



## Modélisation de l'écoulement des fluides complexes

### Cas du pétrole brut

Meriem Benziane madjid<sup>1</sup>, Liazid abdelkrim<sup>2</sup>, Zahloul hamou<sup>1</sup>, Moudjeber djamel-eddine<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Département de génie mécanique, Université Hassiba Ben-Bouali- Chlef, Algérie E-mail:  
mbmadid2001@yahoo.fr, zahloulh@yahoo.fr, demoudjeber@yahoo.fr

<sup>2</sup> Laboratoire LTE, ENSET-Oran, BP 1523, El Mnaouer 31000- Oran, Algérie

#### Résumé :

Le but de notre travail est de proposer une compréhension des difficultés inhérentes au transport des matières épaisses dont le pétrole fait partie, présenter, comparer les effets de la concentration sur la suspension des particules solides du pétrole brut pour différentes valeurs de taux de cisaillement par des modèles rhéologiques et enfin, modéliser le comportement rhéologique du pétrole brut.

Les résultats obtenus avec ce modèle ont été validés et, on a pu ainsi confirmer les propriétés non newtoniennes du pétrole brut. C'est ce caractère complexe, dû à l'interaction fluide solide, qui nous ne permet pas d'utiliser des modèles traditionnels qui considèrent les fluides homogènes. Pour contourner cette difficulté, nous avons utilisé le Modèle de Phan-Thien et Tanner (MPTT) qui est basé sur une description microstructurale du fluide et qui nous semble très vraisemblable pour modéliser un tel écoulement

**Mots clés :** rhéologie, pétrole brut, modélisation, non newtonien, structure, interaction.

## 1. Introduction

La connaissance du comportement rhéologique du pétrole brut est fondamentale puisqu'elle permet de mieux cerner sa modélisation. Dans la première partie de ce travail, on déduit la courbe rhéologique d'un pétrole brut à l'aide de résultats expérimentaux [1, 2]. Les modèles de Herschel-Bulkley et de Bingham ont été exploités à cet effet. Par ailleurs, trois autres modèles en l'occurrence ceux de Cross, de Krieger & Dougherty et de Quémada sont utilisés pour modéliser le comportement non newtonien du pétrole brut étudié en écoulement dans un pipe-line. Pour cela, le modèle modifié de Phan-Thien et Tanner (MPTT) a été utilisé essentiellement pour calculer les effets non newtoniens du pétrole sur l'état des contraintes tangentielles et normales notamment auprès de la paroi de la conduite (interaction fluide-solide).

## 2. Modélisation rhéologique du pétrole brut

### 2.1. Modèle rhéologique

Tout d'abord, il faut noter que les propriétés rhéologiques d'un pétrole brut varient fortement avec sa température [2]. A une température donnée, nous supposons, en première approximation, que le fluide visqueux peut être modélisé par des lois classiques à deux ou trois paramètres. Dans ce qui suit, on fera le point autour des caractéristiques rhéologiques du pétrole brut et les méthodes utilisées pour les déterminer puisqu'elles rentrent dans les calculs des installations de pompage et de transport du pétrole brut. Nous exploitons les expériences qui ont été faites sur le pétrole brut à l'aide d'un rhéomètre représentées par les diagrammes de la viscosité ( $\eta$ ) en fonction du taux de cisaillement ( $\dot{\gamma}$ ) (figure.1) et de la viscosité ( $\eta$ ) en fonction de la contrainte de cisaillement ( $\tau$ ) (figure. 2).

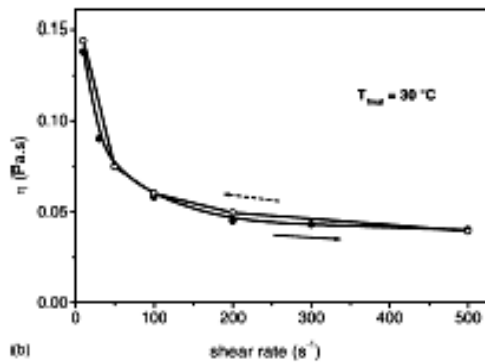


Figure. 1 : Evolution de la viscosité  $\eta$  en fonction du taux de cisaillement  $\dot{\gamma}$  pour le pétrole brut à 30°C. [2]

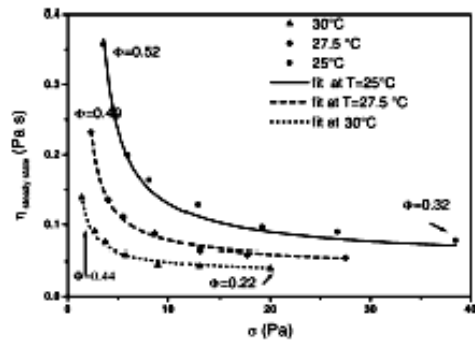


Figure. 2 : Evolution de la viscosité  $\eta$  en fonction de la contrainte de cisaillement  $\tau$  pour le pétrole brut pour diverses concentrations de fractions efficaces de volume ( $\Phi$ ) et diverses températures  $T$ . [2]

Afin de comparer les résultats de la figure.1 à ceux de la figure.2, on ne s'intéresse dans cette dernière qu'à la courbe donnant l'évolution de la viscosité  $\eta$  en fonction de la contrainte de cisaillement  $\tau$  pour une température de 30°C et pour une fraction efficace de volume ( $\Phi=0.44$ ). A partir de ces deux courbes, on peut tracer la courbe des contraintes en fonction de la vitesse de cisaillement, (figure.3).

