

# Simulation de profil de vitesse de l'écoulement du pétrole brut dans le pipe line

ZAHLOUL Hamou<sup>1</sup>, MERIEM BENZIANE Madjid<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Département de génie mécanique université de CHLEF, BP 151 CHLEF Algérie

## Résumé

L'objectif principal de ce travail est la simulation numérique d'écoulements axisymétriques (étude de profil de vitesse de pétrole brut et leur influence sur la matière de la conduite).

On a étudié l'écoulement du pétrole brut, pour lequel on a choisi le modèle de Herschel-Bulkley et le modèle de Bingham pour l'appliquer sur le pétrole brut, et on a déterminé leurs paramètres ; indice de comportement, contrainte de seuil et le coefficient de consistance. Par la suite on a trouvé que le pétrole brut est un fluide plastique non idéal (rhéofluidifiant possédant une contrainte de seuil).

L'étude a été conduite en présence d'un comportement non newtonien selon la relation de Krieger & Dougherty et Cross afin de préciser les effets éventuels des propriétés non Newtoniennes du pétrole brut sur les écoulements. Nous avons étudié les variations du gradient de pression, et les paramètres rhéologiques du fluide en fonction de la vitesse moyenne. Cette étude a également permis de comprendre un peu mieux le rôle de la vitesse sur la paroi.

## 1. Introduction

Dans les industries chimiques, pétrolières ou minières, de nombreuses installations métalliques subissent des endommagements par la corrosion. La corrosion uniforme ou généralisée est la forme la plus connue et la plus fréquemment rencontrée. La corrosion aqueuse et les mécanismes physico-chimiques mis en jeu sont désormais assez bien compris.

Les techniques classiques utilisées sur site industriel, pour effectuer une évaluation de l'endommagement (coupons de corrosion, sondes électrochimiques), ne permettent que d'effectuer une mesure locale à un instant donné. Il semble donc primordial de développer de nouvelles techniques d'investigation permettant une détection rapide de la vitesse de corrosion.

Notre étude entre dans le cadre de la compréhension de ces mécanismes avec notamment pour objectif la détermination de la vitesse de corrosion induite par les acides naphténiques. La présence et l'attaque dues à ces acides, dépendent de plusieurs paramètres parmi lesquels nous citerons **2** :

1. La température : en effet, la corrosion se produit de façon notable entre 220 C et 400 C.
2. La vitesse du fluide : la morphologie des attaques montre que le fluide se déplace à une vitesse locale élevée,
3. la présence de turbulences : Certains secteurs des raffineries telles que les canalisations coudées, créent des zones de turbulences. Ce sont ces zones dans lesquelles sont mesurées les vitesses de corrosion par les acides naphténiques les plus élevées.

Quand un ou plusieurs de ces paramètres est réalisés, il y a l'apparition de la corrosion dans la conduite.

D'après les résultats expérimentaux de la vitesse de corrosion pour différentes vitesses de l'écoulement du pétrole brut (tableau.1) **2**. Nous remarquons bien qu'il y a une relation entre le taux de corrosion et la vitesse de l'écoulement à la paroi du conduit.

Alliages	aux de corrosion g n ralis e		aux de corrosion localis e	
	(3 m/s)	(66 m/s)	(3 m/s)	(66 m/s)
5 Cr	21,8	25,5	0,0	201,1
9 Cr	20,3	24,2	0,0	191,8
317 SS	3,29	6,09	0,0	28,7

Tableau .1 : Effet de la vitesse sur la corrosion, [2].

Dans ce chapitre nous tudier le profil de vitesse du p trole brut dans un tranchant de la pipe line pour voir la r partition de la vitesse d' coulement, par l'utilisation des mod les rh ologiques tels que Krieger & Dougherty, Cross avec diff rents valeurs de (m) et (n) pour la comparaison.

## 2. rofil de itesse de l Ecoulement par diff rents mod les rh ologi ues:

Nous allons, pr sent, utiliser les mod les de Krieger & Dougherty, Cross pour extraire le profil de vitesse de l coulement. On consid re que le probl me est axisym trique (Figure.1):

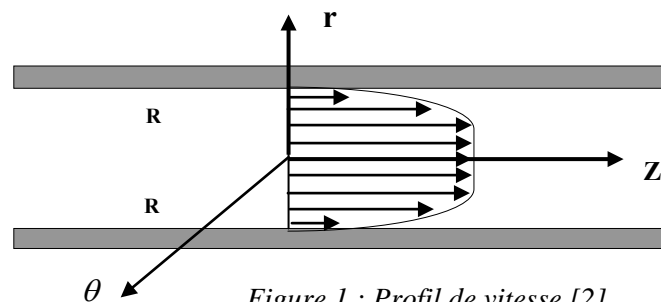


Figure.1 : Profil de vitesse [2].

