

Etude de la thermo-rhéologie d'une solution de carboxyméthylcellulose s'écoulant dans une conduite cylindrique

H. ABCHICHE^{*}, M. MELLAL^b, K. Y. BENKAHLA^c, A. LAMANI, A. HAFFAR

^{b,c} Laboratoire des Phénomènes de Transfert, Faculté de Génie Mécanique et de Génie des Procédés, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, Alger, Algérie

habchiche@usthb.dz
mmellal@usthb.dz

Résumé : L'objectif de notre travail consiste, en l'étude du comportement thermo-rhéologique d'un fluide complexe (solution de Carboxyméthylcellulose, CMC à 1% massique), s'écoulement dans une conduite cylindrique de 10 mm de diamètre. À cet effet nous avons conçu une installation expérimentale et mis au point un protocole expérimentale permettant la détermination de trois grandeurs essentielles ; température, débit, pertes de charge. Ces derniers, nous permettrons par la suite la détermination de la vitesse de cisaillement et le taux de cisaillement en utilisant la relation de Rabinowitsch-Mooney, et finalement l'obtention des rhéogrammes du fluide complexe à différentes températures. Les résultats rhéologiques obtenus ont montré que : la CMC à 1%, est caractérisée par le modèle de Bingham dans le domaine de cisaillement étudié. Les résultats obtenus ont permis de conclure que la température, est l'un des facteurs les plus importants qui influe sur le comportement rhéologique de la solution de CMC à 1%. En effet la contrainte seuil ainsi que la viscosité apparente diminuent avec l'accroissement de la température.

Mots clés :

Carboxyméthylcellulose, rhéologie, température, conduite cylindrique, installation expérimentale, contrainte seuil, viscosité apparente

1. Introduction

Les polymères présentent un grand intérêt en raison de leurs applications étendues dans les différentes industries. Le polymère faisant l'objet de notre travail est le *Carboxyméthylcellulose (CMC)* mis en solution dans de l'eau. En général, les lois de comportement de ce polymère en solution se révèlent complexe, et dépendent de plusieurs paramètres.

L'objectif de ce travail est de caractériser les propriétés rhéologiques d'une solution de CMC en utilisant une installation d'expulsion spécialement conçue et mise au point pour étudier le comportement rhéologique des produits relativement visqueux, et d'apporter des explications quant aux effets de la température sur le comportement rhéologique de la solution CMC, ce qui traduit une étude thermorhéologique en adaptant à la conduite d'écoulement utilisée une source de chaleur permettant de chauffer la solution qui s'écoule.

2. Matériels et méthodes

2.1. Matériels

Le produit utilisé est le polymère carboxyméthylcellulose CMC, de PH = 10,5 et 0,51 de degré de substitutions.

2.1.1. Préparation des échantillons

Nous avons préparé une solution aqueuse à 1% en masse de CMC. La préparation de la solution de CMC a été réalisée en utilisant de l'eau déminéralisée à température ambiante. Le polymère est dissout sous agitation durant 2 heures à l'aide d'un agitateur à mèche. L'échantillon reste au repos pendant 24h avant son utilisation.

2.1.2. Installation expérimentale

L'installation utilisée comprend essentiellement un bac amont, une pompe, un by-pass, un bac aval d'environ 30 litres pour le stockage du fluide à étudier, équipée d'un capteur de pression et d'un agitateur racleur, une conduite cylindrique de 3 mètres de long et de 8mm de diamètre servant à l'établissement du

régime, une conduite d'essai cylindrique de 10 mm diamètre débouchant à l'atmosphère. Nous détaillerons dans ce qui suit la conception de la conduite d'essai (figure 1), elle comporte les étapes suivantes :

