



Département de Physique

Faculté des Sciences, Université M'Hamed Bougara de Boumerdès

Mémoire

Pour obtenir le diplôme de :

Master en Physique

Spécialité :

Dynamique des fluides et énergétique

Présenté par :

AKKOUCHE Romaïssa

Intitulé :

Etude de l'influence de transfert de chaleur sur les écoulements de fluides visqueux charges de paraffine

Soutenu publiquement le 06/07/2022

le jury composé de :

M. SAFER Nabil

MCB (UMBB)

Président

Mme. BAAZIZ Djamila

MAA (UMBB)

Examineur

M. BOUCETTA Rachid

MCA (UMBB)

Encadrant

Département de Physique, Faculté des Sciences,

Université de Boumerdès 1, Avenue de l'indépendance 35000 Boumerdès

Tel : +213 (0) 24 81 62 49 / Fax : +213 (0) 24 81 62 84



Dédicaces

Je dédie ce modeste travail de fin d'études Aux êtres les plus chères :

*A Ma tendre mère **Leila**, pour son amour, ses encouragements et ses sacrifices.*

*A Mon très cher Père **Rabah**, pour son soutien, son affection, et la confiance qu'il m'a accordée.*

Et qui ont veillé à guider mes pas durant toute ma vie par leurs aides, leurs grandes émotions et leurs sacrifices. Que Dieu les préserve de toute peine et de tout malheur

*A **Hocine Debbaa**, **Abdoul haq Mohamed** et **Merieme Berrami***

*A mes chers frères et mes sœurs : **Amine**, **Ayoub**, **Rania**, **Feriel** et **Djomana***

*A ma tante **Dallel** et la femme de mon oncle **Nabila** et mes deux grand-mères*

*A mes cousins **Oussama** et **AbdelMalek**, **Chawki***

A tous ceux qui m'aiment

***POUR** leur soutien tout au long de mon parcours universitaire que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit de votre soutien infailible.*

***Merci** d'être toujours là pour moi.*

Remerciements

Je remercie « ALLAH » le tout puissant de nous avoir donné la santé, la patience, le courage durant ces longues années d'études et la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire.

« EL HAMDOULILAH »

Tout d'abord, ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu voir le jour sans l'aide et l'encadrement de Monsieur **BOUCETTA RACHID**, Maître de conférences à l'université M'Hamed Bougera de Boumerdès, qui m'a beaucoup encouragé et conseillé, je tiens à exprimer ma gratitude et mes remerciements pour la disponibilité, la patience, et la rigueur, ainsi pour la qualité de son encadrement exceptionnel durant la réalisation de ce mémoire.

Ensuite, J'exprime ma reconnaissance à Monsieur **SAFER NABIL**, Maître de conférences à l'université M'Hamed Bougera de Boumerdes, qui m'a fait l'honneur de présider le jury de ce mémoire.

J'adresse mes respectueux remerciements à Madame **BAAZIZ DJAMILA**, Maître assistant à l'université M'Hamed Bougera de Boumerdes, d'avoir accepté de participer au jury de ce mémoire.

Enfin, Je souhaite adresser mes remerciements les plus sincères aux personnes qui m'ont apporté leur aide et qui ont contribué à l'élaboration de ce mémoire ainsi qu'à la réussite de cette formidable année universitaire.

Merci à tous et à toutes.

Résumé

Notre travail a porté sur l'étude des écoulements de fluides visqueux chargés de paraffine qui ont lieu dans plusieurs installations industrielles tel que les puits de production, les réseaux de collecte de pétrole et les canalisations d'acheminement des huiles. Le problème posé est l'obstruction de ces pipelines. Afin de mieux cerner le problème d'obstruction des pipelines causée par la déposition de paraffine à l'intérieur des pipelines. Nous avons commencé notre travail par la compréhension du sujet proposé. Ensuite, 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 modèle obtenu est réécrit sous une forme adimensionnelle complète afin de l'adapter aux diverses installations précitées. Les relations constitutives sont données en fonction des différents paramètres de similitude adaptés à ce type d'écoulement, dont le principal est le nombre de Peclet. Par la suite nous avons proposé alors un algorithme de résolution basé sur la méthode de Runge-Kutta d'ordre quatre pour la résolution du système d'équations obtenu. Enfin, nous avons terminé par l'évaluation de l'impact de l'influence de transfert de la chaleur sur la formation du dépôt de paraffine dans les pipelines sur les paramètres d'écoulement.

Mots clés : dépôt de paraffine, pipeline, transfert de chaleur, convection force, diffusion moléculaire, écoulement laminaire, hydrodynamique.

Abstract

Our work is focused on the study of the flow of viscous paraffin charges that occur in several industrial facilities such as production wells, oil collection networks and oil pipelines. The problem is the obstruction of these pipelines. To better understand the problem of the pipeline obstruction caused by the deposition of paraffin within pipelines. We began our work by understanding the proposed topic. Then We modelled the flow of hot viscous paraffin-laden fluids, taking the fundamental equations of fluid mechanics, heat transfer, and mass transfer in a circular section pipeline. The resulting model is rewritten in a complete adimensional form to adapt it to the various installations mentioned above. The constituent relationships are given according to the different parameters of similarity adapted to this type of flow, the main one being the Peclet number. We then proposed a resolution algorithm based on the Runge-Kutta four-order method for the resolution of the resulting system of equations. Finally, we concluded by assessing the impact of the influence of heat transfer on the formation of paraffin deposition in pipelines on flow parameters.

Keywords: paraffin deposition, pipeline, heat transfer, convective force, molecular diffusion, laminar flow, and hydrodynamics

Sommaire

Nomenclature	
Table des figures	
Introduction Générale	1
Présentation du mémoire	3
Chapitre 1 Etude bibliographique.....	4
1. 1 Introduction.....	5
1. 2 Pipeline	5
1. 3 Hydrodynamique.....	6
1. 4 Pétrole brut.....	6
1. 5 Paraffine.....	7
1. 6 Porosité	7
1. 7 Etude bibliographique	8
1. 8 Mécanismes de la formation de dépôt de paraffine.....	12
1.8.1 Diffusion moléculaire.....	12
1.8.2 Diffusion brownienne.....	13
1.8.3 Dispersion par cisaillement.....	14
1. 9 Transfert de chaleur.....	15
1.9.1 Conduction	15
1.9.2 Rayonnement	16
1.9.3 Convection.....	17
a. Convection naturelle	17
b. Convection forcée.....	17
1. 10 Signification physique de quelques nombres sans dimensions	18
Chapitre 2 Modélisation théorique.....	19
2. 1 Introduction.....	20
2. 2 Position du problème.....	20
2. 3 Équation de la quantité du mouvement	22
2. 4 Forme adimensionnelle des paramètres.....	23
2. 5 Bilan Énergétique	24
2. 6 Epaisseur de couche du dépôt de paraffine.....	26
2. 7 Méthode de résolution	28
Chapitre 3 Résultats et discussion	30
3.1 Introduction.....	31
3.2 Validation du code de calcul.....	31
3.3 Epaisseur du dépôt de paraffine	33

3.4	Température	36
3.5	Coefficient globale de transfert de chaleur	38
3.6	La pression	41
3.7	Le débit	43
3.8	Le peclet.....	44
Conclusion Générale		46
Bibliographie.....		47
Site web		50
Annexe		51

Nomenclature

Lettres latines

c	Chaleur spécifique (j/kg k)
D	Diffusivité moléculaire (m^2 /s)
c_s	Concentration de cristaux de paraffines (kg/m^3)
D_m	Coefficient de diffusion moléculaire (m^2 /s)
D_s	Coefficient de dispersion du cisaillement (m)
f	Coefficient de frottement (adimensionnel)
g	Accélération de la pesanteur (m/s^2)
h₀	Coefficient de transfert de chaleur extérieur (W/m^2k)
h_i	Coefficient de transfert de chaleur intérieur (W/m^2k)
H	Dénivelée du tube (m)
j_i	Flux de diffusion massique (kg/sm^2)
L	Longueur du tube (m)
L*	Longueur du tube (adimensionnelle)
m_d	Masse du solide déposé (kg)
Nu₀	Nombre du Nusselt externe (adimensionnel)
Nu_i	Nombre du Nusselt interne (adimensionnel)
p'	Pression statique (Pa)
p	Pression motrice (Pa)
p_{atm}	Pression atmosphérique (Pa)
p_{in}	Pression à l'entrée (Pa)
p *	Pression (adimensionnelle)
pe	Nombre de Peclet (adimensionnel)
pe₀	Nombre de Peclet initial (adimensionnel)
Q	Débit volumique (m^3/s)
Q₀	Débit volumique initial (m^3/s)
r	Coordonnée radiale (m)
R	Rayon intérieur du tube (m)
R₀	Rayon extérieur du tube (m)

R_e	Nombre de Reynolds (adimensionnel)
Re_0	Nombre de Reynolds initial (adimensionnel)
x	Coordonnée axiale (m)
x_d	Longueur du tube propre (m)
x^*	Coordonnée axiale (adimensionnelle)
x^*_d	Longueur du tube propre (adimensionnelle)
s	Coefficient de solubilité (kg/m^3k)
s^*	Coefficient de solubilité (adimensionnel)
t	Temps (s)
t^*	Temps (adimensionnel)
T_b	Température de pétrole(k)
T_c	Température de rosée (k)
T_i	Température à l'interface solide-liquide (k)
T_{in}	Température de pétrole arrivé (k)
T_0	Température de l'environnement extérieur (k)
U	Coefficient de transfert de chaleur global (W/m^2k)
U^*	Coefficient de transfert de chaleur global (adimensionnel)
v	Composantes du vecteur vitesse (m/s)
k_d	Conductivité thermique de la couche déposée (W/mk)
k_i	Conductivité thermique de fluide (W/mk)
k_w	Conductivité thermique de mur (W/mk)
k_0	Conductivité thermique de l'environnement extérieur (w/mK)

Lettres Grecques

δ	Epaisseur de la couche déposée (m)
δ^*	Epaisseur de la couche déposée (adimensionnelle)
Δp	Variation longitudinale de pression (Pa)
Δp_0	Variation longitudinale de pression initiale (Pa)
θ	Température (adimensionnelle)
θ_c	Température de rosée (adimensionnelle) Densité
ρ	Massique de fluide (kg/m ³)
ρ_d	Densité de la matière déposée (kg/m ³)
ρ_s	Solubilité (kg de paraffine par m ³ de pétrole)
Φ	Porosité (adimensionnelle)

Table des figures

Chapitre 1 Etude bibliographique

Figure 1.1 : Pipelines	5
Figure 1.2 : Pipeline bouché par dépôt de paraffine (Zhenyu Huang et al. (2015)).	7
Figure 1.3 : Schéma du mécanisme de diffusion moléculaire (Zhenyu Huang et al. (2015)).	13
Figure 1.4 : Concentration des paraffines précipitées dans la conduite (Burger et al. (1981)).	14
Figure 1.5 : Illustration des trois modes du transfert de la chaleur.	15
Figure 1.6 : Chauffage d'une barre métallique à l'une de ses extrémités par conduction (Pr Said Hamdaoui (2020)).	16
Figure 1.7 : Transfert de chaleur par rayonnement (Ali Agha. (2019)).	16
Figure 1.8 : Transfert de chaleur par convection.	17
Figure 1.9 : Convection naturelle (Ali Agha. (2019)).	17
Figure 1.10 : Convection forcée (Ali Agha. (2019)).	17

Chapitre 2 modélisation théorique

Figure 2.1: Schématisation du problème.	21
--	----

Chapitre 3 résultats et discussion

Figure 3.1 : Répartition longitudinale de la pression, Flavio et al. (1997).	31
Figure 3.2 : Répartition longitudinale de la température, Flavio et al. (1997).	32
Figure 3.3: Répartition longitudinale de débit, Flavio et al. (1997).	32
Figure 3.4 : Répartition longitudinale de l'épaisseur de paraffine.	33
Figure 3.5 : Répartition longitudinale de l'épaisseur de paraffine.	34
Figure 3.6 : Répartition longitudinale de l'épaisseur de paraffine.	34
Figure 3.7 : Répartition longitudinale de l'épaisseur de paraffine.	35
Figure 3.8 : Répartition longitudinale de l'épaisseur (au voisinage de point de démarrage).	35
Figure 3.9 : Répartition longitudinale de la température.	36
Figure 3.10 : Répartition longitudinale de la température.	37
Figure 3.11 : Répartition longitudinale de la température.	37
Figure 3.12 : Répartition longitudinale de la température.	38
Figure 3.13 : Répartition longitudinale du coefficient globale de transfert de chaleur.	39
Figure 3.14 : Répartition longitudinale du coefficient globale de transfert de chaleur.	39
Figure 3.15 : Répartition longitudinale du coefficient globale de transfert de chaleur.	40
Figure 3.16 : Répartition longitudinale du coefficient globale de transfert de chaleur.	40
Figure 3.17: Répartition longitudinale de la pression.	41
Figure 3.18: Répartition longitudinale de la pression.	42
Figure 3.19: Répartition longitudinale de la pression.	42
Figure 3.20: Répartition longitudinale de la pression.	43
Figure 3.21 : Variation du débit en fonction du temps.	44
Figure 3.22: Variation du pecllet en fonction du temps.	45

Introduction Générale

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.

Depuis de nombreuses années, l'industrie pétrolière est confrontée à des problèmes liés à la production et au transport en pipelines des pétroles bruts chargés de paraffines. Dans certaines conditions de température, la quantité de paraffines contenue dans ce type de brut est suffisamment importante pour causer des problèmes de transport du pétrole allant jusqu'à l'arrêt de la production, ce qui peut entraîner des coûts très importants.

Les paraffines responsables des problèmes de transport, connues sous le nom de normales-paraffines (n-paraffines) ou alcanes normaux (n-alcanes), sont des molécules linéaires qui contiennent généralement un nombre d'atomes de carbone supérieur à 20. Aux températures de réservoir (70 °C-150 °C), ces molécules sont dissoutes dans la matrice pétrole et le fluide se comporte alors comme un liquide Newtonien dont la viscosité ne dépend que de la température.

Cependant, lorsque le brut chargé de paraffine quitte le réservoir, les conditions thermiques changent et ses propriétés rhéologiques aussi. En effet, c'est le cas lorsque le pétrole brut est transporté vers sa destination par les pipelines situés dans le fond des océans et dont la température est de 4 °C. Il est alors exposé à des conditions froides et voit sa température diminuer de manière considérable jusqu'à atteindre sa température de cristallisation (T_C). La T_C est la température à laquelle les premiers cristaux de paraffines se forment. Ainsi, lorsque la température du brut est inférieure à sa T_C , les molécules de n-paraffines cristallisent et deviennent solides. Il se produit alors deux phénomènes pouvant entraîner le blocage des pipelines :

1. La formation d'un dépôt solide de paraffines sur les parois des pipelines qui contribue à réduire le diamètre du pipeline utile au transport.
2. La gélification du brut lors du ralentissement de l'écoulement ou de l'arrêt de production.

De ce fait, plusieurs méthodes visant à limiter les problèmes de dépôt et de gélification ont été développées. Parmi ces techniques, les trois les plus souvent utilisées sont listées ci-après :

1. Le raclage des parois consiste à déplacer un racleur dans la conduite afin de racler les parois permettant ainsi d'évacuer les dépôts et de retrouver un débit satisfaisant. Pendant les opérations de raclages, la production est ralentie et cela entraîne un coût supplémentaire. Ainsi, il faut bien choisir la fréquence à laquelle ces opérations sont effectuées.

2. L'isolation ou le chauffage des pipelines sont des moyens efficaces mais coûteux et l'infrastructure demandée est lourde. En général, cette solution est utilisée lorsque les distances entre les puits et les installations de traitement sont courtes.

3. L'utilisation d'additif anti-paraffinique vise à limiter la cristallisation des paraffines en abaissant la T_c ou la température de gélification du brut T_g . C'est une technique simple qui permet de limiter la formation du dépôt ainsi que le risque de gélification. Cependant, elle est onéreuse et nécessite une bonne connaissance des propriétés du fluide ainsi que de la structure du dépôt.

À ce jour, dans le cas où la formation du dépôt est inévitable, la seule technique de remédiation adaptée est le raclage fréquent des pipelines. Il est donc important pour les opérateurs pétroliers de connaître l'évolution de l'épaisseur du dépôt au cours du temps, afin qu'ils puissent correctement dimensionner leurs installations et adapter la fréquence de raclage des pipelines de production. Le développement d'un modèle de prédiction de formation de dépôt universel s'avère alors indispensable.

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 modèle obtenu est réécrit sous une forme adimensionnelle complète afin de l'adapter aux diverses installations précitées. Les relations constitutives sont données en fonction des différents paramètres de similitude adaptés à ce type d'écoulement, dont le principal est le nombre de Peclet. Il est proposé alors un algorithme de résolution basé sur la méthode de Runge-Kutta d'ordre quatre pour la résolution du système d'équations obtenu.

Ce travail est focalisé sur l'influence de transfert de chaleur sur la formation du dépôt de paraffine dans les pipelines vise à évaluer leur impact sur les paramètres d'écoulement concernent essentiellement, l'épaisseur de dépôt de paraffine, la répartition longitudinale de coefficient global de transfert de chaleur, la répartition longitudinale de la température, la répartition longitudinale de la pression ainsi que le la variation du débit.

