



Mesure des Propriétés Rhéologique des Suspensions Solide-Liquide : Utilisation d'un Viscosimètre Rotatif à Cylindres Coaxiaux à large entrefer

SAD CHEMLOUL nord-eddine¹, CHAIB khaled¹, BELMILOUD Mohamed amine¹,

1- Laboratoire des Technologies Industrielles (LRTI); Université Ibn Khaldoun de Tiaret

Article history

Received: 2018-07-31

Accepted: 2019-05-20

Résumé

Dans cette étude expérimentale, nous avons conçu et réalisé un viscosimètre rotatif à cylindre coaxiaux à large entrefer (10 mm) dans le but d'étudier les propriétés rhéologiques des suspensions solide-liquide. En plus du viscosimètre rotatif à cylindre coaxiaux HAAKE RV2 à entrefer étroit, quatre rotors de différents diamètres ont été utilisés pour les mesures rhéologiques. La suspension utilisée, a pour phase solide des particules sphériques de polystyrène de densité 0.715, et pour phase liquide de l'huile « EMEREX MT 3200 » de densité 0.7. Pour les particules solides, quatre diamètres et six concentrations volumiques ont été utilisés. Les résultats obtenus montrent que le diamètre des particules a une influence sur le comportement rhéologique. En effet, quand le diamètre des particules diminue, le comportement tend vers un comportement pseudoplastique. Pour les grands diamètres, le comportement tend vers le newtonien. La concentration a une légère influence sur le comportement rhéologique. La variation de la viscosité relative en fonction de la concentration volumique, suit le modèle de Mooney pour les petits diamètres et celui de Happel [pour les grands diamètres.

Mots-clés : *Gradient de vitesse, Contrainte de cisaillement, Viscosité apparente, Entrefer large, Suspension*

Abstract

In this experimental study, we designed and realized a coaxial cylinder viscometer with a wide gap (10 mm) in order to study the rheological properties of solid-liquid suspensions. In addition to the HAAKE RV2 coaxial cylinder viscometer with narrow gap, four rotors of different diameters were used for rheological measurements. The suspension used has as solid phase a spherical particle of polystyrene with density of 0.715, and as liquid phase an oil "EMEREX MT 3200" with density of 0.7. For solid particles, four diameters and six particule concentrations were used. The results obtained show that the particle diameter has an influence on the rheological behavior. Indeed, when the diameter of the particles decreases, the behavior tends towards pseudoplastic behavior. For large diameters, the behavior tends to Newtonian behavior. The particle concentration has a slight influence on the rheological behavior. The variation of the relative viscosity as a function of the particle concentration follows the model of Mooney for small diameters and that of Happel for large diameters.

Keywords: Speed gradient, Shear stress, Viscosity apparent, Wide gap, Suspension

* Corresponding author. Tel./fax: +213 791814914

E-mail address: sad_2412@yahoo.fr.

1. Introduction

La plupart des systèmes biphasiques utilisés dans l'industrie sont des dispersions de particules solides ou de gouttelettes dans un fluide primaire. Ces systèmes, de structure plus ou moins complexe, se présentent soit sous forme de suspensions, soit sous forme d'émulsions (systèmes thermodynamiquement instables).

L'amélioration des connaissances du transport solide-liquide, dans le domaine rhéologique fait l'objet de nombreuses recherches tant sur le plan fondamental que sur celui des applications. En effet, les utilisateurs de ces suspensions se sont aperçus depuis longtemps que le comportement rhéologique de ces suspensions ne répondait pas à ce que la mécanique classique des fluides visqueux aurait pu prévoir. Ceci a rendu très difficile la connaissance du comportement rhéologique à laquelle on accède la plupart du temps par tâtonnement souvent très coûteux. Cependant l'intérêt économique que présentent ces systèmes a conduit dans l'industrie (chimique, papetière, pétrolière, pharmaceutique, agroalimentaire...) les utilisateurs à cerner de plus près le comportement dynamique de ces systèmes (écoulement, déformations...). La connaissance du comportement rhéologique de la phase fluide est très utile dans l'étude rhéologique des suspensions [1-7]. Pour la mesure des propriétés rhéologiques des suspensions, plusieurs types de viscosimètres sont utilisés. Ces derniers dépendent de la nature de la suspension [8-12]. Le but de ce travail est d'examiner les propriétés des suspensions des particules solides de particules sphériques pouvant atteindre 1 mm de diamètre et de concentration relativement élevées. Nous avons été obligés d'adapter notre viscosimètre à l'étude projetée, et de porter notre choix sur un viscosimètre à large entrefer (10 mm).

2. Partie expérimentale

L'étude des écoulements entre deux cylindres coaxiaux a donné un grand souffle à la compréhension des phénomènes hydrodynamiques. Les premiers qui ont proposé un tel dispositif pour la détermination de la viscosité des liquides étaient par Mallock [13] et Couette [14]. Leurs expériences et leurs analyses concernent le cas le plus fréquemment abordé où un seul cylindre est entraîné en rotation. La majorité des viscosimètres actuels sont conçus pour fonctionner avec un entrefer étroit (le rapport des rayons godet/rotor ne doit pas excéder 1.15). Sous cette condition, le calcul montre que le gradient de vitesses, et donc la déformation, peuvent être considérés comme constants. Dans le but de voir l'influence du diamètre et de la concentration des particules sur les paramètres rhéologiques, nous avons utilisé des suspensions de particules sphériques dont le diamètre peut atteindre 1 mm. Ceci a nécessité l'utilisation d'un entrefer large. En effet, les particules doivent avoir des dimensions assez faibles devant

celle de l'entrefer pour un écoulement aux fortes concentrations et minimiser les interactions avec la paroi.