### 2.1. Mod lisation math mati ue:

Pour un coulement donn , les quations de la dynamique des fluides, avec des conditions aux limites associ es bien d termin es n admettent pas en g n ral, des solutions analytiques.

Nous allons nous int resser l tude de l coulement de Poiseuille. C est le mod le de Krieger ou de Cross qui sera introduit dans les quations de la dynamique des fluides pour prendre en compte le caract re non newtonien du fluide.

### 2.2. E uation de mou ement:

On suppose que l coulement s effectue dans une conduite cylindrique rectiligne de rayon R et qu'il est laminaire, permanent et pleinement d velopp . On se place dans un syst me

de coordonnées cylindriques  $(r, \theta, z)$ . Compte tenu de la symétrie du problème, l'équation de Navier-Stokes s'écrit **3** :

$$\frac{dP}{dz} = \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left[ r \eta \frac{dV}{dr} \right] \quad (1)$$

Où  $\eta$  représente la viscosité apparente.

Sachant que  $\frac{dP}{dz} < 0$ , on pose :

$$-a r = \frac{d}{dr} \left[ r \eta \frac{dV}{dr} \right] \quad (2)$$

Où  $a > 0$

### 2.3. Calcul de l'écoulement par le modèle de Krieger-Dougherty:

Nous avons l'équation (2):

$$\frac{-a r}{2} = \left[ \tau_{rz} \right]$$

Sachant que la viscosité apparente est de la forme :

$$\eta = \eta_{\infty} + \frac{\eta_0 - \eta_{\infty}}{1 + \left[ \frac{\tau}{\tau_c} \right]^m} \quad (3)$$

On a:

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

L'équation, (3) devient :

$$-\frac{a r}{2} = \left( \frac{\eta_0 - \eta}{\eta - \eta_{\infty}} \right)^{\frac{1}{m}} \tau_c \quad (4)$$

### Calcul du profil de la vitesse pour $m$ variable:

Le profil de la vitesse s'écrit donc :

$$\frac{dV}{dr} = \frac{-\frac{a r}{2} \left[ \left( \frac{a r}{2} \right)^m + (\tau_c)^m \right]}{\left[ (\tau_c)^m \eta_0 + \eta_{\infty} \left( \frac{a r}{2} \right)^m \right]} \quad (5)$$

**Cas particulier 1 :**

$$\frac{dV}{dr} = \frac{-\frac{a r}{2} \left[ \left( \frac{a r}{2} \right) + (\tau_c) \right]}{\left[ (\tau_c) \eta_0 + \eta_{\infty} \left( \frac{a r}{2} \right) \right]} \quad (6)$$

Pour  $m=1$ , le profil des vitesses est obtenu en intégrant l'équation (6) :

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

$$\frac{dv}{dr} = \frac{-ar^2}{2\eta_\infty(A+r)} - \frac{r|\tau_c|}{\eta_\infty(A+r)}$$

$$v(r) = \int \left( \frac{-ar^2}{2\eta_\infty(A+r)} - \frac{r|\tau_c|}{\eta_\infty(A+r)} \right) dr$$

$$v(r) = -\frac{a}{2\eta_\infty} \int \frac{r^2}{(A+r)} dr - \frac{|\tau_c|}{\eta_\infty} \int \frac{r}{(A+r)} dr$$

Le profil de vitesse peut s'exprimer alors comme ce suit:

$$V(r) = \frac{a}{4\eta_\infty} (R^2 - r^2) + \left[ \frac{aA}{2\eta_\infty} - \frac{|\tau_c|}{\eta_\infty} \right] (r - R) + \left[ \frac{|\tau_c|A}{\eta_\infty} - \frac{aA^2}{2\eta_\infty} \right] \ln \left[ \frac{r+A}{A+R} \right] \quad (7)$$