- Mise en place des capteurs des thermocouples : L'objectif est d'imposer un flux constant au niveau de la paroi externe de la conduite afin de chauffer le fluide, pour cela la mise en place des capteurs des thermocouples s'est faite aux points A et B de la figure 1, à l'aide d'aluminium ruban adhésif au niveau de la paroi externe. Ces derniers seront reliés au thermorégulateur.
- Isolation primaire : Cette étape consiste à enrouler l'isolant thermique de manière uniforme en évitant les superpositions et les séparations des couche de - Téflon - sur la conduite afin d'éviter tout court-circuit entre la résistance et la conduite en inox.
- Mise en place de la résistance : Le principe est d'enrouler la résistance sous forme de bobine sur tout le long de la conduite d'une manière uniforme en faisant attention au nombre de spire dans chaque partie pour approcher un flux uniforme de chaleur.
- Isolation secondaire : Cette étape a pour but d'isoler la résistance du milieu extérieur. Et pour cette isolation nous avons utilisé le Téflon que nous avons enroulé sur toute la résistance.
- Préparation des prises d'alimentation : Pour que la résistance chauffe nous devons lui envoyer un courant électrique et pour cela nous avons branché des câbles électriques au niveau des trois anneaux placés sur la résistance, ces câbles seront branchés avec un transformateur
- Isolation tertiaire : Pour bien étudier la thermorhéologie et avoir de bonnes conditions de travail il faut assurer une très bonne isolation pour éviter tous perte de chaleur, et pour cela nous avons utilisé la Leine de verre pour une isolation tertiaire après celle du téflon

Réalisation des piquages:

Nous avons effectué des piquages de température et de pression sur la conduite

- 3 piquages de pression: aux extrémités de la conduite et un au milieu, ces piquages ont un diamètre de 1mm ;
- 6 piquages de températures de 3mm diamètre ;

Pour les deux types de piquages, des tiges de 10cm de longueur et 4mm de diamètre ont été soudé verticalement pour faciliter le branchement des tubes manométriques et les capteurs des thermocouples. La conduite chauffante avec les distances et positions des piquages est schématisée sur la figure 1.

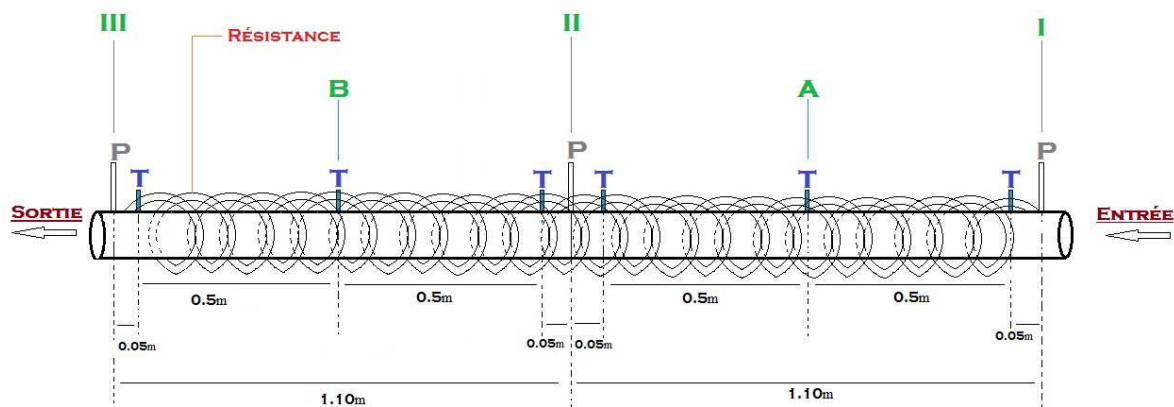


Figure 1 : Schéma général de la conduite chauffante.

2.2. Méthodes

Le fluide est d'abord aspiré du bac amont par la pompe vers le bac aval en surpression par rapport à la pression atmosphérique. Le fluide passe dans la conduite de 3 mètre de long et ensuite dans la conduite d'essai de 10mm de diamètre. A la sortie de la conduite d'essai, le fluide est récupéré dans le bac amont à l'air libre, et le circuit recommence.

2.2.1. Mesure du débit

La mesure du débit volumique de l'écoulement s'effectue par la méthode volumétrique. Le débit ainsi est donné par la relation suivante :

$$Q = \frac{v}{t} \quad (1)$$

2.2.2. Mesure des pressions

Pour évaluer les pressions ou les pertes de pression en un point, nous avons placé des prises de pression à la paroi de la conduite de mesure. Ces prises sont ensuite reliées à des tubes transparents verticaux contenant le même fluide de travail. Ces manomètres en tube transparent gradué permettent de donner directement ΔP en hauteur de liquide.