2.1 Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental utilisé (Fig. 1a) pour les mesures rhéologiques est une combinaison entre un viscosimètre rotatif à cylindres coaxiaux (HAAKE RV2) et le godet (1) que nous avons conçus (Fig. 1b). Ce dernier est formé de deux cylindres en verre et de deux couvercles en plexiglas. L'espace (2) entre les deux cylindres permet la circulation du courant d'eau provenant du bac thermostatique (3) pour réguler la température de la mixture. Le sélecteur du nombre de tours (4) permet d'une part de fixer la vitesse de rotation du moteur (5) qui entraîne le rotor (6), et d'autre part, de mesurer le couple à l'aide de la tête (7). L'ensemble rotor, godet, moteur et tête de mesure est monté sur une table (8) qui sert de support.

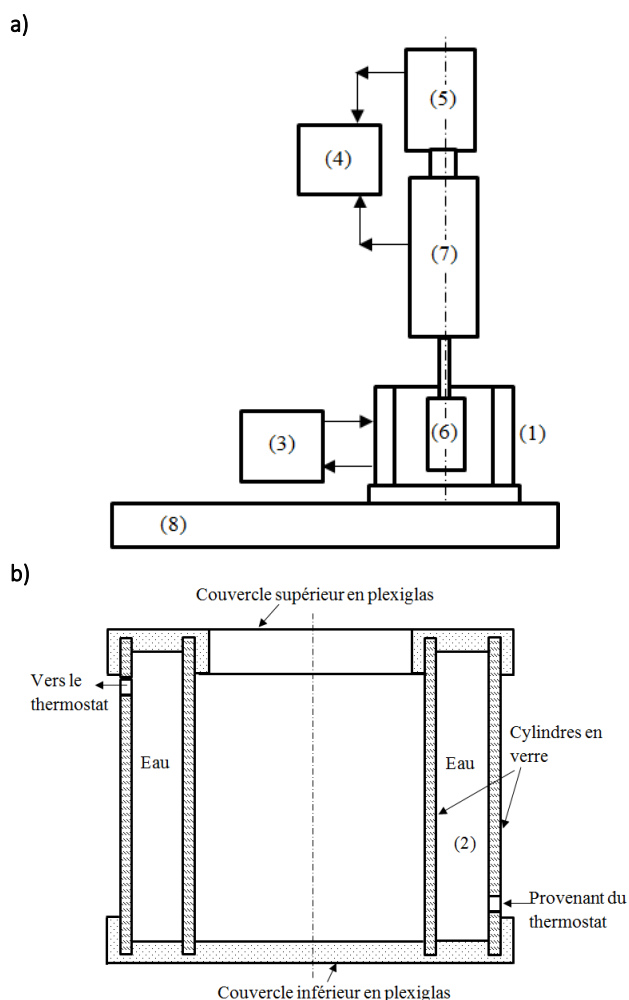


Fig. 1 : Dispositif expérimental: a) Schéma du viscosimètre rotatif à cylindres coaxiaux utilisé pour les mesures rhéologiques ; b) Vue détaillée du godet

Le tableau 1 donne les dimensions des quatre rotors utilisés dans les viscosimètres à large entrefer et de celui du viscosimètre à entrefer étroit HAAKE RV2.

Tableau 1 : Différents viscosimètres utilisés

Caractéristiques	Viscosimètre				
	HAAKE RV2	n°1	n°2	n°2	n°4
r_i (mm)	20.1	27.5	25	22.5	20.1
r_e (mm) r_e (mm)	20.5	30	30	30	30
$\alpha = r_e/r_i$	1.02	1.09	1.2	1.33	1.5
H (mm)	60	60	60	60	60

La détermination du gradient de vitesses dépend du comportement rhéologique du liquide ou de celui de la suspension. Pour un fluide en écoulement dans un viscosimètre rotatif à cylindres coaxiaux, le gradient de vitesses est donné par :

$$\dot{\epsilon} = \frac{r d\omega}{dr} \quad (1)$$

Le tableau 2 donne les relations du profil de vitesse et du gradient de vitesses en fonction du comportement rhéologique utilisées dans cette étude expérimentale : $\tau = \mu f(\dot{\epsilon})$ Type de comportement rhéologique ; $U(r)$ profil des vitesses et $\dot{\epsilon}$ le gradient de cisaillement.

