcule V_m puis, par la correction de Brenner (1-21), V . En fonction des caractéristiques du fluide et de la bille, on détermine quelle loi de frottement visqueux est applicable pour ensuite calculer la valeur de la viscosité cinématique à la température de l'expérience. De cette valeur, on déduit la viscosité dynamique, si besoin est.

5.1 Exemple 1: Huile fluide Shell CS5

a) Données expérimentales

- Masse de la bille $m = 14,7 \pm 0,2$ mg
- Masse volumique de la bille $\rho_B = 1133,5$ kg / m³
- Diamètre de la bille $D = (6m / \rho\pi)^{1/3} = 2,847$ mm
- Temps de descente sur 1 mètre $t_D = 26,3$ s $\pm 0,2$ s
- Masse volumique du fluide $813,53$ kg / m³ à la température d'essai
- Diamètre du tube $D_t = 94$ mm
- Longueur du tube $H_t = 1300$ mm

b) Calcul de la vitesse de l'écoulement en milieu infini

- Vitesse de descente dans le tube :

$$V_m = \frac{1}{26,3} = 0,03802 \text{ m/s}$$

- Correction de Brenner : $V = \left(1 + 2,105 \frac{D}{D_t} + 1,95 \frac{D}{H_t} \right) V_m$

$$V = \left(1 + 2,105 \times \frac{2,847}{94} + 1,95 \times \frac{2,847}{1300} \right) \times 0,03802 \text{ m/s}$$

$$V = 0,04060 \text{ m/s}$$

c) Détermination de la loi de frottement visqueux

$$g D \frac{\rho_B - \rho_L}{\rho_L} = 0,01099 \text{ m}^2/\text{s}^2$$

- Limite d'application de la loi de STOKES : $V < 0,01105$ m/s
- Limite d'application de la loi d'OSEEN : $0,01105 < V < 0,03969$ m/s

On est à la limite de la validité de la loi d'OSEEN, on applique donc la loi de KLYACHKO.

d) Calcul de la viscosité cinématique

v est solution de l'équation :

$$v + \frac{1}{6} V^{2/3} D^{2/3} v^{1/3} - g D^2 \frac{(\rho_B - \rho_L)}{18 V \rho_L} = 0$$

$$10^4 v + 3,995 v^{1/3} - 0,4280 = 0$$

qui a pour solution $v = 30,41 \times 10^{-2}$ Stokes

d'où $Re = 3,805 < 850$

e) Incertitude

$$\frac{\Delta v}{v} \leq \frac{2\Delta D}{D} + \frac{2\Delta V}{V} + \frac{\Delta \rho_L}{\rho_L} + \frac{\Delta \rho_B + \Delta \rho_L}{\rho_B - \rho_L}$$

$$\frac{\Delta D}{D} = \frac{1}{3} \left(\frac{\Delta m}{m} + \frac{\Delta \rho_B}{\rho_B} \right) = 0,0045$$

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{D_t}{t} = 0,0076$$

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = 1\%$$

d'où:

$$\frac{\Delta v}{v} \leq 7,2\%$$

dont 5,5 % viennent de la détermination des masses volumiques. Une détermination à 0,1 % conduit à une valeur de l'erreur relative de 2,8 %.

5.2 Exemple 2: Eau**a) Données expérimentales**

- Masse de la bille $m = 14,7 \pm 0,2$ mg
- Masse volumique de la bille $\rho_B = 1133,5$ kg / m³
- Diamètre de la bille $D = (6m / \rho\pi)^{1/3} = 2,847$ mm
- Temps de descente sur 1 mètre $t_D = 14,7$ s $\pm 0,2$ s
- Masse volumique du fluide $\rho_L = 998,2$ kg / m³ à 20°C
- Diamètre du tube $D_t = 94$ mm
- Longueur du tube $H_t = 1300$ mm

b) Calcul de la vitesse de l'écoulement en milieu infini

- Vitesse de descente dans le tube :

$$V_m = \frac{1}{14,7} = 0,06803 \text{ m/s}$$

- Correction de Brenner : $V = \left(1 + 2,105 \frac{D}{D_t} + 1,95 \frac{D}{H_t} \right) V_m$

$$V = 0,003785 \text{ m/s}$$

c) Détermination de la loi de frottement visqueux

$$g D \frac{\rho_B - \rho_L}{\rho_L} = 0,01099 \text{ m}^2/\text{s}^2$$

- Limite d'application de la loi de STOKES : $V < 0,00648 \text{ m/s}$
- Limite d'application de la loi d'OSEEN : $0,00648 < V < 0,0233 \text{ m/s}$

