

Simulation Numérique de l'Écoulement d'un Fluide Visqueux et Paraffineux

Rachid BOUCETTA¹, Mohand KESSAL² et Mourad TIKOBAINI³

¹Faculté des sciences, Université de Boumerdès, 35000. Algérie

^{2,3} Faculté des Hydrocarbures et de la Chimie, Université de Boumerdès, 35000. Algérie

²*m.kessal@voilà.fr*, ³*tik_mourad@yahoo.fr*

¹*r_boucetta@yahoo.fr*

Résumé : Une étude sur l'écoulement 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, est réalisée pour deux cas pratiques courants afin de prévenir le problème d'obstruction des conduites.

Mots clés :

Dépôt de paraffine, diffusion, dispersion, chaleur latente, écoulement laminaire.

1. Introduction

Les écoulements de fluides visqueux dans les canalisations sont très répandus dans les systèmes industriels. Plusieurs activités et secteurs présentent ce type d'écoulements parmi lesquels on peut citer : la production de pétrole, les réseaux de transport des produits pétroliers et les conduites d'acheminement des huiles.

Ce problème a fait l'objet d'un grand nombre de travaux expérimentaux ([1], [2], [3]), analytiques et numériques ([4], [5], [6] et [7], [8]) dans différentes configurations. Le but étant de maîtriser les divers paramètres régissant le problème de déposition, ainsi que l'exploitation des équipements associés.

Nous avons considéré deux cas de figure: une Δp constante et un débit Q variable (cas A) et une Δp variable avec un Q constant (cas B). Ajouter à cela, une prise en compte de transfert de masse par dispersion du cisaillement ainsi que chaleur latente. Nous obtenons ainsi un modèle général du phénomène.

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.

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.

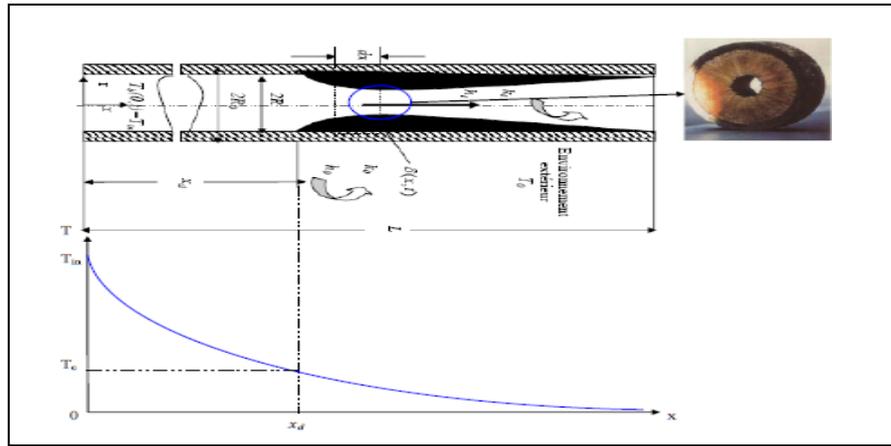


Figure 1 : Schématisation du problème

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.

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) :

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

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

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:

$$2\pi RU(T_b - T_0)dx = -\rho QcdT - \rho Q \frac{\varepsilon H}{T_c - T_\varepsilon} dT_b \quad (5)$$

Avec U coefficient global de transfert de chaleur, ε quantité de paraffine dégagée, T_ε température pour laquelle la valeur ε est connue et H chaleur de cristallisant de la paraffine.

Avec $\varepsilon = 0.1$; $H = 55 \text{ kcal/kg}$; $c = 0.5 \text{ kcal/kg}^0 c$; $T_\varepsilon = 20^0 c$; $T_c = 35^0 c$, Paramètres du brut.

L'intégration l'équation (5) donne la température adimensionnelle pour les deux cas :

$$\theta = \exp \left[-\frac{4U_0^* x_d^*}{Pe_0 Q / Q_0} - \frac{4}{Pe_0 Q / Q_0 \left(1 + \frac{2\varepsilon H}{T_c - T_\varepsilon} \frac{1}{c}\right)} \int_{x_d^*}^{x^*} U^* dx^* \right] \quad \text{Cas A} \quad (6a)$$

$$\theta = \exp \left[-\frac{4U_0^* x_d^*}{Pe_0} - \frac{4}{Pe_0 \left(1 + \frac{2\varepsilon H}{T_c - T_\varepsilon} \frac{1}{c}\right)} \int_{x_d^*}^{x^*} U^* dx^* \right] \quad \text{Cas B} \quad (6b)$$