Présentation du mémoire

Nous avons présenté dans le premier chapitre de ce mémoire une étude bibliographique : dans un premier temps, nous sommes intéressés brièvement à préciser quelques notions sur le pétrole brut, pipeline, paraffine et la porosité. Ensuite nous avons traité une recherche bibliographique détaillée et récente, tant sur le plan expérimental que théorique et orientée principalement sur l'aspect hydrodynamique de l'écoulement. Le paragraphe qui suit est consacré à la mise en évidence des mécanismes éventuellement responsables de la formation de dépôt de paraffines en pipeline tels que proposés dans la littérature. Ce chapitre se termine par un rappel sur les modes de transfert thermique (conduction, rayonnement et convection) et sur la signification physique de nombres adimensionnels utilisés dans ce mémoire.

Le deuxième chapitre est consacré à présenter un modèle théorique, accompagné d'une mise en forme adimensionnelle des principaux paramètres de l'écoulement. Par la suite, un algorithme de résolution numérique du système d'équations obtenues est mis au point.

Dans le dernier chapitre nous avons présenté et discuté un ensemble de résultats obtenus pour un seul cas pratique. Il s'agit d'un d'écoulement suppose un débit (Q) variable mais avec une (Δp) constante.

Enfin, après la conclusion générale, nous proposerons quelques perspectives qui pourraient permettre d'approfondir encore plus les connaissances acquises concernant la formation des dépôts de paraffines dans les pipelines.

Chapitre **1**

Etude bibliographique

1.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons l'étude bibliographique, nous avons mentionné quelques notions fondamentales (Pipeline, Hydrodynamique, Pétrole brut, Paraffine, et Porosité). La recherche bibliographique sur le côté hydrodynamique d'un point de vue expérimental et théorique à laquelle nous avons fait et les objectifs à atteindre. A la fin nous avons abordé les mécanismes responsables de la formation de dépôt de paraffines et un rappel sur les modes de transfert thermique.

1.2 Pipeline

Un pipeline est un mode de transport des matières fluides réalise un moyen de conduits constituent généralement un réseau. Cependant, les produits généralement visés par le terme "transport par canalisation" sont : le pétrole et autres hydrocarbures liquide, le gaz naturel et autre gaz combustibles, ainsi que certains produits chimiques. La canalisation est la partie principale du "système pipeline" , est réalisée actuellement à partir de tube d'acier d'une longueur comprise entre 12 à 18 m. les diamètres standards s'échelonnent entre 100 et 1420 mm, en respectant une normalisation internationale d'origine Américaine, l'American Petroleum Institute (API), caractérisant les tubes par leur diamètre, leur épaisseur et leur taux de contrainte admissible. Les épaisseurs des tubes varient suivant les diamètres et les pressions de service. Elles sont comprises entre 4 et 20 mm pour les installations terrestres, et entre 12 et 40 mm pour les canalisations sous-marines.

Types de canalisation

Le type et le nom d'un pipeline dépendent des caractéristiques physiques et des conditions du transport du produit.

Pour le gaz naturel, transport par gazoduc.

Pour le pétrole, transporté par oléoduc.



Figure 1.1 : Pipelines

1.3 Hydrodynamique

La dynamique des fluides ou hydrodynamique, est l'étude des mouvements des fluides, qu'ils soient liquides ou gazeux. Elle fait partie de la mécanique des fluides avec l'hydrostatique (statique des fluides). Et est basée sur les lois physiques de conservation de la masse, bilan énergétique. Les applications de l'hydrodynamique comprennent l'étude de l'écoulement à canal fermé et à canal ouvert, et le calcul des forces sur les corps immergés. L'écoulement dans des conduits fermés, ou des tuyaux, a été largement étudié à la fois expérimentalement et théoriquement.

1.4 Pétrole brut

Le pétrole est classé suivant sa densité API (du nom de l'American Petroleum Institute), elle est calculée par la formule suivante

$$\text{densité API} = \frac{141.5}{\text{densité à } 60^{\circ} F} - 131.5 \quad (1.1)$$

Plus un brut est léger, plus sa densité est faible, plus sa densité API est élevée. Ainsi un pétrole est léger si le degré API est supérieur à 31.1, moyen s'il est compris entre 22.3 et 31.1, lourd s'il est compris entre 10 et 22.3 et extra lourd s'il est inférieur à 10.

Il existe deux températures caractéristiques de ces bruts. La température de cristallisation commençante appelée aussi point de trouble T_c (WAT : Wax Appearance Temperature), qui est la température à laquelle les premiers cristaux de paraffines apparaissent. La température de gel T_g (Pour Point) est la limite à laquelle le brut passe de l'état fluide à un état de gel solide sous certaines conditions. Les ordres de grandeur de ces deux températures sont présentés dans le tableau 1.1 pour différents pétroles bruts.

Nom du brut	Localisation	°API	T _c (°C)	T _g (°C)	Références
Bonga	Offshore Nigeria (1000m)	29-33	46	-	Schoppa et al. (2007)
Coulomb	Offshore du Golf de Mexique (2286m)	35	34-36	-	Manfield et al. (2007)
Cliff Head	Offshore de Perth en Australie	33	55	33-36	Daniel et Roberts (2008)
Cangu Vang	Offshore du Vietnam	-	52-66	32	Grove et al. (2008)
Wasatch	Onshore Altamont(E.U)	-	72	49	Matlach et Newberry (1983)
Daqing	Chine	-	43	32	Ding et al. (2006)
Gannet	Offshore du Mer du nord (U.K)	41	35.5		Craddock et al. (2007)

Tableau 1.1. Exemples de température de cristallisation et de température de gel certains bruts tirés de la littérature.

1.5 Paraffine

C'est un produit du raffinage du pétrole qui constitue une composante indésirable des fractions lourdes à partir desquelles sont obtenues les huiles lubrifiantes. Elle est séparée des huiles par l'action combinée du froid et de différents solvants, en deux étapes, appelées déparaffinage et recristallisation. Elle subit différentes purifications, qui dépendent de l'emploi ultérieur de la paraffine. Outre les débouchés traditionnels tels que les bougies, diverses formes d'emballages (papiers, cartons, par exemple) et les cosmétiques, etc., la paraffine entre dans la fabrication de certains plastiques, dans le traitement du bois, des textiles, du cuir, etc...

Elle se cristallise avec la baisse de la température, à composition constante, c'est-à-dire lorsqu'elle ne s'accompagne pas d'un transfert de matière entre le gaz et le liquide, la pression est également un facteur favorable à sa cristallisation.



Figure 1.2 : Pipeline bouché par dépôt de paraffine (Zhenyu Huang et al. (2015)).

1.6 Porosité

La porosité est l'ensemble des vides (pores d'un matériau solide, ces vides sont remplis par des fluides (liquide ou gaz). C'est une grandeur physique entre 0 et 1 et en pourcentage entre 0 et 100%, qui conditionne les capacités d'écoulement et de rétention d'un substrat.

La porosité est aussi une valeur numérique définie comme le rapport entre le volume des vides et le volume total d'un milieu poreux.

$$\Phi = \frac{V_{vide}}{V_{totale}} \quad (1.2)$$

Φ : porosité.

V_{vide} : volume de pore.

V_{totale} : volume totale du matériau, c'est à dire la somme du volume de solide et du volume des pores.

1.7 Etude bibliographique

Le problème de l'écoulement des fluides visqueux et paraffinée dans les pipelines, dont le domaine d'application est très varié, est un sujet qui intéresse à la fois les physiciens et les industriels.

Dans le domaine industriel, la déposition de paraffine dans les pipelines, présente un vaste champ d'investigations. Depuis une dizaine d'années, ce problème a fait l'objet d'un grand nombre de travaux expérimentaux, analytiques et numériques dans différentes configurations. Le but étant de maîtriser les divers paramètres régissant le problème de déposition de paraffine, ainsi que les paramètres d'exploitation des équipements associés.

Nous donnons dans cette partie les principaux auteurs qui ont traité de différents aspects de la déposition.

Jessen et Howell (1958) ont fait des études expérimentales où ils ont observé l'augmentation de la vitesse du fluide et le dépôt de paraffine jusqu'à la phase de transition (du régime laminaire au régime turbulent) à partir de laquelle elle commence à diminuer. Ils ont expliqué ceci par la présence d'un coefficient de transfert de masse plus élevé, correspondant à de plus grands débits, ainsi que l'effet de l'entraînement de la matière avec écorchement. Ils ont également proposé deux mécanismes de dépôt de paraffine : dépôt de paraffine de pétrole brut à la paroi du pipeline par diffusion moléculaire et transport de particules à la paroi. En outre ils ont observé que la diffusion moléculaire constitue le principal mécanisme de la déposition.

Les mécanismes de dépôt de paraffine ont fait l'objet d'un travail de **Burger et al. (1981)**, pour des canalisations de transport de pétrole en Alaska. Ils ont souligné que la diffusion moléculaire et la dispersion du cisaillement sont deux mécanismes principaux de dépôt. La diffusion brownienne et l'effet de pesanteur étant de moindre importance.

Brown et al. (1993) ont confirmé, à l'aide d'un appareil d'écoulement, que si le flux de chaleur est nul il n'y a pas le dépôt de paraffine. Aussi, deux observations leur ont permis de conclure que la dispersion du cisaillement ne contribue pas au dépôt de paraffine. Seulement la diffusion moléculaire a été modélisée comme mécanisme de dépôt.

Hamouda et Davidsen (1995) ont réalisé des études expérimentales où ils ont observé que l'effet de la pesanteur contribue à tout mécanisme de dépôt, mais d'un degré moindre par rapport à la dispersion du cisaillement, et de la diffusion moléculaire. Ils ont noté aussi que la dispersion du cisaillement devient importante seulement pour un gradient de température faible.

Huang et al. (2009) ont réalisé une série d'expériences sur le dépôt de paraffine dans une boucle d'écoulement au laboratoire, pour différentes conditions (débit, la différence entre la température de pétrole brut et la température de la paroi de canalisation et le gradient de concentration de la paraffine dissoute), les gisements de paraffine ont été analysés. Ainsi des rapports quantitatifs parmi le contenu de paraffine, la température de cristallisation (WAT), le taux du cisaillement et le gradient radial de concentration de la paraffine dissoute à l'interface solide-liquide ont été obtenus. En conclusion, un modèle a été établi pour prévoir le WAT et le contenu de dépôt paraffine.

Theyab (2018) a fait une étude expérimentale pour évaluer le volume des dépôts de paraffine. Il a étudié les facteurs qui influencent le procédé de dépôt de paraffine tels que la température du pétrole brut, le débit, la perte de charge, la viscosité de l'huile, la contrainte de cisaillement, le temps. Pendant ce travail, quatre techniques différentes sont utilisées pour estimer l'épaisseur des dépôts de paraffine. Ces techniques incluent la chute de pression, technique de raclage, de transfert de chaleur et de détection du niveau de déplacement des liquides (LD-LD). Aussi, une méthode basée sur l'écoulement spiral pour réduire le dépôt de paraffine dans les pipelines a été proposé.

Rongbin et al. (2019) ont réalisé des études expérimentales où ils ont observé que l'augmentation de la vitesse d'écoulement entraîne : un flux de masse plus important de la paraffine dans la direction radiale, un gradient thermique plus élevé et un gradient de concentration à l'intérieur de la couche limite. Les effets de l'augmentation du flux de masse et du gradient thermique ont dominé le dépôt de paraffine, ce qui a entraîné une augmentation du taux de dépôt de paraffine par rapport à la faible vitesse d'écoulement (inférieure à 0,32 m/s). Ils ont souligné aussi que les gouttelettes d'eau piégées ont considérablement modifié la morphologie du dépôt de paraffine.

Sun et al. (2020) ont réalisé une étude expérimentale sur les comportements de dépôt de paraffine. Pour cela ont créé un modèle de calcul cinétique pour l'épaisseur et le contenu en paraffine dans un oléoduc isolé thermiquement sur la base du principe de la diffusion moléculaire, du vieillissement et de l'énergie de cisaillement, ils ont atteint à des résultats en bon accord avec les valeurs expérimentales. Aussi l'épaisseur du dépôt de paraffine en fonction des saisons et de la durée d'exploitation dans le nord-est de la Chine a été prédite selon un modèle théorique qui a été anticipé et qui peut fournir une base scientifique pour formuler le cycle d'élimination de la paraffine du pipeline. En conclusion, les résultats prédits ont montré que l'épaisseur de la couche de dépôt de paraffine augmente d'abord et diminue ensuite le long du pipeline.

Afin de résoudre le problème du dépôt de paraffine dans le pétrole brut chargé de paraffine du champ pétrolifère de Daqing (qui se situe dans la province chinoise du Heilongjiang (nord-est). **Wei et al. (2022)**, ont utilisé « cold finger » dans l'expérience. Ils ont mesuré dans des conditions d'écoulement tubulaire : le dépôt de paraffine avec température, les différences de température entre le pétrole brut et la paroi, le temps de déposition et la vitesse de rotation du « cold finger ». Les résultats montrent que le taux de déposition peut atteindre 0,35 g/h entre 8 et 24 heures. Le taux de déposition maximum à 90 rotations/min est de 0,26 g/h.

Des travaux **théoriques** ont suivi comme tentative pour résoudre les équations régissant le dépôt de paraffine. Parmi lesquels, **Svendsen (1993)** a fait une analyse mathématique détaillée du problème de dépôt pour les deux systèmes ouverts et fermés de canalisations. Il a obtenu la répartition de dépôt en fonction du temps par la résolution des équations de conservation de masse, d'énergie et la loi de diffusion (loi de Fick).

Ce basant sur l'évolution du gradient radial de la concentration de dépôt de paraffine, **Souza Mendes et Braga (1996)** ont établi un modèle adimensionnel qui a permis une simulation numérique du phénomène de déposition, ainsi que les paramètres associés. Dans son travail un seul cas d'écoulement (Δp constante et le débit, Q variable) a été considéré.

Cette étude a été reprise par **Boucetta et Kessal (2010)** ont introduit la même forme adimensionnelle, mais ils ont considéré tous les cas de figure. A savoir, le modèle où la variation longitudinale de pression (Δp) est constante avec un débit (Q) variable et celui du débit constant avec une (Δp) variable, afin de mieux cerner les deux situations généralement rencontrées dans la pratique.

Miao (2012) il a établi un nouveau modèle pour prédire l'épaisseur de dépôt de paraffine, et Les résultats du son modèle correspondent bien aux données de terrain. Par la suite, Il a établi et validé par les données de terrain des modèles pour les processus d'arrêt et de redémarrage d'un oléoduc de pétrole brut chargé de paraffine.

Kenneth et Lesinwiabu (2018) ont développé un modèle mathématique basé sur les équations de masse et d'énergie pour prévoir le dépôt de paraffine dans le pipeline. Dans son travail le régime d'écoulement est laminaire, ils ont pris en compte de facteurs tels que la concentration de paraffine, le débit et la différence de température entre le mélange et la paroi du pipeline. Puis, ils ont réalisé une série d'expériences au laboratoire pour valider les résultats du modèle mathématique.

Boucetta et al. (2019) ont fait une analyse mathématique détaillée du problème de dépôt. Ils ont étudié l'impact de la porosité de paraffine 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. Ils ont montré que la porosité contribue à la croissance de la couche déposée de paraffine.

Olajire (2021) a évalué différents mécanismes de dépôt et différents modèles numériques qui ont été utilisés pour la prédiction du dépôt de paraffine, qui ont été validés expérimentalement. Bien que la diffusion moléculaire ait été généralement acceptée par tous les modèles comme le principal mécanisme de dépôt, on ne saurait trop insister sur la contribution des forces de cisaillement à la précision des modèles de dépôt de paraffine. L'étude souligne également les avantages de l'application de techniques d'atténuation telles que les techniques thermiques, chimiques, mécaniques et biologiques, ainsi que d'une technologie de stimulation sans produits chimiques et respectueuse de l'environnement pour contrôler le processus de dépôt de paraffine.

Des études expérimentales et de modélisation antérieure ont confirmé que le processus de dépôt à partir de pétroles bruts chargés de paraffines peut être entièrement décrit par l'approche du transfert de chaleur. L'approche du transfert de chaleur considère la déposition des paraffines comme un processus de congélation (partielle), impliquant une transformation de phase liquide à solide. **Mehrotra et al. (2021)** ont développé et validé l'approche de transfert de chaleur pour le dépôt de paraffine dans un pipeline avec des données de laboratoire en utilisant des mélanges préparés de paraffine à plusieurs composants et des échantillons de solvant comprenant des n-alcanes. Le modèle mathématique développé n'implique pas de paramètres ajustables ou de " réglage ", car toutes les propriétés et tous les paramètres peuvent être estimés à partir des méthodes de prédiction et des corrélations disponibles. Ils ont fournies des prédictions numériques pour la variation de l'épaisseur du dépôt en fonction des changements de la température de l'huile, de la température environnante ou du liquide de refroidissement, du coefficient de transfert de chaleur pour l'huile qui s'écoule, du rayon intérieur du pipeline, de la conductivité thermique moyenne du dépôt, de la conductivité thermique de la paroi du pipeline, de la conductivité thermique de l'isolation et de la température de cristallisation de paraffine.

1. 8 Mécanismes de la formation de dépôt de paraffine

La bonne modélisation du dépôt de paraffine dans la littérature, requiert une bonne compréhension des mécanismes responsables du transport de la paraffine vers la paroi. Nous en mentionnons trois mécanismes qui participeraient de ce déplacement, la diffusion moléculaire, la diffusion brownienne et la dispersion par cisaillement. Le rôle de la gravité sur la croissance de dépôt est écarté à l'unanimité dans la littérature. En effet des tests en conduites horizontales et verticales effectués dans les mêmes conditions mènent aux mêmes résultats. De plus, le test effectué sur la boucle LYRE à l'IFP (*l'Institut Français du Pétrole*) par **Maurel et al. (1999)** montre que le dépôt obtenu en conduite horizontale est relativement homogène sur la périphérie.