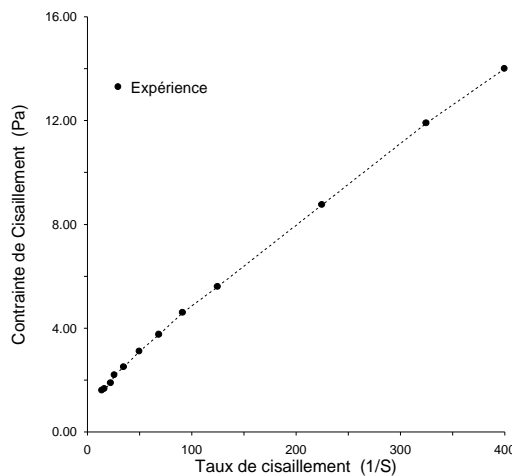


Figure. 3 : Evolution de la contrainte de cisaillement  $\tau$  en fonction du taux de cisaillement  $\dot{\gamma}$  pour  $\Phi=0.44$ , (Expérience) [2].

D'après la figure.3, on peut remarquer que le pétrole obéit à une loi « puissance » avec un indice de comportement inférieur à 1. On conclut donc, que le pétrole est un fluide non newtonien de type rhéofluidifiant (fluide pseudo plastique). Il peut être donc représenté par des modèles tels que ceux de Bingham et de Herschel-Bulkley [3,4].

▪ Modèle de Bingham : 
$$\tau = \tau_0 + \mu_p \dot{\gamma} \tag{1}$$

▪ Modèle Herschel-Bulkley 
$$\tau = \tau_0 + k \dot{\gamma}^n \tag{2}$$

où  $\tau$  est la contrainte de cisaillement,  $\tau_0$  est la contrainte de seuil,  $k$  est la consistance du fluide,  $n$  est l'indice de comportement,  $\dot{\gamma}$  est la vitesse de cisaillement et  $\mu_p$  est la viscosité plastique. A ce stade, nous calculons les caractéristiques rhéologiques pour déterminer par quel modèle, Herschel-Bulkley ou Bingham, le pétrole brut étudié sera le mieux représenté. En utilisant la méthode des moindres carrés, nous avons obtenu les résultats suivants :

$\tau_0$ (Pa)	$n$	$K$
0.85	0,86	0,076

Tableau 1 : Paramètres rhéologiques du pétrole brut [2] calculé par le modèle Herschel-Bulkley.

$\tau_0$ (Pa)	$n$	$\mu_p$
1.37	1	0.0322

Tableau 2 : Paramètres rhéologiques du pétrole brut [2] calculé par le modèle Bingham.

Le modèle de Herschel-Bulkley, s'écrit :  $\tau = 0,85 + 0,076 \dot{\gamma}^{0,86}$

et le modèle de Bingham, s'écrit :  $\tau = 1.37 + 0,0322 \dot{\gamma}$

Ainsi, il est mis en évidence que le comportement rhéologique du pétrole brut étudié montre un aspect non newtonien de type rhéofluidifiant, avec une contrainte de seuil, qui se comporte comme un solide aux faibles contraintes de cisaillement, et qui ensuite, se comporte comme un fluide visqueux dont la viscosité diminue au fur et à mesure que la contrainte de cisaillement augmente. A partir de ces données, nous traçons les différents rhéogrammes afin de conclure quel est celui qui est le plus représentatif.

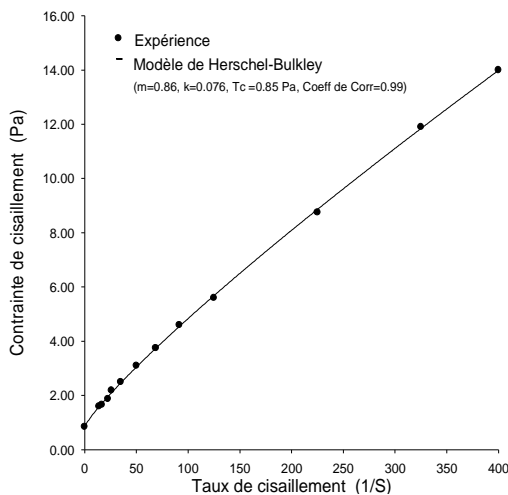


Figure. 4 : Evolution de la contrainte de cisaillement  $\tau$  en fonction du taux de cisaillement  $\dot{\gamma}$  pour  $\Phi=0.44$  (Expérience et Modèle de Herschel-Bulkley).

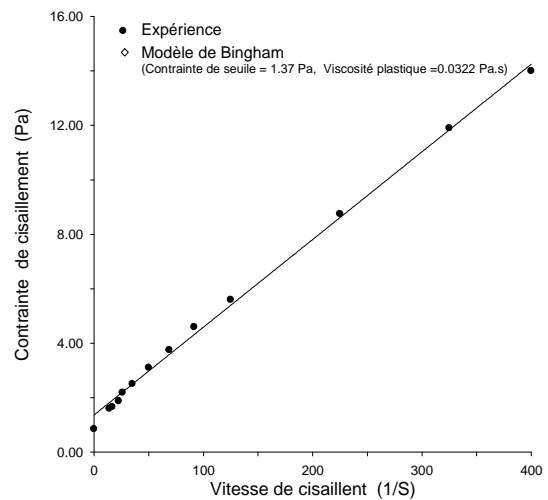


Figure. 5 : Evolution de la contrainte de cisaillement  $\tau$  en fonction du taux de cisaillement  $\dot{\gamma}$  pour  $\Phi=0.44$  (Expérience et Modèle de Bingham).