On doit de nouveau appliquer la loi de KLYACHKO.

d) Calcul de la viscosité cinématique

La viscosité cinématique ν est solution de l'équation :

$$10^4 \nu + 3,995 \nu^{1/3} - 0,4280 = 0$$

d'où $\nu = 1,527 \times 10^{-2}$ Stokes

Cette valeur est particulièrement éloignée de la valeur connue pour l'eau, la différence est essentiellement due à un mouvement non rectiligne de la bille dans le tube. Pour certaines billes, on constate des trajectoires très perturbées pendant la descente, ce qui entraîne des temps beaucoup trop longs. La trajectoire doit être aussi proche d'une droite que possible, pour obtenir des résultats significatifs.

Cet impératif n'est satisfait qu'en l'absence de turbulence autour de la bille pendant la descente. Dans le cas de l'eau, cette condition n'est satisfaisante que pour des billes de diamètre inférieur à 1 mm pour les tubes utilisés, comme il a été indiqué au paragraphe "CONDUITE DE L'EXPÉRIENCE".

6. INSTALLATION DU VISCOSIMÈTRE À CHUTE DE BILLE

(voir schéma p. 9)

L'appareil doit être alimenté en 220 V, sauf spécification spéciale à la commande. Fixer le support contre un mur par les 4 trous repère (1) Démontez le capot repère (2) et enlever la protection du tube néon. Remettre le capot en place. Accrocher les deux bacs de récupération repère (3). Les 2 vannes repère (4) doivent être en position ouverte. Soulever les bouchons repère (5) et remplir jusqu'à 20 mm maximum du sommet des tubes. Remettre les bouchons en place.

6.1 Récupération des billes

- Fermer les vannes repère (4)
- Dévisser les écrous repère (6)
- Récupérer les billes tombées dans les tubes de récupération repère (7)
- Remettre l'ensemble en place.

ATTENTION : Prévoir récupération fréquente des billes, afin d'éviter de coincer les vannes.

6.2 Vidange du tube

- Fermer la vanne
- Dévisser l'écrou repère (6)
- Remplacer le tube repère (7) par un embout cannelé livré avec l'appareil
- Ouvrir la vanne pour vidanger.

6.3 Remplacement du tube néon

Pour monter le tube néon dans son support, il suffit de démonter le capot avant de l'appareil.

6.4 Remplissage des tubes d'Altuglass

Avant de remplir les tubes de liquide à étudier, il est conseillé de consulter le tableau de la résistance chimique à l'Altuglass, donné en annexe 1. Dans ce tableau, les différentes abréviations ont la signification suivante :

NA = non attaqué, mais peut provoquer une légère coloration permanente.

AL = attaque légère avec possibilités d'absorption du liquide ou de léger fendillement or gonflement.

AF = Attaque franche avec décomposition ou fort gonflement, perte de résistance de l'Altuglas.

ANNEXE 1

PROPRIÉTÉS CHIMIQUES

PROPRIÉTÉS CHIMIQUES

L'Altuglas possède une très bonne résistance à l'eau, aux alcalis, aux solutions aqueuses de sels inorganiques et à la plupart des acides dilués.

Cependant, certains acides dilués, comme les acides cyanhydrique et fluorhydrique, attaquent l'Altuglas, de même que les acides sulfurique, azotique et chromique concentrés.

L'action de substances organiques sur l'Altuglas dépend de la nature des substances ; certaines peuvent n'avoir aucune action ; d'autres sont susceptibles de provoquer un gonflement, un fendillement ou un ramollissement du matériau. D'autres enfin sont capables de le dissoudre complètement.

Ces substances solvantes peuvent être classées en trois catégories :

Solvants très actifs :

Le méthacrylate de méthyle monomère et les hydrocarbures chlorés (dichloréthylène, chlorure de méthyle, chlorure de méthylène, chloroforme, monochlorhydrine du glycol, dichloréthane...).

Solvants moins actifs :

Les carbures aromatiques (toluène, benzène, xylène, etc.).

Les aldéhydes et les cétones (acétone, furfural, méthyléthylcétone).

Les esters de l'acide acétique (acétate d'éthyle, le butyle, etc.).

Solvants à chaud :

Les alcools : butylique, éthylique, méthylique (avec l'alcool éthylique, il se produit un gonflement).

RÉSISTANCE CHIMIQUE

Le tableau ci-après donne des indications sur la résistance chimique de l'Altuglas transparent, déterminée par l'observation de petits échantillons plongés dans divers liquides à 20/° et dans certains cas, à 60/° durant un temps variable.

