

---

# Mesure de viscosité : les limites d'un rhéomètre à géométrie vane

Alexandre Pierre<sup>1</sup>, Arnaud Perrot<sup>2</sup>, Aymeric Histace<sup>3</sup>, Saber Gharsalli<sup>1</sup>, E-H. Kadri<sup>1</sup>

<sup>1</sup> L2MGC, Université de Cergy-Pontoise, 5 mail Gay-Lussac-Neuville-sur-Oise, 95031 Cergy-Pontoise

<sup>2</sup> FRE CNRS 3744, IRDL, Université de Bretagne Sud, F-56100 Lorient

<sup>3</sup> ETIS, ENSEA, Université de Cergy-Pontoise, 6 Avenue du Ponceau, 95014 Cergy-Pontoise

---

## RÉSUMÉ.

*Cette étude présente des résultats d'essais rhéologiques, réalisés avec une géométrie vane et dans une configuration à entrefer large, sur des suspensions d'argile. L'étude est focalisée sur la façon dont une mesure de la viscosité ne peut être efficace pour deux raisons: les limites de la géométrie vane elle-même et les limites de la suspension en fonction de sa teneur en particules solides. L'analyse d'image du cisaillement du matériau est réalisée pour analyser le régime d'écoulement. En fonction de la fraction volumique des particules solides dans le mélange, nous relierons le comportement macroscopique au régime rhéophysique de l'écoulement des suspensions en corrélant l'analyse d'image et les mesures issues du rhéomètre. Ce travail a deux objectifs: le premier est de décrire les phénomènes physiques qui contrôlent le comportement rhéologique macroscopique et le second est de mettre en évidence les limites de la géométrie vane pour mesurer la viscosité des suspensions minérales, comme des pâtes de kaolinite.*

## ABSTRACT.

*This study presents results from the rheological measurement of clay suspensions using vane geometry in a wide gap configuration. It focuses on how a measurement of viscosity cannot be effective for two reasons: the limits of the vane geometry itself and the limits of the material depending on its content of solid particles. Image analysis of the flow while shearing the material is carried out to relate the flow. Depending on the solid volume fraction of the particles in the mixture, we relate the macroscopic behavior using the image analysis and the shear-flow curves to the rheophysical regime of the flow of the suspensions. Therefore, this paper has two simultaneous goals: the first one is to describe the physical phenomena which control macroscopic behavior and the second one is to highlight the limits of the vane geometry for the viscosity measurement of mineral suspensions like kaolinite pastes.*

*MOTS-CLÉS : Rhéométrie, Géométrie vane, Suspension, Analyse d'images*

*KEY WORDS: Rheometry, Viscosity, Vane geometry, Suspension, Flow visualization..*

---

## 1. Introduction

Les suspensions minérales concentrées et les pâtes granulaires avec une teneur élevée en particules solides sont fortement utilisées dans le domaine du génie civil. Les mesures rhéologiques permettent la caractérisation des comportements en écoulement de ces matériaux : ciment, plâtre, argile, mortier, béton. Il faut garder à l'esprit que divers effets perturbateurs peuvent se produire au cours des essais rhéologiques : glissement à la paroi, fracture, sédimentation et effets de bord, etc [1] [2]. Ceux-ci peuvent conduire à une mauvaise interprétation des données obtenues avec un rhéomètre.

Un benchmark international sur des rhéomètres béton a mis en évidence que différents rhéomètres, équipés de différentes géométries et avec différents protocoles d'analyse des données, évaluent des paramètres rhéologiques avec une dispersion des valeurs non-négligeables [3]. Quant à la fiabilité des paramètres rhéologiques estimée avec une géométrie vane, elle est encore en discussion [4]. Il est généralement conseillé de recalculer le taux à partir de la mesure du couple et de la vitesse de rotation de cisaillement, afin de tracer les courbes d'écoulement [5].

Au cours des quinze dernières années, la géométrie vane a été utilisée pour étudier le comportement rhéologique des suspensions à forte teneur en particules solide. La géométrie Couette réduit les hétérogénéités d'écoulement par rapport à une géométrie vane, mais elle ne convient pas à la caractérisation de ciment, mortiers et/ou béton à fortes fractions volumiques solides et la plupart des résultats avec cette géométrie permettent de mesurer des valeurs de contrainte seuil inférieure à une centaine de Pascal [6]. La géométrie vane est principalement utilisée pour mesurer la contrainte seuil en imposant généralement une vitesse de rotation très faible et constante. L'originalité de ce travail est de se concentrer sur la limite de cette géométrie, dans une configuration de large entrefer, pour évaluer la viscosité, en étudiant le comportement du matériau et le rhéomètre utilisé. Il n'est pas habituel de mesurer la viscosité en utilisant cette géométrie car elle peut induire de la turbulence à une vitesse de rotation inférieure à un écoulement de Couette, en fonction du nombre de lames. En outre, en raison de la dilatance, le matériau peut subir des variations volumétriques pendant l'essai. Cependant, de nombreux rhéomètres basés sur la géométrie vane ont été développés pour d'obtenir une description complète du comportement de suspensions cimentaires, de suspensions d'argiles, de bétons et mortiers [7].