1.8.1 Diffusion moléculaire

La diffusion moléculaire est le principal mécanisme moteur de la croissance de dépôt. L'existence d'un gradient de concentration de la paraffine dissoute dans le brut engendre automatiquement la diffusion moléculaire. En effet, le brut transporté dans le pipeline est refroidi par l'environnement thermique extérieur, il apparaît donc un gradient de température dans le fluide. Dans tous les endroits du brut où la température est inférieure à T_c , les paraffines de poids moléculaire les plus élevées, précipitent. Il y a donc localement une phase solide en équilibre avec le brut. Ainsi, l'apparition d'un gradient de température dans le fluide engendre un gradient de concentration de paraffines dissoutes. L'huile près de la paroi est plus froide que celle dans le cœur du fluide. Le système (huile + paraffines dissoutes) s'équilibre en faisant migrer des paraffines à l'état liquide du cœur du fluide vers la paroi où elles précipitent à leur tour. Pour quantifier le flux de migration des paraffines, la première loi de Fick est utilisée dans la littérature :

$$\frac{dm_m}{dt} = \rho_d A D_m \frac{dc_i}{dr} \quad (1.3)$$

Où ρ_d , D_m , C_i et A sont respectivement la masse volumique de dépôt, le coefficient de diffusion du brut, la fraction volumique de concentration de paraffine dissoute et la surface de déposition.

La diffusion moléculaire comme principal mécanisme de dépôt de la paraffine .

Les quatre étapes suivantes sont impliquées dans ce mécanisme **Zhenyu Huang et al. (2015)**

- Etape 1 : précipitation des molécules de paraffine dissoutes
- Etape 2 : Génération d'un gradient de concentration radial de composants cireux dissous
- Étape 3 : Dépôt de composants cireux sur la surface d'un dépôt existant
- Étape 4 : Diffusion interne des composants cireux dans le dépôt.

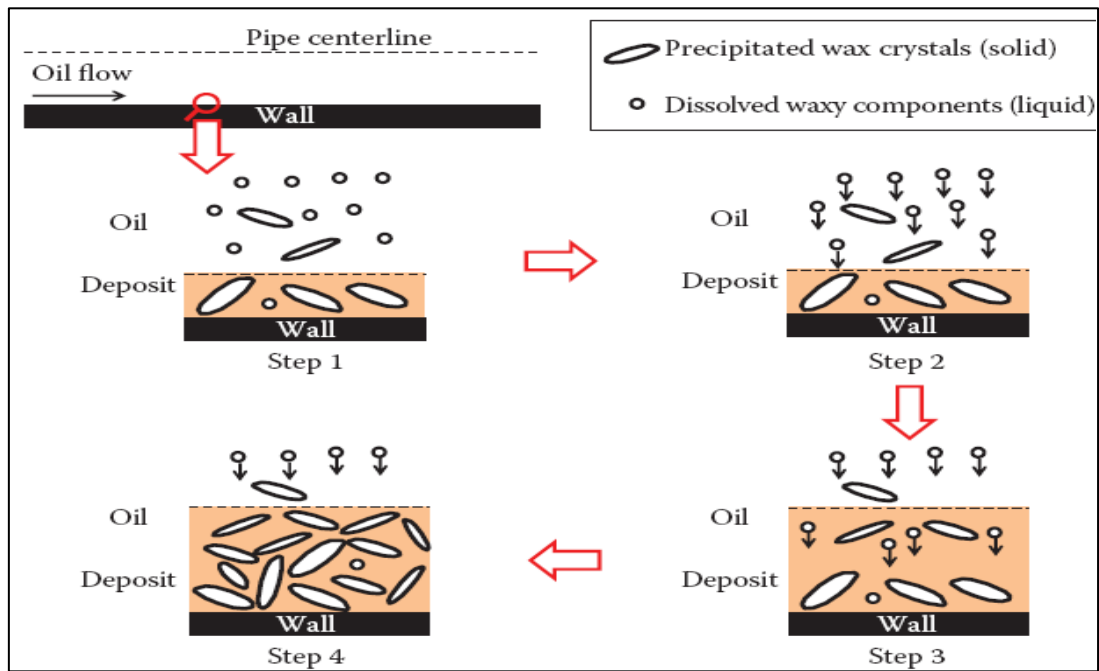


Figure 1.3 : Schéma du mécanisme de diffusion moléculaire (Zhenyu Huang et al. (2015)).

1.8.2 Diffusion brownienne

Burger et al. (1981), sont les premiers à discuter de la contribution éventuelle de la diffusion brownienne sur la croissance de dépôt de paraffine. Ils suggèrent que, dans les régions du fluide où la température est inférieure à T_c , les paraffines précipitent et restent en suspension dans le brut. Ces cristaux entrent en collision avec les molécules du brut du fait de l'agitation thermique. Ceci a pour conséquence le déplacement des paraffines vers les zones de plus faibles concentrations. Pour caractériser cette diffusion brownienne, l'équation de Fick est une fois de plus utilisée :

$$\frac{dm_B}{dt} = \rho_d A D_B \left. \frac{dc_s}{dr} \right|_{wall} \quad (1.4)$$

c_s Est la fraction volumique de concentration de cristaux de paraffine et D_B est le coefficient de diffusion brownienne.

La figure 1.4 représente éventuellement la distribution des cristaux de paraffine dans la conduite. Nous constatons sur ce schéma que la diffusion brownienne transporte une partie des cristaux vers la paroi et l'autre partie vers le cœur du fluide. Burger et al. (1981) concluent que la diffusion brownienne ne joue pas un grand rôle sur la croissance de dépôt.

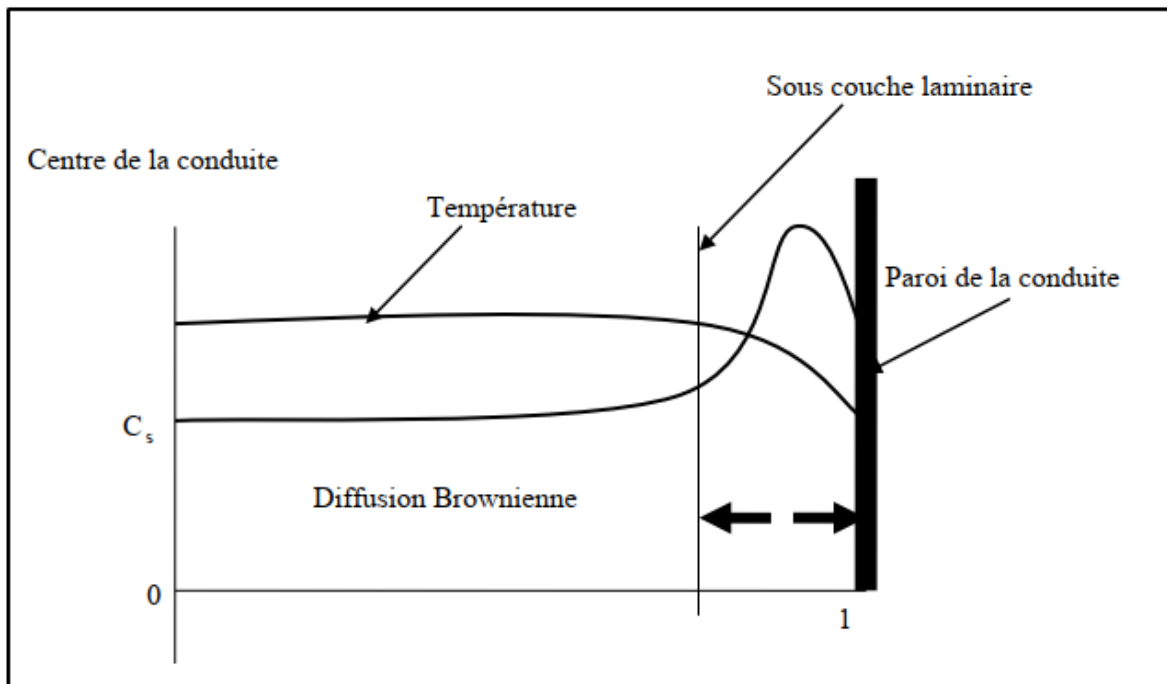


Figure 1.4 : Concentration des paraffines précipitées dans la conduite (Burger et al. (1981).

1.8.3 Dispersion par cisaillement

Tout comme la diffusion brownienne, la dispersion par cisaillement est la mise en mouvement radiale des cristaux de paraffine en suspension. Le mouvement d'une particule solide dépend de sa taille, sa densité, sa forme et de sa mobilité au sein du fluide. Les études effectuées sur ce sujet montrent que le transport radial des particules sphériques sous cisaillement est dans la direction des cisaillements les plus faibles.

Dans un écoulement de poiseuille, cela signifie que les particules s'éloignent de la paroi et vont en direction du cœur du fluide.

Plusieurs chercheurs ont conduit des études expérimentales dans des boucles de laboratoire pour observer le rôle joué par le cisaillement. Ces expérimentateurs s'affranchissent de la participation de la diffusion moléculaire en maintenant la paroi de la conduite et celle du fluide à la même température. Le fluide pompé est un mélange de cristaux de paraffines et d'huile. Le gradient de température nul dans la conduite induit qu'il ne peut pas y avoir un gradient de concentration des paraffines solides près de la paroi. En conséquence, s'il y a formation de dépôt de paraffine, c'est uniquement la dispersion par cisaillement qui en serait la cause. La dispersion par cisaillement est représentée par la loi de Fick :

$$\frac{dm_c}{dt} = \rho_d A D_c \left. \frac{dc_s}{dr} \right|_{wall} \quad (1.5)$$

Où D_c est le coefficient de dispersion.

1.9 Transfert de chaleur

Un transfert de chaleur ou transfert thermique entre 2 corps est une interaction énergétique qui résulte d'une différence de température entre les 2 corps, si ayant la même température sont dits en "équilibre thermique". Si leurs températures sont différentes, le corps le plus chaud cède de l'énergie thermique au corps le plus froid : on dit qu'il y a transfert thermique. On distingue habituellement 3 modes de transfert de chaleur :

1. La conduction thermique ou diffusion thermique
2. Le rayonnement thermique
3. La convection

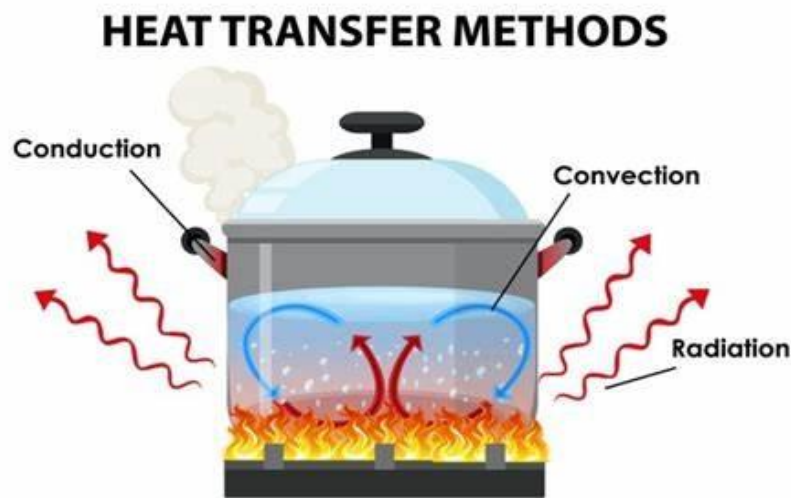


Figure 1.5 : Illustration des trois modes du transfert de la chaleur.

1.9.1 Conduction

C'est le transfert de chaleur au sein d'un milieu opaque, sans déplacement de matière, sous l'influence d'une différence de température. La propagation de la chaleur par conduction à l'intérieur d'un corps s'effectue selon deux mécanismes distincts : une transmission par les vibrations des atomes ou molécules et une transmission par les électrons libres. La théorie de la conduction repose sur l'hypothèse de Fourier.

$$\varphi = -\lambda S \frac{\partial T}{\partial x} \quad (1.6)$$

φ : Flux de chaleur transmis par conduction [w]

λ : Conductivité thermique du milieu [w/m · k]

X : Variable d'espace dans la direction du flux[m]

S : Aire de la section de passage du flux de chaleur [m^2]

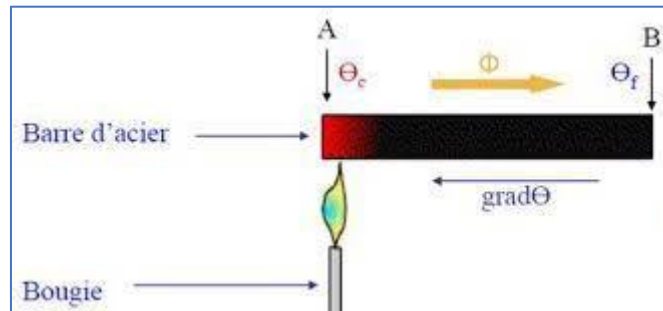


Figure 1.6 : Chauffage d'une barre métallique à l'une de ses extrémités par conduction (Pr Said Hamdaoui (2020)).

1.9.2 Rayonnement

Le rayonnement thermique peut être considéré comme un cas particulier du rayonnement électromagnétique, L'exemple caractéristique de ce type de transfert est le rayonnement solaire.

Ce transfert est le mode de transmission par lequel la chaleur passe d'un corps à haute température à un autre plus froid sans nécessité du support matériel. C'est donc le seul mode de transfert qui peut se propager dans le vide. La loi de Stefan-Boltzmann, qui permet de quantifier ces échanges. L'énergie rayonnée par un corps s'écrit :

$$\varphi = \xi \sigma s T_s^4 \quad (1.7)$$

Où σ : Est la constante de Stefan-Boltzmann, vaut $5.67 \cdot 10^{-8} \text{w}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$

ξ : émissivité, indice prend 1 pour un corps noir et qui compris entre 0 et 1 selon l'état de surface du matériau

S : superficie du corps

T : température du corps en (kelvin)

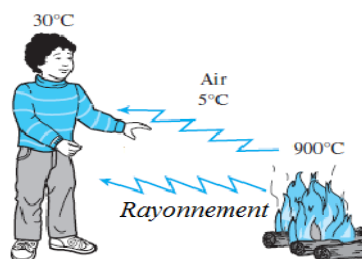


Figure 1.7 : Transfert de chaleur par rayonnement (Ali Agha. (2019)).

1.9.3 Convection

La convection consiste essentiellement en la transmission de l'énergie par le mouvement ou le déplacement macroscopique d'une parcelle (grand nombre de molécules), généralement d'un fluide d'une région à autre. Ce mécanisme est accompagné toujours par le transfert d'énergie dû au mouvement moléculaire et qui représente le coté conductif de ce mode. On distingue deux types de convection (naturelle et forcé).



Figure 1.8 : Transfert de chaleur par convection.

On distingue deux types de phénomènes convectifs :

a. Convection naturelle

Où le mouvement des particules est dû aux différences de température qui sont imposées au fluide. . La différence de température implique une différence de masses volumiques (déplacement des particules, dilatation), exemple (chauffage de l'eau dans un récipient).



Figure 1.9 : Convection naturelle (Ali Agha. (2019)).

b. Convection forcée

Où le mouvement des particules résulte de la pression appliquée au fluide par l'intermédiaire des moyens mécaniques, (d'une pompe, ventilateur par exemple).

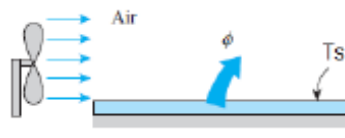


Figure 1.10 : Convection forcée (Ali Agha. (2019)).

On peut exprimer la quantité de chaleur transmise par convection entre une paroi solide à la température T_2 et un fluide à la température T_1 . Elle s'écrit (loi de Newton) :

$$\varphi = hs (T_2 - T_1) \quad (1.8)$$

h : Coefficient d'échange thermique par convection [$\omega/m^2 \cdot ^\circ C$]

1. 10 Signification physique de quelques nombres sans dimensions

Le tableau ci-après indique quelques nombres sans dimension utilisés dans le transfert de chaleur et qu'on va introduire dans la suite de ce travail.

Nom	Signification	Definition
Nusselt	Gradient thermique normalisé dans un écoulement.	$\text{Nu} = \frac{h \cdot L}{\lambda}$
Reynolds	Rapport entre les forces d'inerties et les forces visqueuses dans un fluide newtonien.	$\text{Re} = \frac{u \cdot d}{\nu} = \frac{\rho \cdot u \cdot d}{\mu}$
Prandtl	Rapport de la viscosité cinématique et de la diffusivité thermique	$\text{Pr} = \frac{\nu}{a} = \frac{\mu \cdot c_p}{\lambda}$
Péclet thermique	Le rapport du transfert par convection sur le transfert par conduction.	$\text{Pe}_{\text{the}} = \frac{u \cdot d}{a} = \frac{\rho \cdot c_p \cdot u \cdot d}{\lambda}$ $= \text{Re} \cdot \text{Pr}$
Péclet massique	Le rapport du transfert par convection sur le transfert par diffusion.	$\text{Pe}_{\text{mass}} = \frac{u \cdot d}{D}$
Rayleigh	Produit du nombre de Grashof et le nombre de Prandtl	$\text{Ra} = \text{Gr} \cdot \text{Pr}$

Tableau 1. 2. nombres adimensionnels.