Tableau 2 : Types de comportement rhéologique étudiés

$U(r)$	$\dot{\epsilon}$
Newtonien $\tau = \mu f(\dot{\epsilon}) = \mu \dot{\epsilon}$	
$U(r) = A \left(\frac{1}{r} - \frac{r}{r_e^2} \right)$ (2)	$\dot{\epsilon} = \frac{2A}{r^2}$ (3)
avec $A = \omega \frac{r_e r_i}{r_e^2 - r_i^2}$	
Ostwald $\tau = \mu f(\dot{\epsilon}) = k(\dot{\epsilon})^n$	
$U(r)$	$\dot{\epsilon}$
$U(r) = \left[C \left(\frac{1}{r^2} \right)^{1/n} - \left(\frac{r}{r_e^2} \right)^{1/n} \right]$ (4)	$\dot{\epsilon} = C \left(\frac{1}{r^2} \right)^{1/n}$ (5)
avec $C = \frac{n}{2} \left(\frac{5M}{2\pi Hk} \right)^{1/n}$	

Les mesures rhéologiques réalisées dans cette étude tiennent compte des corrections d'extrémité. Ces dernières ont été minimisées en évitant la partie inférieure du cylindre intérieur. Les effets de bouts sont déterminés en utilisant en utilisant deux méthodes d'après [3] et [7].

Dans le cas d'un entrefer étroit, la contrainte à la paroi et le gradient de vitesses sont données respectivement par :

$$\tau_i = \omega \frac{M}{2\pi r_i H} \quad (6)$$

et

$$\dot{\epsilon}' = \omega \frac{r_e r_i}{r_e^2 - r_i^2} \quad (7)$$

Pour la correction du gradient de vitesse, nous avons utilisé la méthode à un seul mobile de Krieger et Elrod [15]. La relation donnant la vitesse angulaire pour un écoulement à loi de puissance est :

$$\omega = \frac{n}{(2k)^{1/n}} (1 - \alpha^{-2/n}) \tau^{-2/n} \quad (8)$$

n et k sont respectivement l'indice d'écoulement et la consistance du matériau, et $\alpha = r_e/r_i$.

Des particules sphériques de polystyrène de densité 0.715 ont été utilisées comme phase solide de la suspension. Différents diamètres (0.3, 0.45, 0.565, 0.715mm) et différentes concentrations volumiques (5, 10, 15, 20, 25, 30%) ont été utilisés. La concentration maximale dans l'entrefer se situait entre 35 et 40%, valeurs à partir de laquelle le rotor commence à tourner difficilement (risque de détérioration). La phase liquide est de l'huile « EMEREX MT 3200 » de densité 0.7 et dont le comportement rhéologique est newtonien (Fig. 2). On remarque la taille de l'entrefer n'a aucune influence sur le comportement rhéologique. L'écart relatif maximum entre les courbes d'écoulement n'excède pas 0.5%. Ces résultats montrent que bien que le cisaillement ne puisse plus être considéré comme constant dans un entrefer large, les corrections de Krieger ne sont pas nécessaires pour déterminer la viscosité.

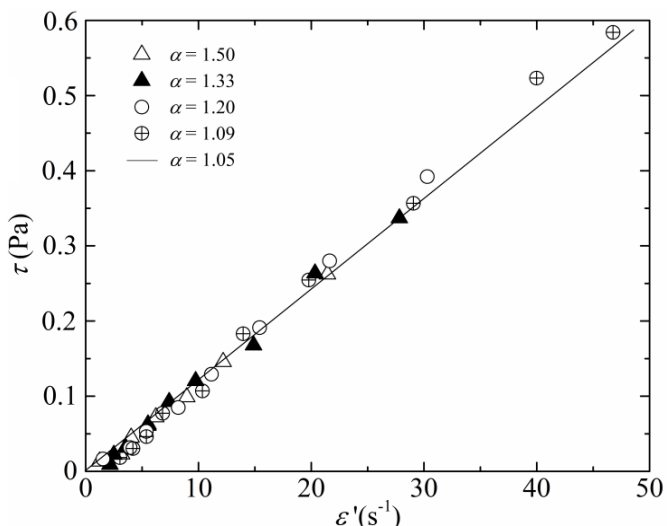


Fig. 2 : Rhéogramme de l'huile « EMEREX MT 3200 » dans les différents entrefers

3. Résultats et discussion

3.1. Influence du diamètre des particules

3.1.1 Contrainte à la paroi

La figure 3 représente la variation de la contrainte de ces suspensions en fonction du gradient de vitesses corrigé pour des concentrations en particules de 15% (Fig. 3a) et 25% (Fig. 3b) et pour différents diamètres. On constate que le comportement rhéologique de ces suspensions semble dépendre beaucoup du diamètre des particules. En effet, d'après les résultats obtenus, pour les diamètres 0.565 et 0.715 mm, le comportement rhéologique des suspensions est newtonien, il est donné par l'équation :

$$\tau = \mu \varepsilon' \quad (9)$$

avec la viscosité dynamique.

