

# Effet du chauffage sur la vitesse de glissement d'une solution de carboxyméthylcellulose s'écoulant dans des conduites cylindriques

Hacina. ABCHICHE<sup>\*a</sup>, Imène.BOUCHELKIA<sup>b</sup>, Mounir.MELLAL<sup>c</sup>, K.Youb. BENKAHLA

<sup>\*b,c</sup>Laboratoire des Phénomènes de Transfert, Faculté de Génie Mécanique et de Génie des Procédés, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene

BP 32 EL ALIA, Alger, Algérie

<sup>\*</sup>(auteur correspondant : [habchiche@usthb.dz](mailto:habchiche@usthb.dz); abchichehacina@yahoo.fr)

**Résumé** - Les écoulements des fluides complexes dans des conduites cylindriques montrent souvent des effets de parois qui sont dus à la présence d'un film pariétal résultant de l'interaction entre les particules fluides et les limites solides des conduites.

Le glissement à la paroi dépend des conditions d'essai (contrainte à la paroi, pression ...), de la paroi de contact (interactions physico-chimiques entre le fluide et la paroi) et de la composition du fluide (la viscosité, le taux de déformation, structure chimique, additive). Ce phénomène complexe est un sujet encore ouvert tant au niveau de son interprétation que de sa quantification. L'objectif de cette étude est la détermination de la vitesse de glissement déterminée par la méthode de correction de GEIGER d'une solution de carboxyméthylcellulose (CMC) à 1,5% (le CMC utilisé est caractérisé par un pH de 10,5 et un degré de substitutions de 0,51) ainsi que l'effet du chauffage des conduites d'écoulement sur cette vitesse. Les résultats ont montré que la température du fluide est un facteur important qui influe sur la vitesse de glissement.

## Nomenclature

|                |  |                      |   |
|----------------|--|----------------------|---|
| $a(\tau_p)$    | Pente du dépouillement de Weigrefe, $m^2 s^{-1}$                     | $Q_t$                | Débit volumique total, $m^3 s^{-1}$                     |
| $d$            | Diamètre de la conduite, m.  | $V_g$                | Vitesse de glissement, $ms^{-1}$                        |
| $f(d, \tau_p)$ | Pente du dépouillement de Geiger, $ms^{-1}$                          | $\dot{\gamma}_p$     | Taux de cisaillement pariétal, $s^{-1}$                 |
| $g(\tau_p)$    | Taux de cisaillement apparent sans glissement selon Geiger, $s^{-1}$ | $\dot{\gamma}$       | Vitesse de cisaillement, $s^{-1}$                       |
| $k$            | Consistance du fluide d'Ostwald, $Pa.s^n$                            | $\dot{\gamma}_{app}$ | Taux de cisaillement apparent, $s^{-1}$                 |
| $L$            | Longueur de la conduite, m   | $\dot{\gamma}_a$     | Taux de cisaillement apparent sans glissement, $s^{-1}$ |
| $R$            | Rayon de la conduite, m  | $\eta$               | Viscosité apparente du fluide, $Pa.s$                   |
| $Q_c$          | Débit volumique résultant du cisaillement, $m^3 s^{-1}$              | $\tau_p$             | Contrainte de cisaillement pariétal, $Pa.s$             |
| $Q_g$          | Débit volumique dû au glissement, $m^3 s^{-1}$                       | $n$                  | Indice d'écoulement d'Ostwald                           |
| $\Delta P$     | Perte de charge, $Pa$  | $n'$                 | Indice d'écoulement généralisé                          |

## 1. Introduction

Les écoulements des fluides complexes dans des conduites cylindriques montrent souvent des effets de parois dus à l'interaction entre les particules et les limites solides des conduits.