2.2.3. Mesure de température

Pour pouvoir étudier l'effet de la température sur le comportement rhéologique de la solution de CMC, nous avons déterminé la température de la paroi du cylindre par des sondes de température de type K

2.2.4. Détermination de la contrainte et taux cisaillement

Il faut savoir que la relation de Mooney-Rabinowitsch (2) [1], permet la détermination de la loi du comportement rhéologique des solutions de CMC à partir des résultats expérimentaux donnant la perte de charge en fonction du débit.

$$\frac{Q}{\pi R^3} = \frac{1}{\tau_p^3} \int_0^{\tau_p} \tau^2 f(\tau) d\tau \quad (2)$$

Elle donne l'expression du taux de cisaillement pariétal [2].

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

Avec :

$$n' = \frac{d \ln \left(\frac{\Delta P}{L} \right)}{d \ln Q} = \frac{d \ln \tau_p}{d \ln \dot{\gamma}_a} \quad (4)$$

A partir de ces relations, nous pouvons déterminer pour chaque débit le taux de cisaillement, il suffit de tracer $\ln \left(\frac{\Delta P}{L} \right)$ en fonction de $\ln(Q)$, la pente donne la valeur de (n'), cette valeur est injectée ensuite dans l'équation (3), et pour ce qui est de la contrainte de cisaillement pariétal, elle est déterminée à partir de la perte de charge [2].

$$\tau_p = \frac{D}{4} \frac{\Delta P}{L} \quad (5)$$

3. Résultats et discussion

Afin de choisir le modèle rhéologique représentant au mieux notre fluide dans la gamme des taux de cisaillements étudiés, nous avons effectué une étude comparative des différentes lois rhéologiques usuelles telles que : Herschel-Buckley, Bingham, Ostwald-De Waele. Pour choisir le modèle mathématique adéquat, on s'est basé sur le coefficient de corrélation R^2 le plus élevé (figure 1).

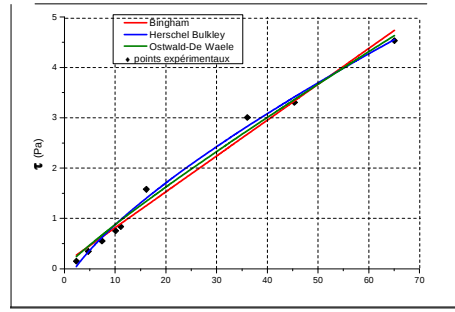


Figure 2: Comparaison entre les points expérimentaux et ceux donnés par trois modèles rhéologiques.

Dans le domaine de cisaillement étudié, le modèle de Bingham est celui qui représente mieux nos points expérimentaux.

Le modèle de Bingham est donné par l'équation :

$$\tau - \tau_0 = \mu_p \dot{\gamma} \quad (6)$$

Où :

τ_0 : est la contrainte seuil ;

μ_p : La viscosité plastique.

Afin d'étudier l'influence de la température sur le comportement rhéologique de la solution de CMC à 1%, nous avons déterminé à l'aide des équations (5) et (3) la contrainte et la vitesse de cisaillement du fluide s'écoulant dans une conduite cylindrique de 10 mm de diamètre pour quatre valeurs de températures. Les résultats sont regroupés sur la figure suivante

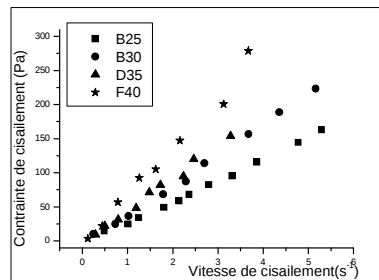


Figure 3: Courbe d'écoulement de la solution de CMC à 1% pour différentes valeurs de températures

Afin de mieux comprendre la thermo-dépendance des paramètres du modèle de Bingham, Nous représentons sur le tableau suivant les variations de ces paramètres en fonction de la température (T°).