La portée de cette étude est de proposer un outil simple pour prédire la validité d'une mesure rhéologique de la viscosité en utilisant la géométrie aube. L'idée est de distinguer le cas où la dissipation visqueuse dans un rhéomètre à palettes se produit à l'aide d'une analyse physique de l'écoulement. Ce travail commence par des mesures rhéologiques sur des suspensions de kaolinite et de l'analyse d'image pour observer la zone de cisaillement quand un grand écart est utilisé. Nous nous concentrons d'abord sur la limite de la zone non-cisaillée et cisaillé par analyse d'image. Cela permet de vérifier si un glissement ou une localisation de l'écoulement se produit. Dans une dernière étape, nous mettons en évidence que la mesure de la viscosité en utilisant la géométrie pale est possible seulement si le rapport de couverture de la géométrie est strictement inférieur à 1. En outre, en utilisant la théorie actuelle qui définit avec précision le comportement rhéologique des particules sphériques, nous montrons que les mesures rhéologiques peuvent être directement liés au régime rhéophysique qui dépend de la fraction volumique solide de particules de kaolinite.

## 2. Matériaux et méthodes

### 2.1. Matériaux

Une argile, appelée Speswhite™, fournie par IMERYS Minerals Ltd est utilisée dans ce travail. Entre 76 % et 83 % des particules sont inférieures à 2 µm et 0,5 % sont supérieures à 10 µm et le diamètre moyen est de 0,7 µm. Le principal constituant minéral est de la kaolinite, qui se compose de silicate d'aluminium hydraté,  $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$  formée par la décomposition du feldspath. L'argile est caractérisée par des limites d'Atterberg liquides de 70% et une limite plastique de 37 %. La densité est de 2,6. Les suspensions d'argile ont été préparées avec un rapport eau / poudre allant de 37 à 175 %. Les suspensions ont été préparées en mélangeant de la poudre sèche avec de l'eau pendant 5 minutes en utilisant un mélangeur Contralab.

### 2.2. Méthodes

Les mesures rhéologiques ont été effectuées en utilisant un rhéomètre (Anton Paar MCR 102®), équipé d'une géométrie vane à quatre pales ( $H_v = 4$  cm;  $R_v = 1,1$  cm;  $R_c = 4,51$  cm). La température est consignée à 25 °C par un dispositif Peltier. Les expériences sont réalisées en imposant une rampe logarithmique en vitesse de cisaillement, allant de  $10^{-3}$  ou  $10^{-4}$  s<sup>-1</sup> jusqu'à 1000 s<sup>-1</sup>, pendant une durée de 20 minutes.

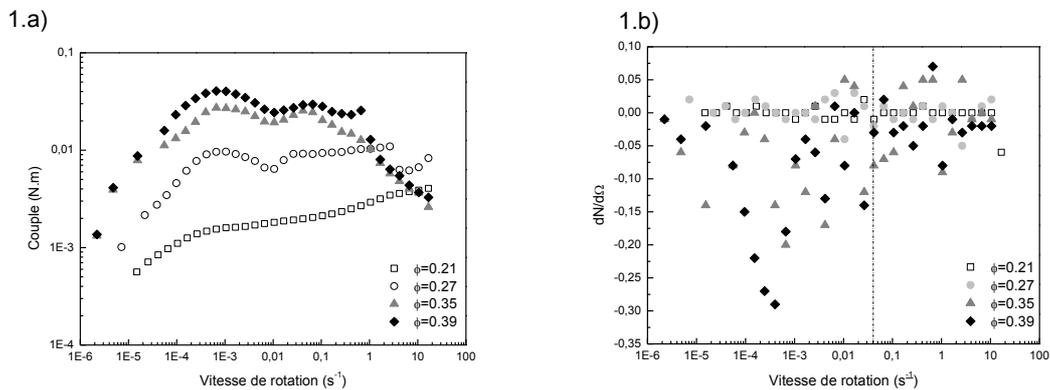
Concernant l'acquisition des données, cinq points par décade sont mesurés sur plus de 6 décades et conduisent à 31 mesures (1 point est ajouté automatiquement par le logiciel pilotant le rhéomètre pour le début de la mesure). Comme nous voulons proposer une caractérisation rapide (environ 20 minutes), éventuellement applicable aux matériaux cimentaires, nous avons choisi d'utiliser une rampe logarithmique pour obtenir des courbes d'écoulement sur une large gamme de taux de cisaillement. Le comportement du matériau pendant la rampe en vitesse est enregistré avec une caméra HD afin de réaliser une analyse d'image de l'écoulement.

