

# Etude expérimentale de la conductivité thermique de fluides non-Newtoniens sous cisaillement application aux solutions de Carbopol 940†

T. LOULOU, H. PEERHOSSAINI et J. P. BARDON

Laboratoire de Thermocinétique, URA CNRS 0869, ISITEM, Université de Nantes,  
La Chantrerie, C.P. 3023, 44087 Nantes Cédex 03, France

(Reçu le 14 mai 1991 et sous forme finale le 7 octobre 1991)

**Résumé**—Les polymères présentent des propriétés physiques intermédiaires entre celles des solides élastiques qui suivent la loi de Hook et celles des liquides dont le comportement est gouverné par la loi de Newton ; on les appelle fluides non-Newtoniens. Sous l'effet de cisaillement, non seulement la viscosité, mais la conductivité thermique de ces fluides varie également. On s'intéresse dans cette étude à l'évolution de la conductivité thermique de solutions aqueuses de Carbopol 940 en fonction de la vitesse de cisaillement et de la température. L'étude s'appuie sur une gamme de fluide modèle à base de Carbopol dont la concentration est de 0.1 et 0.2%. Leurs caractérisations rhéologiques a été effectuée sur une large gamme de vitesse de cisaillement. On montre que le modèle d'Oswald permet de représenter correctement le comportement de cette catégorie de fluides. On décrit sommairement la cellule de mesure utilisée pour l'évaluation de la conductivité thermique, en régime thermique établi, est donné. Des essais en régime statique sont présentés pour illustrer la fiabilité du conductivimètre. L'effet de cisaillement sur la conductivité thermique des fluides complexes est abordé par la suite. Les premiers résultats de cette étude sont présentés. Les effets visqueux ainsi que le comportement viscoélastique de ces fluides sont discutés.

## 1. INTRODUCTION

LE TRAITEMENT thermique des fluides complexes implique souvent des transferts de chaleur ; ainsi, on comprend que la mesure précise de la conductivité thermique de ces derniers est indispensable, particulièrement quand il s'agit d'établir des corrélations des transferts de chaleur. En général ces fluides présentent un comportement non-Newtonien et une forte thermodépendance de leurs caractéristiques thermorhéologiques. Ils présentent des caractéristiques très différentes des fluides ordinaires. Leurs propriétés doivent donc nécessairement être prises en compte dans toute prévision concernant l'utilisation pratique de ces fluides, notamment lors d'écoulement en présence de transferts thermiques.

Il existe différentes méthodes de mesures en statique de la conductivité thermique des solutions en fonction de leurs concentrations et de leurs températures, mais très peu qui abordent le problème lorsqu'il existe un champ de cisaillement. La mesure précise de la conductivité thermique des fluides complexes est indispensable pour l'analyse des transferts de chaleur, particulièrement quand il s'agit d'établir des corrélations. Elle varie généralement en fonction de la température et de la concentration de la solution. Les modifications de structure induites par l'écoulement risquent aussi d'influencer la conductivité thermique [1].

Parmi les quelques études qui abordent ce dernier point, un certain nombre d'études traitent de l'influence de la vitesse de cisaillement sur la conductivité thermique des polymères fondus. En effet, ces derniers

ont un comportement non-Newtonien très marqué, possédant des chaînes de molécules très longues. Sous l'effet de l'écoulement, elles peuvent s'orienter selon les lignes de courant et cette orientation peut induire une anisotropie dans les propriétés de transport [2].

L'une des méthodes de mesure de la conductivité thermique est celle utilisée par Cocci et Picot [3]. La cellule de mesure est constituée d'un tube de verre dans l'axe duquel est tendu un fil chauffant qui fait aussi office de capteur de température. En effet une partie de celui-ci est en nickel, l'autre partie en constantan et la mesure de la résistance du circuit de chauffage permet de déterminer la température. Cocci a mesuré les conductivités des polymères liquides de très fort poids moléculaire et très visqueux. Il a conclu à une augmentation de 7% de la conductivité thermique pour une vitesse de cisaillement allant de 0 à  $160 \text{ s}^{-1}$  à  $16^\circ\text{C}$ . Cette augmentation est moins sensible à température plus élevée.