2.4. 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 de dépôt de paraffine $\delta^*(x^*, t^*)$. Pour cela en écrivant l'équation flux de masse (diffusion moléculaire + dispersion de cisaillement) de paraffine à l'interface solide-liquide. La variation de l'épaisseur par rapport au temps s'écrit sous la forme suivante :

$$\rho_d \frac{\partial \delta^*}{\partial t^*} = \begin{cases} 0, & \text{si } 0 \leq x^* \leq x_d^* \\ m_m + m_s, & \text{si } x_d^* \leq x^* \leq L^* \end{cases} \quad (7)$$

$$m_m = \frac{\rho_d S^* U^*}{1 - \delta^*} \theta, \quad m_s = \frac{\rho_d B}{1 - \delta^*}, \quad B = \frac{2u_0 D_s C_s}{\rho_d D_m}, \quad t^* = \frac{D_m t}{R^2} \quad \text{et} \quad S^* = \frac{s(T_m - T_0)}{\rho_d}$$

Où m_m et m_s désignent respectivement le transfert de masse par diffusion et par dispersion, S^* est le coefficient de solubilité adimensionnel. Le terme B est calculé pour :

$$D_s = 4,8 \times 10^{-3} \text{ cm}^2; D_m = 0,4 \times 10^{-4} \text{ cm}^2 / \text{s}; C_s = 0,51 \times 10^{-6} \text{ g} / \text{cm}^3; \rho_d = 0,8 \text{ g} / \text{cm}^3; u_0 = 200 \text{ cm} / \text{s}, \text{ Fusi [9].}$$

3. Résultats et discussion

3.1. Méthode de résolution

En fixant la condition initiale $\delta^*(x^*, 0) = 0$, on résout le système d'équations (7) 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, Démidovith [10].

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

$$L/R = 1000; \theta_c = (T_c - T_0)/(T_m - T_0) = 0.9; S^* = 0.06; K_i / K_d = 1; Nu_i = 3.66$$

3.2. Résultats

L'application du système précédent pour une canalisation verticale (Fig.1), permet d'observer la répartition dans le temps et dans l'espace la déposition de paraffine, la température et le transfert de masse compte tenu de la diffusion moléculaire, la dispersion (cisaillement) ainsi que la chaleur latente. Dans ce travail seul cas A est considéré dans les calculs de l'écoulement d'un fluide Newtonien.

Sur la figure 3, on observe une l'influence importante de la dispersion qui permet de couvrir une longueur de déposition plus importante. En effet la comparaison de cette figure avec celle qui ne tient pas compte de ce phénomène (Fig. 2), montre que l'obstruction est plus rapide dans le cas de la présence de ces deux phénomènes (diffusion moléculaire + dispersion). Ceci a lieu à $t^*=6$ sur la figure 3 et $t^*=10$ sur la figure 2. On observe une influence importante de la chaleur latente qui permet de couvrir une longueur de déposition plus importante telle que montrée sur la figure 4.

La figure 6 montre la répartition longitudinale de la température en présence la diffusion moléculaire et la dispersion de cisaillement, où l'on remarque un refroidissement rapide du produit par rapport au cas qui tient compte uniquement de la diffusion moléculaire (e.g. Fig. 5). Cette chute de température est due à une obstruction rapide de la conduite à $t^*=6$. Sur la figure 7, on observe une influence importante de la chaleur latente sur la répartition longitudinale de la température, cette influence se traduit par un refroidissement lent du produit.

Compte tenu de la diffusion moléculaire et la dispersion (cisaillement), la figure 8 représente l'évolution du transfert de masse du à ces deux phénomènes, où l'on remarque une relative conservation longitudinale de la quantité déposée par dispersion. Ceci, contrairement à la quantité déposée par diffusion moléculaire qui se concentre dans la zone de démarrage de la déposition. Ceci est justifié par la valeur initiale du gradient de température.