L'analyse des mesures rhéologiques, ne prenant pas en compte ces interactions fluide-paroi, conduira alors à des résultats erronés. Pour trouver la loi rhéologique réelle de ce type de fluide, on a souvent recours à la correction des effets de parois. Le phénomène de glissement à la paroi est fréquemment rencontré pour plusieurs types de fluides notamment les solutions de polymères, pour lesquels ce glissement est souvent assimilé à un glissement apparent, résultant de la formation d'une fine couche de fluide de faible viscosité à la paroi, dû à une orientation préférentielle des particules ou des molécules. Une des hypothèses majeures dans le dépouillement des essais rhéologiques est que le produit adhère à la paroi de l'écoulement. Or, dans certaines conditions d'écoulement ou pour certains produits, cette hypothèse peut être prise en défaut, ce qui conduit à des erreurs importantes dans l'interprétation des données. [1]. Le glissement à la paroi dépend des conditions d'essai (contrainte à la paroi, pression et température), de la paroi de contact (interactions physico-chimiques entre le fluide et la paroi, rugosité de la paroi) et de la composition du fluide (la viscosité, le taux de déformation, structure chimique, additive). Ce phénomène complexe est un sujet encore ouvert tant au niveau de son interprétation que de sa quantification. Afin de mettre en évidence les effets de glissement, il existe différentes méthodes de quantification du glissement à la paroi. La première méthode proposée par Mooney 1931[2], elle est de loin la plus largement employée dans ce domaine, plusieurs auteurs ont proposé d'autres méthodes de correction de ces effets de glissement tel que Oldroyd 1949[3], Weigrefe 1991[4], Geiger 1989[5], Mourniac 1992[6]. Nous avons choisi pour notre travail, la méthode de Geiger ; qui remet en cause la méthode de Mooney. Il suppose une dépendance de la vitesse de glissement non seulement en fonction de la contrainte de cisaillement, mais aussi du diamètre de conduite d'écoulement.

## 2. Etude théorique

### 2.1. Modélisation du comportement rhéologique des fluides en écoulement

Dans une conduite circulaire horizontale de diamètre  $d$  et de longueur  $L$ , la perte de pression est liée à la contrainte de cisaillement à la paroi  $\tau_p$  par la relation suivante :

$$\tau_p = \frac{d}{4} \frac{\Delta P}{L} (1)$$

En ce qui concerne le débit, il est relié à la vitesse de cisaillement  $\dot{\gamma}_p$  à l'aide de la relation de Rabinowitsch-Mooney[2]. Il faut noter que la relation de Mooney-Rabinowitsch est valable pour tous les fluides indépendants du temps, en écoulement laminaire et elle suppose qu'il n'y a pas d'effet de paroi, due à la vitesse d'adhérence qui est nulle

$$\dot{\gamma}_p = \frac{32Q}{\pi d^3} \left( \frac{3n'+1}{4n'} \right) \quad (2)$$

$$\text{Avec :} \quad n' = \frac{d \log \left( \frac{\Delta P}{L} \right)}{d \log Q} = \frac{d \log \tau_p}{d \log \dot{\gamma}_a} \quad (3)$$

À partir de ces relations nous pouvons déterminer pour chaque débit le taux de cisaillement, il suffit de tracer  $\log \left( \frac{\Delta P}{L} \right)$  en fonction de  $\log (Q)$ , la pente donne la valeur de  $(n')$ , cette valeur est injectée ensuite dans l'équation (2),

## 2.2. La méthode de correction de Geiger

Geiger suppose une dépendance de la vitesse de glissement non seulement en fonction de la contrainte. Il postule que le taux de cisaillement apparent  $\dot{\gamma}_{app}$  et le taux de cisaillement apparent sans glissement  $g(\tau_p)$  sont reliés par l'expression donnée par l'équation 4.

