

Influence de la porosité sur les écoulements des produits visqueux dans les pipelines

R. BOUCETTA^a, M. ZAMOUM^b, M. KESSAL^c

a. Faculté des Sciences, Université de Boumerdès, 35000
r.boucetta@univ-boumerdes.dz

b. Faculté des Sciences, Université de Boumerdès, 35000
m.zamoum@univ-boumerdes.dz

c. Faculté des Hydrocarbures et de la Chimie, Université de Boumerdès, 35000
md.kessal@laposte.net

Résumé :

Une étude sur l'écoulement ascendant dans les pipelines de fluides visqueux chargés de paraffine est menée sur la base des équations du mouvement, de transfert de chaleur et de transfert de masse. Ces dernières sont réécrites sous une forme adimensionnelle complète. Une résolution numérique du nouveau système d'équations, par la méthode de Runge-Kutta d'ordre quatre. Les principaux paramètres de l'écoulement sont calculés à l'aide d'une méthode itérative de Newton Cotes d'ordre huit. Les résultats obtenus montrent que la porosité accélère l'obstruction des pipelines.

Abstract :

A study on the upward flow in pipelines of Heavy viscous and waxy fluid was conducted based on the momentum equation, heat and mass transfer. The latter are rewritten in a complete dimensionless form. A numerical resolution of the new equation system, based on the Runge-Kutta 4th order method. The main flow parameters are calculated using an iterative Newton Quotes of eighth order. The obtained results show that porosity accelerates the obstruction of pipelines.

Mots clefs : Dépôt de paraffine, transfert de chaleur, diffusion moléculaire, écoulement laminaire, porosité, hydrodynamique, pipeline.

1 Introduction

Les écoulements de fluides visqueux chargés de paraffine ont lieu dans plusieurs installations industrielles comme les puits de production et les réseaux de collecte de pétrole, les conduites de chargement et de déchargement de ce liquide, ainsi que les canalisations d'acheminement des huiles. Le problème généralement posé est celui de l'obstruction de ces pipelines, compte tenu de l'influence de la température sur le comportement du produit. Ce phénomène, qui constitue un transfert de matière, présente ainsi des aspects : chimique, thermodynamique et hydrodynamique. Dans notre étude nous nous proposons au dernier aspect.

Ce problème a fait l'objet d'un grand nombre de travaux expérimentaux ([1], [2], [3] et [4]), analytiques et numériques ([5], [6], [7, 8] et [9]) dans différentes configurations. Le but étant de maîtriser les divers paramètres régissant le problème de déposition, ainsi que l'exploitation des équipements associés. En réalité la couche de paraffine déposée sur la paroi de pipeline n'est pas de la paraffine pure, elle contient souvent d'huile piégée. La quantité d'huile piégée à l'intérieur des dépôts de paraffine est parfois appelée porosité de la paraffine. La porosité de la paraffine donne la quantité fractionnée d'huile piégée dans le dépôt. Les expériences sur le dépôt de paraffine ont donné la valeur de la porosité allant jusqu'à 90% pour le dépôt mou et de 50-72% pour le dépôt dur [10].

Pour cela, nous avons modélisé l'écoulement des fluides visqueux chauds chargés de paraffine, en reprenant les équations fondamentales de la mécanique des fluides, transfert de chaleur et du transfert de masse dans un pipeline de section circulaire. Le problème des pertes de charges a fait l'objet d'un traitement approprié, à cause du dépôt de paraffine sur la paroi de pipeline.

Le nouveau système d'équations obtenu est résolu par la méthode de Runge-Kutta d'ordre quatre, et les principaux paramètres de l'écoulement sont calculés à l'aide d'une méthode itérative de Newton Cotes d'ordre huit.

Ce travail est centré sur la porosité de paraffine dans les pipelines et vise à évaluer leur impact sur les paramètres d'écoulement concernant essentiellement, l'épaisseur de dépôt de paraffine, la répartition longitudinale de la température ainsi que l'évolution de débit.

2 Modèle théorique

On distingue deux régions de l'écoulement (Fig. 1), la première commence à $x = 0$ et fini à x_d , où le produit est en contact avec la paroi et où il atteint la température du point de cristallisation ($T_w|_{x_d} = T_c$). Dans cette région, le produit n'est pas encore saturé, il n'y a donc aucune précipitation de paraffine. L'autre région de l'écoulement constitue le reste du domaine, $x_d \leq x \leq L$. Dans cette région le produit est supposé saturé de paraffine.