Naimi *et al.* [4] utilisent une cellule à cylindres coaxiaux en régime permanent légèrement modifiée afin de minimiser les fuites. La plage de température varie de  $10$  à  $80^\circ\text{C}$ . Les résultats expérimentaux concernent des solutions de CMC à 2 et 3% de dilution dans l'eau. Ils ont constaté une montée progressive de conductivité thermique en fonction du taux de cisaillement. (Variation de 3% pour une vitesse de cisaillement variant de 0 à  $20 \text{ s}^{-1}$ .)

Picot *et al.* [5] utilisent une cellule type cylindres concentriques permettant des mesures jusqu'à  $20^\circ\text{C}$ . Le cylindre extérieur est fixé et thermostaté et le cylindre intérieur mobile est source de flux. Lorsque l'auto-échauffement par dissipation visqueuse a atteint un régime permanent, la mesure de conductivité thermique est effectuée en dissipant un flux de chaleur

† A brief English version of this paper can be obtained from the second author.

## NOMENCLATURE

$h$	épaisseur cône–plateau [m]	$\lambda$	conductivité thermique [W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]
$k$	indice de consistance du fluide non-Newtonien	$\lambda_a$	conductivité thermique apparente sans correction [W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]
$n$	indice de compartiment du fluide non-Newtonien	$\lambda_o$	conductivité thermique statique [W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]
$r$	distance par rapport à l'axe de rotation [m]	$\mu$	viscosité dynamique [Pa s]
$V_z$	vitesse suivant la direction axiale [m s <sup>-1</sup> ]	$\mu_a$	viscosité dynamique apparente [Pa s]
$V_x$	vitesse tangentielle [m s <sup>-1</sup> ].	$\nu$	viscosité cinématique [m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> ]
Symboles grec		$\rho$	masse volumique [kg m <sup>-3</sup> ]
$\alpha$	angle d'ouverture du cône [°, rad]	$\tau$	contrainte de cisaillement [N m <sup>-2</sup> ]
$\dot{\gamma}$	vitesse de cisaillement [N m <sup>-2</sup> ]	$\Phi_c$	flux de chaleur dissipé par les deux chaufferettes [W m <sup>-2</sup> ]
$\theta$	température [°C]	$\Phi_c$	flux dû à la conduction [W m <sup>-2</sup> ]
$\theta_c$	température de la plaque chaude [°C]	$\Phi_d$	flux dû à la dissipation visqueuse [W m <sup>-2</sup> ]
$\theta_f$	température de la plaque froide [°C]	$\Omega$	vitesses de rotation du cône [rad s <sup>-1</sup> ].

constant à la surface du cylindre intérieur et en enregistrant la température du liquide sur cette même surface. Les résultats présentés sur un polyéthylène liquide montrent une augmentation de la conductivité thermique de 10% à une vitesse de cisaillement de 400 s<sup>-1</sup>.

Enfin Chaliche *et al.* [6] ont choisi une cellule de type cône–plateau du fait des avantages qu'elle présente par rapport à la configuration cylindres coaxiaux. Un des avantages de ce choix est que, lorsque l'angle d'ouverture est petit, le liquide est soumis à une vitesse de cisaillement constante.

L'objectif de ce travail est de réaliser une étude expérimentale sur la conductivité thermique des fluides complexes en présence de cisaillement. Et ainsi établir une première approche de la variation de cette dernière en fonction de la vitesse de cisaillement, de la température et de la concentration.

## 2. ECOULEMENT D'UN FLUIDE VISQUEUX ET TRANSFERT DE CHALEUR DANS UNE CONFIGURATION CÔNE–PLATEAU

La configuration de type cône–plateau (voir Fig. 1) a été retenue pour les avantages qu'elle présente. Elle permet, comme nous allons le voir, d'obtenir des contraintes et des vitesses de cisaillement indépendantes du rayon, ceci à condition que l'angle d'ouverture  $\alpha$  du cône soit faible. De plus, les conditions thermiques imposées peuvent être mieux définies que dans les autres types de configurations.

Le principe de mesure de la conductivité thermique dans ce type de configuration s'inspire d'un système type plaque chaude gardée. Ainsi, si la partie conique est animée d'un mouvement de rotation à une vitesse  $\Omega$ , on peut considérer que la vitesse tangentielle de rotation à une distance  $r$  évolue linéairement de 0 à  $r \cdot \Omega$  sur une hauteur  $h = r \cdot \alpha$  ( $\alpha$  très petit). La vitesse de cisaillement s'écrit :

$$\dot{\gamma} = \partial V_x / \partial z = \Omega / \alpha.$$

En supposant le fluide non-Newtonien, le taux de cisaillement s'écrit :

$$\tau = \mu_a \dot{\gamma} = \mu_a \cdot \Omega / \alpha,$$

où  $\mu_a$  est la viscosité apparente du fluide,  $\tau$  et  $\dot{\gamma}$  sont indépendants du rayon  $r$ .