$$\dot{\gamma}_{app} = g(\tau_p) f(d, \tau_p) \quad (4)$$

Geiger suppose que la fonction ( $f$ ) qui lie le diamètre de la conduite cylindrique "d" et la contrainte suit une loi exponentielle donnée par la fonction suivante :

$$f(d, \tau_p) = \exp\left[\frac{a(\tau_p)}{d}\right] \quad (5)$$

Il développe une méthode de quantification, en supposant que le débit total d'écoulement est la somme du débit de glissement et du débit de cisaillement ; qui s'écrit aussi sous la forme d'un produit du débit de cisaillement par la fonction "f" :

$$Q_t = Q_c + Q_g = f(d, \tau_p) Q_c = f(d, \tau_p) w d^2 g(\tau_p) \quad (6)$$

Soit:

$$\log(\dot{\gamma}_{app}) = \log\left[\frac{Q_t}{w \cdot d^2}\right] = \frac{f(d, \tau_p)}{d} + \log(g(\tau_p)) \quad (7)$$

À contrainte imposée à la paroi, la représentation graphique de  $\log(\dot{\gamma}_{app}) = f\left(\frac{1}{d}\right)$  est une droite, de pente  $f(d, \tau_p)$  et d'ordonnée à l'origine  $\log(g(\tau_p))$  (figure I) :

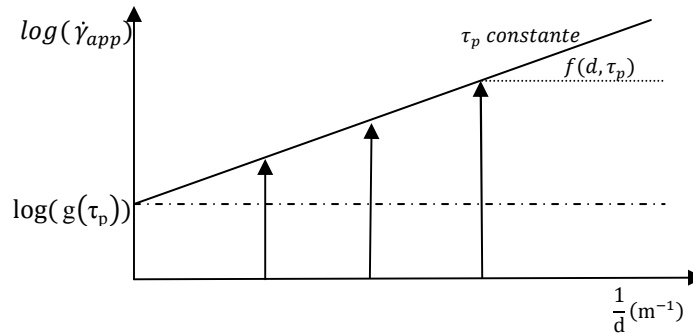


Figure 1. : Détermination de la vitesse de glissement, Geiger

## 3. Méthodologie expérimentale

Les solutions de carboxyméthylcellulose à 1,5% en masse sont préparées avec de la poudre de CMC, mélangée avec de l'eau déminéralisée sous agitation pendant 2 heures. Les échantillons restent au repos pendant 24 heures avant leur utilisation.

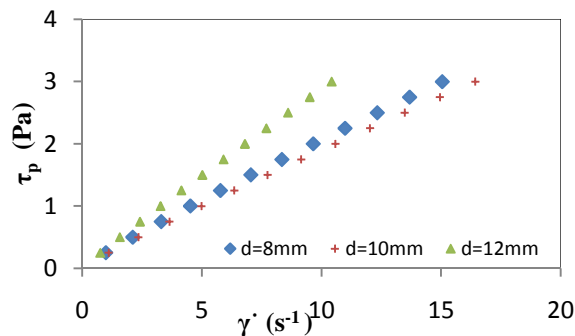
Afin de caractériser le comportement rhéologique de la solution de CMC, nous avons adopté une méthode basée sur une mesure de perte de charge et du débit. Le dispositif expérimental conçu à cet effet est constitué essentiellement ; d'une cuve à double enveloppe servant au stockage du fluide mis en circulation au moyen d'une pompe centrifuge dont la fréquence d'entraînement est imposée grâce à un variateur de tension, une conduite circulaire

horizontale de différent diamètre intérieur ( $d = 0,008 \text{ m}$ ,  $d = 0,010 \text{ m}$ ,  $d = 0,012 \text{ m}$ ) placée en aval d'une région d'établissement du régime, sur laquelle a été bobiné un fil coaxial chauffant en Nickel-Chrome; le fil est isolé de la conduite en inox par du téflon. L'ensemble des cylindres est efficacement isolé par une couche de laine de verre. Cette conduite est instrumentée d'un capteur de pression fourni par la société CITEC® et de sondes de température de type K. La mesure du débit est effectuée par l'intermédiaire d'un débitmètre électromagnétique. L'acquisition de données est réalisée grâce à un logiciel. Leurs traitements se font à l'aide des équations de Rabinowitsch-Mooney permet de tracer les courbes d'écoulements.  $\tau_p, \dot{\gamma}$ .