Pour les diamètres 0.3 et 0.45 mm, le comportement rhéologique est pseudoplastique () donné par la relation :

$$\tau = k(\varepsilon')^n \quad (10)$$

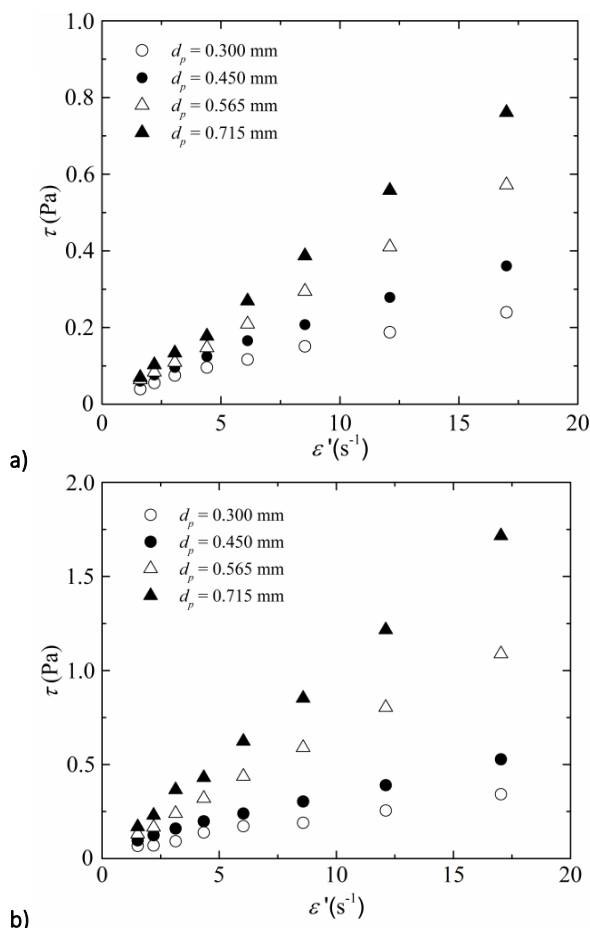


Fig. 3 : Variation de la contrainte de cisaillement en fonction du gradient de vitesses : a) $C_v = 15\%$; b) $C_v = 25\%$

D'autres auteurs ont trouvé ce comportement newtonien pour des suspensions de particules de polystyrène (de type différent du nôtre) dans l'eau salée et même densité que les particules. En effet, Stuart [16] a étudié ces suspensions

dont les dimensions des particules étaient plus grandes que celles que nous avons utilisées (0.97, 1.24, et 1.78) pour une gamme de concentration de 31.2, 40.6, 49.1, et 57%, (ces suspensions sont généralement appelées suspensions denses). Il a trouvé que toutes ces suspensions avaient un comportement newtonien. Ceci ne fait que rendre décisif l'effet du diamètre des particules sur le comportement rhéologique. On peut encore citer Bagnold [17] qui a trouvé ce comportement newtonien pour des suspensions de « cire minérale » dans l'eau, et de « stéarate de plomb » dans un mélange d'eau, d'alcool et de glycérol.

3.1.2 Viscosité apparente

La viscosité apparente dans le cas d'un comportement rhéologique d'Ostwald-de-Waele est tirée de la relation (10) :

$$\eta_{app} = k(\varepsilon')^{n-1} \quad (11)$$

L'influence du diamètre de la particule sur la viscosité apparente est représentée par la figure 4 pour des concentrations en particules respectivement de 15% (Fig. 4a) et 25% (Fig. 4b).

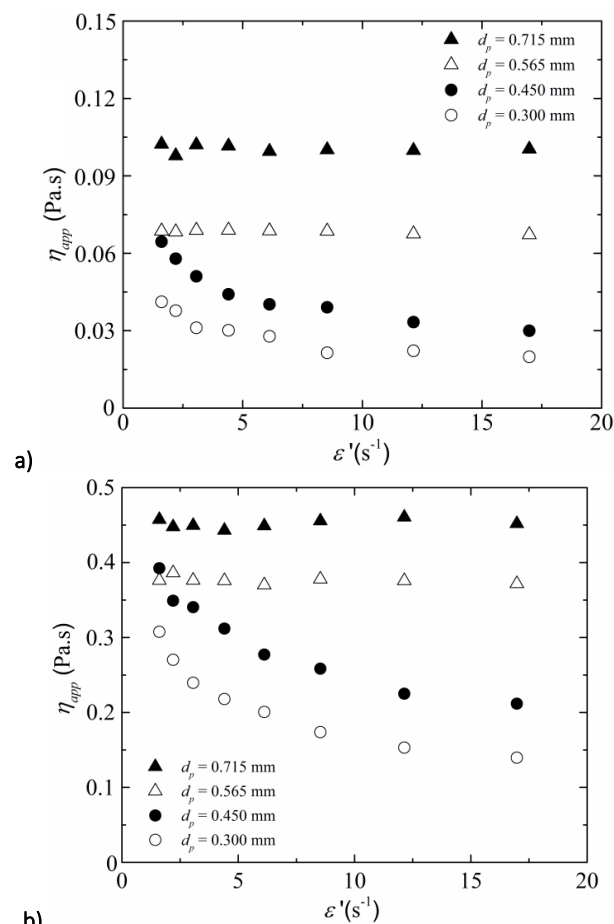


Fig. 4 : Variation de la viscosité apparente en fonction du gradient de vitesses : a) $C_v = 15\%$; b) $C_v = 25\%$

En effet, pour des diamètres 0.565 et 0.715 mm, la viscosité apparente reste constante (comportement newtonien), par

contre, pour des diamètres 0.3 et 0.45 mm, cette viscosité a tendance à décroître quand le gradient de vitesse augmente.