2.1 Equation de la quantité de mouvement

Pour un écoulement unidirectionnel d'un fluide visqueux chargé de paraffine, en négligeant les termes non linéaires et compte tenu de la répartition de l'épaisseur ($d = 2[R - \delta]$), l'équation de conservation de la quantité de mouvement s'écrit :

$$\Delta p = p_{in} - p_{atm} - \rho g H = \frac{\rho Q^2}{4\pi^2 R^4} \int_0^L \frac{f}{(1 - \delta^*)^5} dx^* \quad (1)$$

Où P_{in} est la pression à l'entrée, P_{atm} la pression atmosphérique, g l'accélération de la pesanteur, H la dénivelée entrée-sortie du tube, $f = f(x, t)$ le coefficient de frottement, R le rayon du tube et ρ la densité de fluide supposée constante.

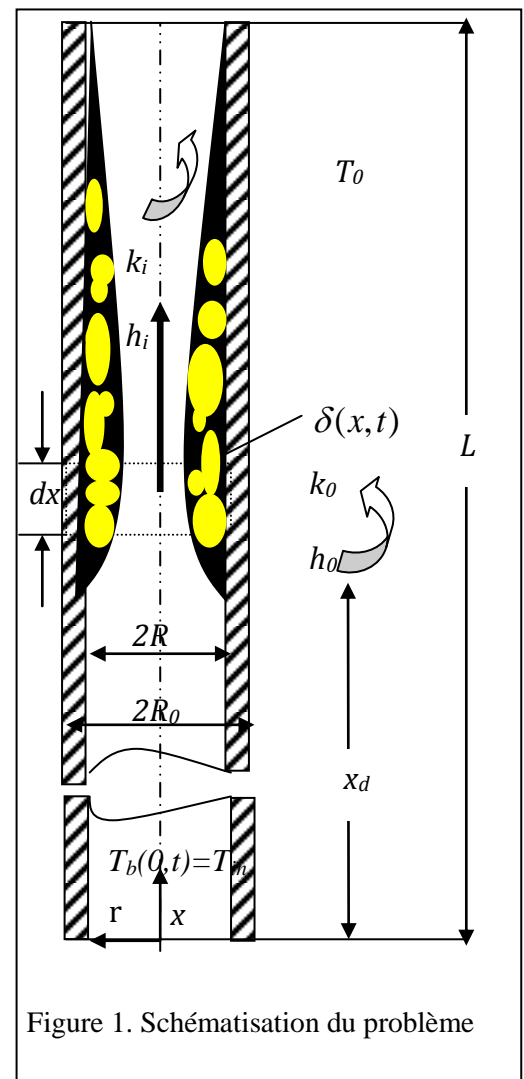


Figure 1. Schématisation du problème

2.2 Forme adimensionnelle des paramètres

L'introduction d'une forme adimensionnelle des paramètres permet d'écrire :
 $L^* = L/R$, longueur adimensionnelle, $x^* = x/R$, coordonnée axiale adimensionnelle et $\delta^* = \delta/R$,
 l'épaisseur adimensionnelle de la couche déposée.

Le débit instationnaire est obtenu de l'équation (1) sous la forme suivante :

$$Q(t) = 2\pi R^2 \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}} \frac{1}{\sqrt{\int_0^{L^*} \frac{f}{(1-\delta^*)^5} dx^*}} \quad (2)$$

Il est utile de rappeler que cette forme de débit souligne l'interdépendance débit-variation de pression. Il faut donc fixer l'un de ces deux paramètres dans le calcul, ce qui nous conduira par la suite à considérer les deux cas de figure précités.

On définit le débit (Q) et la variation longitudinale de pression (Δp) par rapport à l'état initial respectivement (Q_0) et (Δp_0) :

$$Q/Q_0 = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{\int_0^{L^*} \frac{f}{(1-\delta^*)^5} dx^*}} \sqrt{\frac{64L^*}{Re_0}} & \text{Cas A} \\ 1 & \text{Cas B} \end{cases} \quad (3)$$

$$\Delta p / \Delta p_0 = \begin{cases} \frac{Re_0}{64L^*} \int_0^{L^*} \frac{f}{(1-\delta^*)^5} dx^* & \text{Cas B} \\ 1 & \text{Cas A} \end{cases} \quad (4)$$