Immédiatement après le mélange, le seuil de mise en écoulement est également mesuré à l'aide d'un rhéomètre Anton Paar Rheoloab QC équipée avec une géométrie vane. Une déformation croissante est appliquée à l'échantillon à une vitesse de cisaillement de  $0,01 \text{ s}^{-1}$  pendant 240 s. Afin d'améliorer la fiabilité et la précision des résultats, chaque mesure a été effectuée cinq fois pour chaque suspension.

### 3. Résultats

#### 3.1. Rhéométrie

La figure 1 présente les résultats couple-vitesse de rotation ainsi que l'évolution de la force normale en fonction du taux de cisaillement pendant la mesure.

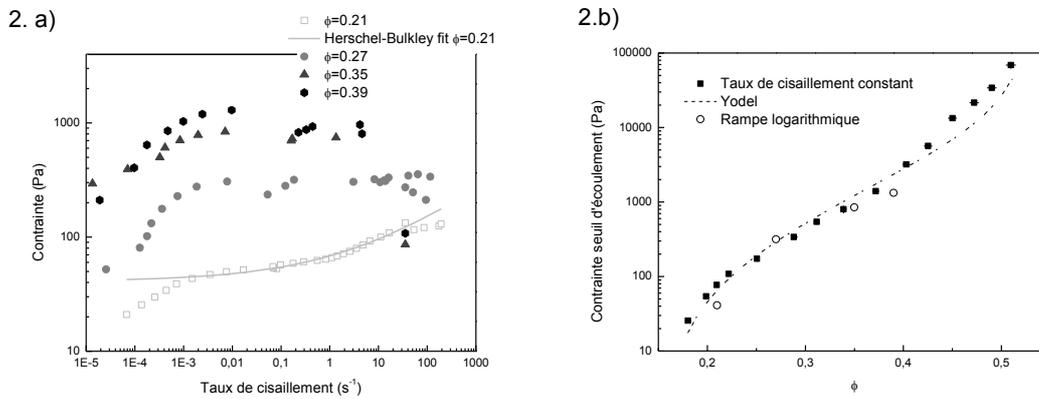


**Figure 1.** a) Couple mesuré en fonction de la vitesse de rotation imposée ; b) dérivée de l'effort normal en fonction de la vitesse de rotation.

Trois comportements différents peuvent être observés sur la figure 1 en fonction de la fraction volumique solide. Pour une fraction volumique solide "faible" ( $\phi=0,21$ ), le couple augmente en fonction de la vitesse de rotation pendant toute la durée de l'essai. Pour une fraction volumique solide "moyenne" ( $\phi=0,27$ ), la pâte de kaolin présente une diminution du couple suivie d'un plateau et ensuite d'une chute brutale à grande vitesse de rotation. Pour une fraction volumique solide élevée ( $\phi=0,35$  ;  $\phi=0,39$ ), le couple présente une faible diminution suivie d'un plateau et une diminution progressive du couple avec la vitesse de rotation. Il semble que seul le test effectué avec une fraction volumique solide de 0,21 donne une courbe caractéristique d'écoulement qui peut conduire à l'estimation des deux composantes visqueuses et plastiques du comportement rhéologique.

À notre connaissance, seules quelques observations peuvent être trouvées sur la base de mesures de force normale lors des essais rhéométriques utilisant une géométrie vane. En effet, les géométries plan-plan ou les géométries cône-plan sont plus usuelles pour de telles mesures [8] [9]. Les petites fluctuations de contraintes normales apparaissent à une fraction de volume solide de 0,27 et augmente sensiblement pour  $\phi = 0,35$  et  $\phi = 0,39$ . D'autre part pour  $\phi = 0,21$ , la force normale reste proche de zéro. Ceci confirme que l'écoulement des particules, une fois que la contrainte seuil est atteinte est totalement indépendant du régime de la force normale détectée par le rhéomètre. Dans ce cas et comme rapporté par Coussot [10], l'interaction hydrodynamique argile-eau régit le comportement rhéologique. A l'inverse, lorsque la fraction volumique solide est plus proche de la fraction volumique solide maximale, le mélange eau-kaolin peut former un matériau pâteux où le comportement rhéologique peut être gouverné par des interactions granulaires.