**Cas o m 0.8 :**

L'équation (7) devient:

$$\frac{dV}{dr} = \frac{-\frac{ar}{2} \left[ \left( \frac{ar}{2} \right)^{4/5} + (\tau_c)^{4/5} \right]}{\left[ (\tau_c)^{4/5} \eta_0 + \eta_\infty \left( \frac{ar}{2} \right)^{4/5} \right]} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} v(r) = & \frac{\tau_c^{1/2}}{\eta_\infty \left( \frac{a}{2} \right)^{1/2}} \left[ \frac{-5a}{12} r^{6/5} - 2,5r^{2/5} \eta_0 + 2,5R^{2/5} \right] + 2,5 \left( \frac{\eta_0 \tau_c^{1/2}}{\eta_\infty \left( \frac{a}{2} \right)^{1/2}} \right)^{3/2} (\text{arctgr}^{2/5} - \text{arctg}R^{2/5}) - \\ & \frac{5}{6} R^{6/5} + \frac{a}{2\eta_\infty} \left( \frac{r^2}{2} - \frac{5}{6} r^{5/6} \left( \frac{2\eta_0 \tau_c}{a} \right)^{1/2} \right) + \frac{\eta_0}{\eta_\infty} \left( \frac{2\tau_c}{a} \right)^{1/2} \left( 2,5(r^{2/5} - \text{arctgr}^{2/5} - 1) + \frac{5}{6} R^{6/5} \right) - R^2 - \\ & 2,5R^{2/5} \left( \frac{\eta_0}{\eta_\infty} \right)^2 \frac{2\tau_c}{a} + 2,5 \left( \frac{\eta_0}{\eta_\infty} \frac{2\tau_c}{a} \right)^{5/2} \text{arctg}R^{2/5} \end{aligned} \quad (9)$$

**Cas o m 2:**

L'équation (6) devient:

$$\frac{dV}{dr} = \frac{-\frac{ar}{2} \left[ \left( \frac{ar}{2} \right)^2 + (\tau_c)^2 \right]}{\left[ (\tau_c)^2 \eta_0 + \eta_\infty \left( \frac{ar}{2} \right)^2 \right]} \quad (10)$$

$$dv = \frac{-a^2 r^3 - \frac{ar\tau_c^2}{2}}{\tau_c^2 \eta_0 + \eta_\infty \frac{a^2 r^2}{4}} dr ,$$

$$dv = \frac{-a^2 r^3}{\tau_c^2 \eta_0 + \eta_\infty a^2 r^2} dr - \frac{2ar\tau_c^2}{2\tau_c^2 \eta_0 + \eta_\infty a^2 r^2} dr \quad (11)$$

$$v(r) = \int_r^R -\frac{a^2 r^3}{\tau_c^2 \eta_0 + \eta_\infty a^2 r^2} dr - \int_r^R \frac{2ar\tau_c^2}{2\tau_c^2 \eta_0 + \eta_\infty a^2 r^2} dr$$

Le profil des vitesses est obtenu en intégrant l'équation (11) :

$$v(r) = \frac{8\tau_c^2}{\eta_\infty} \left( \frac{\eta_0}{\eta_\infty a} - \frac{1}{2a^{1/3}} \right) \left( \log(r^2) + \frac{4\eta_0\tau_c^2}{\eta_\infty^2 a^{2/3}} \right) \frac{1}{\left( R^2 + \frac{4\eta_0\tau_c^2}{\eta_\infty a^{2/3}} \right)} + \frac{a}{4\eta_\infty a^{2/3}} (R^2 - r^2) \quad (12)$$

#### 2.4. Calcul de l'écoulement par le modèle de Cross:

Remplaçons  $\eta$  par l'expression de Cross dans l'équation (2).

$$-\frac{ar}{2} = \eta \frac{dv}{dr} \quad \text{Sachant que } \dot{\varepsilon} = -\frac{dv}{dr} ; \text{ on trouve:}$$

$$\frac{ar}{2} = \eta \dot{\varepsilon} = \eta_\infty \dot{\varepsilon} + \frac{\eta_0 - \eta_\infty}{1 + \left[ \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_c} \right]^n} \dot{\varepsilon} \quad (13)$$

Pour résoudre cette équation nous considérons deux cas limites:

$$\mathbf{A) Cas 0 :} \quad \left[ \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_c} \right]^n \gg 1 \quad \text{donc} \quad \eta = \eta_\infty + (\eta_0 - \eta_\infty) \left[ \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_c} \right]^n \quad (14)$$

Remplaçons  $\eta$  par sa valeur dans l'expression (14):

$$\frac{ar}{2} = \eta_\infty \dot{\varepsilon} + (\eta_0 - \eta_\infty) \left[ \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_c} \right]^n \dot{\varepsilon} \quad (15)$$

On résout l'équation (9) pour  $n=0,5$  et  $n=1$ .