3.2. Influence de la concentration des particules

3.2.1 Contrainte à la paroi

Sur la figure 5, on peut facilement voir l'influence de la concentration sur la valeur de la contrainte à la paroi. Cette dernière croît avec la concentration.

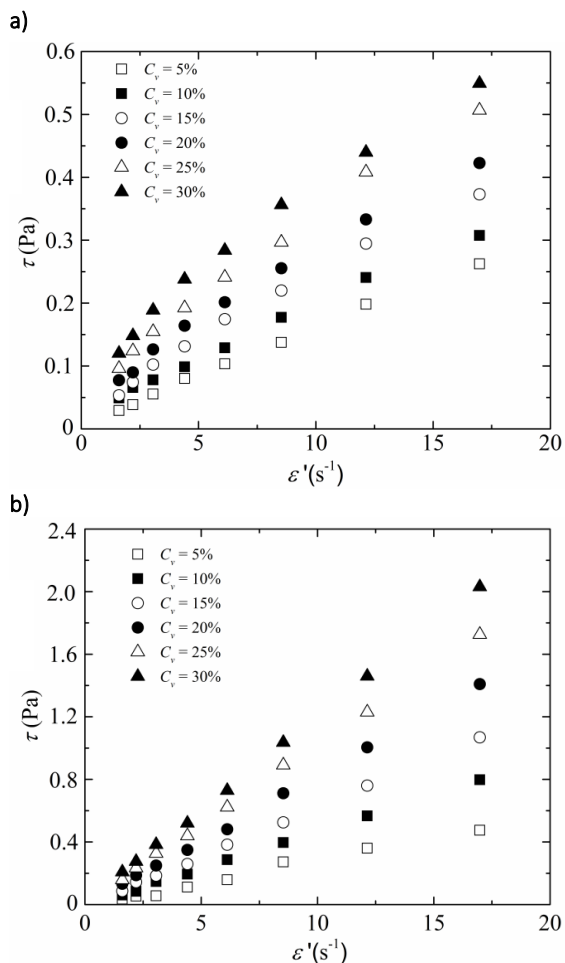


Fig. 5 : Variation de la contrainte de cisaillement en fonction du gradient de vitesses : a) $d_p = 0.45$ mm ; b) $d_p = 0.715$ mm

Bien que dans notre étude nous n'ayons pas pu voir l'influence de la contraction sur le comportement rhéologique des suspensions, celle-ci existe. En effet Saunders [22] dans ses études sur le Latex a montré que ce dernier avait un comportement newtonien jusqu'à une concentration de 25%. Il a pu constater cela en traçant la variation de l'indice d'écoulement en fonction de la concentration. Ce coefficient était constant jusqu'à la concentration indiquée. Au-delà de cette concentration, le comportement a tendance à devenir non newtonien. Ces résultats sont en bon accord avec ceux de Krieger et Maron [15]. De même Shaheen [21], dans ses études sur la

viscosité et l'écoulement des suspension, a montré que la concentration influe beaucoup sur le comportement rhéologique. En effet, les suspensions qu'il a utilisées et qui se composaient de particules de styrène divinyl benzène et d'eau distillée, montrent un comportement newtonien pour des concentrations inférieures à 40%, et pseudoplastiques au-delà.

3.2.2 Viscosité apparente

Sur la figure 6, on peut facilement voir que la viscosité apparente augmente avec la concentration. Ghassemzadeh [23], dans son étude sur les propriétés visqueuses des suspensions concentrées d'huile et de charbon, a trouvé que la viscosité apparente, en plus de la température et du gradient de vitesse, dépendait beaucoup de la concentration volumique. Ces résultats obtenus montrent bien l'influence de la concentration sur le comportement rhéologique. En effet, il montre que le comportement est newtonien pour des concentrations inférieures à 40% (Fig. 6a), pseudoplastique au-delà (Fig. 6b).

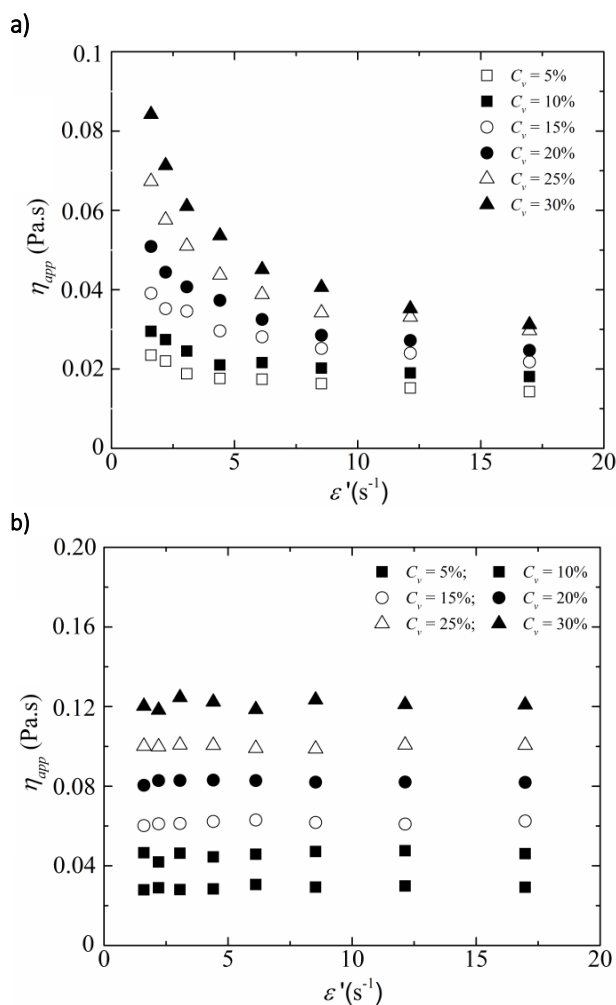


Fig. 6 : Variation de la viscosité apparente en fonction du gradient de vitesses : a) $d_p = 0,45$ mm ; b) $d_p = 0,715$ mm