Pour les écoulements internes la dimension caractéristique du système a utilisé dans le calcul du nombre de Reynolds est le diamètre hydraulique (m) qui est donné par :

$$Dh = \frac{4 \cdot S}{P} \quad (1.9)$$

Ou S est la surface du tuyau (m²) et P est son périmètre (m). Pour les écoulements externes, par contre, la dimension caractéristique est la longueur du système dans la direction de l'écoulement.

Si le nombre de Reynolds du système est plus petit que sa valeur critique Re_{crit} on trouve un écoulement turbulent.

- Ecoulement interne $\text{Re}_{\text{crit}} = 2300$
- Ecoulement externe $\text{Re}_{\text{crit}} = 300000$

Chapitre **2**

Modélisation théorique

2.1 Introduction

La modélisation numérique a suscité durant ces dernières décennies un grand intérêt pour la prédiction et l'étude des écoulements en mécanique des fluides. Ceci est dû au fait que la simulation numérique permet de comprendre les phénomènes physiques avec une simplicité, une facilité et une rapidité de sa mise en œuvre. Dans ce chapitre, toutes les simulations sont menées avec la méthode classique de Runge-Kutta d'ordre quatre ou le calcul des principaux paramètres a fait l'objet d'une méthode itérative appropriée.

2.2 Position du problème

On considère l'écoulement ascendant d'un fluide visqueux chargé de paraffine dans un pipeline. En appelant δ l'épaisseur de la couche déposée, nous présentons maintenant le système d'équations qui dépend de la fonction $\delta(x, t)$ (figure 2. 1). A l'instant $t = 0$ la paroi de tube est propre (pas de dépôt de paraffine), c'est-à-dire, $\delta(x, 0) = 0, \forall x$ entre 0 et L.

On distingue donc deux régions de l'écoulement, la première commence à $x = 0$ et fini à x_d , où le produit est en contact avec la paroi où il atteint la température du point de de rosé ($T_w|_{T_{xd}} = T_c$)

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, $x_d \leq x \leq L$. Nous supposons que dans cette région le produit est saturé de paraffine.

Cas A : dans ce cas la variation longitudinale de pression (Δ_p) est constante avec un débit (Q) variable, ce dernier est une fonction décroissante du temps, à cause du dépôt de paraffine, la température moyenne du liquide (T_b) est aussi fonction de la longueur de la conduite et du temps ($T_b = T_b(x, t)$). Par conséquent, la position longitudinale du point de démarrage (x_d) du phénomène de déposition de paraffine est également une fonction de temps.

Cas B : le débit (Q) est constant et la variation de pression (Δ_p) augmente avec le temps, cette augmentation est due à la croissance de l'obstruction. Dans ce cas, la distance x_d devrait être constante car (Q) est constant. La température de rosé (T_c) a aussi une position constante.

Dans le cadre de cette étude nous nous intéressons uniquement au cas A .

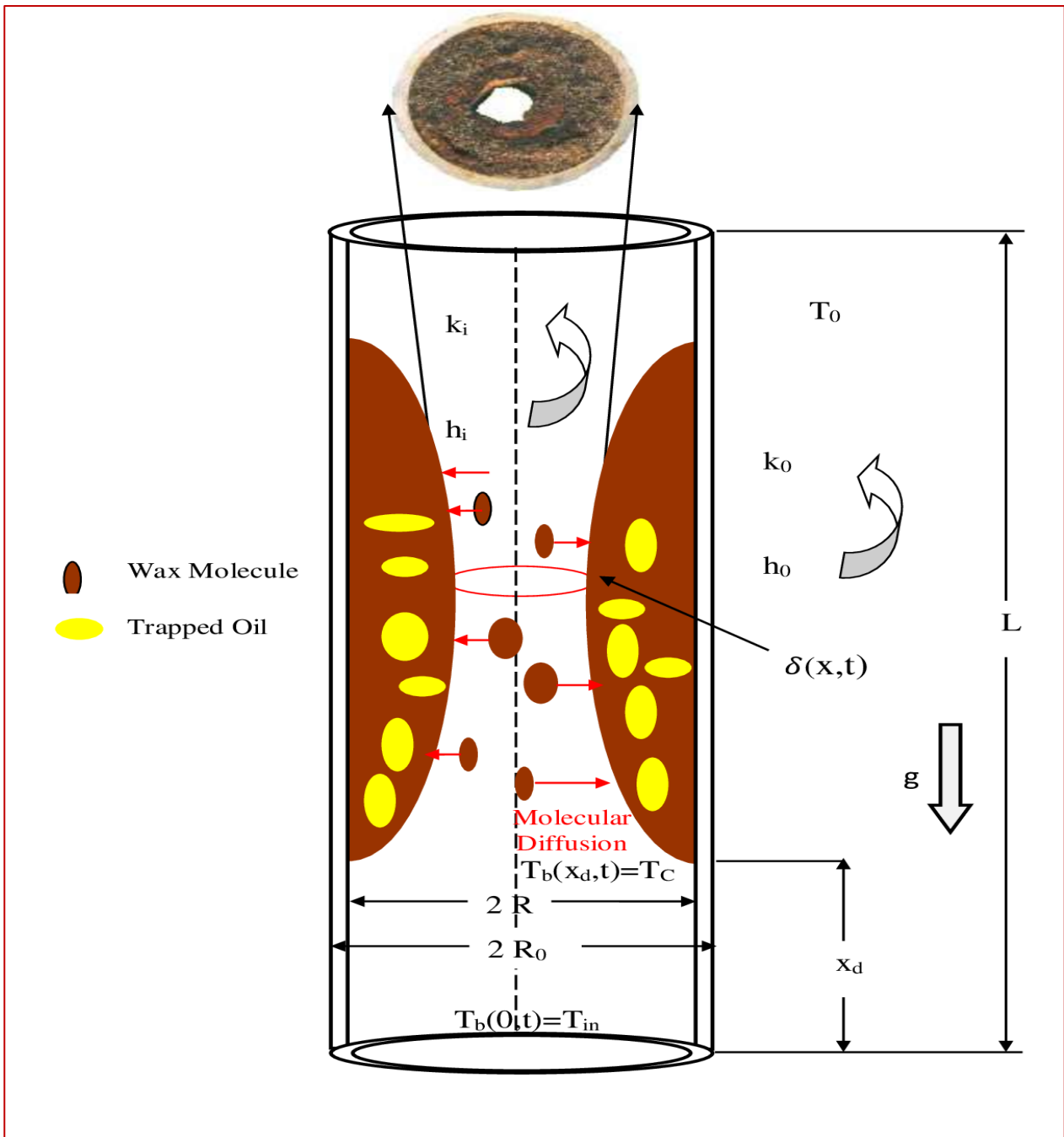


Figure 2.1 : Schématisation du problème.

Abréviation	Explication
R_0	Le rayon extérieur de tube.
R	Le rayon intérieur du tube.
k_0	La conductivité thermique de l'environnement extérieur.
k_i	La conductivité thermique de fluide.
h_0	Le coefficient extérieur de transfert de chaleur par convection.
h_i	Le coefficient intérieur de transfert de chaleur par convection.

2.3 Équation de la quantité du mouvement

L'équation de conservation de la quantité de mouvement s'écrit :

$$\rho \frac{dv}{dt} = -\frac{\partial p'}{\partial x} - \rho g \sin a - f \frac{\rho v^2}{2d} \quad (2.1)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} \right) = -\frac{\partial p'}{\partial x} - \rho g \sin a - f \frac{\rho v^2}{2d} \quad (2.2)$$

a : angle d'une inclinaison des pipelines

Où p' est la pression statique.

Où $p = p' + \rho g dx \sin a$ appelée pression motrice.

L'écoulement en régime permanent d'un fluide incompressible dans une conduite est décrit par l'équation suivante :

$$\rho v \frac{\delta v}{\delta x} = -\frac{\partial p}{\partial x} - f \frac{\rho v^2}{2d} \quad (2.3)$$

Pour un écoulement unidirectionnel, en négligeant les termes non linéaires et compte tenu de la répartition de l'épaisseur ($d = 2[R - \delta]$), cette relation devient :

$$\frac{dp}{dx} = -f \frac{\rho v^2}{4(R - \delta)} \quad (2.4)$$

En considérant le fluide newtonien et en négligeant les termes local et convectif,

Equation précédente s'écrit: $Q = V.S \Rightarrow V = \frac{Q}{S} = \frac{Q}{\pi(R-\delta)^2}$

Donc:

$$\frac{dp}{dx} = -f \frac{\rho Q^2}{4\pi^2(R - \delta)^5} \quad (2.5)$$

Où $p = p(x, t)$ est la pression, $f = f(x, t)$ le coefficient de frottement, R le rayon du tube et ρ la densité de fluide supposée constante.

De l'équation (2.5) est issue la définition du facteur de frottement f . En intégrant cette équation par rapport à x , entre 0 et L , on obtient :

$$\Delta p = p_{in} - p_{atm} - \rho g H = \frac{\rho Q^2}{4\pi^2 R^4} \int_0^{L^*} \frac{f}{(1 - \delta^*)^5} dx^* \quad (2.6)$$

Dans cette équation, p_{in} est la pression à l'entrée, p_{atm} la pression atmosphérique à ($x = l$) g l'accélération de la pesanteur et H la dénivelée entrée-sortie du tube.

2.4 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,

$\delta^* = \delta/R$, l'épaisseur adimensionnelle de la couche déposée.

Aussi la distribution axiale de la pression est donnée par :

$$p^* = \frac{p - p_{atm} - \rho g H}{\Delta p} \quad (2.7)$$

Le débit instationnaire est obtenu de l'équation (II.5) sous la forme suivante :

$$Q(t) = 2\pi R^2 \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}} \frac{1}{\sqrt{\int_0^{L^*} \frac{f}{(1 - \delta^*)^5} dx^*}} \quad (2.8)$$

Il est utile de rappeler que cette forme de débit souligne l'interdépendance débit-variation de pression. Il faut donc fixer l'un des deux dans le calcul. Ce qui nous conduira par la suite à considérer un cas de figure (cas A).

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

$$Q/Q_0 = \left\{ \frac{1}{\sqrt{\int_0^{L^*} \frac{f}{(1 - \delta^*)^5}} \sqrt{\frac{64L^*}{Re_0}} \right. \quad (2.9)$$

$$\Delta p / \Delta p_0 = 1 \quad (2.10)$$

Le nombre de Reynolds (Re) est défini aussi par rapport au nombre de Reynolds initial (Re_0) pour le cas A :

$$Re = \frac{Q/Q_0}{1 - \delta^*} Re_0 \quad (2.11)$$

La distribution longitudinale de la pression pour le cas A :

$$p^* = \frac{p - p_{atm} - \rho g H}{\Delta p} = \frac{Re_0}{64L^*} \left(\frac{Q}{Q_0} \right)^2 \int_{x^*}^{L^*} \frac{f}{(1 - \delta^*)^5} dx^* \quad (2.12)$$

2.5 Bilan Énergétique

Le transfert thermique joue un rôle important dans le processus de dépôt. Si nous appliquons le Principe de la conservation de l'énergie en régime permanent, au volume de contrôle, nous obtenons:

$$mc \frac{dT_b}{dt} = -2\pi R dx U (T_b - T_0) \quad (2.13)$$

$$\text{Avec: } m = \rho V = \rho A dx$$

$$\frac{dT_b}{dt} = \frac{\partial T_b}{\partial t} + v \frac{\partial T_b}{\partial x} = v \frac{dT_b}{dx} \quad (\text{Régime permanent})$$

$$\rho Q c \frac{dT_b}{dx} = 2\pi R U (T_0 - T_b) \quad (2.14)$$

Où c est la chaleur spécifique de fluide lourd, $U(x, t)$ le coefficient de transfert de chaleur global et T_0 la température de l'environnement dans lequel le tube est immergé. Nous observons que $U(x, t)$ prend en considération les convections à l'intérieur et à l'extérieur de la canalisation ainsi que la conduction à travers la paroi du tube et de la couche de paraffine. Il peut être exprimé par la relation générale suivante (annexe) :

$$U = \left[\frac{R}{R_0} \frac{1}{h_0} + \frac{R}{k_w} \ln \left(\frac{R_0}{R} \right) + \frac{R}{K_d} \ln \left(\frac{1}{1 - \delta^*} \right) + \left(\frac{1}{1 - \delta^*} \right) \frac{1}{h_i} \right]^{-1} \quad (2.15)$$

Où R_0 est le rayon extérieur de tube, h_0 et h_i sont les coefficients extérieur et intérieur de transfert de chaleur par convection respectivement, k_w conductivité thermique de mur et k_d conductivité thermique de la couche déposée.

Il est clair que $U(x, t)$ dépend $\delta^* = (x, t)$ et que l'équation (2.15), réécrite sous une forme adimensionnelle, devient :

$$U^* = \frac{UR}{k_i} = \left[\frac{2k_i/k_i}{Nu_0} + \frac{k_i}{k_w} \ln\left(\frac{R_0}{R}\right) + \frac{k_i}{k_d} \ln\left(\frac{1}{1-\delta^*}\right) + \frac{2}{Nu_i} \right]^{-1} \quad (2.16)$$

Dans cette équation R_0 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(annexe) :

$$Nu_0 = \frac{2R_0 h_0}{k_0}$$

$$Nu_i = \frac{2R h_i}{k_i} (1 - \delta^*) \quad (2.17)$$

h_0 et h_i sont les coefficients extérieur et intérieur de transfert de chaleur par convection respectivement, k_w conductivité thermique de mur et k_d conductivité thermique de la couche déposée.

Le nombre de Nusselt externe peut être obtenu à l'aide des corrélations empiriques existant dans la littérature (**Brid (1987)**). Ce nombre dépend du type de l'écoulement externe. Pour la simplicité de ce travail nous négligeons la résistance de conduction externe ($Nu_0 \rightarrow \infty$) et la résistance conductrice de mur ($k_i \ll k_w$).

$$Nu_i = \frac{3,66}{n^{0,12}} \quad (2.18)$$

L'expression ci-dessus est donnée par (**Brid (1987)**). pour des valeurs discrètes de n et pour un écoulement laminaire dans la gamme $0,33 \leq n \leq 1$.

L'intégration de l'équation (2.13) donne :

$$\int_{T_{in}}^{T_b} \frac{dT_b}{(T_b - T_0)} = -\frac{2\pi R}{\rho Q_c} \int_0^x U dx$$

$$T_b = T_0 + (T_{in} - T_0) \exp \left[-\frac{2\pi R}{\rho Q_c} \int_0^x U dx \right]$$

$$\text{Donc : } \theta = \frac{T_b - T_0}{T_{in} - T_0} = \exp \left[-\frac{2\pi R k_i}{\rho Q_c} \int_0^{x^*} U^* dx^* \right] \quad (2.19)$$

Le nombre de Peclet pour une conduite de section circulaire s'écrit :

$$Pe = \frac{2R\rho v c}{k_i}$$

Avec :

$$v = \frac{Q}{\pi R^2}$$

Donc :

$$Pe = \frac{2\rho Q c}{\pi R k_i}$$

On définit le nombre de Peclet en fonction du nombre de Peclet initial :

$$Pe = Pe_0 \frac{Q}{Q_0} \quad (2.20)$$

La distribution longitudinale de la température pour le Cas A est :

$$\theta = \exp \left[-\frac{4}{Pe_0 \frac{Q}{Q_0}} \int_0^{x^*} U^* dx^* \right] \quad (2.21)$$

L'équation (2.21) donne également le point de démarrage du phénomène de déposition, x_d^* parce que dans l'espace $0 \leq x^* \leq x_d^*$, ni δ^* (égale zéro dans la région propre de tube) ni U^* ne dépendent de x^* ainsi, après intégration de cette équation, il vient :

$$x_d^* = \frac{\ln \left(\frac{T_{in} - T_0}{T_c - T_0} \right)}{4U^*|_{\delta^*=0}} Pe_0 \frac{Q}{Q_0} \quad (2.22)$$

Où $U^* = |_{\delta^*=0}$ est donné par équation (2.15) pour $\delta^* = 0$

Nous observons, que (x_d^*) est fonction de δ^* , et que (Q) diminue avec le temps, par conséquent (x_d^*) diminue aussi avec le temps.

2.6 Epaisseur de couche du dépôt de paraffine

Pour compléter la formulation du problème, nous avons besoin d'une équation Régissant $\delta^*(x, t)$.

L'épaisseur de couche est inhérente au flux de masse j_i à l'interface solide- liquide, défini par :

$$J_i = \frac{dm_d}{dt dA} \quad (2.23)$$

Où dm_d est la masse du solide déposée pendant un intervalle de temps sur l'élément de surface dA .
 Pour la masse d'un volume élémentaire:

$$dm_{dp} = \rho_d dV(1 - \Phi)$$

Où ρ_d est la densité de la matière déposée, Φ la porosité de la paraffine, dV le volume de la masse déposée sur dA pendant le temps dt , c'est-à-dire,

$$dV = dAd\delta = dA \left(\frac{\partial \delta}{\partial T} \right) dt$$

$$j_i = \rho_d(1 - \Phi) \frac{\partial \delta(x, t)}{\partial t} \quad (2.24)$$

La loi de Fick sur la diffusion moléculaire, peut également s'écrire sous la forme suivante :

$$j_i = \begin{cases} 0, & \text{si } 0 \leq x \leq x_d. \\ -D \frac{d\rho_s}{dT} \Big|_i \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_i, & \text{si } x_d \leq x \leq L. \end{cases} \quad (2.25)$$

Dans cette équation D est la diffusivité moléculaire, ρ_s solubilité et $(s = \frac{d\rho_s}{dT})$

Coefficient de solubilité évalué à la température locale à l'interface solide-liquide (T_i).