Lorsque la partie conique est animée d'un mouvement de rotation deux phénomènes apparaissent :

(i) à un rayon  $r$ , l'ensemble du fluide est soumis à une force centrifuge par unité de volume qui s'écrit :

$$F_c = \rho \cdot r \cdot \Omega^2,$$

$\rho$  étant la masse volumique du fluide ;

(ii) au même rayon  $r$  l'ensemble du fluide est soumis à une contrainte  $\tau$  de cisaillement qui s'écrit :

$$\tau = \mu_a \cdot \Omega / \alpha$$

alors les forces visqueuses s'expriment par :  $F_v = \tau / r \alpha = \mu_a \cdot \Omega / r \alpha^2$ .

Le rapport entre ces deux forces mises en jeu nous permet de définir un paramètre de contrôle appelé  $R$ , qui représente le rapport entre les deux forces.

$$R = \Omega \cdot \alpha^2 \cdot r^2 / \nu_a.$$

L'inconvénient de chaque configuration comme on l'a vu était l'apparition de l'écoulement secondaire, ce paramètre de contrôle  $R$  nous permet de bien contrôler l'existence de cet écoulement. Chaliche *et al.* [6], ont déterminé expérimentalement le paramètre de contrôle critique. La valeur est de l'ordre :

$$R = 0.022.$$

2.1.1. *Equation de base.* La partie conique où se trouve le fluide peut être assimilée à deux plans parallèles et comme  $\alpha$  est petit on peut considérer que le champ de température est quasiment unidimensionnel et l'équation de l'énergie s'écrit comme suit :

$$\lambda \cdot \partial^2 \theta / \partial z^2 - \rho \cdot c \cdot V_z \cdot \partial \theta / \partial z + \mu_a \cdot (\partial V_x / \partial z)^2 = 0.$$

En supposant que l'écoulement secondaire n'intervient pas, que l'ensemble est soumis à des conditions aux limites de première espèce et après simplification, l'intégration de l'équation de l'énergie donne :

$$\lambda = \Phi_c \cdot h / (\theta_c - \theta_f) + \mu_a \cdot V^2 / 2 \cdot (\theta_c - \theta_f),$$

le terme  $\mu_a \cdot V^2 / 2 \cdot (\theta_c - \theta_f)$  représente la dissipation visqueuse ce qui implique une correction à apporter à la conductivité thermique réelle  $\lambda$ .

2.1.2. *Nombre de Brinkman.* On peut introduire dans l'expression finale de la conductivité thermique un nombre adimensionnel qui traduit le rapport entre le transfert conductif et la dissipation visqueuse. Ce nombre est connu sous le nom de nombre de Brinkman. La densité d'énergie générée par la dissipation visqueuse est :

$$\Phi_d = \mu_a \cdot \dot{\gamma} \cdot h.$$

La densité de flux de chaleur  $\Phi_c$  transmise par conduction à vitesse de cisaillement nulle est :

$$\Phi_c = \lambda_0 \cdot (\theta_c - \theta_f) / h,$$

avec  $\lambda_0$  conductivité thermique à  $\dot{\gamma} = 0$  d'où le nombre de Brinkman aura pour expression :

$$Br = \mu_a \cdot \Omega \cdot r / \lambda_0 (\theta_c - \theta_f).$$

Ceci implique donc la connaissance de la viscosité apparente du fluide considéré aux vitesses de cisaillement et aux différents paliers de température considérés. L'expression finale de la conductivité thermique sera comme suit :

$$\lambda = \Phi_c \cdot h / (\theta_c - \theta_f) + Br \lambda_0 / 2.$$

### 3. DESCRIPTION DU DISPOSITIF EXPERIMENTAL

La Fig. 1 représente la cellule de mesure, de forme cylindrique. Son diamètre intérieur est de 10 cm. Le fond de cette cellule, de forme conique à faible ouverture (6°) constitue la source froide. Sa paroi conductrice en laiton chromé est réglée à température  $\theta_f$  par une circulation de fluide thermostaté.