La distribution longitudinale de la pression pour les deux cas est :

$$p^* = \frac{p - p_{atm} - \rho g H}{\Delta p} = \frac{\int_{x^*}^{L^*} \frac{f}{(1-\delta^*)^5} dx^{*'}}{\int_0^{L^*} \frac{f}{(1-\delta^*)^5} dx^*} \quad \text{Cas B} \quad (5)$$

$$p^* = \frac{p - p_{atm} - \rho g H}{\Delta p} = \frac{Re_0}{64L^*} \left(\frac{Q}{Q_0} \right)^2 \int_{x^*}^{L^*} \frac{f}{(1-\delta^*)^5} dx^{*'} \quad \text{Cas A}$$

2.3 Bilan énergétique

Le transfert thermique joue un rôle important dans le processus du dépôt. Si nous appliquons le principe de la conservation de l'énergie à un volume de contrôle (Fig. 1), nous obtenons:

$$\rho Q c \frac{dT_b}{dx} = 2\pi R U (T_0 - T_b) \quad (6)$$

Où c est la chaleur spécifique de fluide visqueux, $U(x, t)$ le coefficient de transfert de chaleur global et T_0 la température de l'environnement dans lequel le pipe est immergé.

Le coefficient de transfert de chaleur global $U(x,t)$ dépend de $\delta^*(x,t)$, est réécrit sous une forme adimensionnelle :

$$U^* = \frac{UR}{k_i} = \left[\frac{2k_i/k_0}{Nu_0} + \frac{k_i}{k_w} \ln\left(\frac{R_0}{R}\right) + \frac{k_i}{k_d} \ln\left(\frac{1}{1-\delta^*}\right) + \frac{2}{Nu_i} \right]^{-1} \quad (7)$$

Dans cette équation k_i et k_0 représentent, respectivement, la conductivité thermique du fluide et la conductivité thermique de l'environnement extérieur.

Nu_0 et Nu_i sont les nombres du Nusselt externe et interne, respectivement, définis par :

$$Nu_0 = \frac{2R_0 h_0}{k_0} \quad ; \quad Nu_i = \frac{2R h_i}{k_i} (1 - \delta^*)$$

La température adimensionnelle pour les deux cas est:

$$\theta = \exp\left[-\frac{4}{Pe_0 Q / Q_0} \int_0^{x^*} U^* dx^{*'}\right] \quad \text{Cas A} \quad (8)$$

$$\theta = \exp\left[-\frac{4}{Pe_0} \int_0^{x^*} U^* dx^{*'}\right] \quad \text{Cas B}$$

2.3 Epaisseur de couche du dépôt de paraffine

Pour compléter la formulation du problème nous avons besoin d'une équation régissant l'évolution de l'épaisseur du dépôt de paraffine $\delta^*(x^*, t^*)$. Pour cela en écrivant l'équation flux de masse de paraffine à l'interface solide-liquide et en utilisant la loi de Fick sur la diffusion moléculaire. La variation de l'épaisseur par rapport au temps s'écrit sous la forme suivante :

$$\frac{\partial \delta^*}{\partial t^*} = \begin{cases} 0, & \text{si } 0 \leq x^* < x_d^* ; \\ \frac{S^* U^*}{(1 - \delta^*)(1 - \Phi)} \theta & \text{si } x_d^* \leq x^* < L^* . \end{cases} \quad (9)$$

Où S^* est le coefficient de solubilité adimensionnel et Φ la porosité de la paraffine

3 Résultats et discussion

3.1 Méthode de résolution

En fixant la condition initiale $\delta^*(x^*, 0) = 0$, on résout le système d'équations (9) en utilisant la méthode de Runge-Kutta d'ordre quatre. Le calcul des paramètres essentiels (le débit, la température et la pression) a fait l'objet de la méthode itérative de Newton Cotes d'ordre huit [11].

Pour compléter les données de ce problème, on définit les constantes comme suit [7] :

$$L/R = 1000 ; \theta_c = (T_c - T_o)/(T_{in} - T_o) = 0.9 ; S^* = 0.06 ; K_i / K_d = 1 ; Nu_i = 3.66$$

3.2 Résultats

L'application du système précédent permet d'observer la répartition dans le temps et dans l'espace, la déposition de paraffine, la température et le débit pour les deux situations (avec et sans porosité de la paraffine). Dans ce travail un seul cas pratique est considéré dans les calculs (cas A).