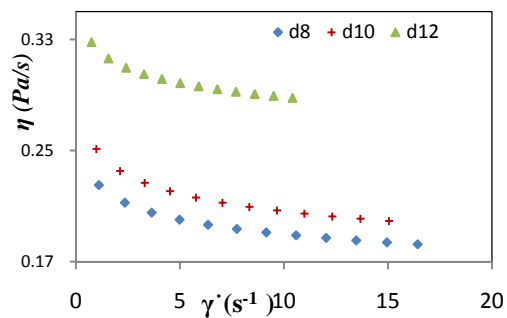
## 4. Résultats

### 4.1. Correction des effets de glissements

Afin de mieux comprendre le phénomène de glissement pariétal de la solution de CMC en écoulement dans des conduites cylindriques, nous avons étudié la variation de la contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement pour trois diamètres de conduites d'écoulement, nous présentons sur la figure 2, la variation de la contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement pour la solution de CMC à 1,5% et  $T=24^\circ\text{C}$  et sur la figure 3, l'évolution de la viscosité en fonction du taux de cisaillement



**Figure. 2:**Évolution de la contrainte de cisaillement pariétale en fonction du taux de cisaillement  
 $C=1,5\%$ ,  $T= 24^\circ\text{C}$



**Figure.3 :**Évolution de la viscosité en fonction du taux de cisaillement  
 $C=1,5\%$ ,  $T=24^\circ\text{C}$

D'après la figure 2, nous pouvons décrire le comportement de la solution de CMC à 1,5% par le modèle en loi de puissance (type d'Oswald-De-Waele), dans la gamme de taux de cisaillement étudiée. La viscosité apparente pour ce type de fluide est donnée par l'équation suivante:

$$\eta(\dot{\gamma}) = k\dot{\gamma}^{n-1} \quad (8)$$

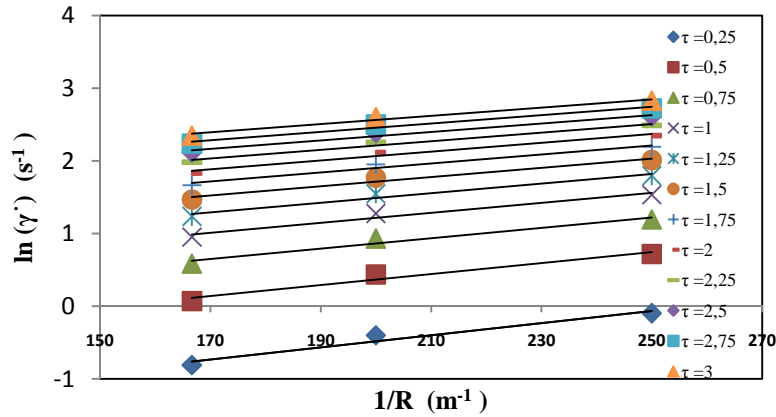
Nous remarquons à partir de la figure 3 que la viscosité apparente de la solution de CMC diffère d'une conduite d'écoulement à une autre. Ce résultat peut sembler illogique ; étant donné qu'un même fluide ne peut pas avoir une viscosité différente. Cette dépendance de la viscosité apparente avec le diamètre d'écoulement met en évidence des effets de glissement pariétal, ce résultat est confirmé par *KrittalakChakrabandhu 2005* [7]. Pour déterminer le comportement rhéologique réel de la solution en absence de glissement, nous devons prendre en compte et corriger ces effets de glissement. Nous représentons dans ce qui suit, les résultats de la méthode de corrections de **Geiger**

### 4.2. Résultats de correction par la méthode de Geiger

Pour déterminer les variables de la méthode de Geiger, il suffit de tracer

$$\ln(\dot{\gamma}_{app}) = f\left(\frac{1}{R}\right)$$

Les résultats de dépouillement trouvés par cette méthode pour une solution de 1,5% sont présentés sur la figure 4.