D'après les courbes des (figure.3, 4, 5), on conclut que les propriétés rhéologiques du pétrole brut étudié sont convenablement représentées par le modèle de Herschel-Bulkley.

### 3. Suspension de particules solides (effet de la concentration)

La méthode la plus simple de décrire la structure du pétrole est de voir celui-ci comme une suspension de particules solides, dans un solvant newtonien, Il s'agit de la théorie des suspensions diluées [5] dont les prémices remontent à 1906 avec les résultats d'Einstein, qui furent ensuite largement repris et modifiés.

#### 3.1. Les modèles de suspensions de sphères rigides

##### 3.1.1 Modele einstein

Les travaux d'Einstein en rhéologie portent sur les suspensions très diluées de sphères rigides, de concentration volumique  $\Phi$  ( $\Phi \leq 0.03$ ), dans un solvant newtonien de viscosité  $\eta_s$ . Il propose la formule, valable pour tout type d'écoulement

$$\frac{\eta}{\eta_s} = 1 + 2.5 * \Phi \quad (1)$$

où  $\frac{\eta}{\eta_s}$  est la viscosité relative moyenne de la suspension.

##### 3.1.2 Modele batchelor & green batchelor & green (1972)

Ajoutèrent à cette formule un terme quadratique, pour tenir compte du mouvement des particules :

$$\frac{\eta}{\eta_s} = 1 + 2.5 * \Phi + 6.2 * \Phi^2 \quad (2)$$

##### 3.1.3 Modele batchelor & green modifie

Une forme plus complexe est proposée par Phan-Thien & Pham (1987). Ils considèrent une suspension de concentration  $\Phi$ , et de viscosité  $\eta$ . L'ajout d'une petite quantité de particules  $d\Phi$  dans la fraction  $(1-\Phi)$  de fluide restant augmente la concentration de  $d\Phi(1-\Phi)$ . En utilisant la relation d'Einstein, l'incrément de

viscosité s'écrit alors :

$$d\eta = 2.5 \frac{d\Phi}{(1-\Phi)} \eta$$

qui après intégration donne:

$$\frac{\eta}{\eta_s} = (1 - \Phi)^{-2.5} \quad (3)$$

##### 3.1.4 Modèle ball & richmond

Ball & Richmond (1980) modifièrent ce résultat en faisant intervenir une concentration maximale admissible  $\Phi_m$  ( $\approx 0.64$  pour des sphères), et obtinrent :

$$\frac{\eta}{\eta_s} = \left(1 - \frac{\Phi}{\Phi_m}\right)^{-2.5 * \Phi_m} \quad (4)$$

### 3.1.5 Modèle frankel & acrivos (1967)

S'attacha au fait que pour les suspensions denses, les forces de « lubrification » entre les particules voisines dominaient et que la distance sphère-sphère était un paramètre important. Ils proposèrent la relation :

$$\frac{\eta}{\eta_s} = \frac{9 * \left( \frac{\Phi}{\Phi_m} \right)^{1/3}}{8 * \left( 1 - \left( \frac{\Phi}{\Phi_m} \right)^{1/3} \right)} \quad (5)$$

### 3.1.6 Modèle metzner (1985)

Recommande :

$$\frac{\eta}{\eta_s} = \left( 1 - \frac{c}{A} \right)^{-2} \quad (6)$$

Les Figures (2 et 7), présente une comparaison de ces différentes formules, avec les résultats expérimentaux obtenus pour une suspension de sphères rigides à divers taux de concentration.

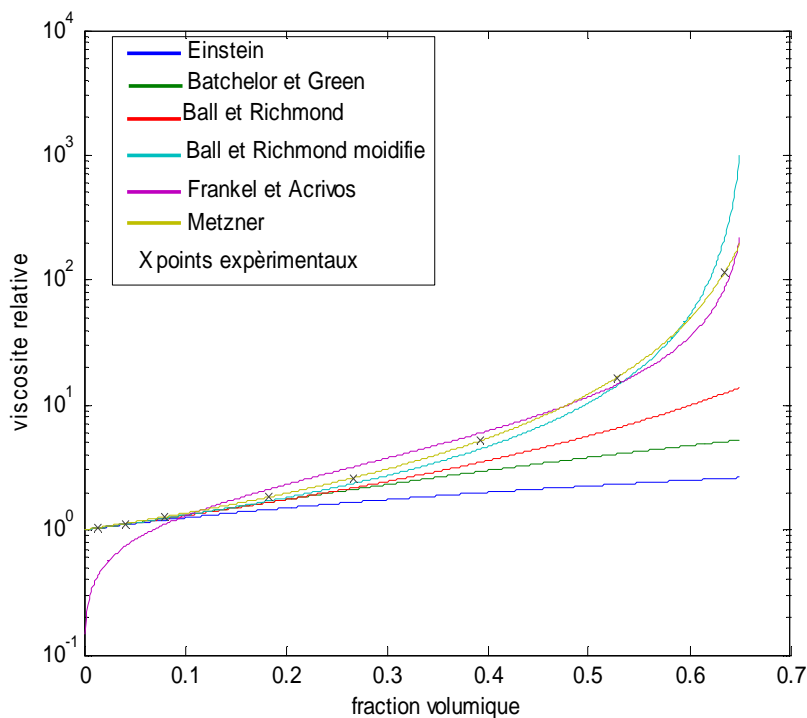


Figure 6 : Influence de la concentration en particules sphériques sur la viscosité. Comparaison de divers modèles et du résultat expérimental ( $\dot{\epsilon} = 7 [1/s]$ )