3.3 Influence de la concentration et du diamètre des particules sur la viscosité relative, l'indice d'écoulement et la consistance

La viscosité relative d'une suspension a fait l'objet de nombreuses études théoriques, expérimentales et numériques en raison de son importance fondamentale dans un grand nombre d'applications. Il s'agit également d'un cas modèle de systèmes complexes où les équations du mouvement de chaque particule sont déterminées (équations de Stokes) mais où les propriétés macroscopiques (notamment la rhéologie) du système sont non triviales. Pour modéliser la viscosité relative en milieu concentré, plusieurs relations empiriques ont été proposées [18-20]. Une des difficultés est le comportement non newtonien de la suspension concentrée. Ainsi sa viscosité à faible vitesse de cisaillement est plus élevée que celle à plus forte vitesse de cisaillement.

La figure 7 représente la variation de la viscosité relative en fonction de la concentration, pour les diamètres 0.45 mm (Fig. 7a) et 0.715 mm (Fig. 7b). Ces deux courbes ont été tracées à des gradients de vitesses constants, très proches de 4.263 s^{-1} , afin de pouvoir les comparer. On remarque que la viscosité relative augmente avec la concentration volumique et la taille des particules. L'effet de la taille des particules dans les systèmes mono-dispersés sur la viscosité relative a été étudié par Shaheen [21] et Kitano [22]. Ils ont trouvé que lorsque la taille des particules augmente, la valeur de la viscosité relative augmente. Le premier a travaillé avec des particules sphériques, tandis que le second a utilisé des fibres cylindriques caractérisées par leur rapport d'aspect géométrique (longueur/diamètre).

L'effet du diamètre de la particule sphérique sur la viscosité relative, comme l'explique Shaheen [21], peut être dû à deux mécanismes. Le premier est la présence des forces attractives qui dépendent aussi bien de la surface que du volume de la particule. Le deuxième est l'affectation du champ d'écoulement hydrodynamique local près de la particule (caractérisé par le nombre de Reynolds de la particule) par le champ fort d'écoulement (caractérisé par le nombre de Reynolds de l'écoulement). D'autres auteurs, Eversson et Moreland cités dans [21], ont trouvé des résultats qualitativement identiques.

Les résultats de la viscosité relative s'accordent très bien avec le modèle de Mooney [24] pour les diamètres 0.3 et 0.415 mm, et avec le modèle de Happel [25] pour les diamètres 0.565 et 0.715 mm. Le modèle de Mooney est donné par :

$$\eta_{rel} = 1 + sAC_v \tag{12}$$

Où A est un facteur d'interaction qui est fonction du rapport du rayon de la particule solide à celui de l'enveloppe fluide qui entoure la particule solide; s est une constante égale à 5.5. Les valeurs des différents facteurs

intervenant dans les relations de Mooney et Happel sont données par le tableau 3.

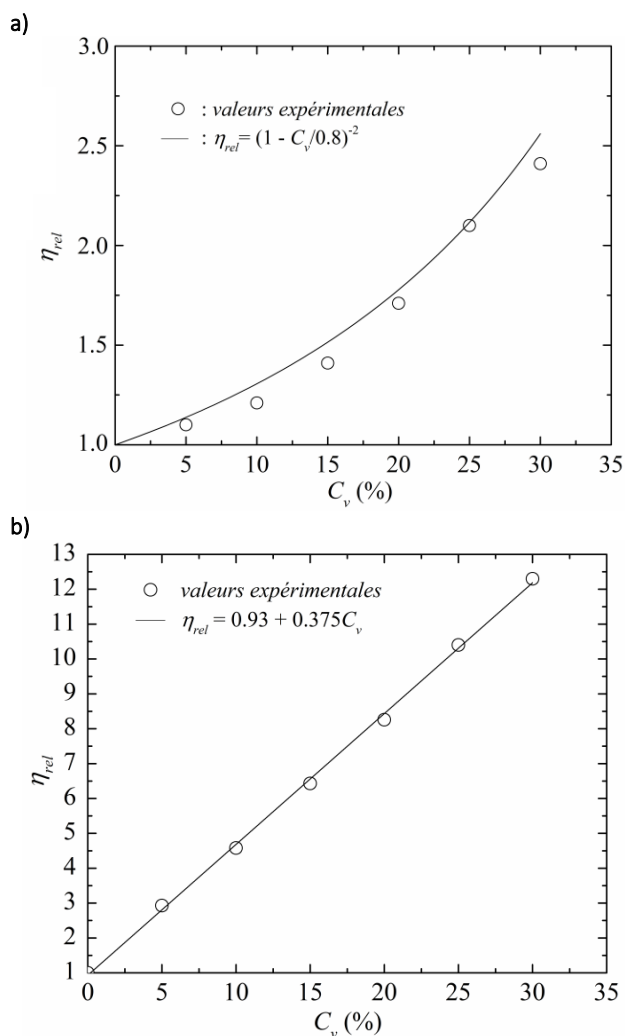


Fig. 7 : Variation de la viscosité relative en fonction du gradient de vitesses : a) $d_p = 0,45 \text{ mm}$; b) $d_p = 0,715 \text{ mm}$