Sur la figure 2 nous avons tracé l'évolution de l'épaisseur de paraffine en fonction de la longueur adimensionnelle de canalisation pour un nombre de Reynolds $Re_0 = 10$ et de Peclet $Pe_0 = 1000$. La figure montre que l'obstruction de pipeline a lieu à $t^* = 10$. Par ailleurs l'amplitude de l'épaisseur au point de démarrage est élevée. Ceci est justifié par la valeur initiale du gradient de température.

Les figures 3 et 4 montrent une influence importante de la porosité de la paraffine sur l'évolution de l'épaisseur de dépôt de paraffine. En effet la comparaison de ces figures avec celle sans porosité (figure 2), montre que l'obstruction est plus rapide dans le cas de la présence de la porosité de la paraffine. En outre, plus la valeur de la porosité de la paraffine est grande, plus l'épaisseur de dépôt de paraffine est élevée, et par conséquent l'obstruction de pipeline est rapide.

Nous avons tracé l'évolution de la température en fonction de la longueur adimensionnelle de canalisation, telle que montrée sur la figure 5. On observe un refroidissement de fluide à cause de l'accumulation des dépôts de paraffine dans le pipeline, ce qui produit une décroissance du débit, ce dernier provoque une longue durée de contact de fluide avec la paroi propre (sans dépôt de paraffine), et par conséquent une chute rapide de la température de fluide dans le temps.

La comparaison des figures 6 et 7 avec son homologue (figure 5) montre clairement l'effet de la porosité de la paraffine sur l'évolution de la température. En effet en remarque une influence importante de la porosité sur la répartition longitudinale de la température, cette influence se traduit par un refroidissement rapide de fluide transporté par pipeline. Ceci est dû à la croissance de la couche déposée sur la paroi de pipeline. En outre, Plus valeur de la porosité de la paraffine est élevée, plus le refroidissement de fluide visqueux transporté est rapide ($\Phi = 0,8$)

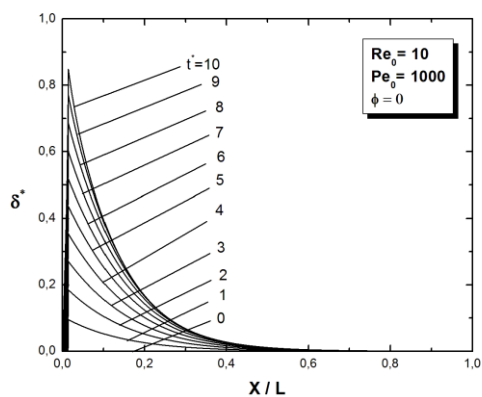


Figure 2. Répartition longitudinale de l'épaisseur sans porosité ($\Phi = 0$)

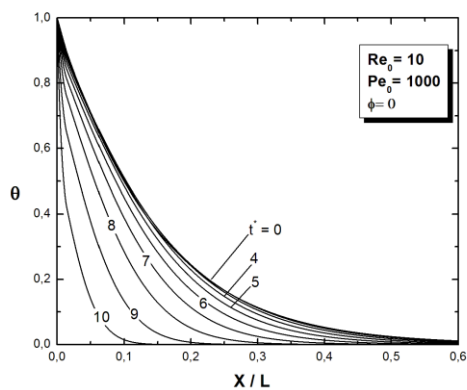


Figure 5. Répartition longitudinale de la température sans porosité ($\Phi = 0$)

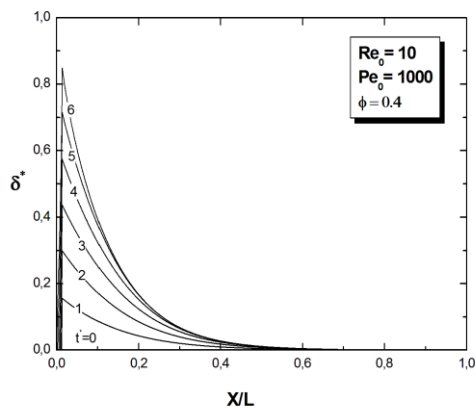


Figure 3. Répartition longitudinale de l'épaisseur avec porosité ($\Phi = 0, 4$)

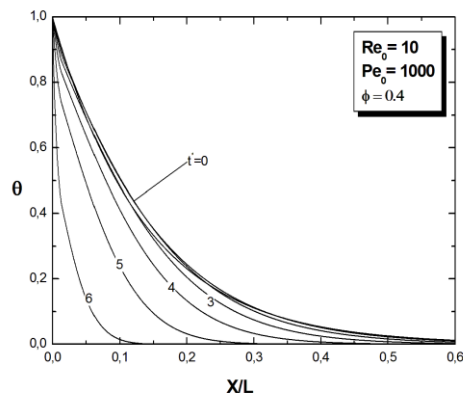


Figure 6. Répartition longitudinale de la température avec porosité ($\Phi = 0, 4$)