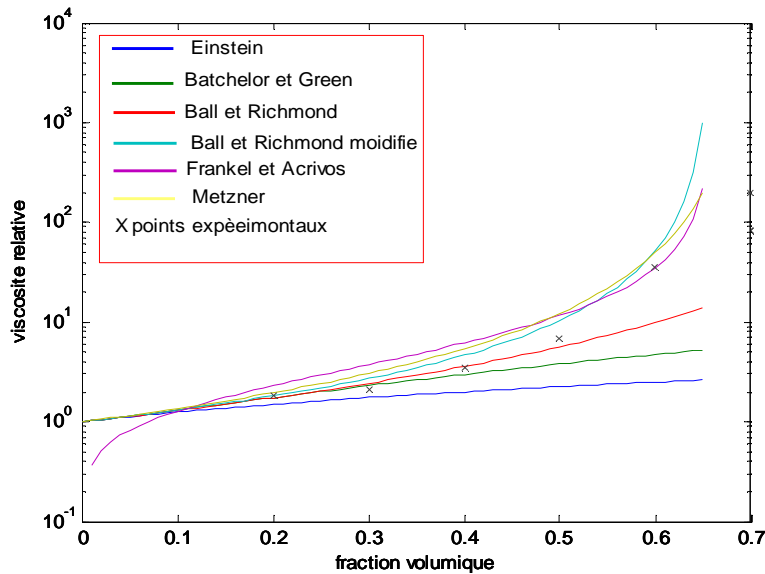


Figure 7 : Influence de la concentration en particules sphériques sur la viscosité. Comparaison de divers modèles et résultats expérimentaux ( $\dot{\epsilon} = 743 [1/s]$ ).

### Interprétation:

- La formule d'Einstein est utilisable pour des concentrations très faibles.

- Pour des concentrations plus élevées, ce sont les formules de Metzner et Ball & Richmond qui sont les plus proches des valeurs expérimentales. Au delà de  $\Phi=0.6$ , les résultats ne sont plus précis.

Ces théories offrent l'avantage de considérer le pétrole, non comme un fluide homogène comme précédemment, mais comme une suspension des particules rigides.

On fait l'hypothèse que les molécules sont des particules rigides, alors qu'en réalité ils sont très déformables. Cette modélisation ne permet pas de prendre en compte les interactions (glissement, forces) entre les molécules. Elle n'offre qu'une vision statique du pétrole brut. Il n'est pas possible de prendre en compte dans la loi de comportement le caractère instable de l'écoulement des fluides non newtoniens.

Au vu de la dispersion et du manque de représentativité des résultats, il est nécessaire de s'appuyer sur des modèles rhéologiques plus élaborés.

## 4. Modélisation numérique de l'écoulement du pétrole brut

En supposant que l'écoulement garde un profil symétrique par rapport à l'axe Z de la conduite (figure.6), c'est le modèle de Krieger & Dougherty qui est choisi pour formuler le caractère non newtonien du pétrole brut étudié.

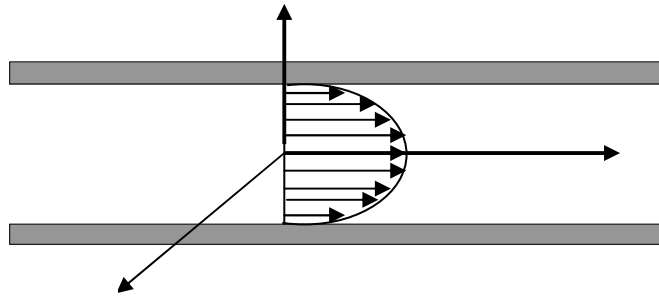


Figure. 8: Profil de vitesse d'écoulement.

#### 4.1. Modélisation mathématique

C'est avec des conditions aux limites associées bien déterminées, que nous allons établir et résoudre les équations de la dynamique des fluides.

##### 4.1.1. Modèle de Krieger et Dougherty

Ce modèle nous permet de déterminer le profil de vitesses. Le modèle de Krieger et Dougherty s'écrit donc :

$$\eta = \eta_{\infty} + \frac{\eta_0 - \eta_{\infty}}{1 + \left[ \frac{\tau}{\tau_c} \right]^m} \quad (7)$$

Après intégration de l'équation (7), on trouve la relation :

$$\frac{a r}{2} = \left( \frac{\eta_0 - \eta}{\eta - \eta_{\infty}} \right)^{\frac{1}{m}} |\tau_c| \quad (8)$$

où  $\tau_c$  est négatif

##### 4.1.2. Calcul du profil de la vitesse pour m variable

Dans le cas général, le profil de vitesse est obtenu en résolvant l'équation (8) pour  $m$  variable.