Le terme $\frac{\partial T}{\partial r} \Big|_i$ est le gradient local de la température à l'interface solide-liquide, il est donné par :

$$\frac{\partial T}{\partial r} \Big|_i = -\frac{U^*}{1 - \delta^*} \frac{T_{in} - T_0}{R} \theta \quad (2.26)$$

Le temps adimensionnel $t^* = Dt/R^2$ est défini en combinant les équations (2.24), (2.25), (2.26) :

$$\frac{\partial \delta^*}{\partial t^*} = \begin{cases} 0, & \text{si } 0 \leq x^* \leq x_d^* \\ \frac{S^* U^*}{(1 - \delta^*)(1 - \Phi)} \theta, & \text{si } x_d^* \leq x^* \leq L^* \end{cases} \quad (2.27)$$

Où le coefficient de solubilité adimensionnel, s^* est défini par :

$$S^* = \frac{S(T_{in} - T_0)}{\rho_d} \quad (2.28)$$

2.7 Méthode de résolution

Un code Fortran est développé pour résoudre l'équation d'énergie, de quantité de mouvement et de diffusion moléculaire associée aux conditions initiales et aux conditions aux limites. Pour évaluer l'épaisseur du dépôt de paraffine on utilise la méthode de Runge Kutta d'ordre quatre. Le calcul des paramètres essentielles (le débit, la température, la pression et la variation longitudinale de pression) ont fait l'objet de la méthode itérative de Newton Cotes d'ordre supérieur (d'ordre huit) (**Démidovith (1987)**).

➤ Les étapes de la simulation du problème sont les suivantes :

1. Les constantes initiales ont introduit :

$$\frac{L}{R} = 1000, \theta_c = \frac{T_c - T_0}{T_{in} - T_0} = 0.9, K_i / K_d = 1, \Phi = 0.4, Nu_i = 3.66.$$

2. $(\delta^*, 0) = 0$ à $t^* = 0$.

3. Incrémentations du temps t^* ($\Delta t^* = 0.01$)

4. Discrétisation du pipeline ($N \times \Delta x = 10000 \times 0.1$)

5. Calcul des paramètres essentielles (le débit, la température, la pression et la variation longitudinale de pression) par la méthode itérative de Newton Cotes d'ordre supérieur (d'ordre huit).

6. Calcule l'épaisseur $\delta^* = (x^*, t^*)$ par la méthode de Runge-Kutta d'ordre quatre.

7. $t^* = t^* + \Delta t^*$

8. Nouveau calcul (étape 5) jusqu'à $t^* = t_{obstruction}$

➤ Méthode de Runge Kutta d'ordre quatre :

$$k_1 = hf(t_i, x(t_i))$$

$$k_2 = hf\left(t_i + \frac{h}{2}, X(t_i) + \frac{K_1}{2}\right)$$

$$k_3 = hf\left(t_i + \frac{h}{2}, X(t_i) + \frac{K_2}{2}\right)$$

$$k_4 = hf(t_i + h, X(t_i) + K_3)$$

$$X(t_{i+1}) = X(t_i) + \frac{(k_1 + 2K_2 + 2K_3 + K_4)}{6}$$

Méthode itérative de Newton Cotes d'ordre supérieur (d'ordre huit) (**Démidovith (1987)**) :

$$\int_a^b y dx = (b - a) \sum_{i=0}^n H_i y_i$$

Avec :

$$y_i = f(a + ih), h = \frac{b-a}{n}, H_i = \frac{\hat{H}_i}{N}, \sum_{i=0}^n \hat{H}_i = N$$

\hat{H}_i Les coefficients de Newton Cotes (**Démidovith (1987)**)

n	\hat{H}_0	\hat{H}_1	\hat{H}_2	\hat{H}_3	\hat{H}_4	\hat{H}_5	\hat{H}_6	\hat{H}_7	\hat{H}_8	Dénominateur commun N
1	1	1								2
2	1	4	1							6
3	1	3	3	1						8
4	7	32	12	32	7					90
5	19	75	50	50	75	19				288
6	41	216	27	272	27	216	41			840
7	751	3577	1323	2989	2989	1323	3577	751		17280
8	989	5888	-928	10496	-4540	10496	-928	5888	989	28350

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

$$l/R = 1000$$

$$\theta_c = \frac{T_c - T_0}{T_{IN} - T_0} = 0,9$$

$$\frac{k_i}{k_d} = 1$$

$$\Phi = 0,4$$

$$Nu_i = 3,66$$

Chapitre **3**

Résultats et discussion

3.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons analyser et interpréter les résultats obtenus, compte tenu de la nature du fluide newtonien, avec un régime supposé laminaire. La résolution de la méthode de Runge Kutta d'ordre quatre nous a permis d'obtenir la répartition dans le temps et dans l'espace de l'épaisseur de la déposition de paraffine, la température, le coefficient global de transfert de chaleur et la pression pour une valeur précise de porosité ($\Phi = 0.4$) et avec un nombre de Peclet différent compte tenu de la diffusion moléculaire ; ainsi que la variation du débit et du nombre de Peclet. Parmi les cas discutés dans le chapitre 2, seul le cas A est pris en considération pour la mise en œuvre pratique des calculs.

3.2 Validation du code de calcul

Afin de valider le modèle analytique et la méthode de calcul présentée dans ce travail, nous avons comparé la pression, la température et le débit, à ceux calculé par **Flavio et al. (1997)** (figure 3.1, 3.2, 3.3). A bon accord est enregistré pour ce cas.

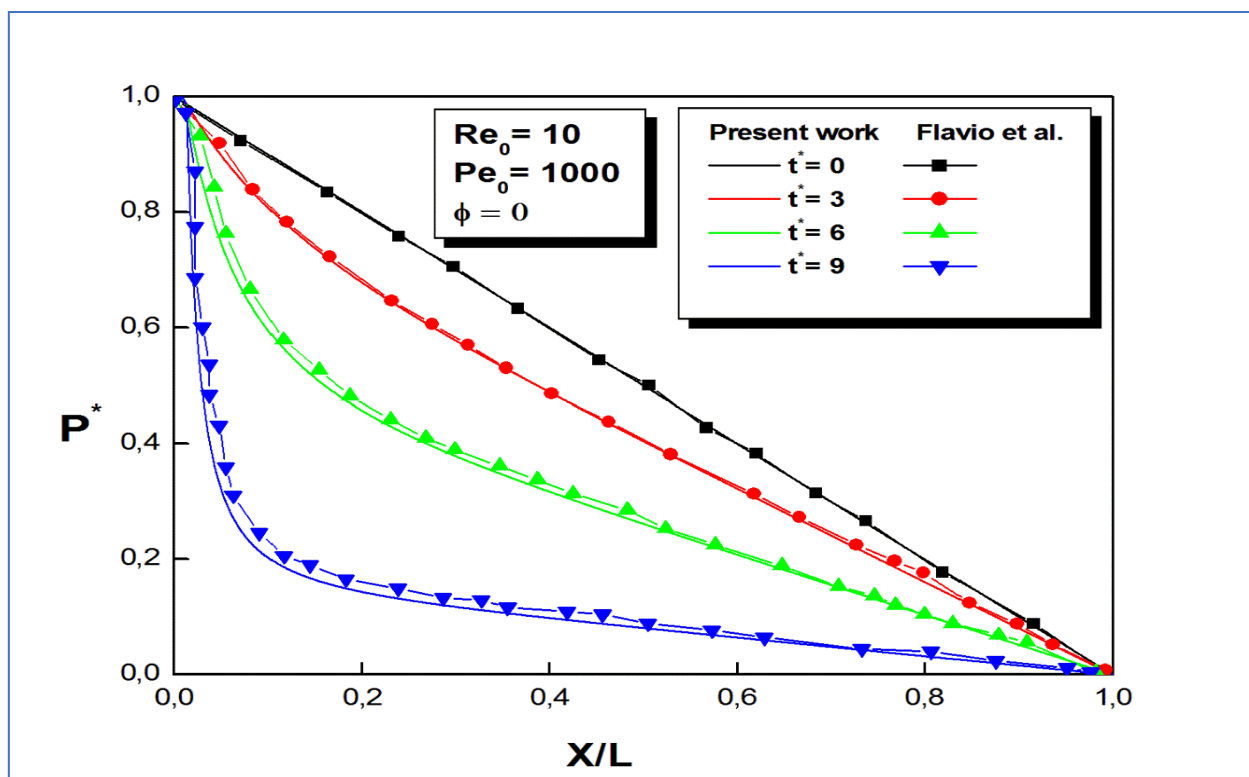


Figure 3.1 : Répartition longitudinale de la pression, Flavio et al. (1997).

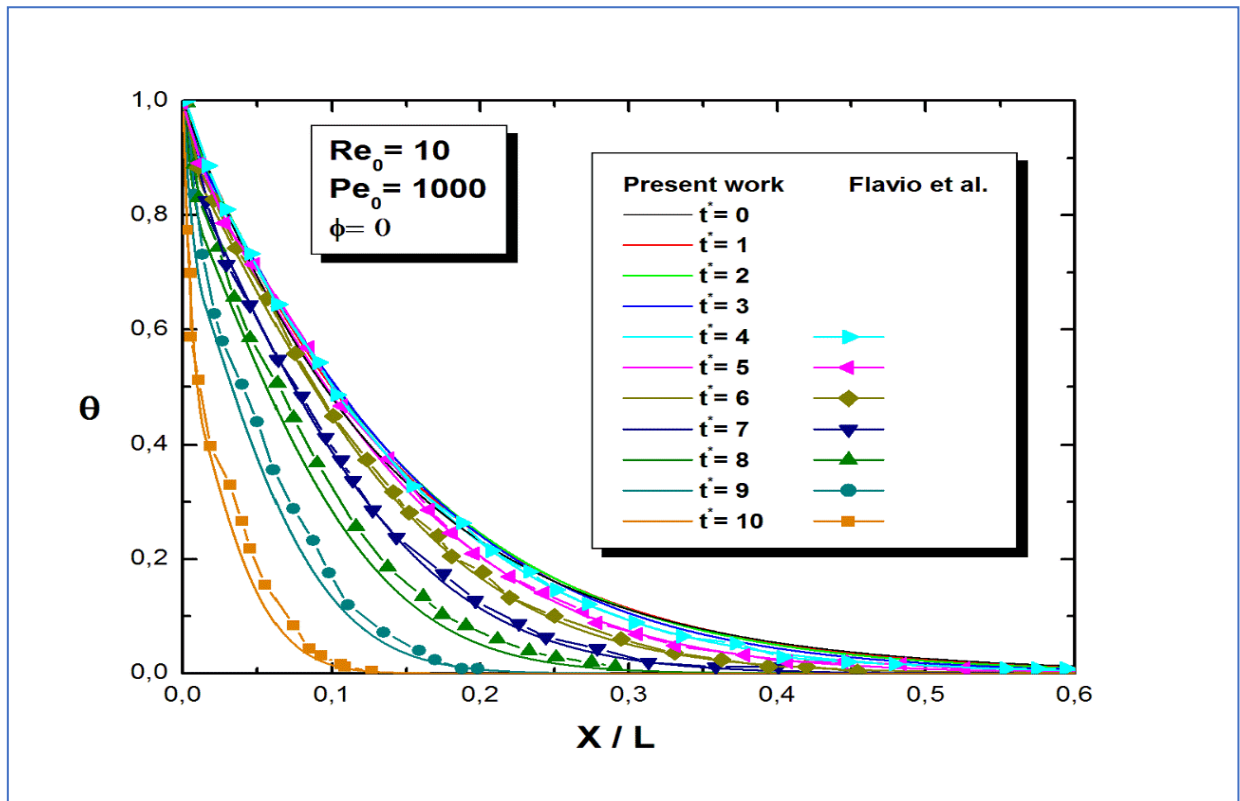


Figure 3.2 : Répartition longitudinale de la température, Flavio et al. (1997).

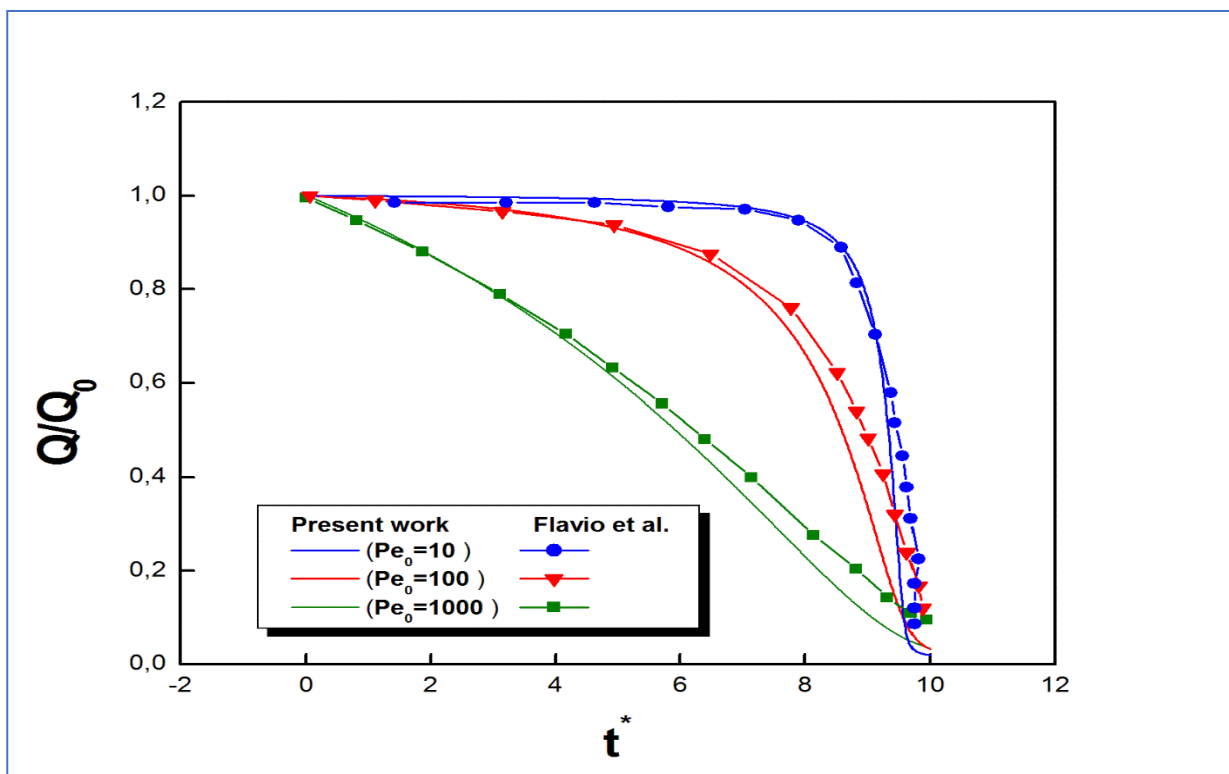


Figure 3.3: Répartition longitudinale de débit, Flavio et al. (1997).

3.3 Epaisseur du dépôt de paraffine

Les figures 3.4, 3.5, 3.6 et 3.7 montrent la variation de l'épaisseur du dépôt de paraffine en fonction de la longueur adimensionnelle de la canalisation pour une valeur précisée de porosité = 0.4 , de nombre de Reynolds $Re_0 = 10$ et pour des nombres de Peclet de l'ordre de $Pe_0 = 100; 250; 500$ et 1000 . Nous remarquons qu'amplitude de l'épaisseur du dépôt de paraffine c'est presque la même quel que soit la valeur du nombre de Peclet. Par contre, pour les valeurs élevées du nombre de Peclet, en remarque que la couche de paraffine déposée couvrait une longueur très importante comparé à celle des faibles valeurs de Peclet. Par exemple, pour Peclet $Pe_0 = 100$ la longueur du dépôt est faible soit à une valeur de $x/L = 0.08$ et pour un nombre de Peclet $Pe_0 = 1000$ où la valeur de $x/L = 0,6$. Ceci s'explique par le fait que si le nombre de Peclet est faible, l'écoulement du fluide est lent et la convection forcée est faible. En effet, si la vitesse est de l'écoulement est faible, le fluide se refroidit rapidement et par conséquent, l'obstruction est très rapide et se fait à l'entrée de pipeline, mais la quantité de paraffine déposée est très faible. Par contre, nous pouvons noter aussi que lorsque le nombre de Peclet est élevé, la vitesse du fluide est grande, ainsi le transfert de chaleur par convection forcée croît et provoque le refroidissement de fluide à une longue distance. Ce qui autorise l'apparition des cristaux de paraffines en grand nombres, ces cristaux vont précipitent sur la paroi de pipeline sous l'effet de la diffusion moléculaire et, en conséquence la quantité de paraffine déposée est tes grande pour ce cas-là. Sur le plan physique le phénomène de convection (forcée) est prépondérant.