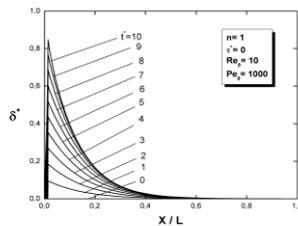


Figure 2 : Répartition longitudinale de l'épaisseur

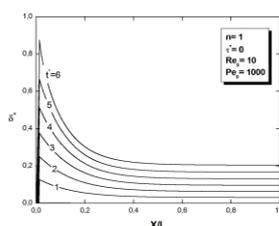


Figure 3: Répartition longitudinale de l'épaisseur

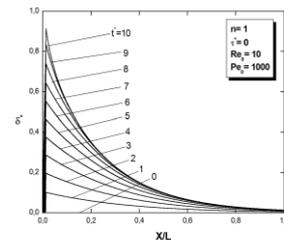


Figure 4 : Répartition longitudinale de l'épaisseur

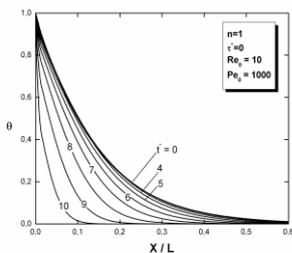


Figure 5 : Répartition longitudinale de la température

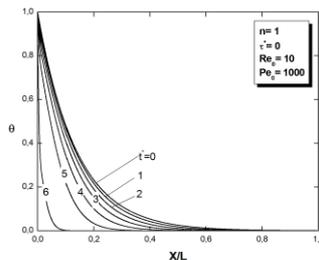


Figure 6 : Répartition longitudinale de la température

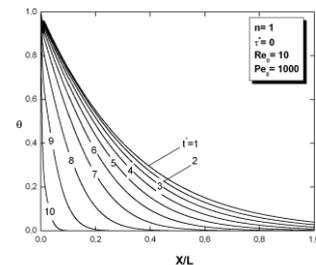


Figure 7 : Répartition longitudinale de la température

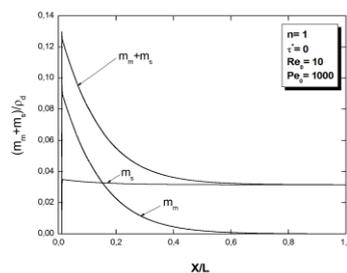


Figure 8 : Répartition longitudinale du transfert de masse pour $t^* = 1$

4. Conclusion

La modélisation de l'influence de la diffusion moléculaire, la dispersion de cisaillement et la chaleur latente sur la répartition du dépôt de paraffine est réalisée par une analyse dimensionnelle des paramètres associés. En outre, l'influence de la dispersion de paraffine sur le temps d'obstruction de la canalisation et de la forme de l'épaisseur du dépôt de paraffine est prépondérante. Par conséquent négliger ces phénomènes pourrait conduire à des résultats moins réalistes.

Nomenclature

Symboles

c	Chaleur spécifique, j/kg k
D	Diffusivité moléculaire, m^2/s
f	Coefficient de frottement, adimensionnel
h	Coefficient de transfert de chaleur, W/m^2k
J	Flux de diffusion massique, kg/sm^2
H	Chaleur de cristallisant, j/kg
L	Longueur du tube, m
m	Transfert de masse, kg/m^3
Nu	Nombre du Nusselt, adimensionnel
P	Pression, Pa
Pe	Nombre de Peclet, adimensionnel
Q	Débit volumique, m^3/s
Re	Nombre de Reynolds, adimensionnel
x	Coordonnée axiale, m
S	Coefficient de solubilité, kg/m^3k
t	Temps, s
T	Température de pétrole, k
U	Coefficient global de transfert de chaleur, W/m^2k
k	Conductivité thermique, W/mk

Lettres grecques

δ	Épaisseur de la couche déposée, m
Δp	Variation longitudinale de pression, Pa
θ	Température, adimensionnelle
ε	Quantité de paraffine dégagée,
ρ	Densité massique de fluide, kg/m^3

Indices

d	dépôt
i	interne
m	diffusion
o	externe
s	dispersion
o	état initial

Exposants

* forme adimensionnelle

References

- [1] F. W. Jessen, J.N. Howell, "Effect of flow rate on paraffin accumulation in plastic, Steel, and coated Pipe", *Petroleum Transactions*, AIME, pp 80-84, (1958).
- [2] E. D. Burger, T. K. Perkins and J. H. Striegler, "Studies of wax deposition in the trans Alaska pipeline", *J. Pet. Technol.*, 33, 1075-1086, (1981).
- [3] Q. Huang, J. Wang, and J. Zhang, "Physical properties of wax deposits on the walls of crude pipelines", *Pet Sci*, 6, 64-68, (2009).
- [4] P. R. Souza Mendes, and S. L. Braga, "Obstruction of pipelines during the flow of waxy crude oils", *J. Fluids Eng.* ASME, 118, 722-727, (1996).
- [5] S. Corraera, A. Fasano, L. Fusi and D. Merino-Garcia, "Calculating deposit formation in the pipelining of waxy crude oils", *Meccanica*, 42, 149-165 (2007).
- [6] 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, 190-199, (2010).
- [7] R. Boucetta, and M. Kessal "Effect of the latent heat on wax deposit in pipelines", *Defect and Diffusion Forum*, Volumes 312-315, 154-159, (2011).
- [8] Z. Huang, H.S. Lee, M.Senra and H.S.Fogler, "A fundamental model of wax deposition in subsea oil pipelines", *Aiche J.*, 57, 2955-2964, (2011).
- [9] L. Fusi, "On the stationary flow of a waxy crude oil with deposition mechanisms", *Nonlinear Analysis*, 53, pp. 507-526, (2003).
- [10] B. Démidovitch, and I. Maron, "Eléments de calcul numérique", *Editions MIR MOSCOU*, (1987).