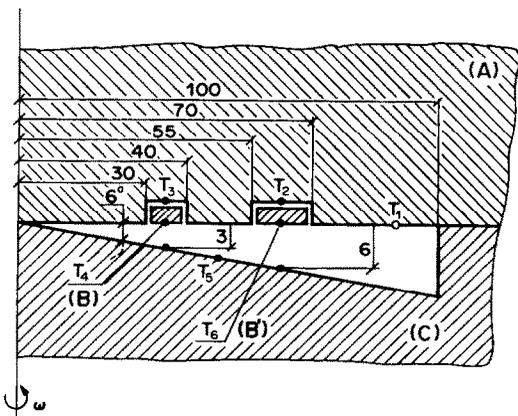


FIG. 1. Schéma du dispositif.

La partie supérieure (A) est constituée par un disque maintenu à température constante, qui joue le rôle de garde pour deux éléments chauffants (B, B') (sources chaudes), en forme de couronne. Les dimensions des chauffettes ont été choisies de manière à être adaptées à deux domaines de viscosité :

- (i) chauffette extérieure pour fluides très visqueux ; et
- (ii) chauffette intérieure pour fluides moyennement visqueux.

La partie supérieure du dispositif, équipée de couronnes chauffantes, est statique et repose sur un bâti. La partie inférieure (C) à fond conique est animée d'un mouvement de rotation. Six thermocouples  $T_1$  à  $T_6$ , de diamètre 8/100 mm, sont répartis dans les parois de la cellule. Trois d'entre eux,  $T_1$ ,  $T_2$  et  $T_3$ , sont disposés dans la garde au voisinage des couronnes chauffantes. Les thermocouples  $T_4$  et  $T_6$  sont placés sur les faces avant des chauffettes. Trois autres thermocouples sont situés sur la plaque froide, en vis à vis de ceux situés sur la plaque chaude. Seul le thermocouple  $T_5$  est relié aux appareils de mesure par l'intermédiaire d'un contact tournant en cuivre. Les jonctions chrome-alumel/cuivre-cuivre des trois thermocouples placés sur la plaque froide sont réalisées dans un petit boîtier aménagé dans la partie froide de la cellule de mesure. Rappelons que les températures  $T_c$  et  $T_f$  sont lues directement sur l'affichage des bains thermostatés, qui est d'une précision de 0.1°C, et que toute le tuyauterie de circulation est bien calorifugée. Pour la détermination de  $\lambda$  à partir des mesures on substitue les valeurs de  $T_c$  et  $T_f$  à celles issues des thermocouples  $T_4$ ,  $T_6$  et  $T_5$ .

### 4. ETUDE RHEOLOGIQUE DES SOLUTIONS DE CARBOPOL 940 (FIGS 2, 3 ET 4)

#### 4.1. Fluides modèles et étude rhéologique

Les fluides modèles qui répondent au mieux aux exigences de notre expérimentation sont les solutions de carbopol, car elles présentent un aspect fortement non-Newtonien, une bonne stabilité aux températures peu élevées et de grande viscosité à faible concen-

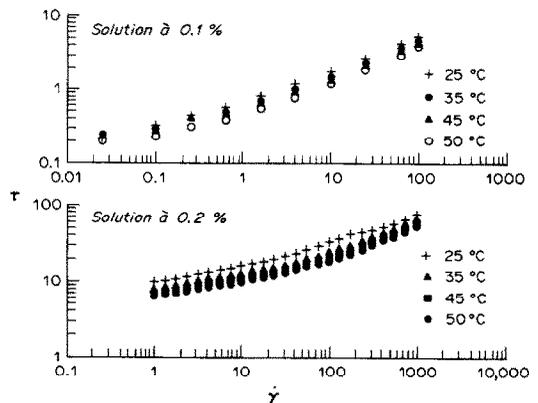


FIG. 2. Variation du taux de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement.