$$\frac{dV}{dr} = \frac{-\frac{a r}{2} \left[ \left( \frac{a r}{2} \right)^m + (\tau_c)^m \right]}{\left[ (\tau_c)^m \eta_0 + \eta_{\infty} \left( \frac{a r}{2} \right)^m \right]} \quad (9)$$

Mais, puisque  $m$  est très proche de l'unité ( $m \cong 1$ ) [11], la résolution de l'équation (9) donne le profil de vitesse recherché pour le pétrole brut étudié :

$$V(r) = \frac{a}{4\eta_\infty} (R^2 - r^2) + \left[ \frac{aA}{2\eta_\infty} - \frac{|\tau_c|}{\eta_\infty} \right] (r - R) + \left[ \frac{|\tau_c|A}{\eta_\infty} - \frac{aA^2}{2\eta_\infty} \right] \ln \left[ \frac{r+A}{A+R} \right] \quad (10)$$

$$\text{où } A = \frac{2\eta_0 |\tau_c|}{a\eta_\infty}$$

Le profil de vitesse nous permet de calculer les différentes contraintes, dues à l'interaction fluide solide, par le biais du modèle Phan-Thien et Tanner (MPTT) [4, 5].

#### 4.2. Calcul des contraintes du fluide par le Modèle MPTT

Le modèle de Phan-Thien et Tanner (MPTT) [4, 5] appartient à la théorie des réseaux. Ce modèle a été développé pour l'étude du comportement de lubrifiants soumis à des sollicitations brutales. Sous ce type de sollicitations, le lubrifiant perd son caractère newtonien, sa viscosité chute pour des taux de cisaillement élevés. Ces propriétés laissent entrevoir des ressemblances intéressantes avec l'écoulement

du pétrole brut, d'ailleurs le lubrifiant est un des produits pétroliers. De plus, on peut dresser de nombreuses analogies du point de vue rhéologique : les intersections entre les molécules et le solvant sont communes aux types de fluide. Pour comparaison, on introduit la figure.7 qui nous montre que le comportement rhéologique de l'eau est newtonien, alors que le comportement du pétrole brut est non-newtonien (fluide plastique non idéal). Le modèle modifié de Phan-Thien et Tanner (MPTT) se distingue des modèles de la théorie des réseaux en prenant pour hypothèse un mouvement non affine des brins moléculaires au sein du solvant.

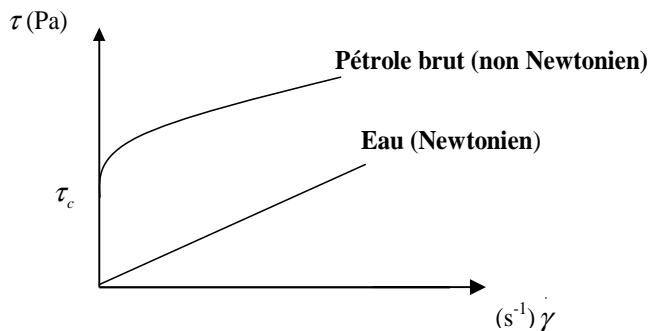


Figure. 9 : Comportement rhéologique du pétrole brut et de

#### 4.3. Ecriture de l'équation de contraintes

L'équation des contraintes est obtenue à partir de l'équation d'équilibre. Elle nous est donnée sous la forme [7, 8] :

$$\lambda_{i,0} \frac{D\tau_{ij}}{Dt} + \sigma_i (tr \tau_{ij}) \tau_{ij} = 2\eta_m D \quad (11)$$

$$\frac{D}{Dt} = \frac{d}{dt} ( ) - \zeta \cdot ( ) - ( ) \cdot \zeta^t$$

où,  $\zeta$  est le tenseur du gradient de vitesse de l'écoulement local,  $\tau_{ij}$  est la contrainte de cisaillement,  $D$  est le tenseur des taux de déformations macroscopiques,  $\eta_m$  est le rapport de la viscosité du fluide et  $\sigma_i$  est la contrainte normale.

En projetant l'équation (11) sur les axes  $(rr)$ ,  $(rz)$  et  $(zz)$ , on obtient le système suivant qui sera résolu par une méthode des différences finies :

$$\begin{cases} \text{sur}(rr) \Rightarrow \frac{\partial \tau_{rr}}{\partial t} = -\frac{\sigma_i}{\lambda_{i,0}} \tau_{rr} - AA \zeta \cdot \tau_{rz} \\ \text{sur}(rz) \Rightarrow \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial t} = -\frac{\sigma_i}{\lambda_{i,0}} \tau_{rz} - AA [\xi \cdot \tau_{zz} + (\xi - 2) \tau_{rr}] + 2 \frac{\eta_m}{\lambda_{i,0}} AA \\ \text{sur}(zz) \Rightarrow \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial t} = -\frac{\sigma_i}{\lambda_{i,0}} \tau_{zz} - AA (\xi - 2) \tau_{rz} \end{cases} \quad (12)$$

$$\text{avec } \sigma_i = \exp\left(\epsilon \frac{\text{tr}(\tau_{ij})}{G_{i,0}}\right) \text{ et } AA = \frac{-\frac{ar}{2} \left[ \left(\frac{ar}{2}\right) + (\tau_c) \right]}{(\tau_c) \eta_0 + \eta_\infty \left(\frac{ar}{2}\right)}$$

où  $\zeta$  est le paramètre définissant le taux de glissement,  $\lambda_{i,0}$  est le rapport adimensionné,  $(x, y, z)$  sont des variables d'espaces,  $G_{i,0}$  est le module de cisaillement du pétrole brut,  $\epsilon$  est une constante et  $\lambda_i$  est le temps de relaxation du fluide