#### Résolution pour $n = 1$ :

$$\text{L'équation (15) devient:} \quad \frac{ar}{2} = \eta_\infty \dot{\varepsilon} + (\eta_0 - \eta_\infty) \dot{\varepsilon}_c$$

D'o :

$$\dot{\varepsilon} = \frac{ar}{2\eta_\infty} - \frac{\eta_0 - \eta_\infty}{\eta_\infty} \dot{\varepsilon}_c$$

$$\frac{dv}{dr} = -\frac{ar}{2\eta_\infty} + \frac{\eta_0 - \eta_\infty}{\eta_\infty} \dot{\varepsilon}_c \quad (16)$$

Le profile de vitesse est obtenu en int grant l'expression (16):

$$v(r) = \int_r^R \left( -\frac{ar}{2\eta_\infty} + \frac{\eta_0 - \eta_\infty}{\eta_\infty} \dot{\varepsilon}_c \right) dr$$

$$v(r) = \frac{a}{4\eta_\infty} (R^2 - r^2) + \frac{\eta_0 - \eta_\infty}{\eta_\infty} \dot{\varepsilon}_c (r - R) \quad (17)$$

### R solution pour n 0,5:

L' equation (16) devient:

$$-\frac{ar}{2} + \eta_\infty \dot{\varepsilon} + (\eta_0 - \eta_\infty) \dot{\varepsilon}_c \left( \frac{a}{4\eta_\infty} \right)^{1/2} \left( \frac{a}{2\eta_\infty} \right)^{1/2} = 0 \quad (18)$$

Le profile de vitesse est obtenu en int grant l'expression (18):

$$v(r) = \int_r^R \left( -\frac{(\eta_0 - \eta_\infty)^2}{2\eta_\infty^2} \dot{\varepsilon}_c - \frac{ar}{2\eta_\infty} + \frac{\eta_0 - \eta_\infty}{\eta_\infty} \dot{\varepsilon}_c \left( \frac{(\eta_0 - \eta_\infty)^2}{4\eta_\infty^2} \dot{\varepsilon}_c + \frac{ar}{2\eta_\infty} \right)^{1/2} \right) dr$$

$$v(r) = \frac{a}{4\eta_\infty} (R^2 - r^2) + \frac{(\eta_0 - \eta_\infty)^2}{2\eta_\infty^2} \dot{\varepsilon}_c (R - r) + \frac{4}{3a} (\eta_0 - \eta_\infty) \dot{\varepsilon}_c \left\{ \left[ \left( \frac{\eta_0 - \eta_\infty}{2\eta_\infty} \right)^2 \dot{\varepsilon}_c + \frac{ar}{2\eta_\infty} \right]^{3/2} - \left[ \left( \frac{\eta_0 - \eta_\infty}{2\eta_\infty} \right)^2 \dot{\varepsilon}_c + \frac{aR}{2\eta_\infty} \right]^{3/2} \right\} \quad (19)$$

### 3. R sultats:

Nous r sultats, avec les param tres des equations de Krieger & Dougherty et Cross, ont t compar s avec ceux du tableau (I .1). Ces derniers, ont t d duits les equations de profil de vitesse en fonction du rayon. On a fait varier le gradient de vitesse progressivement pour balayer les plages de fonctionnement usuelles. Nous remarquons l'apparition d'une vitesse lev e la paroi de la conduite, ce qui favorise la lib ration des mol cules des acides naphthiques et permet de justifier la pr sence de la corrosion.

Notre contribution dans le domaine est le d veloppement d'un mod le diff rents param tres : d termination des vitesses moyennes la paroi et v rification exp rimentale des valeurs des vitesses moyennes qui permettent la lib ration les acides naphthiques. La connaissance des ces valeurs a donn e une vision approach e de l'emploi de produits chimiques pour des applications industrielles.