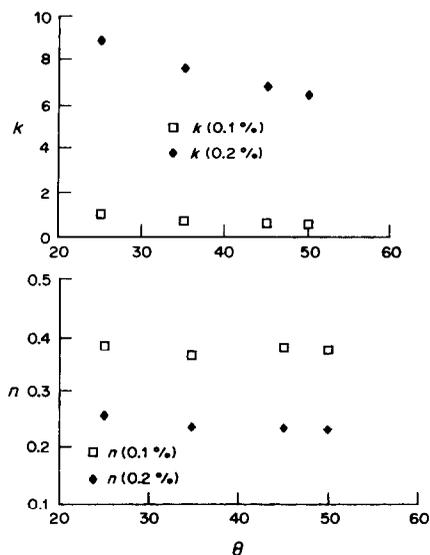


FIG. 3. Variation des indices de consistance  $k$  et de comportement  $n$  en fonction de la température.

tration. Cette étude doit nous permettre d'identifier le fluide à partir des mesures rhéologiques de laboratoire et de lui appliquer l'équation rhéologique correspondante. Les différentes solutions qui font l'objet de notre étude sont des concentrations à 0.1 et 0.2% de carbopol avec un pH compris entre 7.3 et 7.8. La préparation des différentes solutions a été effectuée suivant les instructions du fabricant (BF GOODRICH).

4.1.1. *Mesure de viscosité.* La variation de la contrainte de cisaillement, pour les solutions à 0.1 et 0.2% de concentration en carbopol, en fonction de la vitesse de cisaillement et de la température est montrée en Fig. 2.

Ces dernières courbes montrent que ces solutions présentent un seuil d'écoulement suivi d'un comportement rhéofluidifiant qui s'approche asymptotiquement d'un plateau. Ce comportement rhéologique des solutions de carbopol peut s'exprimer par une relation de type Hershel-Bulkley qui n'est d'autres que la superposition des modèles d'Ostwald et

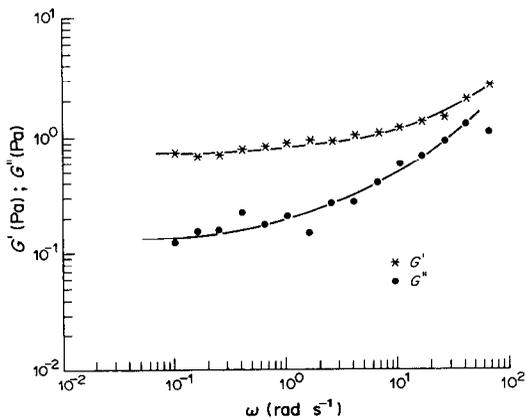


FIG. 4. Variation de  $G'$  et  $G''$  en fonction de la vitesse de  $\omega$  ( $\text{rad s}^{-1}$ ). Solution à 0.1% en masse.

de Bingham. Par extrapolation de ces courbes de viscosité on détermine le seuil d'écoulement. Il faut remarquer que : cerner le comportement du fluide près du seuil d'écoulement nécessite la mise en oeuvre de procédures particulièrement contrôlées. En absence de glissement la courbe de ( $\tau = f(\dot{\gamma})$ ) tend vers une asymptote horizontale traduisant l'existence d'un seuil d'écoulement. Ce glissement, entre les parois du rhéomètre et le fluide, est mis en évidence aux faibles vitesses de cisaillement [7]. Il se manifeste par décrochement de la courbe de représentation ( $\tau = f(\dot{\gamma})$ ) à faible régime de cisaillement d'où la suggestion d'utiliser un rhéomètre de configuration cône-plan avec surfaces rugueuses. A titre indicatif on peut déduire de la Fig. 2 le seuil d'écoulement qui est de l'ordre de 0.2 Pa pour une solution aqueuse de 0.1% de concentration en mass et de 8 Pa (5 Pa) pour la solution à 0.2% de concentration à une température de 25°C (45–50°C).

4.1.2. *Détermination des paramètres rhéologiques.* Les différentes mesures nous ont permis de montrer la relation reliant la viscosité apparente à la vitesse de cisaillement. On a observé que la variation de la viscosité en fonction de la vitesse de cisaillement suit une loi en puissance. Cette dernière n'est autre que le modèle d'Ostwald qui répond le mieux à cette catégorie de fluides non-Newtoniens choisis.

Le modèle d'Ostwald s'écrit :  $\tau = k \cdot \dot{\gamma}^n$  où la viscosité apparente s'écrit dans ce cas :

$$\mu_a = k \cdot \dot{\gamma}^{n-1}$$

Les deux constantes  $k$  et  $n$  de la loi pour les différentes solutions retenues sont déterminées par un lissage logarithmique. Ces différentes valeurs sont reportées sur un graphe pour mieux visualiser la variation de  $k$  et  $n$  en fonction de la température pour différentes concentrations (Fig. 3). En conclusion on peut dire que la thermodépendance est faible.