Nous calculons ensuite le taux de cisaillement en fonction des valeurs de couple et de vitesse de rotation pendant l'essai en utilisant la méthodologie développée dans [5]. Nous pouvons alors présenter les courbes contrainte-taux de cisaillement à la figure 2.a). L'évolution de la contrainte seuil en fonction de la fraction volumique solide est illustrée sur la figure 2.b).



**Figure 2.** a) Contrainte en fonction du taux de cisaillement ; b) Seuil de mise en écoulement en fonction de la fraction volumique solide.

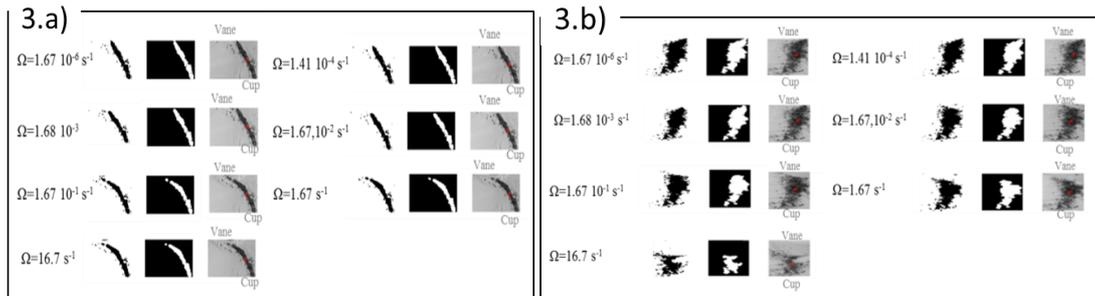
L'expression du Yodel [11], représenté à la figure 2.b) s'écrit selon l'équation [1] :

$$\tau_c = m \frac{\phi^2(\phi - \phi_p)}{\phi_m(\phi_m - \phi)} \quad [1]$$

Avec  $\tau_c$  le seuil de mise en écoulement,  $\phi_m$  la fraction volumique solide maximale et  $\phi_p$  la fraction volumique solide de percolation. Le paramètre  $m$  est un facteur relié à la distribution des particules en taille et à la force d'attraction entre particules. Le meilleur ajustement du Yodel est obtenu  $\phi_p = 0.16$  ;  $\phi_m = 0.52$  et  $m = 5000$ . Nous observons que les valeurs de seuil évaluées suivant la procédure en rampe de cisaillement sont proches des valeurs de seuils obtenu avec une vitesse de cisaillement constante.

### 3.2. Analyse d'images

L'analyse d'image de la surface supérieure dans l'entrefer a été effectuée au cours des mesures rhéologiques. Deux exemples d'analyse d'image sur des fractions de volume solides de 0,21 et 0,39 sont représentés sur la figure 3.



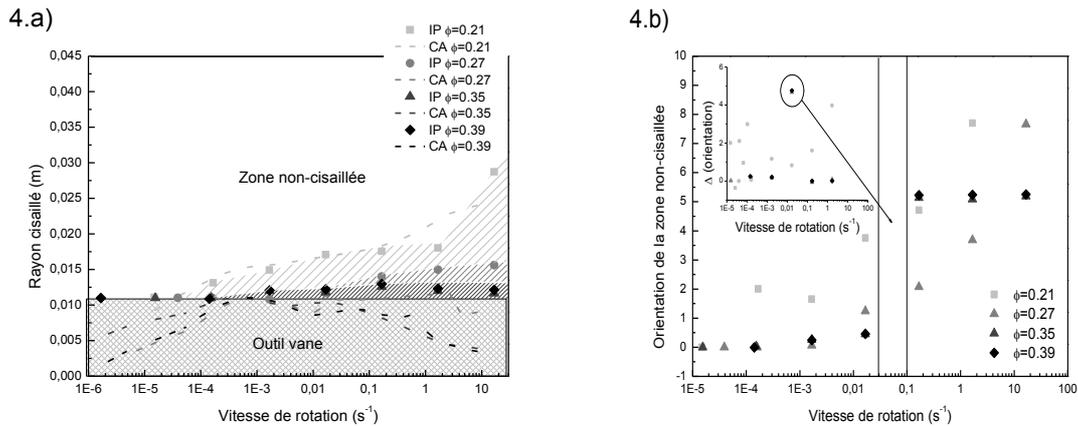
**Figure 3.** Analyse d'image de la surface d'une suspension de Kaolin dans l'entrefer d'un rhéomètre à géométrie vane pendant un essai à taux de cisaillement imposé croissant ; a)  $\phi=0.39$  ; b)  $\phi=0.21$