Les solutions sont pr sentes, sous certaines conditions de fonctionnement, parmi lesquelles le gradient de pression impos . L'volution du profil de vitesse de l'coulement

correspond des phénomènes d'orientation de la corrosivité du pipe-line dans le cas d'un fluide non-newtonien.

Les résultats sont les suivants :

### 3.1. Modèle de Krieger - Dougherty:

a)  $m = 1$

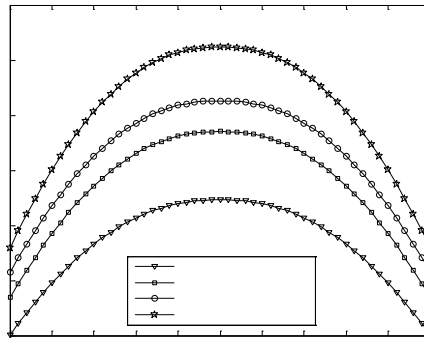


Figure .2: Comparaison des profils de vitesses pour différents gradients de pression, obtenues par le modèle de Krieger & Dougherty,  $m=1$ .

b)  $m = 0.8$

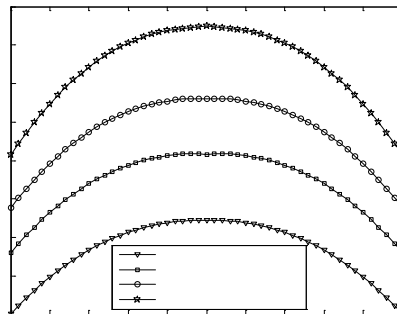


Figure .3: Comparaison des profils de vitesses pour différents gradients de pression, obtenues par le modèle de Krieger & Dougherty  $m=0,8$ .

c)  $m = 2$

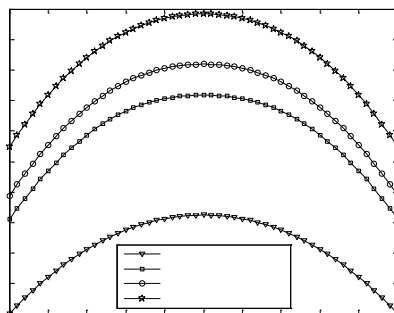


Figure .4: Comparaison des profils de vitesses pour différents gradients de pression, obtenues par le modèle de Krieger & Dougherty  $m=2$ .

### 3.2. Mod le de Cross:

#### a) m 1

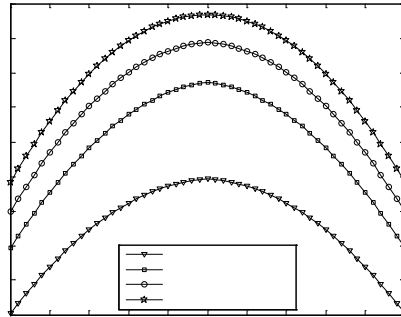


Figure .5: Comparaison des profils de vitesses pour différents gradients de pression, obtenues par le modèle de Cross  $m=1$ .

#### b) m 0,5

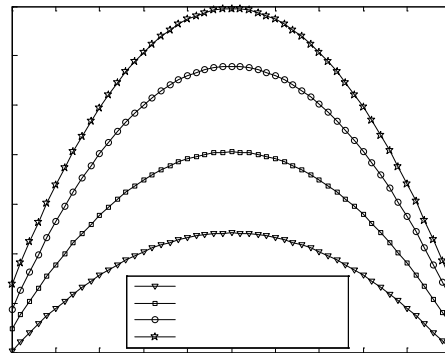


Figure .6: Comparaison des profils de vitesses pour différents gradients de pression, obtenues par le modèle de Cross  $m=0,5$ .

### 3.3. Discussion:

Nous remarquons que le profil de vitesse obtenu à l'aide des modèles de Krieger & Dougherty et de Cross ob it une forme parabolique du type :

$$V(r) = ar^2 + br + c . \quad (19)$$

Enfin, ces profils de vitesse nous permettent d'examiner une simulation numérique pour faire apparaître l'impact des propriétés physiques du p trole brut, en tant que fluide non newtonien, durant son transport.

Pour un rayon de 0,25m correspondant à celui d'un pipe-line de Condensate, on a trouvé les résultats de (Tableau.2) et (Tableau.3).