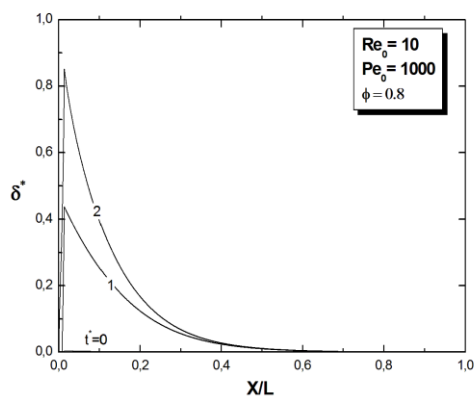


Figure 4. Répartition longitudinale de l'épaisseur avec porosité ($\Phi = 0, 8$)

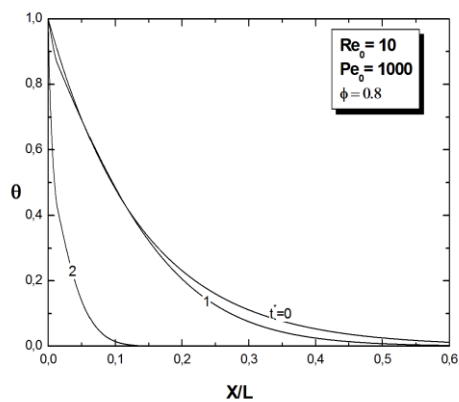
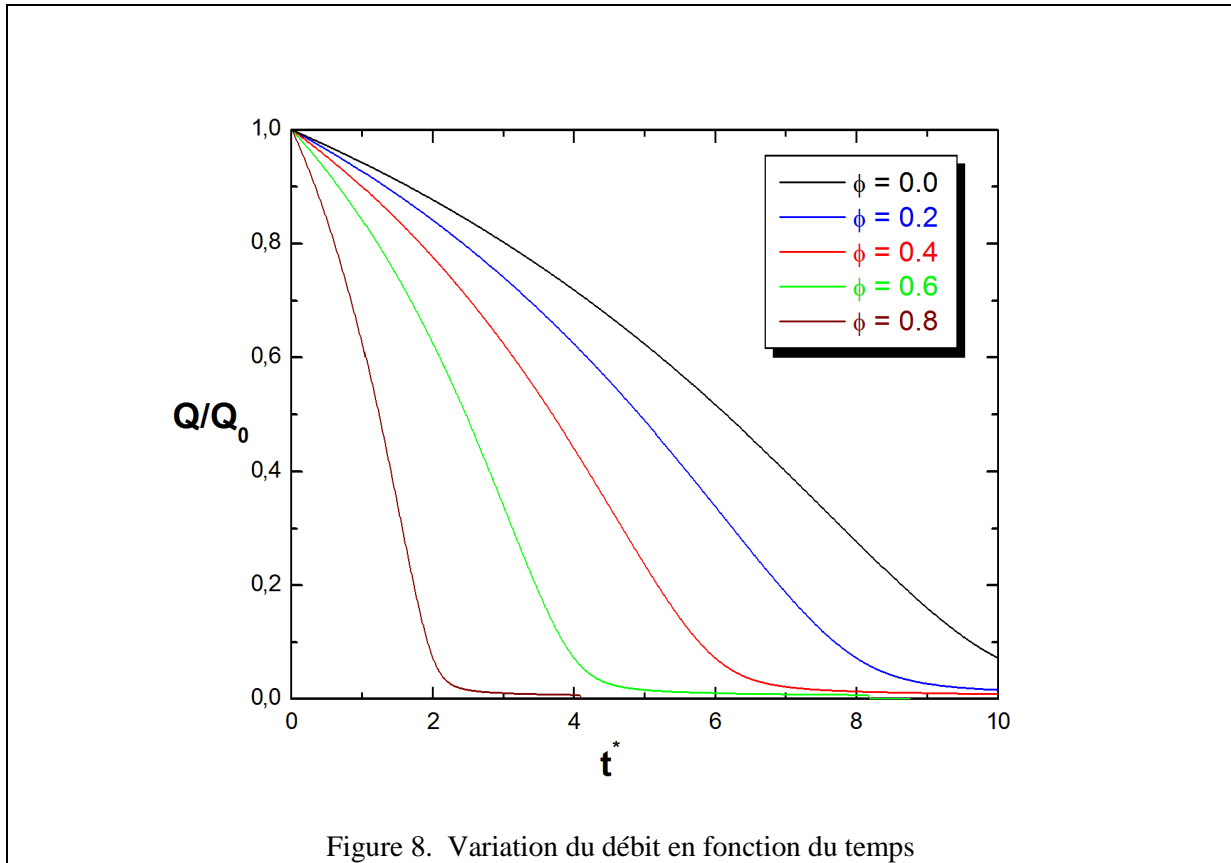