Pour différentes températures et différentes concentrations et sur des plages de mesure de 2 à 5 min, nous avons constaté que la valeur du couple reste constante ce qui explique que le carbopol à différentes concentrations n'a pas un comportement thixotrope donc il n'y a donc pas destruction de la structure du fluide.

4.1.3. *Mesure de la viscoélasticité.* La méthode classique expérimentale qui permet l'identification d'un comportement viscoélastique consiste à soumettre le fluide à des sollicitations de cisaillement harmonique du type :  $\dot{\gamma}(\omega) = \dot{\gamma} \cdot \sin(\omega t)$ . La réponse à cette sollicitation sinusoïdale permet de déterminer si le comportement est viscoélastique en examinant les modules d'élasticité  $G'$  et de rigidité  $G''$  (Fig. 4). Nous avons observé une nette différence entre les deux modules et une supériorité du module d'élasticité par rapport à celui de la rigidité. Suivant les résultats obtenus nous pouvons conclure que les solutions étudiées ont un comportement plutôt élastique que visqueux et ce dernier devient plus marqué à partir des concentrations peu élevées.

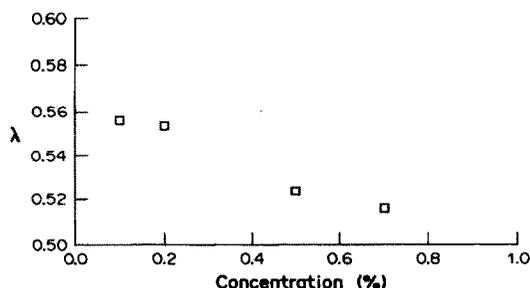


FIG. 5. Evolution de la conductivité en fonction de la concentration à 25°C.

**5. MESURE DE LA CONDUCTIVITE THERMIQUE ET DISCUSSION**

*5.1. Statique*

Les résultats obtenus en statique pour les différentes solutions présente une décroissance de 7% de la conductivité thermique avec la concentration Fig. 5. On peut expliquer qualitativement, ce phénomène de diminution de la conductivité thermique en fonction de la concentration par un argument phénoménologique [2]. En général le transfert conductif intracellulaire est moindre et affaibli par la diminution du libre parcours moyen des molécules d'eau emprisonnées. Le transfert convectif intercellulaire est alors pratiquement inexistant du fait des disproportions entre les tailles des molécules du solvant et du soluté. Cette diminution est d'autant plus grande que les molécules en présence sont plus longues et plus lourdes.

Une comparaison entre l'évolution de la conductivité thermique, de l'eau et d'une solution de carbopol à 0.2% de concentration, en fonction de la température est donnée sur la Fig. 6. On peut remarquer qu'à 0.2% de concentration en carbopol, la solution comparée ne présente pas de grande différence avec celle de l'eau. Cela peut s'expliquer par le fait qu'à 0.2% de concentration en carbopol la solution est pauvre et elle se comporte comme l'eau.

*5.2. Dynamique*

Nous présentons ici les premiers résultats obtenus avec les solutions à 0.1 et 0.2%. Les mesures étaient difficiles à faire du fait de l'apparition d'un écoulement secondaire à partir de faibles vitesses de cisaillement.

Nous avons cherché une relation qui traduit la vari-

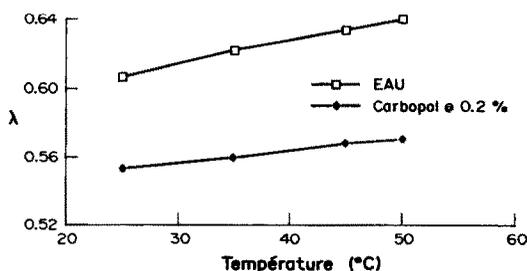


FIG. 6. Comparaison entre la conductivité thermique de l'eau et celle d'une solution de carbopol à 0.2%.