Les abréviations suivantes ont été employées :

NA : Non attaqué (il peut se produire toutefois, dans certains cas, une légère coloration de l'Altuglas) ;

AL : Attaque légère par le liquide, ou faible absorption de ce dernier, ou encore léger gonflement ou fendillement ;

AF : Attaque franche : l'Altuglas s'est décomposé, a été dissous, s'est gonflé, a perdu de sa résistance, etc.

ACIDES	CONCENTRATION	Résistance à		Durée de l'exposition	Remarques
		20/°	60/°		
Acétique.	10 %	NA		1 an	Gonflement marqué. Dissous.
	100 %	AF		1 jour	
	Glacial	AF		3 jours	
Azotique (ou nitrique).	10 %	NA		1 an	Gonflé. Dissous. Léger crazing. Léger crazing. Coloration.
	10 %		NA	6 mois	
	100 %	AF		1 jour	
Butyrique	Concentré	AF		1 semaine	Léger crazing. Léger crazing.
	Chlorhydrique.	10 %	NA	6 mois	
Chromique.	Concentré	NA	NA	6 mois	Dissous.
	10 %	NA		1 an	
	10 %		NA	6 mois	
Citrique.	Solution saturée	AF		1 an	Dissous.
	Solution saturée	NA		1 an	
	Solution saturée		NA	6 mois	

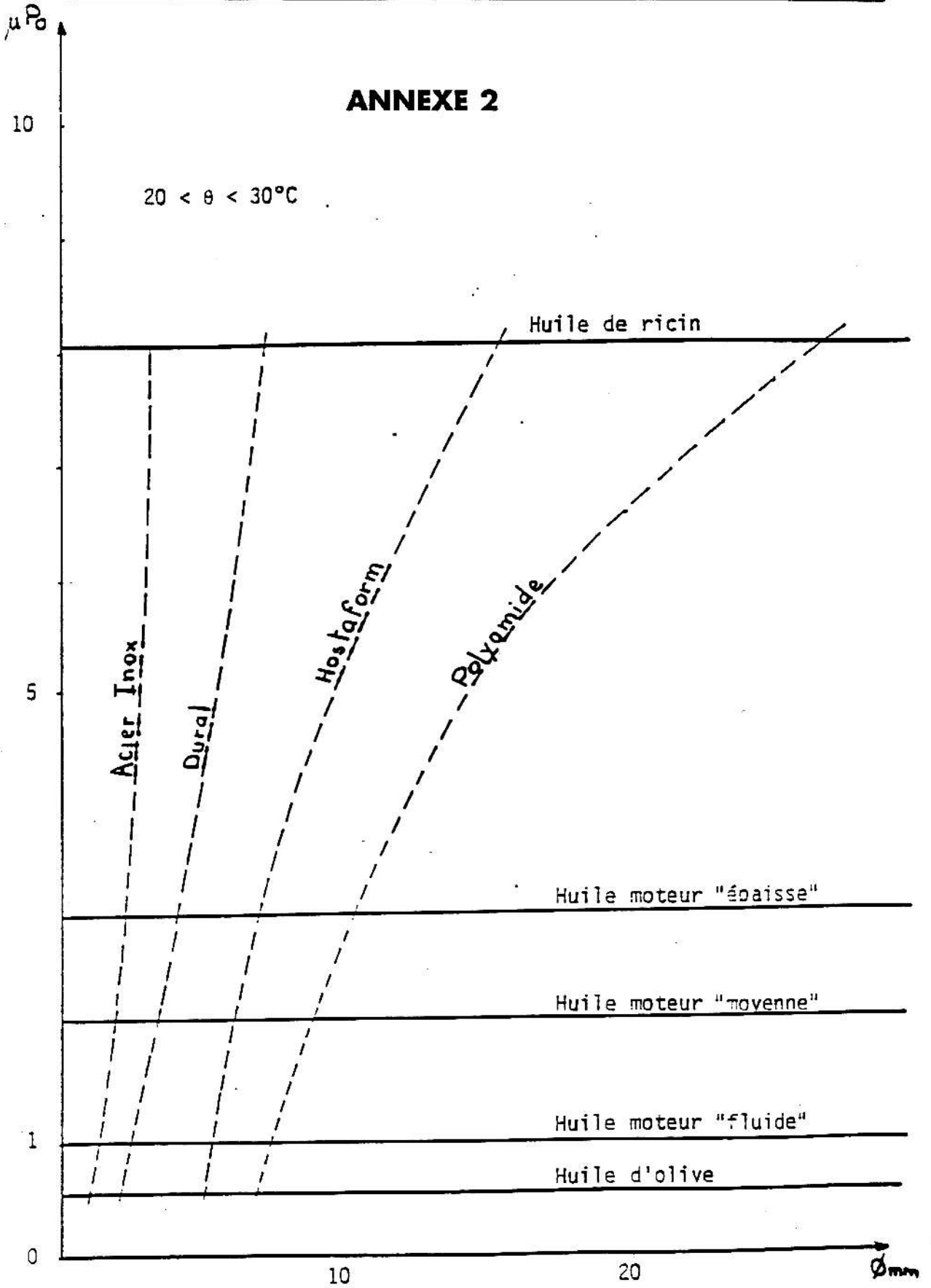
ACIDES	CONCENTRATION	Résistance à		Durée de l'exposition	Remarques
		20/°	60/°		
Fluorhydrique.		A F		1 jour	Gonflé et ramolli.
Formique.	10 %	N A		1 an	
	10 %		A F	6 mois	
	90 %	A F		1 semaine	
Lactique.	20 %	N A		1 an	
Oxalique.	Solution saturée	N A		1 an	
	Solution saturée		N A	6 mois	
Paracétique.		A F			Dissous.
Phosphorique.	10 %	N A		1 an	
	10 %		N A	6 mois	
	95 %	A F		1 semaine	Crazing prononcé.
Sulfurique.	10 %	N A		1 an	
	10 %		N A	6 mois	
	30 %	A L	A L	1 an	Légère attaque sur les arêtes ; crazing.
Tartrique.	98 %	A F	A F	1 jour	
	Solution saturée	N A		1 an	
	Solution saturée		N A	6 mois	
BASES					
Ammoniaque.	Solution p.s.				
	0,88	N A	A L		
	Liquide	A F	A F		
Potasse.	10 %	N A			
	50 %		A F		
Soude caustique.	10 %	N A			
	50 %		A F		
AUTRES AGENTS					
Acétylène.		N A			
Aldéhyde formique.	Solution				
	aqueuse à 40 %	N A		1 an	
Aluminate de sodium.		N A			
Alun.	Solution saturée	N A		1 an	
Anhydride acétique.		A L			
Anhydride carbonique (CO ²).		N A			
Anhydride sulfureux (SO ²).		N A			
Anhydride sulfurique (SO ³).		A F			
Aniline.		A F		1 semaine	Fendillé et dissous.
Bichromate de sodium.	10 %	N A			