Tableau 3 : Valeurs des différents coefficients des modèles de Mooney [24] et Happel [25] $\dot{\epsilon}' = 4.263 \text{ s}^{-1}$

Modèle de Mooney			Modèle de Happel		
d_p (mm)	k	a	d_p (mm)	s	A
0.300	1.25	1.42	0.565	5.5	5
0.450	1.30	2	0.715	5.5	6.7

En outre, ces coefficients dépendent de la valeur du gradient de vitesse choisie. L'effet du gradient de vitesses sur la viscosité relative a été étudiée par Shaheen [21], Kitano [22], et Ghassemzadeh [23] qui montrent également que cette viscosité dépend de celle du liquide porteur.

La figure 8a représente la variation de l'indice d'écoulement (n) et de la consistance (k) en fonction de la concentration. On constate que l'indice d'écoulement diminue lorsque la concentration augmente, par contre, la consistance augmente avec la concentration. Ceci a été

obtenu dans le cas de la suspension de particules d'amidon dans l'eau.

La figure 8b donne la variation de l'indice d'écoulement et de la consistance en fonction du diamètre des particules, pour une concentration de 15%. On constate que l'indice d'écoulement augmente avec le diamètre des particules : on tend vers l'écoulement newtonien.

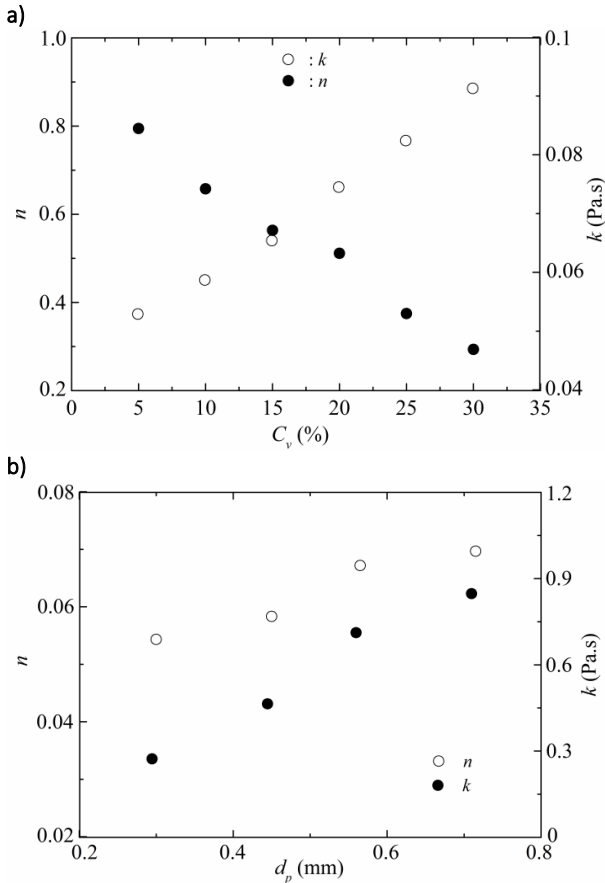


Fig. 8 : Variation de l'indice d'écoulement et de la consistance en fonction : a) de la concentration volumique C_v pour $\dot{\epsilon}' = 4.263 \text{ s}^{-1}$; b) du diamètre des particules d_p pour $\dot{\epsilon}' = 4.263 \text{ s}^{-1}$

Nous pensons que l'augmentation de la consistance avec le diamètre des particules est due au fait que lorsque l'on augmente ce diamètre, la distance séparant les centres de gravité de deux particules diminue, entraînant ainsi des frottements liquide-solide et solide-solide très importants.

4. Conclusion

La détermination des paramètres rhéologiques tels que la contrainte à la paroi, la viscosité apparente, etc..., des liquides et des suspensions (généralement des particules fines), faite dans les viscosimètres rotatifs à cylindres coaxiaux est toujours basée sur l'hypothèse du gradient de vitesses constant, valable quand le rapport des rayons (godet/rotor) est inférieur à 1.15. Pour les suspensions de dimension millimétrique, cette hypothèse n'est plus respectée car il est nécessaire d'utiliser des viscosimètres à

large entrefer de dimension au moins égale à dix fois le diamètre des particules. Cette étude expérimentale, nous permet de tirer les conclusions suivantes :

- L'influence du diamètre des particules sur le comportement rhéologique des suspensions est très importante. En effet, quand le diamètre des particules diminue, le comportement tend vers la pseudo-plasticité. En ce qui concerne l'influence de la concentration sur le comportement rhéologique, même si nous n'avons pas pu mettre en évidence cette influence, certains auteurs ont trouvé que pour des particules de même nature et de même diamètre, la transition entre les écoulements newtoniens et non-newtonien se fait à partir d'une certaine concentration [21], [22].