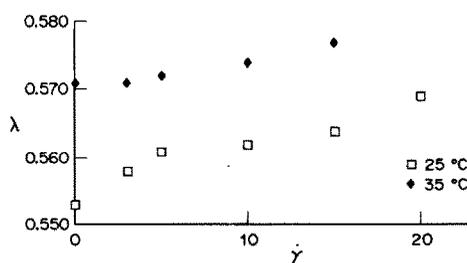


FIG. 7. Evolution de la conductivité thermique en fonction du cisaillement pour différentes températures (pour une solution de 0.2%).

ation de la conductivité thermique avec la température et avec la vitesse de cisaillement. Ainsi l'évolution de la conductivité thermique en fonction de la vitesse de cisaillement et suivant les différentes plages de température peut s'écrire comme suit :

$$\lambda = \lambda_0 + a \cdot \dot{\gamma},$$

où *a* est la pente de la droite reliant ces points expérimentaux suivant les différents paliers de température. La Fig. 7 montre l'évolution de la conductivité thermique en fonction du cisaillement pour différentes températures. Cette variation est de 6.5% pour la solution à 0.1% de concentration et de 8% pour celle à 0.2% de concentration en masse sur une marge de vitesse de cisaillement allant de 0 à 20 s<sup>-1</sup>. La pente *a* diminue avec l'augmentation de la température. La première constatation est que le facteur *a* est petit : la variation de la conductivité thermique en fonction de la vitesse de cisaillement est faible.

La variation de la conductivité thermique en fonction de la vitesse de cisaillement suivant les différentes concentrations peut s'écrire comme suit :

$$\lambda = \lambda_0 + b \cdot \dot{\gamma},$$

où *b* est une constante dépendant de la concentration, Fig. 8. Pour des vitesses de cisaillement faibles ou quasiment nulles les deux solutions à 0.1 et 0.2% de concentration en carbopol convergent vers leurs valeurs de conductivités statiques. Elles commencent à s'en écarter avec l'augmentation de la vitesse de cisaillement. Ceci peut être expliqué par le fait que le comportement non-Newtonien ne se manifeste que sous l'effet de cisaillement élevé.

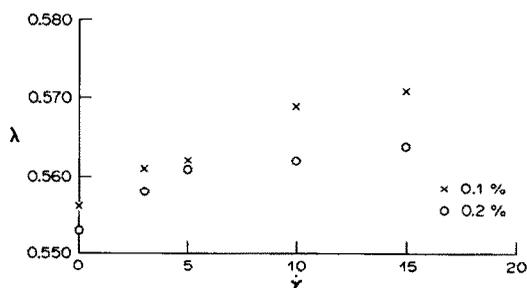


FIG. 8. Evolution de la conductivité thermique en fonction du cisaillement pour différentes concentrations (à 25°C).

## 6. CONCLUSIONS

L'étude rhéologique nous a permis de montrer que la viscosité des solutions de carbopol peut s'exprimer en fonction de la vitesse de cisaillement par une loi en puissance et qu'elles présentent un seuil d'écoulement. Ce dernier est autant plus grand que la solution est plus concentrée. Ainsi, les solutions de 0.2% et plus de concentration en carbopol se comportent plutôt comme des fluides élastiques que comme des fluides visqueux.

L'étude thermique nous a permis de constater la variation de la conductivité thermique, en fonction de la concentration, ainsi qu'en fonction de la vitesse de cisaillement. L'influence du cisaillement sur la conductivité thermique est faible. Cette constatation justifie l'hypothèse d'isotropie globale des solutions considérées malgré l'anisotropie moléculaire marquée qu'elles présentent. Le comportement rhéologique de ces solutions polymériques n'affecte donc pas de façon sensible leur comportement thermique.

On ne peut pas dissocier l'étude du transfert thermique des caractéristiques non-Newtoniens d'écoulement de ces fluides. Nous noterons toutefois l'absence quasi-totale de données concernant les fluides viscoélastiques. Un grand nombre de travaux aussi bien théoriques qu'expérimentaux s'avèrent donc nécessaires pour une meilleure compréhension des transferts thermiques dans les fluides complexes.

*Remerciements*—Les auteurs remercient vivement MM. Lefèvre et Doublier de leur contribution en nous permettant d'effectuer des mesures de viscosité dans leur laboratoire (I.N.R.A. de Nantes), ainsi que A. Sarda, du laboratoire de Thermocinétique, pour son aide précieuse et sa critique objective.