Figure 7. Répartition longitudinale de la température avec porosité ($\Phi = 0, 8$)



Sur la figure 8 nous avons tracé l'évolution du débit en fonction du temps adimensionnel. On observe une décroissance du débit sous forme linéaire en fonction du temps. Cette décroissance à cause du dépôt de paraffine sur la paroi jusqu'à l'obstruction de pipeline c.à.d ($Q/Q_0 = 0$).

Sur la même figure nous avons tracé aussi l'évolution du débit en fonction du temps pour différentes valeurs de la porosité de la paraffine. En effet, la comparaison entre ces courbes avec celle sans porosité de la paraffine montre que l'obstruction de pipeline est rapide avec la croissance de la porosité.

3 Conclusion

Cette étude a considéré l'écoulement d'un fluide visqueux chargé de paraffine dans les pipelines, avec une analyse détaillée des phénomènes de transfert de chaleur et transfert de masse. Un seul cas pratique est considéré dans les calculs de l'écoulement d'un fluide Newtonien, à savoir un écoulement avec (Δp) constante et un débit (Q) variable. Les résultats obtenus ont montré l'effet du dépôt de paraffine sur les paramètres d'écoulement. L'effet de la porosité, qui dépend de l'état de la couche déposée (mou ou dur), montre que la porosité contribue à la croissance de la l'épaisseur de dépôt de paraffine. En conséquent son influence ne peut pas être négligée car elle accélère l'obstruction de pipeline.

Références

- [1] F. W. Jessen, J.N. Howell, Effect of flow rate on paraffin accumulation in plastic, Steel, and coated Pipe, Petroleum Transactions, AIME, (1958) 80-84.
- [2] E. D. Burger, T. K. Perkins and J. H. Striegler, Studies of wax deposition in the trans Alaska pipeline, J. Pet. Technol 33, (1981) 1075-1086.
- [3] Q. Huang, J. Wang, and J. Zhang, Physical properties of wax deposits on the walls of crude pipelines”, Pet Sci 6, (2009) 64-68.
- [4] N. Makwashi, S.A. Akubo, K. Sarkodie, and D. Zhao, Engaging best practices during waxy crude oil production to prevent deposition in the subsea pipeline, International Conference on Professionalism and Ethics in Construction - LSBU, Keyworth Centre, London, 22nd – 23rd November 2018.
- [5] P. R. Souza Mendes, and S. L. Braga, Obstruction of pipelines during the flow of waxy crude oils, J. Fluids Eng. ASME, 118, (1996) 722-727.
- [6] S. Corraera, A. Fasano, L. Fusi and D. Merino-Garcia, Calculating deposit formation in the pipelining of waxy crude oils, Meccanica 42, (2007) 149-165.
- [7] R. Boucetta, and M. Kessal , Modélisation de dépôt de paraffine lors d’un écoulement ascendant de pétrole, The Canadian Journal of Chemical Engineering, Volume 88 Issue 2, (2010) 190-199.
- [8] R. Boucetta, and M. Kessal , Effect of the latent heat on wax deposit in pipelines, Defect and Diffusion Forum, Volumes 312-315, (2011) 154-159.
- [9] K. Dagde and Lesinwiabu , Development of model and flow loop for predicting wax deposition in oil pipelines under lamina flow regime, American Journal Of Engineering Research (AJER), Vol. 7, No. 5, 2018, 414-424.
- [10] HJ. Lund, Investigation of paraffin deposition during single phase flow in pipelines, M.Sc. Thesis, The University of Tulsa, pp 158 (1998).
- [11] B. Démidovith, and I. Maron, Eléments de calcul numérique, Editions MIR MOSCOU, (1987).