- Le modèle suivant lequel varie la viscosité relative en fonction de la concentration, dépend du diamètre des particules. En effet, cette variation suit le modèle de Mooney pour les petits diamètres et celui de Happel pour les grands.

Nomenclature

C_v	Concentration volumique	-
M	Couple appliqué sur le cylindre	Nm
H	Hauteur du cylindre	m
$U(r)$	Vitesse de la phase liquide ou de la suspension	m/s
d_p	Diamètre de la particule	m
k	Consistance	$\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$
n	Indice d'écoulement	-
r_e	Rayon du godet	m
r_i	Rayon du cylindre	m
$\alpha = r_e/r_i$	Rapport des rayons : godet/cylindre	-
$\dot{\epsilon}'$	Gradient de vitesses	s^{-1}
η_{app}	Viscosité apparente	$\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$
η_{rel}	Viscosité relative	-
μ	Viscosité dynamique	$\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$
τ_i	Contrainte tangentielle appliquée sur le cylindre	N/m^2
ω	Vitesse angulaire	s^{-1}

References

- [1]. Reiner M. Rhéologie théorique. Dunod, 1955.
- [2]. Persoz B. Introduction à l'étude de la rhéologie. Edition Dunod, 1960.
- [3]. Van Wazer J.R., Lyons J.W., Kim K.Y., Colwell R.E. Viscosity and flow measurement. A laboratory handbook of rheology. Interscience publishers, New York, 1963.
- [4]. Reiner M. Deformation strain and flow: An elementary Introduction to Rheology, 2nd ed., Lewis, London, 1960.
- [5]. Coleman D.B., Markovitz Noll W. Viscosimetric flows of non-newtonian fluids: Theory and Experiment. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, vol. 5, 1966.
- [6]. Courraze G., Grossiard J.L., Huang N. Initiation à la rhéologie : Bases théoriques et applications expérimentales. 4ème édition, Lavoisier, 2014.
- [7]. Midoux N. Mécanique et rhéologie des fluides en génie chimique. Technique et Documentation-Lavoisier, 1993 .
- [8]. G. Ovarlez, Q. Barral, and P. Coussot. 3D jamming and flows of glassy materials. Nature Materials, 2010, 9:115-119.
- [9]. Coussot P., Ancey CV. Frictional-viscous transition for concentrated suspensions. Sciences Editions, Paris. 1999, 327:515-522.
- [10]. Coussot P., Nguyen Q.D., Huynh H.T., Bonn D. Viscosity bifurcation in thixotropic, yielding fluids. Journal of Rheology, 2002, 46:576-589.
- [11]. Coussot P., Roussel N. Quantification de la thixotropie des matériaux cimentaires et de ses effets. Revue Européenne de Génie Civil, 2006, 10 : 45-63.
- [12]. Coussot P., Tabuteau H., Chateau X., Tocquer L. Ovarlez G. Aging and solid or liquid behavior in pastes. Journal of Rheology, 2006, 50:975-994.
- [13]. Mallock A. Determination of the viscosity of water. Proceeding of the Royal Society Series A, 1888, 45:126-132.
- [14]. Couette M. (1890). Etudes sur le frottement des liquides. Ann. Chim. Phys., 1993, 21:433-510.
- [15]. Krieger A., Martin E.W. Direct. Determination of the Flow Curves of Non-Newtonian Fluids. IV. Parallel-Plane Rotational Viscometer. J. of Appl. Phys., 1966, 37.
- [16]. Stuart B.S., Shawn K. Shear stresses developed during rapid shear of concentrated suspensions of large spherical particles between concentric cylinders. J. fluid Mech., 1983, 127:453-472.
- [17]. Bagnold R.A. Experiments on a gravity-free dispersion of large solid spheres in a Newtonian fluid under shear. Proceeding of the Royal Society A, 1954, 22:49-63.
- [18]. Khalil, M., Thèse de Doctorat, Université de Strasbourg, France, 2010.
- [19]. Boyer F., Pouliquen O., Guazzelli E. The measurement of suspension rheology. J. Fluid Mech., 2012, 686:5-25
- [20]. Guazzelli E., Morris J. A physical Introduction to Suspension dynamics. Cambridge University Press, 2012.
- [21]. Shaheen E.I. Rheological studies of viscosities and pipe flow of concentrated slurries. Powder Tech., 1971, 5:245-254.
- [22]. Kitano T., Kataoka T. The rheology of suspensions of vinylon fibers in polymer liquids. II. Suspensions in polymer solutions. Rheologica Acta, 1980, 20:403-415.
- [23]. Ghassemzadeh M.R., Carmi S. Rheological studies of coal-oil mixtures. Rheologica Acta, 1981, 20:198-202.
- [24]. Mooney, M., Viscosity of the concentrated suspensions of spherical particles, J. colloid Sci., 1951, 9:162.
- [25]. Happel J. Viscosity of Suspensions of Uniform Spheres. J. Appl. Phys., 1957, 28:1283.