Tableau 1 : Paramètres rhéologiques du modèle de Bingham.
En fonction de la concentration et la température

T ($^\circ\text{C}$)	τ_0 (Pa)	μ_p (Pa.s)
25	0.1847	0.0318
30	0.1706	0.0226
35	0.164	0.0193
40	0.1093	0.0135

Nous portons sur les figures 3(a) et 3 (b) l'évolution des paramètres du modèle de Bingham en fonction de la température

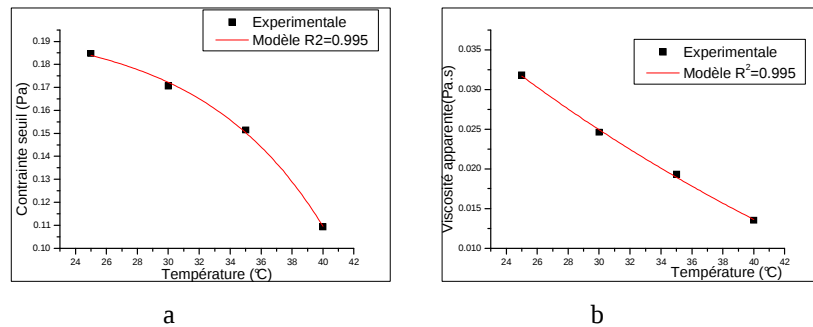


Figure 3: Evolution de la contrainte seuil(a) et la viscosité plastique (b) de la solution de CMC à 1% en fonction de la température.

Nous constatons d'après la figure précédente, que la contrainte seuil et la viscosité plastique de la solution de CMC à 1% diminuent en fonction de la température du chauffage. Nous proposons deux modèles mathématiques traduisant la variation de la contrainte seuil en fonction de la température (équation 7) et la variation de la viscosité plastique en fonction de la température (équation 8)

$$\tau_0 = -5.95805 \cdot 10^{-4} \cdot \exp(-T / -8.00935) + 0.19743 \quad (7)$$

$$\mu_p = 0.10866 \cdot \exp(-T / 41.26308) - 0.02758 \quad (8)$$

La contrainte seuil est définie comme étant la contrainte minimale en dessous de laquelle l'écoulement n'est pas possible. Autrement dit, lorsque les fluides plastiques sont soumis à une contrainte très faible, leur viscosité est tellement forte qu'ils ne peuvent pas s'écouler. Leur viscosité diminue ensuite si une contrainte supérieure au seuil est appliquée. Quand la solution de CMC est soumise à un chauffage, les chaînes polymériques se dilatent et le fluide voit sa viscosité diminuer et il s'écoule plus facilement, donc la contrainte seuil diminue aussi.

Conclusion

Les résultats rhéologiques obtenus sur la solution de CMC à 1%, ont montré que : le fluide est caractérisé par le modèle de Bingham dans le domaine de cisaillement étudié. L'étude de l'effet de la température sur le comportement rhéologique de la solution de CMC à 1% a révélé une thermo-dépendance des paramètres du modèle de Bingham. En effet la contrainte seuil ainsi que la viscosité apparente diminuent avec l'accroissement de la température. Deux modèles mathématiques traduisant l'évolution de la contrainte seuil et la viscosité plastique en fonction de la température, ont été proposés.

Nomenclature

Abréviation	ΔP	Perte de charge, Pa
CMC : Carboxyméthylcellulose	L	Longueur de la conduite, m
Symbole	τ_p	Contrainte pariétale, Pa
Q	τ_0	Contrainte seuil, Pa
Débit volumique, m^3/s	μ_p	Viscosité plastique, Pa.s
T	v	Volume, m^3
Température, $^{\circ}C$		
t		
Temps, s		
$\dot{\gamma}_p$		
Taux de cisaillement pariétal, s^{-1}		
D		
Diamètre, m		

Références

- [1] MIDOU, N. *Mécanique et rhéologie des fluides*. Paris, 1994, 277 p. ISBN 2603009451.
- [2] M.Mellal. *Thermorhéologie des suspensions solide/liquide concentrées*, DEA, université de technologie Compiègne, p : 11-16, 2002.