**Figure 4 :** Variation du logarithme népérien de la vitesse de déformation apparente en fonction de  $(1/R)$  pour une solution de 1,5%,

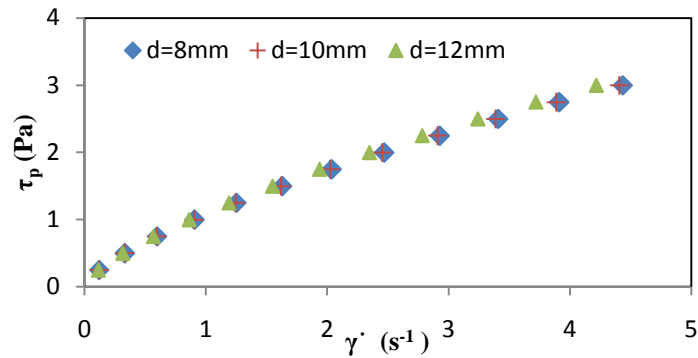
À partir des résultats précédents, et par une simple régression linéaire ; on détermine les variables de Geiger qui sont  $f(\tau_p)$  données par la pente et  $g(\tau_p)$  données par l'ordonnée à l'origine. Les résultats sont regroupés sur le tableau 1.

| $\tau_p$ (Pascal) | $f(\tau_p)10^3$ | $g(\tau_p)$ |
|-------------------|-----------------|-------------|
| 0,25              | 8,34            | 0,12        |
| 0,5               | 7,59            | 0,32        |
| 0,75              | 7,14            | 0,57        |
| 1                 | 6,83            | 0,86        |
| 1,25              | 6,59            | 1,19        |
| 1,5               | 6,39            | 1,55        |
| 1,75              | 6,22            | 1,93        |
| 2                 | 6,07            | 2,34        |
| 2,25              | 5,94            | 2,78        |
| 2,5               | 5,83            | 3,24        |
| 2,75              | 5,63            | 3,71        |
| 3                 | 5,72            | 4,21        |

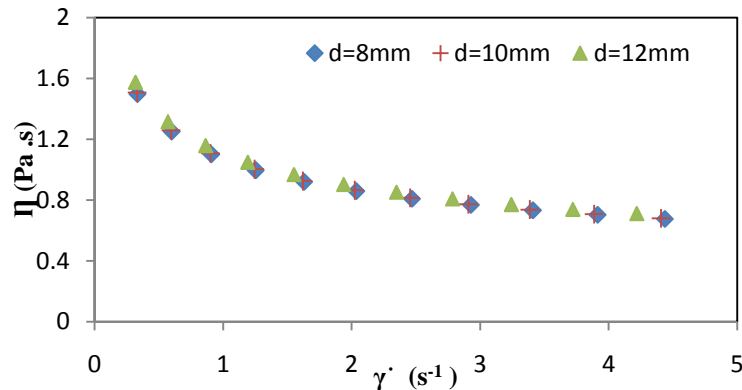
**Tableau 1 :** Valeurs de  $f(\tau_p)$  et  $g(\tau_p)$  déterminée par le dépouillement de Geiger pour une solution de CMC à 1,5%

En tenant compte des corrections des effets de glissements, on peut connaître le comportement rhéologique réel de la solution de CMC, en appliquant le traitement de Geiger aux données expérimentales corrigées. L'exponentielle de l'ordonnée à l'origine des droites de la figure 4 nous permet d'avoir le cisaillement apparent du fluide sans glissement.