On notera que la partie supérieure de chaque image est la zone proche de l'outil vane et le fond est en relation avec la zone proche du bord de cylindre contenant le matériau. Un seuillage automatique adaptatif permet d'extraire une image binaire sur laquelle la forme des marqueurs peut être caractérisée en utilisant des caractéristiques standards, y compris l'orientation. Cette caractéristique d'orientation est exprimée sous la forme d'un scalaire qui définit l'angle entre l'axe x et l'axe majeur de l'ellipse. En outre, les aires des régions binaires correspondant aux marqueurs sont également calculées et permettent d'évaluer la valeur du rayon de la zone non cisailée en fonction de l'évolution du taux de cisaillement.

Nous comparons ensuite la valeur du rayon mesurée avec la valeur du rayon calculée suivant l'analogie de Couette (équation [2]) que nous notons  $R_{v_e,cal}$  :

$$R_{v_e,cal} = \sqrt{\frac{M}{2\pi\tau_c h_v}} \quad [2]$$

Avec  $\tau_c$  la contrainte de mise en écoulement. La figure 4.a) illustre la zone cisailée calculée selon l'analyse d'image (IP) et selon la théorie de Couette (CA). La figure 4.b) représente la variation du paramètre d'orientation des marqueurs en fonction de la vitesse de rotation.



**Figure 4.** Analyse d'image de la surface d'une suspension de Kaolin dans l'entrefer d'un rhéomètre à géométrie vane pendant un essai à taux de cisaillement imposé croissant ; a) Evolution du rayon cisailé en fonction de la vitesse de rotation : comparaison entre l'analogie de Couette (CA) et l'analyse d'image (IP) ; b) Orientation et analyse de la variation d'orientation en fonction de la vitesse de rotation

Seule la prédiction du rayon cisailé suivant l'analogie de Couette est fiable avec des résultats expérimentaux en-dessous de  $0,5 \text{ s}^{-1}$  et pour une faible fraction volumique solide. Les valeurs de rayons calculées à partir de l'équation [2] pour les fractions volumique solides élevées sont éloignées des valeurs de rayon évaluées à partir de l'analyse d'image. L'analogie de Couette n'est pas fiable pour l'évaluation de la zone cisailée dans le cas où la suspension est relativement concentrée en particules de Kaolinite. Le paramètre d'orientation est plus fiable pour mettre en évidence la localisation du flux pour de telles suspensions.

L'orientation relative de la zone cisailée en fonction de la vitesse de rotation est représentée sur la figure 4.b). Trois comportements rhéologiques différents peuvent être observés en fonction de la fraction volumique solide. On notera que l'orientation augmente progressivement en fonction du taux de cisaillement pour une fraction volumique solide faible. A une fraction volumique solide élevée, un changement sévère est observé entre  $0,02 \text{ s}^{-1}$  et  $0,2 \text{ s}^{-1}$ . Ceci est bien lié à la diminution du couple observé précédemment dans la figure 1.a) et à la stabilisation de la force normale au-delà de  $0,03 \text{ s}^{-1}$  sur la figure 1.b). L'orientation est constante au bout de  $0,1 \text{ s}^{-1}$  : les lames sont déjà entièrement couvertes par le matériau. Après cette étape, le couple ne représente que la force de glissement entre le matériau collé sur les pales et le matériau non-cisailé dans l'entrefer.

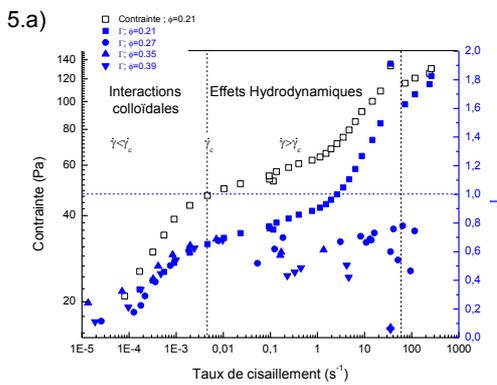
## 4. Discussion

### 4.1. Régime rhéophysique d'écoulement

Nous nous concentrons sur les interactions possibles entre les particules en fonction de la fraction volumique solide. Tel que rapporté par Coussot et Ancy [12], nous utilisons la valeur d'un nombre sans dimension afin de quantifier l'importance des interactions colloïdales par rapport aux effets hydrodynamiques selon l'équation [3] :

$$\Gamma = \frac{\tau}{\tau_c} \frac{K}{b} \quad [3]$$

Avec  $b = r(\phi/\phi_m)^{-1/3}$  la distance entre le centre de deux particules voisines et  $K = 3\pi r$  un paramètre qui dépend de la forme, la taille et l'orientation des particules [12]. La figure 5 représente ce paramètre en fonction du taux de cisaillement.