AUTRES AGENTS (SUITE)	CONCENTRATION	Résistance		Durée de l'exposition	Remarques
		20/°	à 60/°		
Bisulfate de sodium.	10 %	NA			
Butane.		NA			
Carbonate de sodium.	Solution saturée	NA		1 an	
	Solution saturée		NA	6 mois	
Chlorure d'ammonium.	Solution saturée	NA		1 an	
Chlorure de benzoyle.		AF		1 semaine	Dissous.
Chlorure de butyle.		AF		1 semaine	Dissous.
Chlorure mercurique.		AF			
Crésol.		AF		1 semaine	Fendillé et dissous.
Cyclohexane.		AF		1 an	Pas d'attaque durant les 6 premiers mois. Attaque franche après.
Cyclopropane.		AF			
Décaline (décahydronaphtalène).		AF		1 semaine	Ramolli et fendillé.
Dioxane.		AF			
Eau de javel.		NA			Pas d'action aux concentrations ordinairement employées pour les usages ménagers.
Eau de mer.	20 % en volume	NA			
Eau oxygénée.		NA			
Eau régale.		AF			
Essence ordinaire.		AL		6 mois	Crazing superficiel.
Essence à 100 % d'octane		AL		6 mois	Crazing superficiel.
Ether de pétrole.		NA		6 mois	
Ether sulfurique.		AF			
Ethylamine.		AF		6 mois	Ramolli et gonflé.
Ethylène.		AF			
Fréon.		AF		6 mois	
Gas-oil.		AL		1 an	Nuages superficiels.
Gaz de ville.		NA			
Glu.		NA			
Glycérine.		NA		1 an	
Glycol.	NA				
Huile Lockheed.	AF		6 mois		
Huile à moteur (détergente ou non).	NA		1 an		
Huile de noix de coco.	NA		1 an		
Huile d'olive.	NA		6 mois		
Huile de transformateur.	NA		1 an	Coloration.	