## 5. Résultats et discussions

Cette étude nous a menés à la détermination des résultats suivants :

### 5.1. Calcul des contraintes

Pour calculer les contraintes du fluide sur les parois de la conduite, on applique, dans notre cas, la valeur moyenne de la variation de pression par rapport à l'axe  $z$ , qui est  $a=0.01\text{Pa}$ . On obtient les résultats suivants :

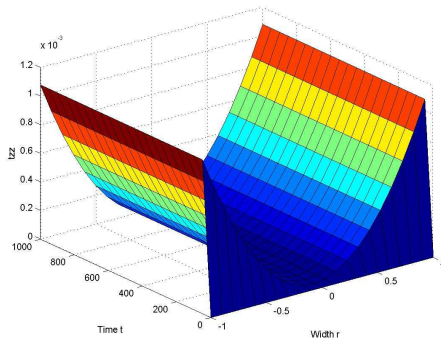


Figure.10 : Répartition de la contrainte  $\tau_{zz}$  en fonction du temps  $t$  et du rayon de la conduite  $r$ .

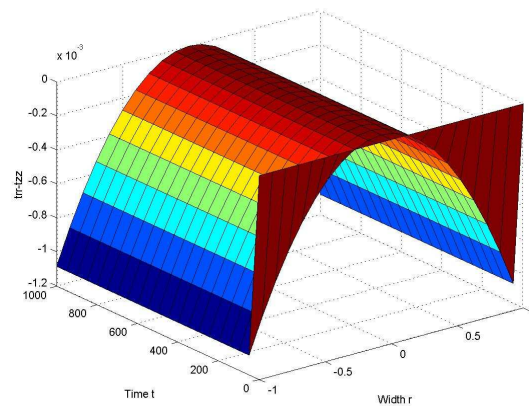


Figure.11 : Répartition de la contrainte  $N_1 = \tau_{zz} - \tau_{rr}$  en fonction du temps  $t$  et du rayon de la conduite  $r$ .

Sachant que la surmodulaire de contrainte  $N_I = \tau_{zz} - \tau_{rr}$ , la figure.8 représente l'évolution de la contrainte  $\tau_{zz}$  en fonction du temps  $t$  et du rayon de la conduite  $r$ . On constate que la contrainte de cisaillement  $\tau_{zz}$  varie de manière parabolique en fonction du rayon de la conduite et que sa valeur maximale est de l'ordre de 1,1 Pas.

La figure.11 représente l'évolution de la surmodulaire de la contrainte  $N_I$  en fonction du temps  $t$  et du rayon de la conduite  $r$ . Elle varie de la même manière (parabolique) que  $\tau_{zz}$  en fonction du rayon de la conduite et du temps.

Contraintes obtenues	
$\tau_{zz\max}$	1.1 Pa
$N_{I\max}$	-1.1 Pa

Tableau 3: L'amplitude  $N_I$  et la contrainte  $\tau_{zz}$

L'amplitude  $N_I$  est égale à celle calculée de la contrainte  $\tau_{zz}$  mais les signes sont opposés. C'est cette configuration qui fournit la meilleure estimation des niveaux de contrainte générés par l'écoulement du pétrole brut dans la conduite. On remarque aussi que l'augmentation des valeurs de la contrainte est proportionnelle au rayon de la conduite et dépend aussi du profil de vitesse.

Donc le modèle de Phan-Thien & Tanner permet une prise en compte pertinente des caractéristiques microstructurales du pétrole brut et nous permet de déterminer les différentes contraintes qui sollicitent la paroi.

## 6. La déformation du pipe-line par le code ABAQUS

Le maillage de pipe-line qui a les dimensions suivantes (L=1m,r=0.1m,R=0.12m)