5.b)



**Figure 5.** a)  $\Gamma$  et contrainte en fonction du taux de cisaillement ; b) Carotte formée par la géométrie vane.

La prédominance des interactions colloïdales est évidente pour les faibles vitesses de cisaillement. On peut noter que les dissipations hydrodynamiques régissent l'écoulement à des vitesses de cisaillement plus élevées. Les résultats pour les fractions de volume solides plus élevées (à savoir la fluctuation de la valeur  $\Gamma$  avec une augmentation du taux de cisaillement) semblent montrer que d'autres interactions régissent le comportement rhéologique macroscopique. Pour ces fractions de volume solides, un phénomène de dilatance est susceptible de se produire en raison de l'enchevêtrement des particules sous cisaillement.

Pour les suspensions de ciment, qui peuvent être assimilés à des particules sphériques, la distinction entre une suspension où la contrainte seuil est régie par des interactions colloïdales et une suspension qui peut s'écouler principalement en raison de l'enchevêtrement et un réseau de contact direct se produit généralement pour une fraction volumique solide égale à  $0.85 \phi_m$  [13]. Ici  $\phi_m$  est caractérisée par la divergence de la contrainte seuil et sa valeur a été estimée à 0,52 précédemment (paragraphe 3.1).

Les fortes variations du paramètre d'orientation (Figure 4.b)) et du début du bruit de force normale (Figure 1.b)) ont été observées pour une fraction volumique solide de 0,35. Cette valeur peut être estimée comme une valeur proche de la fraction volumique solide critique  $\phi_c$ , généralement associée à un réseau de percolation des particules bloqués. Alors, une valeur de 0,67 est calculée pour  $\phi_c/\phi_m$ , qui est inférieur à 25% de celle d'une suspension de ciment [13]. Cette valeur plus faible peut s'expliquer par la forme en château de carte et en feuillet de la kaolinite, qui peut ainsi former des agrégats en fonction des charges de surfaces [14].

#### 4.2. Limitations de la géométrie vane

Nous nous concentrons maintenant sur les limites dues à la géométrie vane utilisée dans cette étude. Comme indiqué par Coussot [1] pour décrire la condition d'écoulement d'un matériau, il est nécessaire d'utiliser un critère prenant en compte un champ de contraintes en trois dimensions. Nous utilisons une approche basée sur le critère de Von- Mises car son principal avantage est de fournir une expression simple pour décrire le cisaillement d'un fluide à seuil simple sans confinement. Ce critère est indépendant de la pression hydrostatique et est basée sur le déviateur des contraintes et non la contrainte de Cauchy.

L'équation de Von- Mises réduit peut être exprimée en fonction des contraintes principales :

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 = 2\sigma_v \quad [4]$$

Avec  $\sigma_2 = -\sigma_3 = 2 \frac{\Omega R_v^2 R_c^2 \eta}{R_v^2 - R_c^2 r^2}$  la contrainte principale pour un rhéomètre en rotation en utilisant une géométrie Couette ou à ailettes. Le matériau commence à s'écouler lorsque  $\sigma_v$  la contrainte uniaxiale atteint une contrainte de cisaillement critique pour lequel écoulement se produit lorsque seul l'effet gravitationnel est pris en compte :

$$\sigma_{max} = \frac{\rho g h}{\sqrt{3}} \quad [5]$$

Pour un tel système, nous pouvons alors calculer la hauteur pour laquelle un matériau est capable de soutenir la gravité et ne coule pas sous son propre poids si nous supposons que  $\sigma_{max} = \tau_c$ . Alors, il est possible d'introduire un coefficient, noté  $\nu$  et dont l'expression est

$$v = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{h_v g \rho_{paste}}{\tau_c} \quad [6]$$