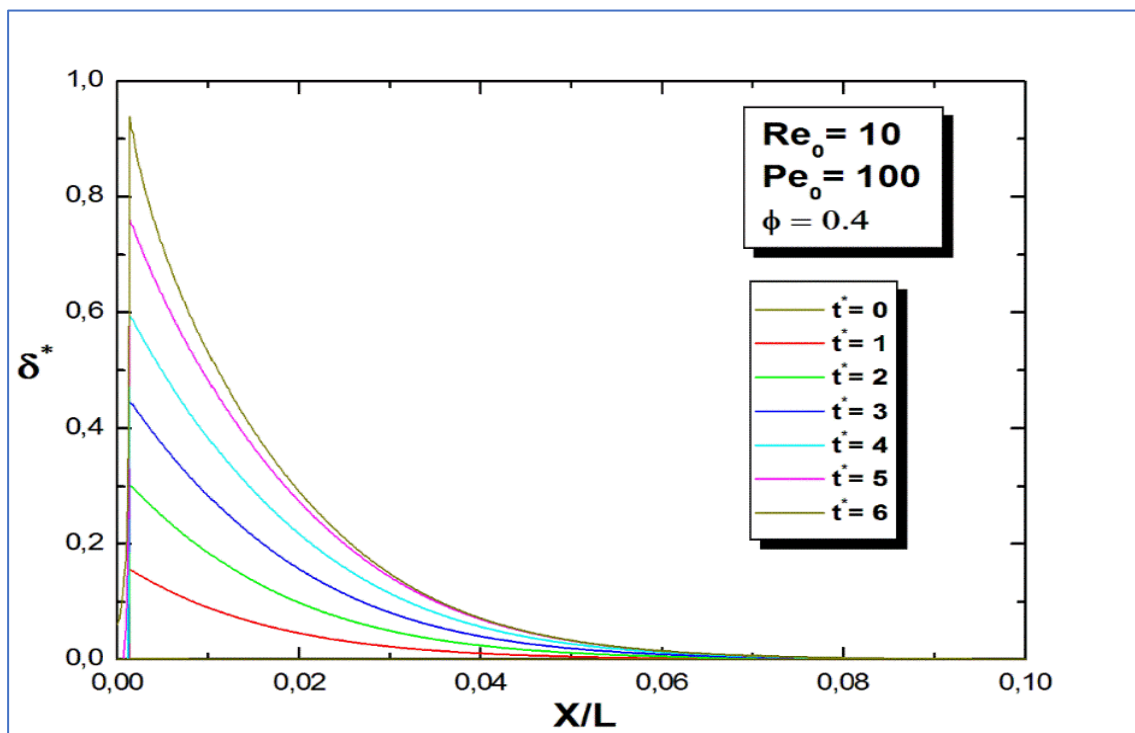


Figure 3.4 : Répartition longitudinale de l'épaisseur de paraffine.

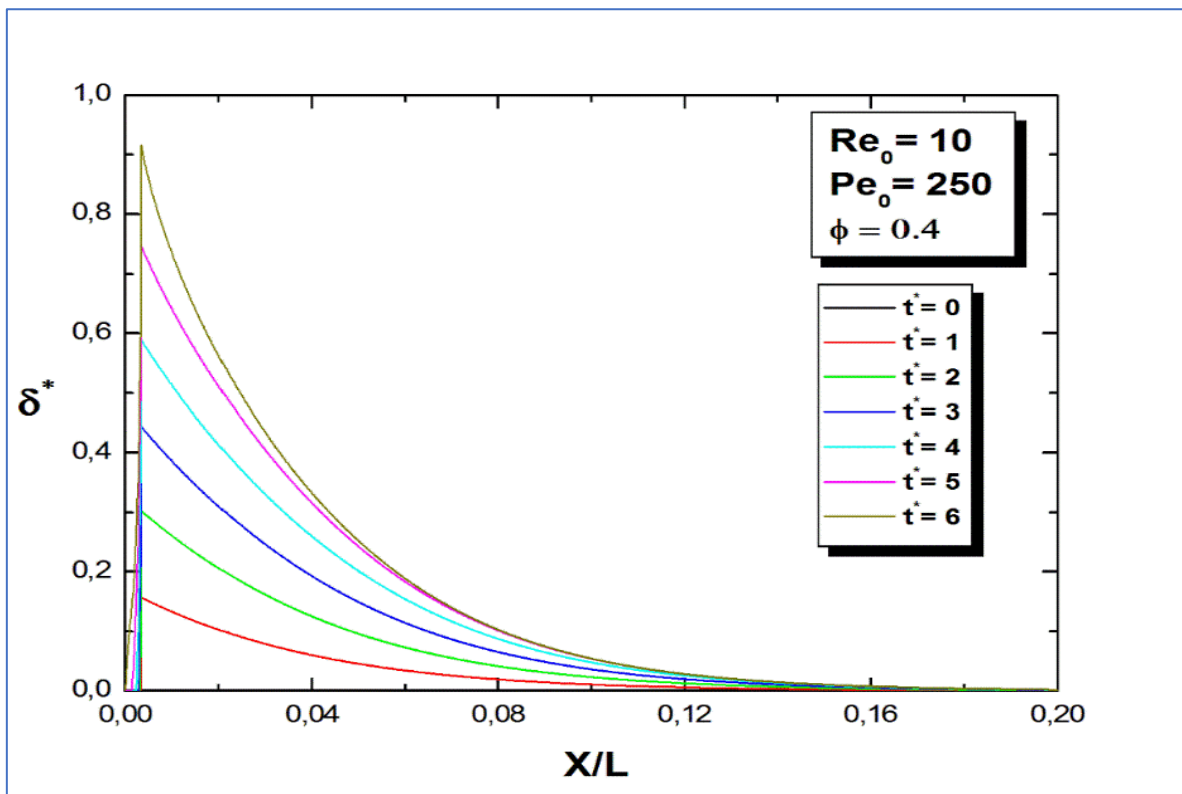


Figure 3.5 : Répartition longitudinale de l'épaisseur de paraffine.

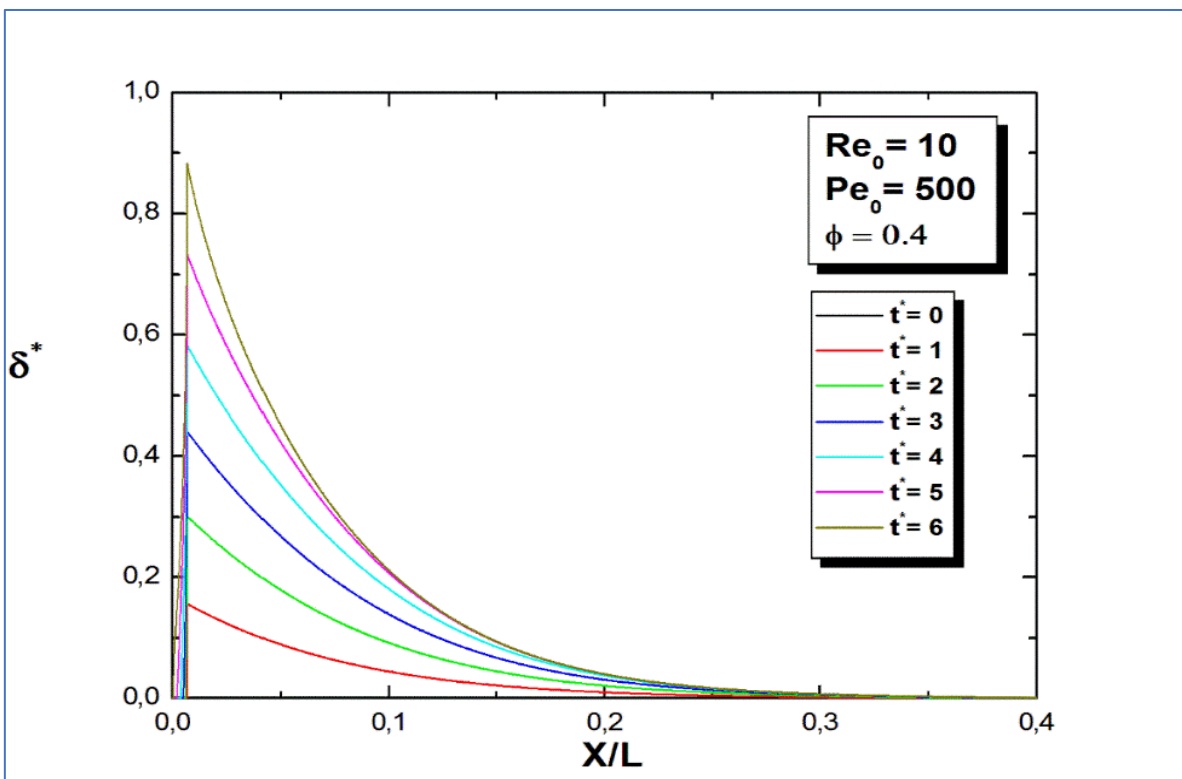


Figure 3.6 : Répartition longitudinale de l'épaisseur de paraffine.

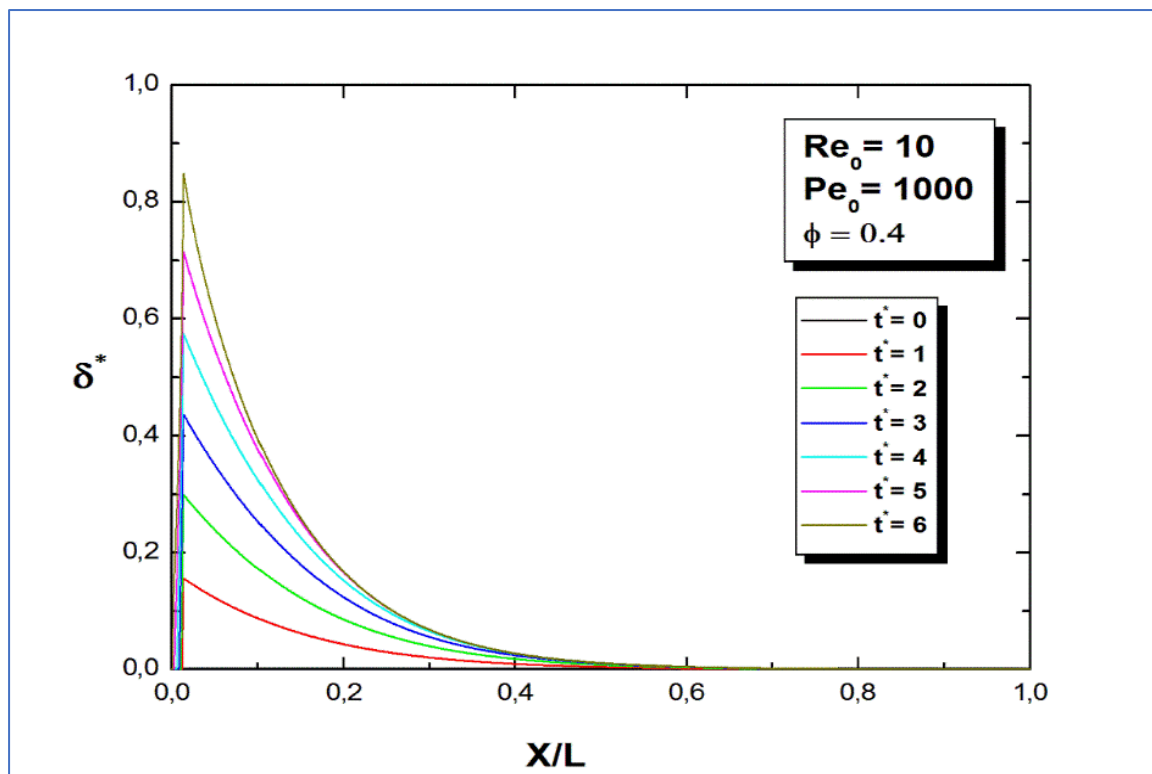


Figure 3.7 : Répartition longitudinale de l'épaisseur de paraffine.

Sur la figure 3.8 nous avons repris l'évolution de l'épaisseur de paraffine en considérant le comportement de l'épaisseur dans la zone du point de démarrage du phénomène de déposition. En fonction du temps, ce point évolue en sens inverse de l'écoulement.

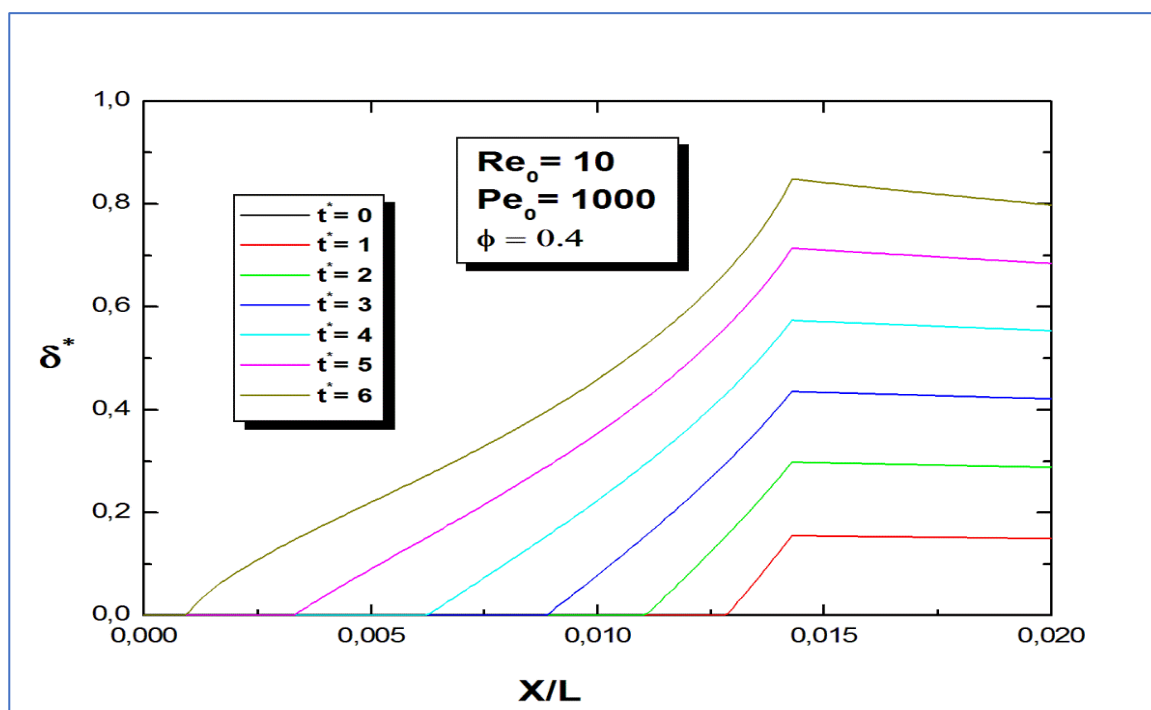


Figure 3.8 : Répartition longitudinale de l'épaisseur (au voisinage de point de démarrage).

3.4 Température

Compte tenu de la diffusion moléculaire comme principal mécanisme la formation de dépôt de paraffine, nous avons tracé la variation de la température en fonction de la longueur adimensionnelle de la canalisation pour une valeur précisée de porosité = **0.4** , de nombre de Reynolds **Re₀ = 10** et pour des nombres de Peclet de l'ordre de **Pe₀ = 100; 250; 500 et 1000** tels que montrées sur les figures **3.9, 3.10, 9.11 et 3.12**. Nous pouvons remarquer une décroissance brusque de la température en fonction de la distance. En effet, si le nombre de Peclet est faible (soit **Pe₀ = 100**), la vitesse du fluide sera faible, ce qui va entraîner un écoulement lent, et un refroidissement rapide du fluide et bien évidemment une chute rapide de la température jusqu'à atteindre la température de cristallisation où il va faire apparaître les cristaux de paraffines à l'entrée de la conduite. Ces derniers font une migration vers la paroi sous l'effet d'un gradient élevé de la température dans cette zone en forment une couche de paraffine. En autre, si le nombre de Peclet est élevé (soit **Pe₀ = 1000**), la vitesse de l'écoulement sera élevée aussi, et par conséquent le refroidissement du fluide se fait lentement, ce qui permettra le dépôt de paraffine avec une quantité plus grande, cette dernière va occuper une longue distance dans le pipeline. Ces dépôts de paraffine engendrent l'obstruction partielle ou totale des conduites, induisant ainsi un ralentissement, voire un arrêt de la production.

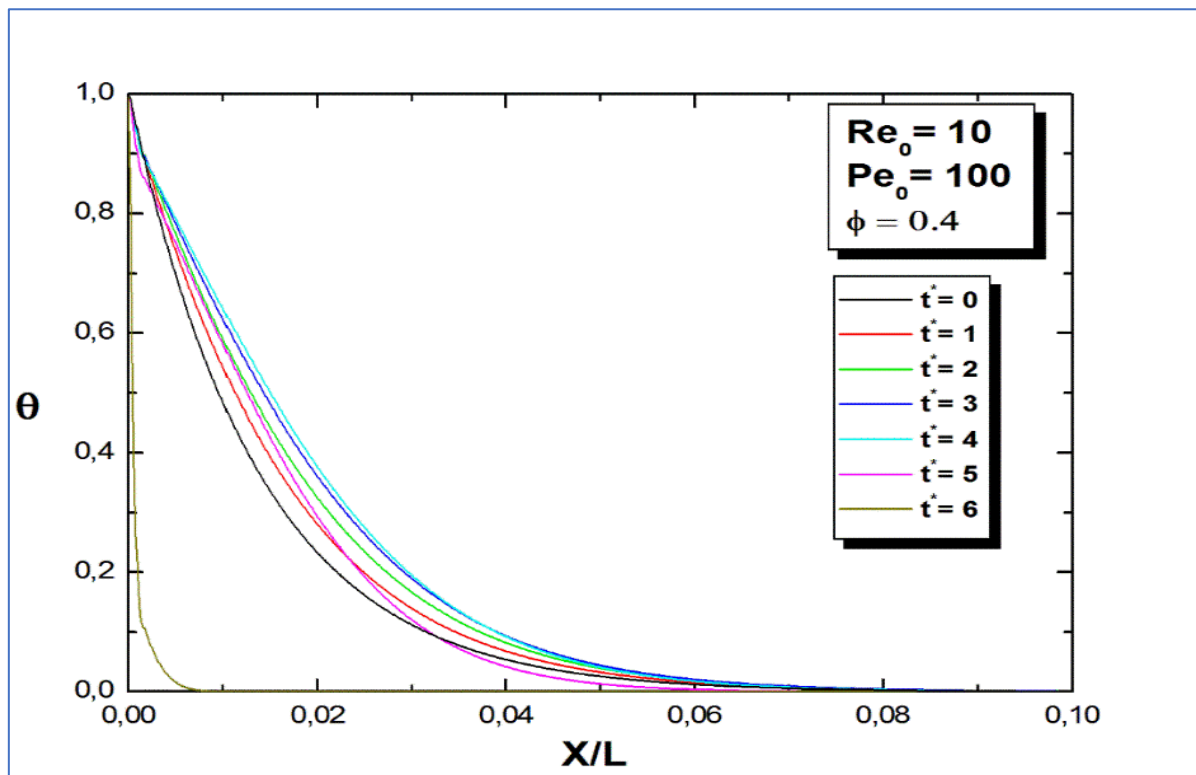


Figure 3.9 : Répartition longitudinale de la température.