## BIBLIOGRAPHIE

1. W. Y. Lee, Y. I. Cho and J. P. Hartnett, Thermal conductivity measurements of non-Newtonian fluids, *Lett. Heat Mass Transfer* **8**, 255 (1981).
2. D. Bellet, M. Sengelin et C. Thirriot, Détermination des propriétés thermophysiques de liquides non-Newtonien à l'aide d'une cellule à cylindres coaxiaux, *Int. J. Heat Mass Transfer* **18**, 1177 (1975).
3. A. A. Cocci and J. J. C. Picot, Rate of strain effect on thermal conductivity of polymer liquid, *Polymer Engng Sci.*, **13**, 337 (1973).
4. M. Naimi, R. Devienne et M. Lebouché, Mesure de la conductivité thermique des fluides complexes à l'aide d'une cellule à cylindres coaxiaux, *Compte-rendu 11<sup>e</sup> colloque rhéologie et transformation des matières agro-alimentaires* (Edited by M. Lebouché), p. 231. Nancy, France (1987).
5. J. J. C. Picot, G. I. Goobie and G. S. Mawhinney, Shear induced anisotropy in thermal conductivity of polyethylene melt, *Polymer Engng Sci.* **22**, 154 (1982).
6. M. Chaliche, D. Delaunay et J. P. Bardon, Appareillage de mesure de la conductivité thermique des fluides complexes en présence d'un champ de vitesse, *Revue Générale de Thermique* **308-309**, 422 (1987).
7. A. Magnin et J. M. Piau, Etude expérimentale et modélisation des écoulements établis et singuliers en conduite d'un fluide à seuil, *Traitement Industriel des fluides Alimentaires non-Newtoniens* (Edited by M. Lalande and M. Lebouché), Vol. 2, p. 47. La Baule, France (1989).

## EXPERIMENTAL STUDY OF THE THERMAL CONDUCTIVITY OF NON-NEWTONIAN FLUIDS UNDER SHEAR: APPLICATION TO THE SOLUTIONS OF CARBOPOL 940

**Abstract**—Polymers exhibit physical properties intermediate to those of elastic solids which follow Hook's law and those of viscous fluids which behave according to Newtonian shear law, therefore, they are designated non-Newtonian fluids. Under a steady shear, non-Newtonian fluids exhibit not only the shear rate dependent viscosity but also their thermal conductivity changes with shear. It is the purpose of this paper to report on our investigation on the dependence of thermal conductivity on shear rate. Aqueous solutions of Carbopol 940 have been used as test fluids to investigate the effects of temperature and shear rate on thermal conductivity.

## EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNG DER SCHERKRAFTABHÄNGIGEN WÄRMELEITFÄHIGKEIT NICHT-NEWTON'SCHER FLUIDE ANHAND EINER WÄSSRIGEN LÖSUNG VON CARBOPOL 940

**Zusammenfassung**—Die physikalischen Stoffeigenschaften von Polymeren liegen zwischen den Werten von elastischen Feststoffen, die dem Hooke'schen Gesetz gehorchen, und denjenigen viskoser Fluide, die aufgrund ihres Newton'schen Scherverhaltens als Newton'sche Fluide bezeichnet werden. Bei stationärer Scherbeanspruchung zeigen nicht-Newton'sche Fluide nicht nur eine scherkraftabhängige Viskosität, sondern auch eine von der Scherbeanspruchung abhängige Wärmeleitfähigkeit. In der vorliegenden Arbeit wird über die Untersuchung der scherkraftabhängigen Wärmeleitfähigkeit berichtet. Zur Untersuchung der temperatur- und scherkraftabhängigen Wärmeleitfähigkeit wird eine wässrige Lösung von Carbopol 940 verwendet.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ НЕНЬЮТОНОВСКИХ ЖИДКОСТЕЙ ПРИМЕНТЕЛЬНО К ВОДНЫМ РАСТВОРАМ Carbopol-940

**Аннотация**—По своим физическим свойствам полимеры занимают промежуточное место между упругими твердыми телами, подчиняющимися закону Гука, и вязкими жидкостями, подчиняющимися ньютонскому закону сдвига, и поэтому они называются ньютонскими жидкостями. В условиях постоянного сдвига не только вязкость, но и теплопроводность ньютонских жидкостей зависят от скорости сдвига. В данной работе исследуется зависимость теплопроводности от скорости сдвига. При определении влияния температуры и скорости сдвига на теплопроводность в качестве рабочих жидкостей используются водные растворы Carbopol-940.