L'évolution de la contrainte de cisaillement en fonction des taux de cisaillement corrigé est donnée sur la figure 5, la viscosité apparente corrigée sur la figure 6



**Figure5 :**Évolution de la contrainte de cisaillement pariétale en fonction du taux de cisaillement corrigé  $C=1,5\%$ ,



**Figure 6:**Évolution de la viscosité corrigée en fonction du taux de cisaillement

### 4.3 Profil de vitesse déduit par la méthode de Geiger

La vitesse de glissement selon Geiger n'est pas fonction seulement de la contrainte, mais aussi du diamètre des conduites d'écoulement. Elle est donnée par :

$$V_g(\tau_p, R) = \frac{R}{4} g(\tau_p) \left[ e^{\frac{f(\tau_p)}{R}} - 1 \right] \quad (10)$$

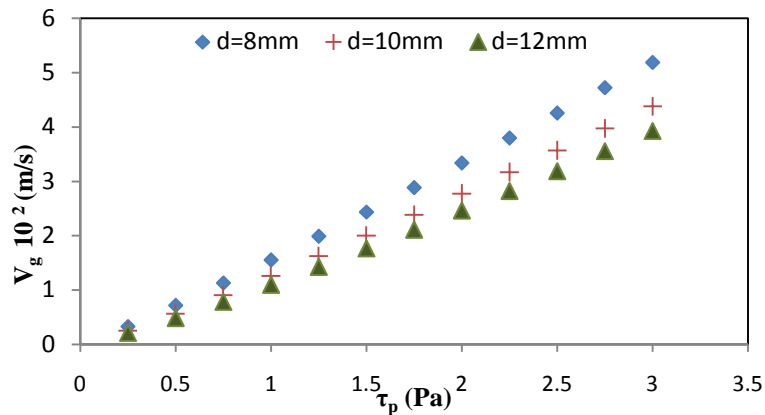
Les résultats de la vitesse de glissement sont regroupés sur le tableau ci-dessus :

| $\tau$ (pascal) | $V_g \cdot 10^3$ (m/s) |        |        |
|-----------------|------------------------|--------|--------|
|                 | d=8mm                  | d=10mm | d=12mm |
| 0,25            | 3,29                   | 2,51   | 2,11   |
| 0,5             | 7,18                   | 5,64   | 4,83   |
| 0,75            | 11,29                  | 9,03   | 7,81   |
| 1               | 15,56                  | 12,58  | 10,97  |
| 1,25            | 19,92                  | 16,25  | 14,25  |
| 1,5             | 24,35                  | 20,01  | 17,63  |
| 1,75            | 28,85                  | 23,85  | 21,09  |
| 2               | 33,40                  | 27,71  | 24,62  |
| 2,25            | 37,98                  | 31,70  | 28,21  |

|      |       |       |       |
|------|-------|-------|-------|
| 2,5  | 42,60 | 35,70 | 31,85 |
| 2,75 | 45,77 | 38,6  | 34,62 |
| 3    | 53,57 | 45,06 | 40,30 |

**Tableau 2:** Vitesse de glissement donnée par la méthode de Geiger pour les trois diamètres d'écoulement de la solution de CMC à  $C=1,5\%$ ,  $T=19^\circ\text{C}$

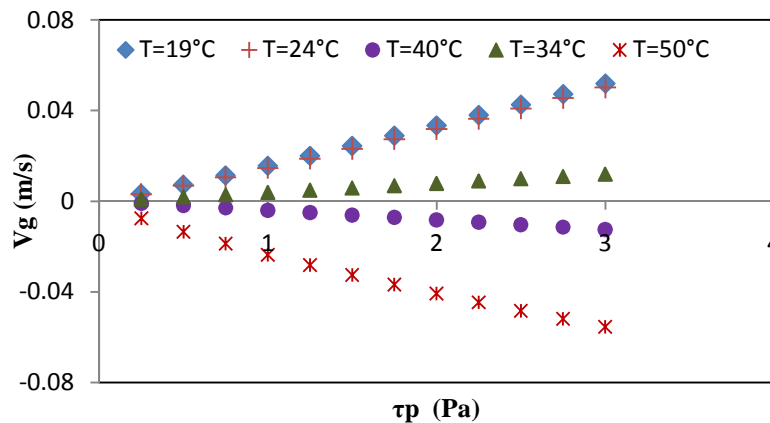
On remarque une évolution en loi de puissance de la vitesse de glissement en fonction du taux de cisaillement pour les trois diamètres de conduites comme le montre la figure 7.