AUTRES AGENTS (FIN)	CONCENTRATION	Résistance		Durée de l'exposition	Remarques
		à 20/°	à 60/°		
Hydrogène.		NA		1 an	
Hypochlorite de chaux.		NA		1 an	
Iodure de potassium.		NA			
Jus de fruits.		NA		1 an	Aucune action si la solution n'est pas alcoolisée.
Lactate de butyle.		NA		1 an	
Lait.		NA		1 an	
Lanoline.		NA		1 an	
Mercure.		NA		1 an	
Mercurochrome.		NA			Taches légèrement roses.
Métaphosphate de sodium		NA			
Métatoluidine.		AF			
Méthylamine.		AL		1 an	Crazing et nuages.
Naphtaline.	Cristaux	AL		1 mois	
Naphte.		AF		6 mois	Ramolli et fendillé.
Nicotine.		AF			
Nitrate d'ammonium.		NA			
Nitrobenzène.		AF		1 semaine	Dissous et fendillé.
Oléate de sodium.		NA			
Oxygène.		NA			
Ozone.		NA			Vieillessement de la matière.
Paraffine.		NA		1 an	
Permanganate de potassium.	Solution au 1/10	NA		1 an	Coloration.
Phénol.		AF		1 semaine	Dissous.
Phosphates disodique et trisodique.		NA			
Propane.		NA		1 jour	
Pyralène.		AF			
Stéarate de butyle.		NA		1 an	Très léger crazing.
Sulfate d'éthyle.		AF			
Sulfate de fer.		NA			Légère coloration.
Sulfure de cuivre.		AF			
Teinture d'iode.		AF			
Tétraline		AF		6 mois	Ramolli et fendillé.
(Tétrahydronaphtalène).					
Vapeurs nitreuses.		NA			
White spirit.	Moins de 3% d'aromatiques	NA		1 an	Très léger crazing.

N.B. — Champignons : sous les climats tropicaux, l'Altuglas résiste à l'attaque des champignons, mais pas à leur envahissement. Il suffit d'un simple essuyage pour retrouver l'aspect d'origine.

ANNEXE 2



Diamètre optimal des sphères en fonction de la viscosité dynamique

Jeu de Billes pour
viscosimètre à chute de bille (286)

Laboratoire de Physique - Chimie
LYCÉE CAMILLE GUÉRIN
33, Rue de la Gibauderie
B.P. 611
86022 POITIERS CEDEX
06/02/03

N° 1 BILLEALUMINIUMD5	BILLE D.5 ALUMINIUM
N° 2 BILLEALUMINIUMD6	BILLE D.6 ALUMINIUM
N° 3 BILLEDURALD_3/EH10	BILLE D.3 DURAL 2.7
N° 4 BILLEDURALD_3_969	BILLE D.3.969 DURAL 2.7
N° 5 BILLEDURALD_7_45	BILLE D.7.45 DURAL 2.7
N° 6 BILLEID_1_587/EH10	BILLE D.1.587 INOX 7.83
N° 7 BILLEID_4_5/EH101	BILLE D.4.5 INOX 7.83
N° 8 BILLEINOXD_2	BILLE D.2 INOX 7.83
N° 9 BILLEINOXD_2_5	BILLE D.2.5 INOX 7.83
N° 10 BILLEINOXD_3	BILLE D.3 INOX 7.83
N° 11 BILLEINOXD_3_5	BILLE D.3.5 INOX 7.83
N° 12 BILLEINOXD_4	BILLE D.4 INOX 7.83
N° 13 BILLEINOXD_5	BILLE D.5 INOX 7.83
N° 14 BILLEINOXD_6	BILLE D.6 INOX 7.83
N° 15 BILLEINOXD_7	BILLE D.7 INOX 7.83
N° 16 BILLEINOXD_8	BILLE D.8 INOX 7.83
N° 17 BILLEPOLD_5/EH101	BILLE D.5 POLYACETAL 1.45
N° 18 BILLEPOLD_6	BILLE D.6 POLYACETAL 1.45
N° 19 BILLEPOLD_7	BILLE D.7 POLYACETAL 1.45
N° 20 BILLEPOLD_8	BILLE D.8 POLYACETAL 1.45
N° 21 BILLEPOLYD3/EH101	BILLE D.3 POLYAMIDE 1.13
N° 22 BILLEPOLYD_4/EH101	BILLE D.4 POLYAMIDE 1.13

DELTA LAB

DELTA LAB

COSMI

Parc d'activités de Centr'Aip
259, rue du Rocher de Lorzier
38430 Moirans - France

tél : 33 (0)4 76 35 05 35

fax : 33 (0)4 76 35 14 19

e mail : info@deltalab.fr