Gradient de pression (Pa/m)	m	$\tau_c$ (Pa)	$\eta_0$ (Pa.s)	$\eta_\infty$ (Pa.s)	itesse la paroi (m/s)
10	1	0,100	0,156	0,0511	2
12	1	0,124	0,154	0,0492	2,684
14	1	0,113	0,259	0,0541	3,141
16	1	0,135	0,487	0,0532	3,595
10	0,8	0,3579	0,194	0,0519	3
12	0,8	0,2241	0,2553	0,0493	3,803
14	0,8	0,2064	0,2907	0,0499	4,384
16	0,8	0,2327	0,289	0,0493	5,071
10	2	0,332	0,1115	0,0789	1,1
12	2	0,121	0,121	0,0724	1,411
14	2	0,154	0,111	0,718	1,488
16	2	0,251	0,111	0,0608	1,647

Tableau .2: Comparaison entre les paramètres rhéologiques et les vitesses à la paroi pour différentes valeurs des gradients de pression calculé par le modèle de Krieger & Dougherty.

Gradient de pression (Pa/m)	n	$\mathcal{E}_c$ (1/s)	$\eta_0$ (Pa.s)	$\eta_\infty$ (Pa.s)	itesse la paroi (m/s)
10	1	0,2998	0,399	0,2184	2,208
12	1	0,589	0,454	0,3201	2,588
14	1	0,719	0,339	0,241	2,796
16	1	1,029	0,217	0,250	2,966
12	0,5	0,0001	0,197	0,0789	1,037
14	0,5	0,0001	0,0829	0,06178	1,491
16	0,5	0,0011	0,0800	0,05178	1,864
18	0,5	0,0001	0,1020	0,0506	2,372

Tableau .3: Comparaison entre les paramètres rhéologiques et les vitesses à la paroi pour différentes valeurs des gradients de pression calculé par le modèle de cross.

#### 4. Conclusion

Nous avons caractérisé, d'une part, la structure d'un écoulement symétrique engendré par des facteurs tels que, la viscosité initiale, la viscosité à la limite et le rayon de la conduite et, d'autre part, fait l'analyse des valeurs moyennes de la vitesse de l'écoulement en fonction du gradient de pression sur les parois de la conduite.

Les contraintes normales et les contraintes tangentielles ont permis d'engendrer un mouvement principal de type parabolique. La vitesse d'écoulement au voisinage de la paroi varie entre 1 et 5 m/s. Sous l'effet de cette vitesse, un milieu favorable est créé pour la génération de plusieurs types d'acides tels que les acides naphthiques.

Au voisinage de cette paroi interne, l'écoulement est caractérisé par des paramètres tels que le gradient de pression et la vitesse moyenne. Cette dernière (vitesse moyenne) prend des valeurs maximales au centre de la conduite.

La corrosion du pipe-line sur sa surface interne apparaît 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.

Plusieurs phénomènes sont possibles tels que, les réactions chimiques et les effets de comportement de l'écoulement du pétrole brut.

De plus, nous avons mis en relief que la corrosion, qui est due à la présence d'acides naphténiques, est dépendante de la pression, de la vitesse et, s'accroît pour des températures allant de 200 à 400 °C. Nous avons obtenu ces résultats selon des gradients de pression et de température représentatifs de la réalité car, notre travail répond à un besoin de l'industrie pétrolière.

## **Références**

- 1 MIDOUX.N**, mécanique et rhéologie des fluides, Lavoisier, 1985, TOM 2.
- 2 MERIEM BENZIANE.M**, Thèse de Doctorat Es-sciences, étude des effets non-newtoniens du pétrole brut sur l'interaction fluide paroi en régime instationnaire, UST Oran 2008 Algérie.
- 3 BEHAR A.**, cours de mécanique des fluides et technique des conduites, Université UHBC de Chlef, Algérie 2000.
- 4 MONSEM S.**, Corrosion l'acier par des pétroles contenant des acides naphténiques, Thèse doctorat, Ecole Doctorale Matériaux de Lyon. 2000.
- 5 LAUREN .**, mécanique des fluides numérique avec FLUENT, polytech'lille.
- 6 MAKRIA. A**, Comportement rhéologique des émulsions concentrées de pétrole brut lourd dans l'eau, Ecole nationale supérieure de techniques avancées, France, Rapport de recherche 194, Novembre 1984.
- 7 AMBLARD. A**, Modélisation de l'écoulement sanguin dans l'aorte, Mémoire DEA, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2003, France.