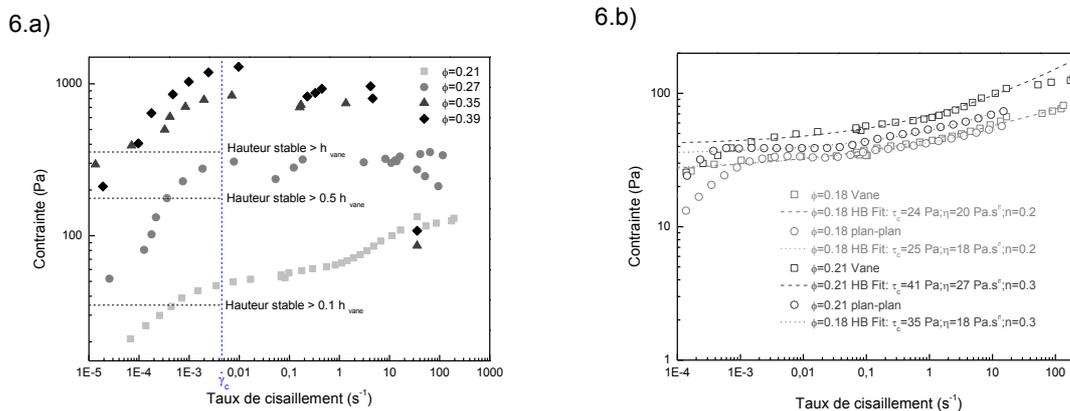
Ce critère indique simplement la stabilité et/ou l'instabilité verticale en relation avec la surface cisailée par l'outil vane en rotation. Si  $v \ll 1$ , alors le matériau est instable et est entraîné par l'écoulement induit par la géométrie vane. Au contraire, si  $v \geq 1$ , le matériau est trop rigide pour s'écouler suivant la surface de cisaillement localisée. En outre, si un phénomène de dilatance existe, la formation d'un anneau vide autour de la géométrie vane est fortement probable. Quand le rapport  $v$  est proche de 1 (comme ici à une fraction volumique solide de 0,27 et un seuil de 357 Pa, le matériau dans l'entrefer est stable et la rotation de la géométrie vane forme une carotte (figure 5.b).

Au-delà de la valeur de contrainte critique  $\sigma_{max,h}$  qui prend en compte la hauteur des ailettes de la géométrie vane utilisée, aucune viscosité ne peut être mesurée en utilisant un rhéomètre à géométrie vane d'une hauteur  $h_v$ . Cette valeur est en accord avec les courbes d'écoulements obtenues à l'aide du rhéomètre à ailettes. Si la localisation de cisaillement s'est produite, le matériau ne peut pas s'écouler à l'intérieur de la fracture verticale sur une profondeur verticale égale à  $vh_v$ . Il est important de noter que la fiabilité de la mesure de la viscosité dépend fortement du paramètre  $v$ .

Des mesures à l'aide d'une géométrie plan-plan de référence ont été effectuées afin de confirmer la fiabilité du critère de l'équation [6] pour une suspension de fraction volumique solide 0,21. En outre, nous avons également effectué un test sur une suspension avec une fraction volumique solide de 0,19 afin de tester une suspension ayant un paramètre  $v$  de valeur inférieure à 0,1. La comparaison des courbes d'écoulement obtenues avec les deux géométries et l'ajustement du modèle Herschel-Bulkley sont tracées sur la figure 6.b). Les résultats montrent que la fraction volumique solide de 0,18, les deux géométries permettent de calculer les mêmes paramètres rhéologiques, c'est à dire  $\tau_c \approx 25$  Pa,  $\eta \approx 19$  Pa.s<sup>-n</sup>;  $n \approx 0.20$ . Comme nous le voyons sur la figure 6, le rapport de stabilité est inférieur à 10% pour cette fraction volumique solide. Ce résultat conduit à une comparaison fiable avec les valeurs de référence de seuil de mise en écoulement, la consistance et l'indice calculé à partir des mesures de plaque plate. Cela confirme également que le matériau capable de circuler à l'intérieur de la fracture verticale permettra d'obtenir des mesures rhéologiques fiables.

Pour les suspensions d'une fraction volumique solide de 0,21, le rapport de stabilité est légèrement supérieur à 10 % et conduit à des valeurs différentes entre la géométrie plan-plan et la géométrie de vane. Ces valeurs diffèrent de près de 15% concernant le seuil de mise en écoulement et de plus de 50% avec les valeurs de consistance. Lorsque ce paramètre est supérieur à 0,1, il peut être prévu que la viscosité mesurée doit être écarté d'à minima 10% de la viscosité réelle du matériau.