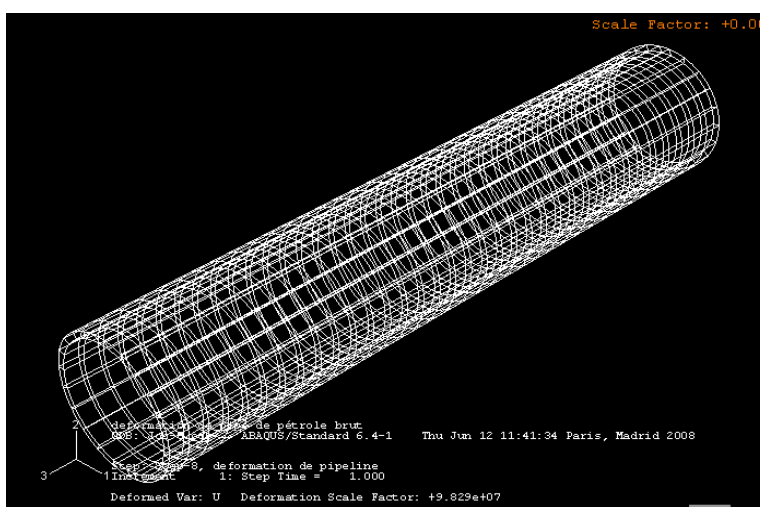


Fig.12 :Le maillage de pipe-line

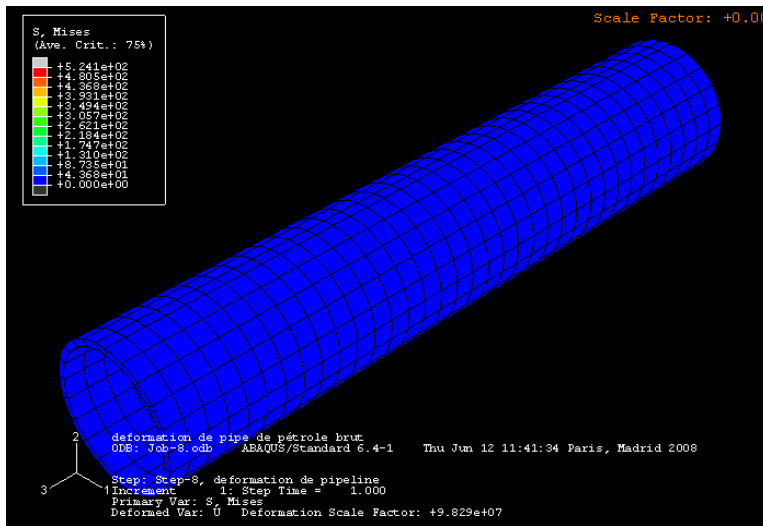


Fig.13: Le pipe-line à l'état initial  $t=0$  s

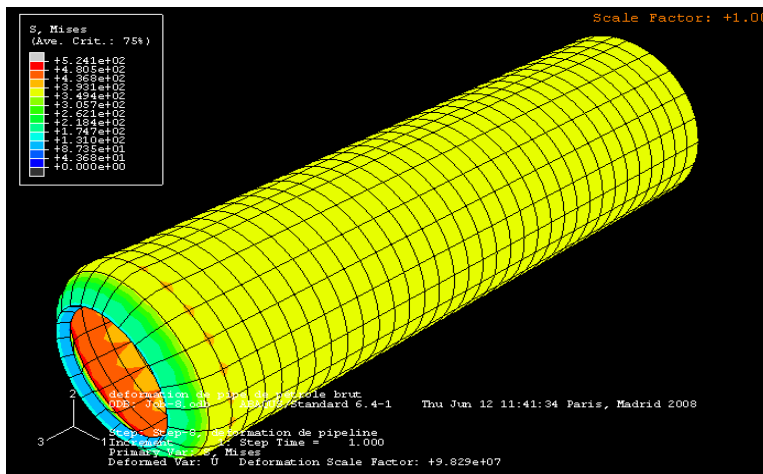


Fig.14: La déformation de pipe-line à l'état finale  $t=1$  s

Le modèle de Phan-Thien & Tanner permet une prise en compte pertinente des caractéristiques microstructurelles du pétrole brut pour déterminer les différentes contraintes qui sollicitent la paroi. La variation des valeurs de contraintes générées par l'écoulement du fluide, dépend aussi du profil de vitesse.

Grâce au logiciel ABAQUS, nous avons pu faire le maillage du pipe line et voir les déformations que ce dernier subit sous l'effet des contraintes pariétales.

De nombreuses lois (modèles) phénoménologiques ont été élaborées, dans la rhéologie des polymères, à partir de l'empirisme. Chaque fluide (newtonien ou non-newtonien) a son modèle mathématique qui nous permet de déterminer ses paramètres (viscosité, indice de comportement ...), et pour caractériser son comportement, en trouvant une relation entre la contrainte de cisaillement et le taux de cisaillement s'approchant le plus possible de la courbe expérimentale. Après avoir montré que le

pétrole brut est plastique non idéal (rhéofluidifiant) possédant une contrainte de seuil, nous avons exploité le modèle de Phan-Thien & Tanner, issu de la théorie des réseaux, pour déterminer l'état des contraintes avec une plus large prise en compte des spécificités rhéologiques du pétrole brut étudié, notamment avec les effets non newtoniens.

## 7. La vitesse de la corrosion

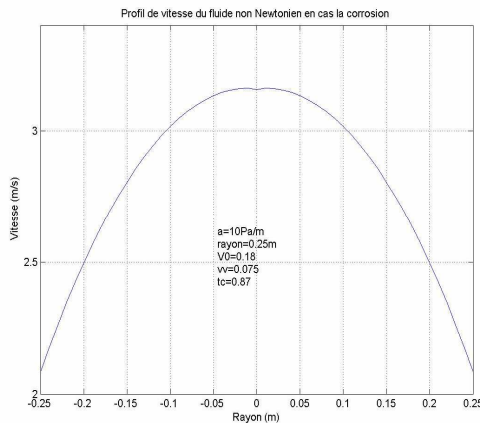


Figure. 15 : La courbe de profil de vitesse en fonction du rayon pour différents paramètres, gradient de pression ( $a = 10 \text{ Pa/m}$ ).

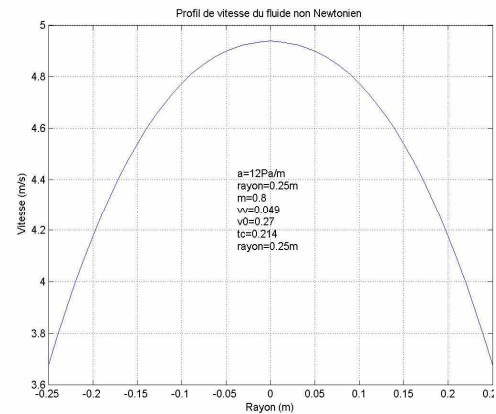


Figure. 16: La courbe de profil de vitesse en fonction du rayon pour différents paramètres, gradient de pression ( $a = 12 \text{ Pa/m}$ ).