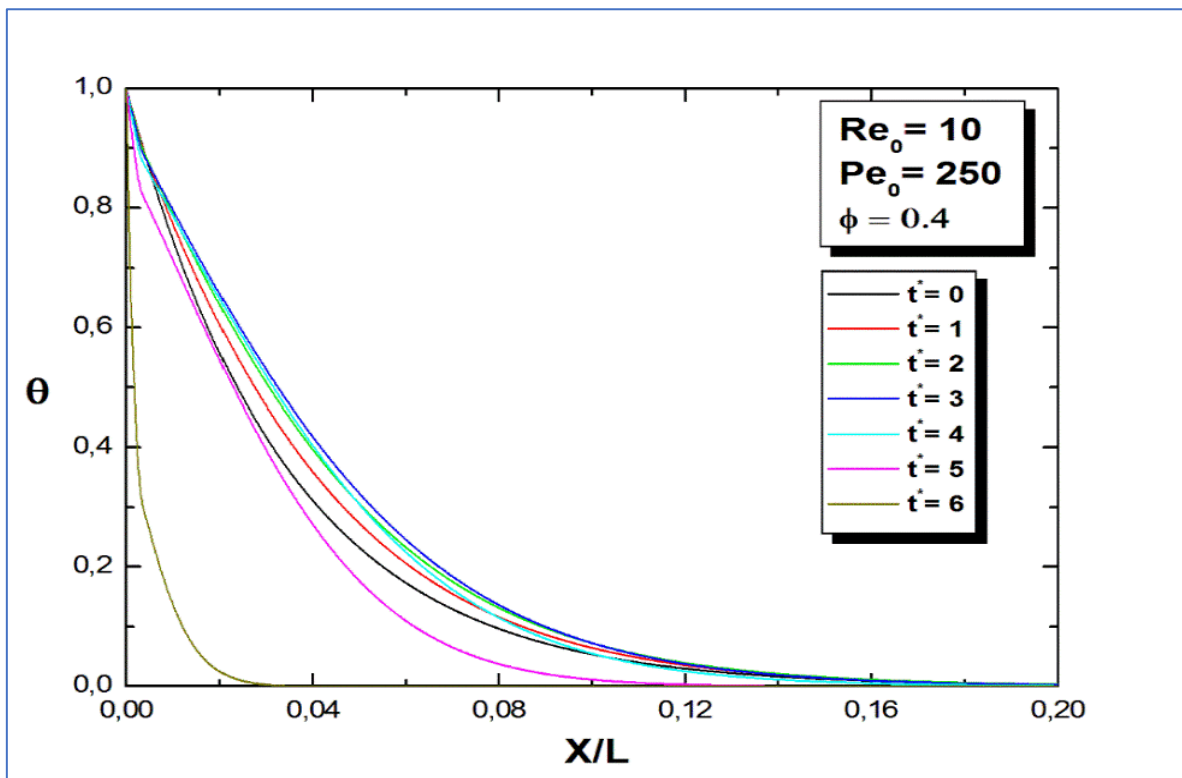


Figure 3.10 : Répartition longitudinale de la température.

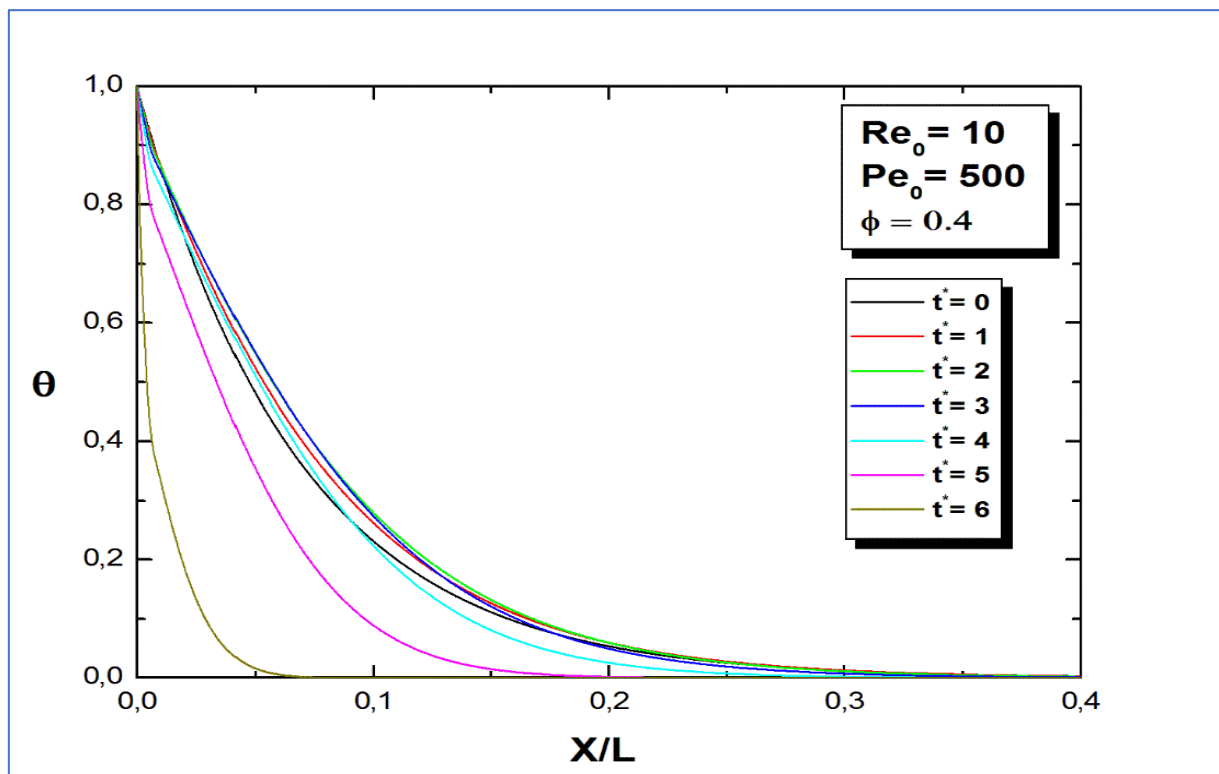


Figure 3.11 : Répartition longitudinale de la température.

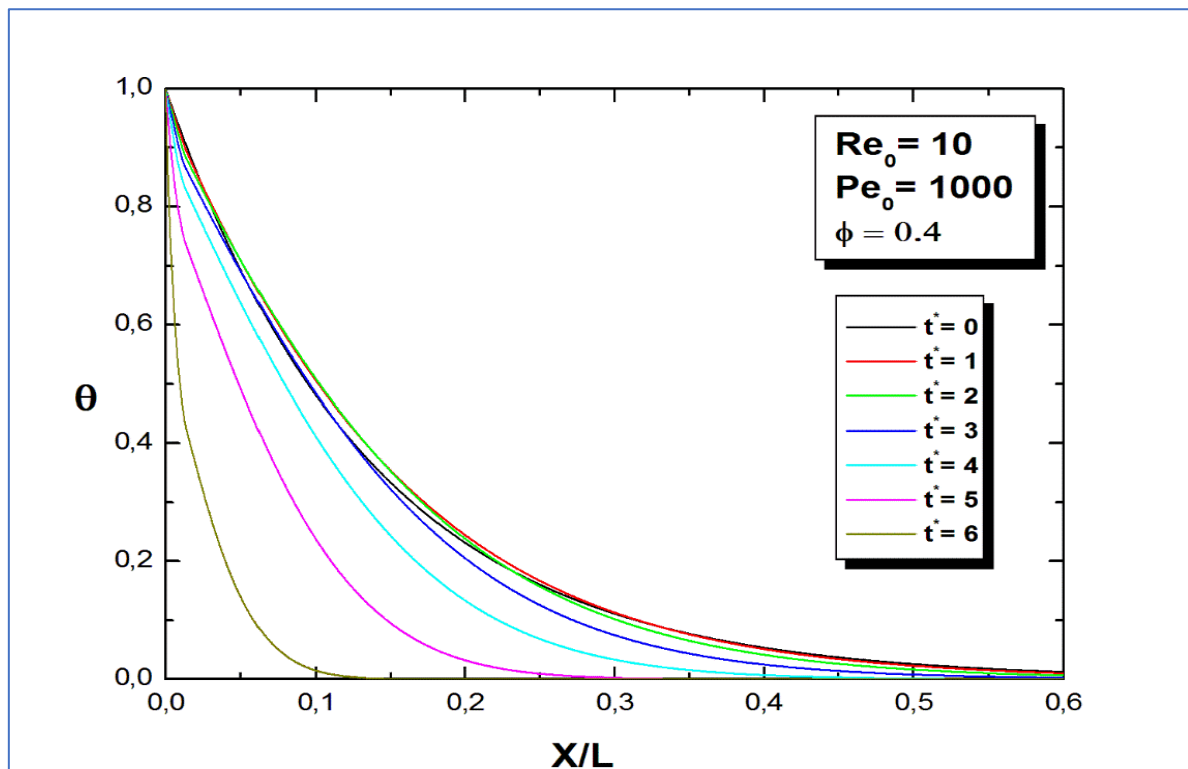


Figure 3.12 : Répartition longitudinale de la température.

3.5 Coefficient globale de transfert de chaleur

De même, les figures 3.13, 3.14, 3.15, et 3.16 montrent la variation du coefficient global de transfert de chaleur en fonction de la longueur adimensionnelle de la canalisation pour une valeur précisée de porosité $\Phi = 0.4$, de nombre de Reynolds $Re_0 = 10$ et pour des nombres de Peclet de l'ordre de $Pe_0 = 100; 250; 500$ et 1000 . La comparaison entre les quatre figures pour différentes valeurs du nombre de Peclet montre clairement l'effet du nombre de Peclet. En effet, au départ il y a une diminution du coefficient de transfert de chaleur due au fait que la valeur l'épaisseur du dépôt de paraffine est maximale, cette dernière va construire une couche isolante qui minimisera le transfert de chaleur, par la suite ce coefficient croît le long de la distance du pipeline car l'épaisseur de la couche de paraffine déposée décroît après le pic. Par ailleurs, pour des faibles valeurs de Peclet, le transfert de chaleur varie pour une petite distance de 0 à $0,08$ le long du pipeline du fait que l'écoulement est long et le bouchage ce fait à une courte distance (à l'entrée de la conduite). Par contre, pour des valeurs élevées de Peclet cette variation du coefficient de transfert se fait à une distance très grande allant jusqu'à $0,6$; ceci est due au fait que la vitesse de l'écoulement est rapide et le transfert de chaleur se fait le long de la conduite. En outre, plus le nombre de Peclet augmente plus la quantité de cristaux de paraffine augmente et ceci à cause de la croissance de transfert de chaleur par convection forcée le long de la conduite.

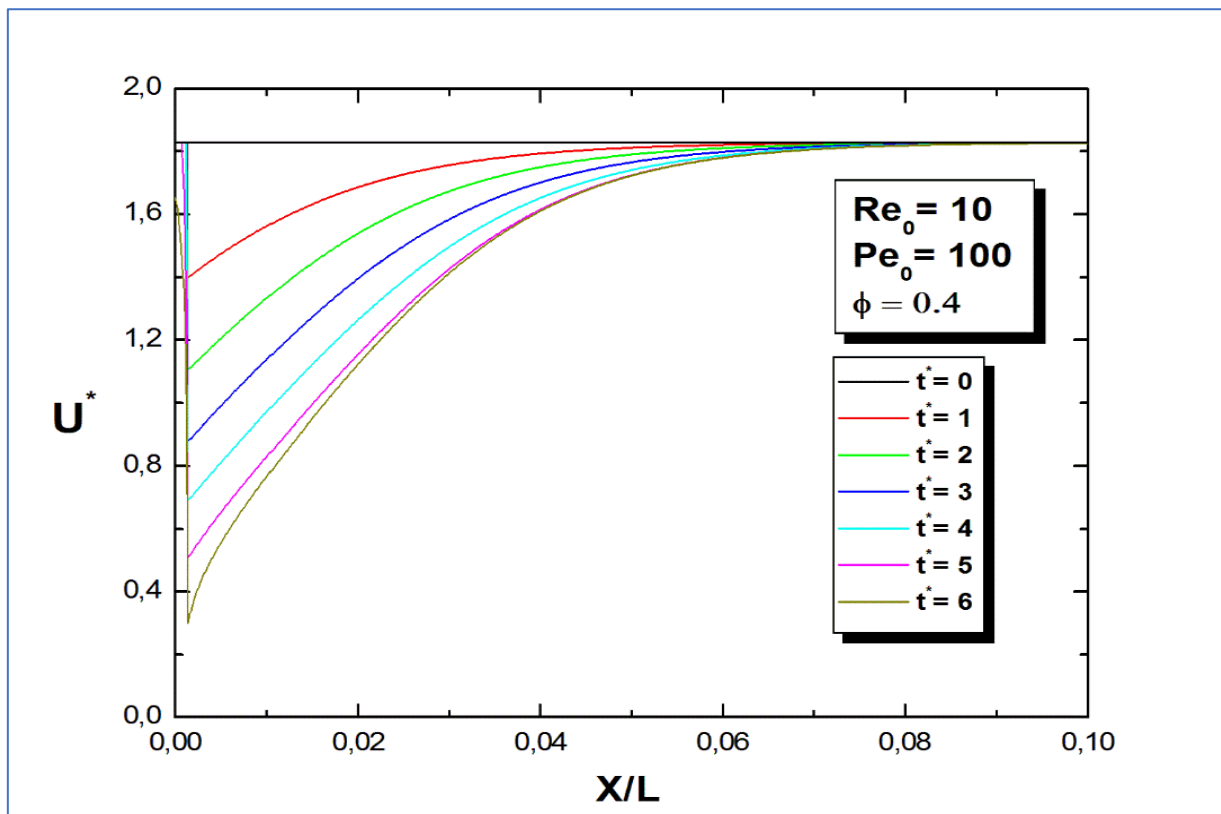


Figure 3.13 : Répartition longitudinale du coefficient globale de transfert de chaleur.

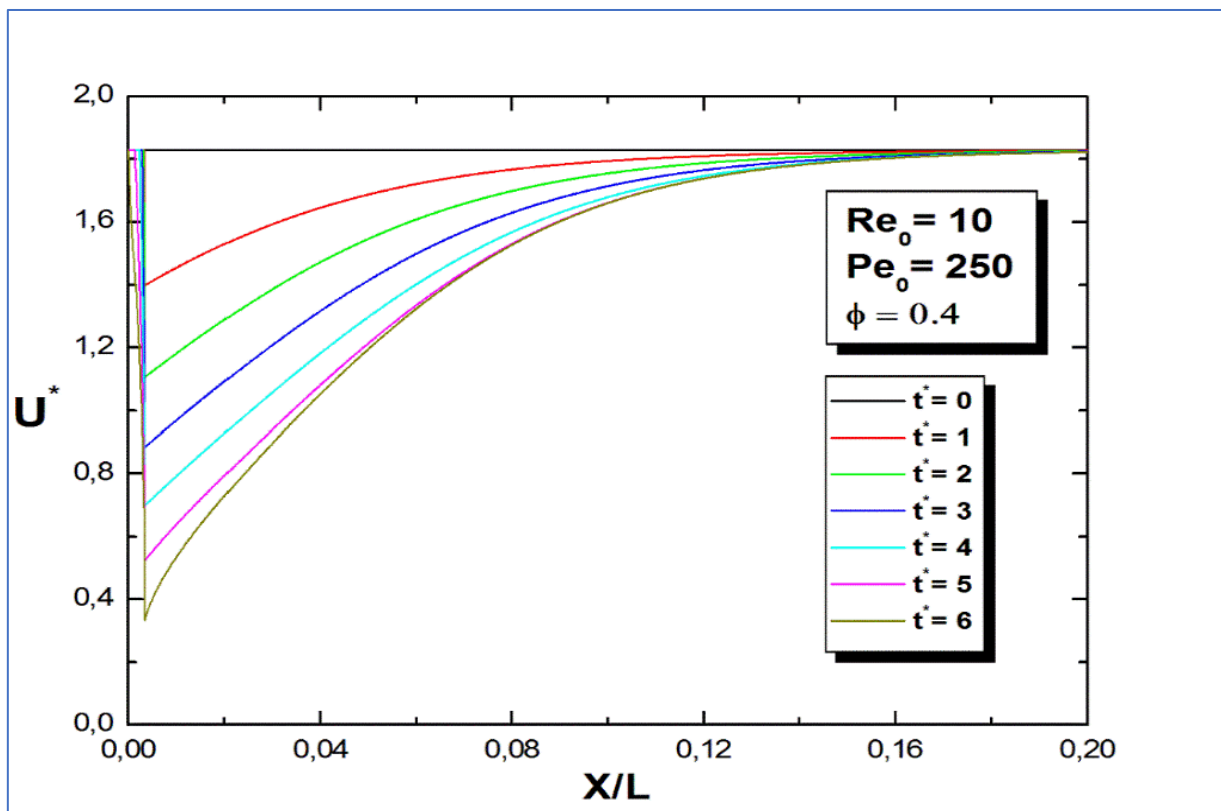


Figure 3.14 : Répartition longitudinale du coefficient globale de transfert de chaleur.