Concernant les suspensions d'une fraction volumique solide de 0,19, les rhéogrammes obtenus avec les deux géométries sont très proches. Par conséquent, ce résultat montre que le paramètre  $v$  peut être utile afin de vérifier si les caractérisations rhéologiques avec une géométrie vane (d'une hauteur d'outil donnée) peuvent être effectuées pour fournir une description précise et fiable du comportement visqueux d'une suspension minérale



**Figure 6.** Contrainte en fonction du taux de cisaillement : indication du critère de stabilité.

## 5. Conclusion

Nous avons proposé une étude des mesures rhéologiques avec une géométrie vane sur des suspensions de kaolin contenant diverses teneurs en particules. Nous avons démontré que l'apparition significative d'un effort normal lors de mesures rhéologiques, réalisées avec une géométrie vane, est directement liée à la localisation de l'écoulement. La fraction volumique solide critique pour laquelle la force normale commence à fluctuer a été évaluée à 0,35. Nous avons montré que la forme typique des particules de kaolin donne un rapport  $\phi_c/\phi_m$  de 0,65, avec  $\phi_m=0,52$  la fraction volumique caractérisée par la divergence du seuil de mise en écoulement. Ces résultats sont justifiés par la forme en plaquette des particules de kaolin. Les analyses d'images ont montré que l'analogie de Couette est fiable pour évaluer le rayon cisailé tant que le matériau présente des interactions colloïdales à faible taux de cisaillement et des effets hydrodynamiques à des taux de cisaillement plus élevés. Par ailleurs, l'analyse d'images est une méthode simple et utile pour détecter le début de la localisation de l'écoulement. Il apparaît également que le paramètre d'orientation de la zone cisailée, évaluée selon l'analyse d'images, est efficace à une vitesse de rotation relativement faible pour les suspensions de fraction volumique solides élevées. Nous avons souligné que les valeurs de vitesse de rotation et de couple doivent être utilisées pour procéder respectivement à la conversion en valeurs de taux cisaillement et de contraintes. Les résultats ont montré que les taux de cisaillement calculés, à partir des valeurs de couple et de vitesse de rotation, diffèrent du taux de cisaillement que le rhéomètre devrait imposer. Enfin, nous avons proposé l'utilisation d'un critère de cisaillement simple, afin d'évaluer une valeur limite de contrainte de cisaillement pour laquelle la mesure de la viscosité n'est pas possible en utilisant une géométrie vane pour ce type de suspensions concentrées. Cette contrainte de cisaillement critique est directement liée à la hauteur de la géométrie vane utilisée.

## 6. Bibliographie

- [1] "P. Coussot, Rheometry of pastes, suspensions, and granular materials, Wiley, New-York, 2005."
- [2] "P. Coussot, L. Tocquer, C. Lanos, G. Ovarlez, Macroscopic vs. local rheology of yield stress fluid, J. Non-Newt. Fluid. Mech. 158 (2009) 85–90."
- [3] "C.F. Ferraris, L.E. Brower, P.F.G. Banfill, Comparison of concrete rheometers: International tests at LCPC (Nantes, France), US Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology, 2001."
- [4] "O. H. Wallevik, D. Feys, J. E. Wallevik, K. H. Khayat, Avoiding inaccurate interpretations of rheological measurements for cement based materials, Cem. Concr. Res. 78 (2015) 100-109."
- [5] "P. Estellé, C. Lanos, A. Perrot, Processing the Couette viscometry data using a Bingham approximation in shear rate calculation, J. Non-Newton. Fluid Mech. 154 (2008) 31-38."
- [6] "G. Ovarlez, F. Mahaut, Fabien, F. Bertrand, X. Chateau, Flows and heterogeneities with a vane tool: Magnetic resonance imaging measurements, J. Rheol. 55 (2011) issue 2."
- [7] "P. Estellé, C. Lanos, High torque vane rheometer for concrete: principle and validation from rheological measurements, Appl. Rheol. 22 (2012) 12881."
- [8] "G. Ovarlez, F. Bertrand, S. Rodts, Local determination of the constitutive law of a dense suspension of noncolloidal particles through MRI, J. Rheol. 50 (2006) 259–292."
- [9] "A. Fall, F. Bertrand, G. Ovarlez, D. Bonn, Shear thickening of cornstach suspensions, J. Rheol. 56 (2012) 575."
- [10] "P. Coussot, Structural similarity and transition from Newtonian to non-Newtonian behavior for water-clay suspensions, Phys. Rev. L. 74 (1995) 3971-3974."
- [11] "R.J. Flatt, P. Bowen, Yodel: a yield stress model for suspensions, J. Am. Ceram. Soc., 89 (2006) 1244–1256."
- [12] "P. Coussot, C. Ancey, Rheophysical classification of concentrated suspensions and granular pastes, Phys. Rev. E. 59 (1999) 4445-4457."
- [13] "N. Roussel, A. Lemaître, R.J. Flatt, P. Coussot, Steady state flow of cement suspensions: A micromechanical state of the art, Cem. Concr. Res 40 (2010) 77-84."
- [14] "Linking rheological and geotechnical properties of kaolinite materials for earthen construction, Mat. Struc (2016) 1-9."