Les contraintes normales et les contraintes tangentielles ont permis d'engendrer un mouvement principal de type parabolique. L'écoulement au voisinage de la paroi interne est caractérisé par la formation d'une zone critique où la vitesse prend des valeurs entre (2 m/s et 4 m/s). Sous l'effet de la vitesse à la paroi, un milieu favorable est créé pour la génération des plusieurs types d'acides tels que les acides naphthéniques.

## 8. Conclusion

La modélisation rhéologique du pétrole brut montre que le modèle de Bingham n'est valable que pour le cas d'un fluide à contrainte de seuil, de viscosité constante et où les taux de cisaillement sont élevés. L'application d'un autre modèle rhéologique tel que celui de Herschel-Bulkley au pétrole brut étudié nous a donné de meilleurs résultats par rapport à la réalité expérimentale. Après avoir montré que le pétrole brut est plastique non idéal (rhéofluidifiant) possédant une contrainte de seuil, nous avons exploité le modèle modifié de de Phan-Thien & Tanner issu de la théorie des réseaux, pour déterminer l'état des contraintes avec une plus large prise en compte des spécificités rhéologiques du pétrole brut étudié, notamment avec les effets non newtoniens.

La corrosion de pipe-line sur sa surface interne apparaît donc lors d'une variation de plusieurs facteurs avec l'augmentation de la température. Ceux sont ces variations qui changent la structure chimique du pétrole brut.

Ces théories offrent l'avantage de considérer le pétrole, non comme un fluide homogène comme précédemment, mais comme une suspension des particules rigides.

On fait l'hypothèse que les molécules sont des particules rigides, alors qu'en réalité ils sont très déformables.

Cette modélisation ne permet pas de prendre en compte les interactions (glissement, forces) entre les molécules.

Elle n'offre qu'une vision statique du pétrole brut. Il n'est pas possible de prendre en compte dans la loi de comportement le caractère instable de l'écoulement des fluides non newtoniens. Au vu de la dispersion et du manque de représentativité des résultats, il est nécessaire de s'appuyer sur des modèles rhéologiques plus élaborés.

De nombreuses lois (modèles) phénoménologiques ont été élaborées, dans la rhéologie des polymères, à partir de l'empirisme. Chaque fluide (newtonien ou non-newtonien) a son modèle mathématique qui nous permet de déterminer ses paramètres (viscosité, indice de comportement ...), et pour caractériser son comportement, en trouvant une relation entre la contrainte de cisaillement et le taux de cisaillement s'approchant le plus possible de la courbe expérimentale. Après avoir montré que le pétrole brut est plastique non idéal (rhéofluidifiant) possédant une contrainte de seuil, nous avons exploité le modèle de Phan-Thien & Tanner, issu de la théorie des réseaux, pour déterminer l'état des contraintes avec une plus large prise en compte des spécificités rhéologiques du pétrole brut étudié, notamment avec les effets non newtoniens.

## Bibliographie

- [1] PHAN THIEN N., TANNER R.I. *A new constitutive equation derived from network theory*. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics- Elsevier Scientific Publishing Company - 1977.
- [2] KANE M., DJABOUROV. M. *Rheology and structure of waxy crude oils in quiescent and under shearing conditions*. Journal of Fuel-Elsevier Scientific Publishing Company, p 1591-1605 - 2004.
- [3] ACHAB L., BENHADID S. *Application d'une loi constitutive dans l'étude numérique de l'écoulement sanguin à travers une artère sténosée*. Rhéologie, vol.7, p 28-34-2005.
- [4] BOURNOVILLE B., COUSSOT P., CHATEAU. X. *Modification du modèle de Farris pour la prise en compte des interaction géométriques d'un mélange polydisperse de particules*. Rhéologie, vol.7, p 1-8-2005.
- [5] GARECHE M., ZERAIBI N., AMOURA M. *Etude rhéologique et comparative de fluide de forage par les modèles classiques et structuraux*. Rhéologie, vol.7, p 1-8-2005.
- [6] AMBLARD A., BOUSAID B. *Modeling of the blood flow in an aorta: an attempt. The MPTT and Modified MPTT models*. Journal of Eengineering Tribology, IME.
- [7] BOUSAID B., PY C. *Modelling of the blood flow in the aorta: an attempt. Part II: The phenomenological and Dumbbell models*. Journal of Engineering Tribology, IME.
- [8] BOUSAID B., PY C. *Modelling of the blood flow in the aorta: an attempt. Part I: General considerations*. Journal of Engineering Tribology, IME.
- [9] MEWUIS J., MORTON M. D. *Constitution equation based on the transient network concept*. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics- Elsevier Scientific Publishing Company, 1983.
- [10] EHRET P. *Contribution à l'étude du comportement de mécanismes lubrifiés sous chargement transitoire*. Mémoire de Doctorat- Institut national des Sciences Appliquées de Lyon, 1993.
- [11] MAKRIA A. *Comportement rhéologique des émulsions concentrées de pétrole brut lourd dans Ecole nationale supérieure de techniques avancées*. Rapport de recherche 194, Novembre 1984.