**Figure7 :** Variation de la vitesse de glissement de Geiger en fonction de la contrainte de cisaillement pour une solution de 1,5%,  $T=19^\circ\text{C}$

#### 4.4. Effet de la température sur la vitesse de glissement

Afin d'étudier l'influence de la température du fluide sur la vitesse de glissement de la solution de CMC à 1,5% en écoulement, nous avons étudié la variation de la vitesse de glissement déterminée par la méthode de Geiger en fonction de la contrainte de cisaillement pariétal à différentes températures du fluide pour les trois diamètres de conduites, nous représentons pour cet article les résultats pour la conduite de 8 mm, figures 8.



**Figure 8 :** Variation de la vitesse de glissement de Geiger en fonction de la contrainte de cisaillement pour une solution de 1,5%, conduite de 8mm

D'après la figure précédente, nous constatons que la vitesse de glissement diminue avec l'augmentation de la température de la solution de CMC. Ce résultat rejoint le travail de Mellal [8] qui a travaillé avec des suspensions concentrées à base de carbonate de calcium, a observé au-delà d'une certaine température une diminution de la vitesse de glissement, il a

expliqué ce résultat par l'évaporation du fluide à la paroi qui peut provoquer une turbulence permettant d'entraîner des particules dans la couche pariétale.

## 5. Conclusion

La détermination du comportement rhéologique de la solution de CMC à 1.5% s'écoulant dans des conduites cylindriques a mis en évidence les effets de glissement pariétaux. Pour déterminer le comportement rhéologique réel de la solution de CMC on a utilisé la méthode de correction de Geiger. Cette méthode a donné des résultats satisfaisants et acceptables pour les corrections des effets de glissement. La vitesse de glissement selon Geiger suit une loi de puissance en fonction du taux de cisaillement et la température du fluide influe sur sa vitesse de glissement ; nous avons constaté une diminution de la vitesse de glissement avec l'augmentation de la température. Ce résultat rejoint le travail de Mellal [8] qui a travaillé avec des suspensions concentrées à base de carbonate de calcium, a observé au-delà d'une certaine température une diminution de la vitesse de glissement, il a expliqué ce résultat par l'évaporation du fluide à la paroi qui peut provoquer une turbulence permettant d'entraîner des particules dans la couche pariétale.

## Références

- [1] KOSCHER, M « *Étude de l'extrusion mono vis de mélanges d'élastomères. Approche expérimentale et simulation numérique* ». Mémoire de Doctorat en sciences et génie des matériaux. L'École Nationale Supérieure des Mines de Paris.
- [2] MOONEY, M. « *Explicit formulas for slip and fluidity* », J. Rheol., 2, 210-222 (1931)
- [3] MIDOUX, N. « *mécanique et Rhéologie des fluides en génie chimique* ». Paris. Édition technique et documentation, Lavoisier, 1985. ISBN 2-85206-271-2.
- [4] WIEGREFFE, S. « *Untersuchungen zum wandgleitverhalten von EPDM und SBR* » Kautschuk Gummi Kunst., 44, 216-221 (1991)
- [5] GEIGER, K. " *Rheologische charakterisierung von EPDM-kautschukmischungen mittels Kapillarrheometer-systemen* ", Kautschuk Gummi Kunst., 42, 273-283 (1989)
- [6] MOURNIAC, P. « *Le problème du glissement à la paroi dans les écoulements de mélanges d'élastomères* », Thèse de Doctorat en Sciences et génie des matériaux. ENSMP, Sophia-Antipolis, France (1991)
- [7] KrittalakChakrabandhu. « *Wall slip determination for coarse food suspensions in tube flow at high temperatures* », *Journal of Food Engineering* 70, 73–81(2005)
- [8] MELLAL, M. « *thermo rhéologie des suspensions solides/liquides concentrées* », Mémoire pour l'obtention de DEA. Université de Technologie Compiègne, 2002.