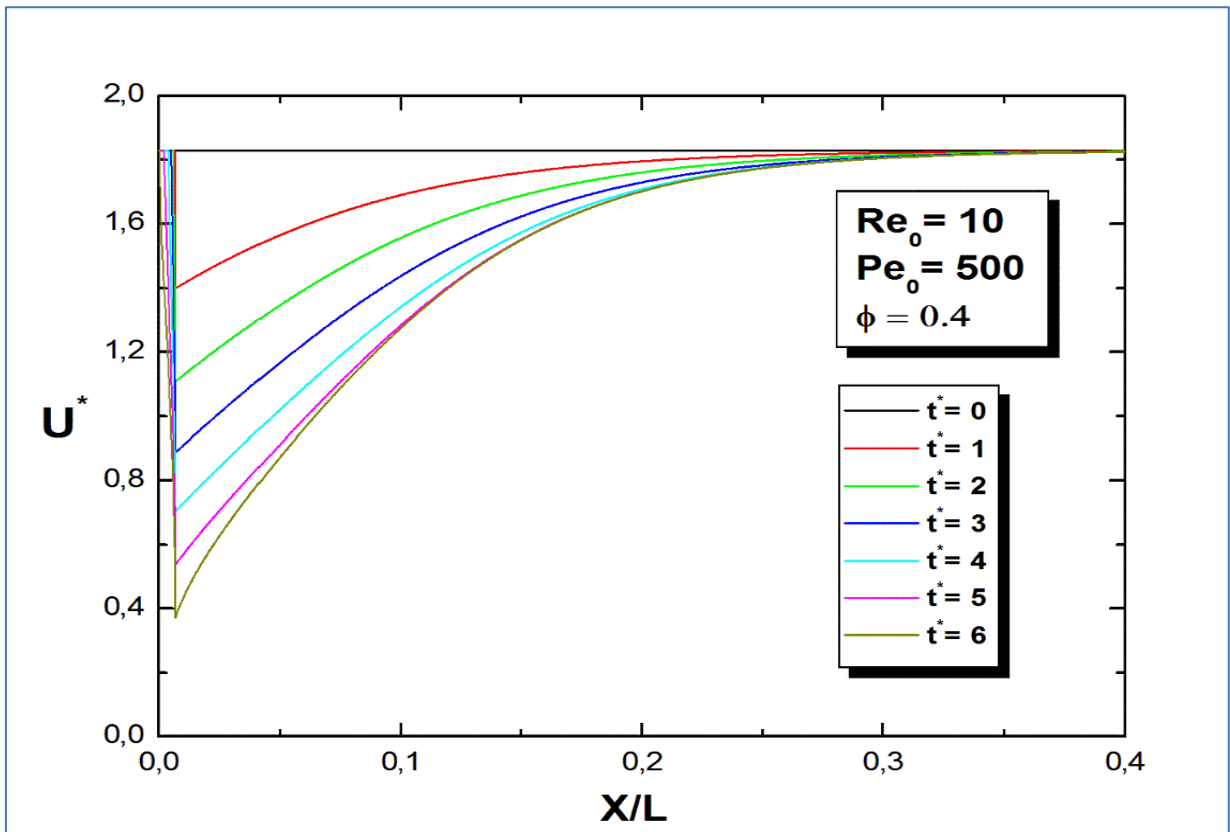


Figure 3.15 : Répartition longitudinale du coefficient globale de transfert de chaleur.

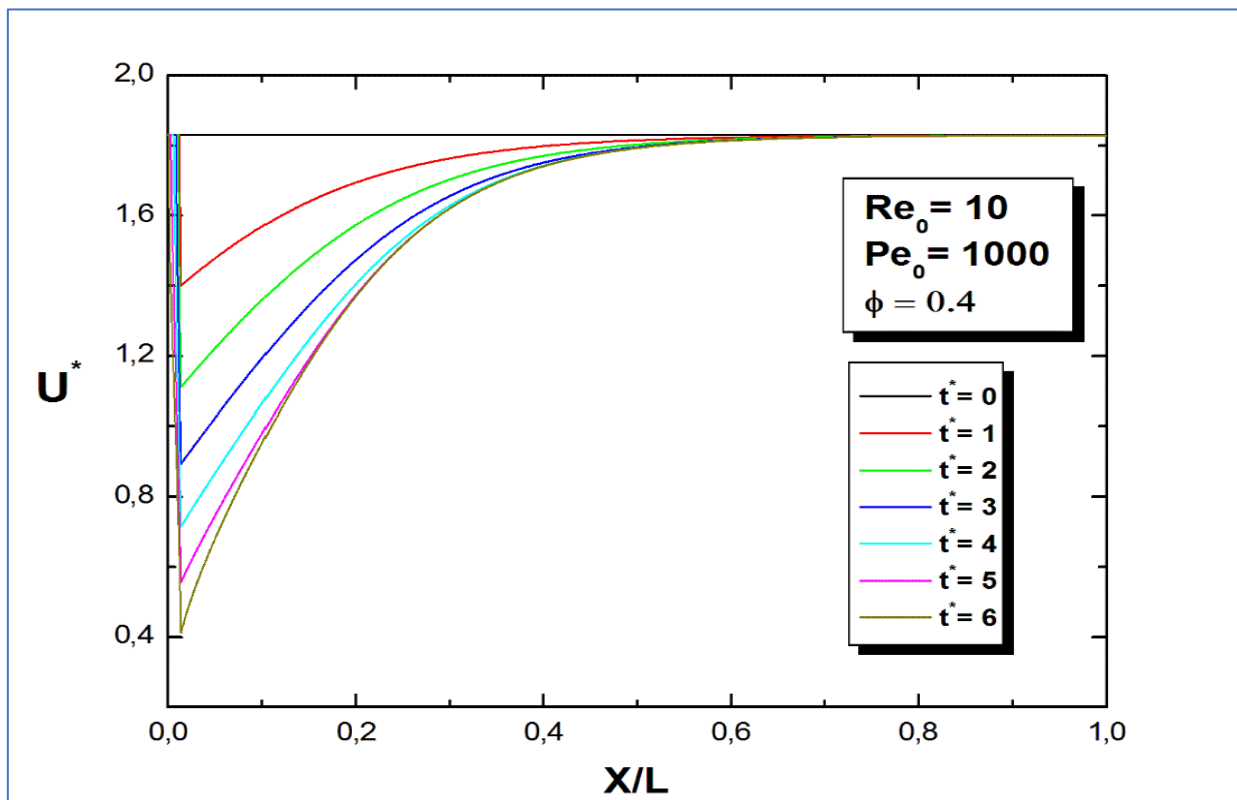


Figure 3.16 : Répartition longitudinale du coefficient globale de transfert de chaleur.

3.6 La pression

Les figures 3.17, 3.18, 3.19 et 3.20, montre la variation longitudinale de la pression pour des nombres de Peclet $Pe_0 = 100; 250; 500$ et 1000 . Ainsi, nous constatons une chute linéaire de la pression au début (car l'écoulement est ascendant et à $t^* = 0; \delta^*(0) = 0$ c.à.d. pas de dépôt de paraffine), et tend vers une forme très aplatie pour des temps maximums. En effet, on remarque une chute de la pression dans le temps telle qu'elle ne sera pas suffisante pour acheminer le produit. A cause sans doute de la quantité de paraffine déposée.

L'influence de transfert de chaleur (par convection forcée) sur l'évolution longitudinale de la pression, qui correspondant respectivement aux nombres de Peclet $Pe_0 = 100; 250; 500$ et 1000 , est plus accentuée. En effet, par exemple pour les faibles valeurs nombre de Peclet ($Pe_0 = 100$ et 250) nous observons clairement une chute rapide de la pression à cause de l'obstruction formée juste à l'entrée de la conduite. Par contre pour des nombres élevés du Peclet $Pe_0 = 1000$, on remarque une chute de la pression progressive dans le temps pour des longues distances le long du pipeline. En conséquence, cette chute de pression va causer l'arrêt de l'écoulement de fluide transporté.

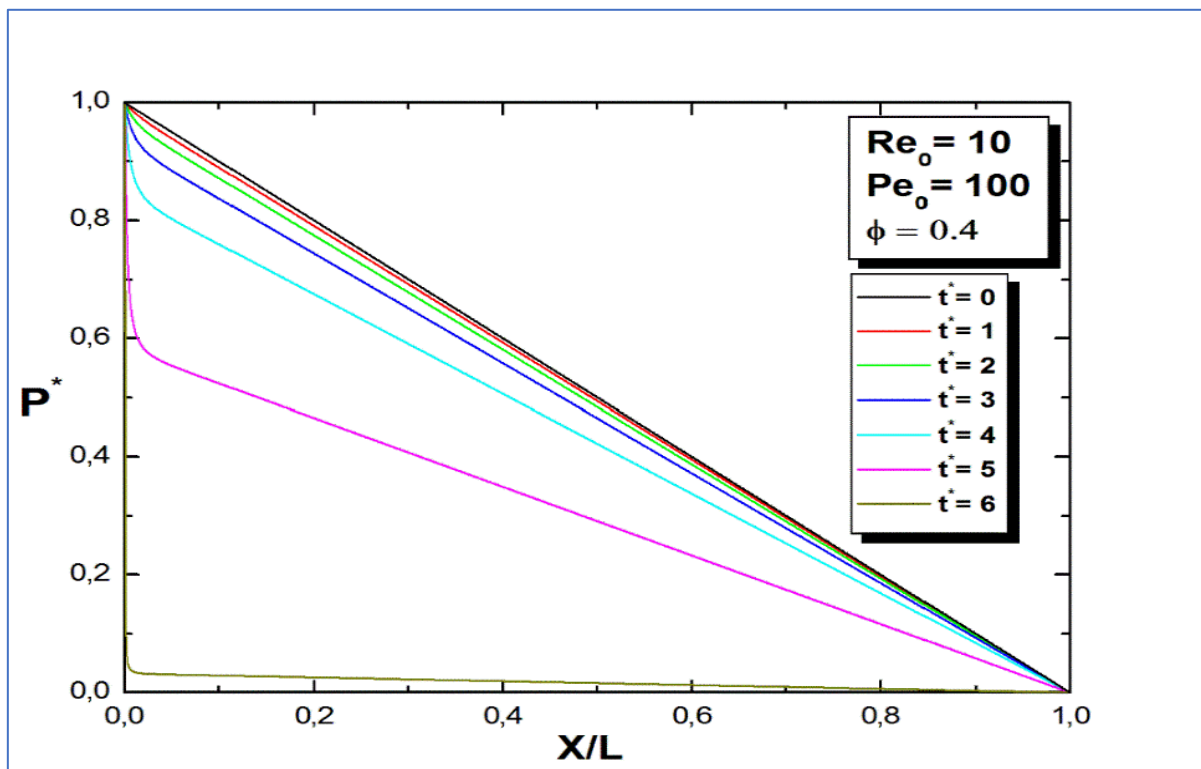


Figure 3.17: Répartition longitudinale de la pression.

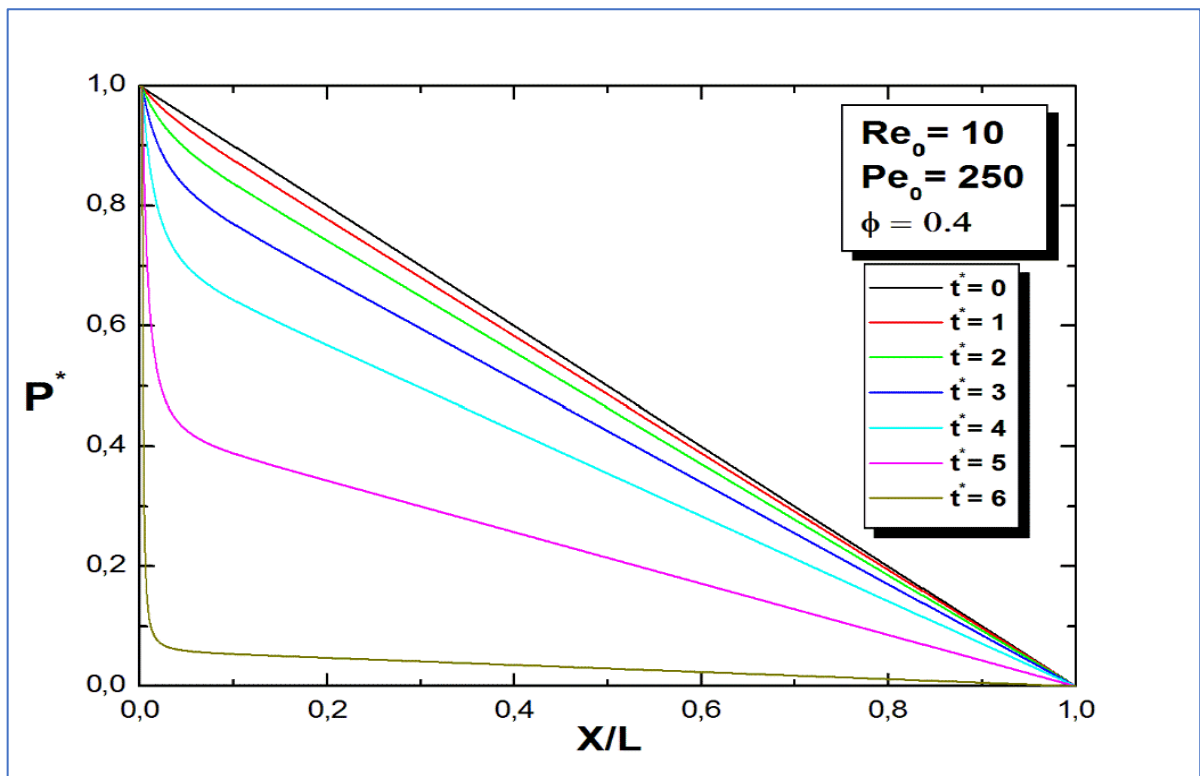


Figure 3.18: Répartition longitudinale de la pression.

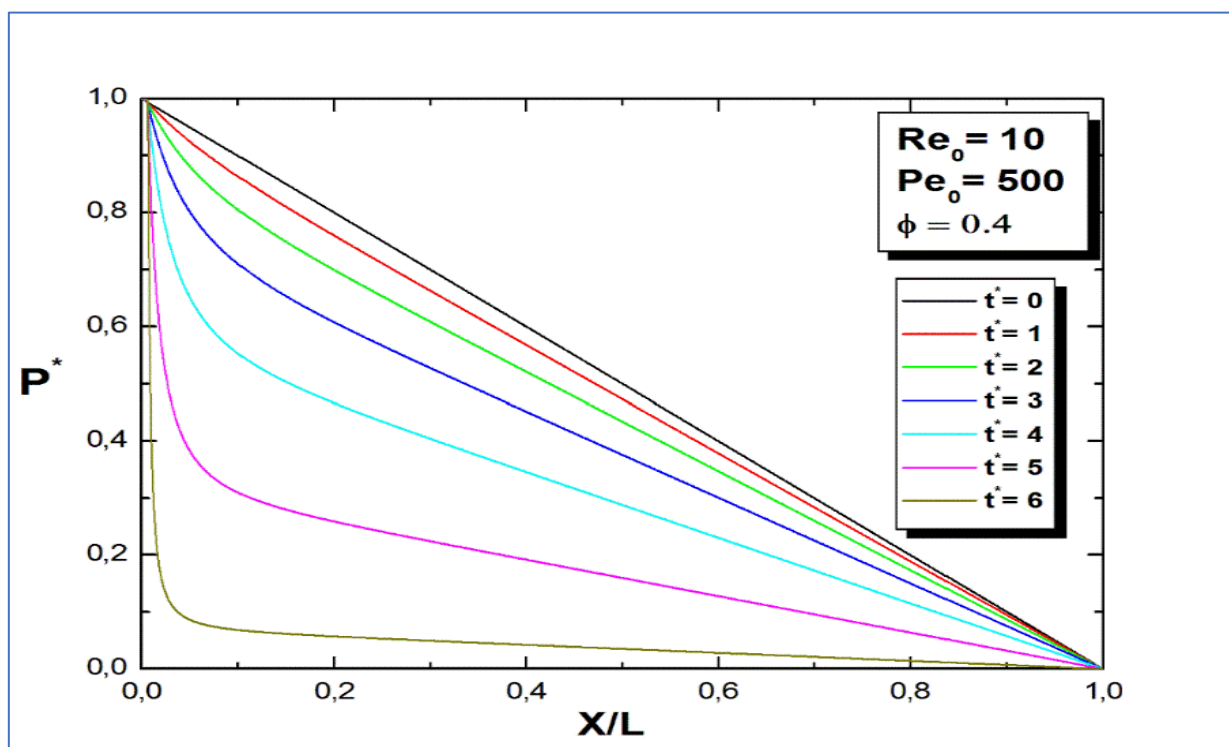


Figure 3.19: Répartition longitudinale de la pression.

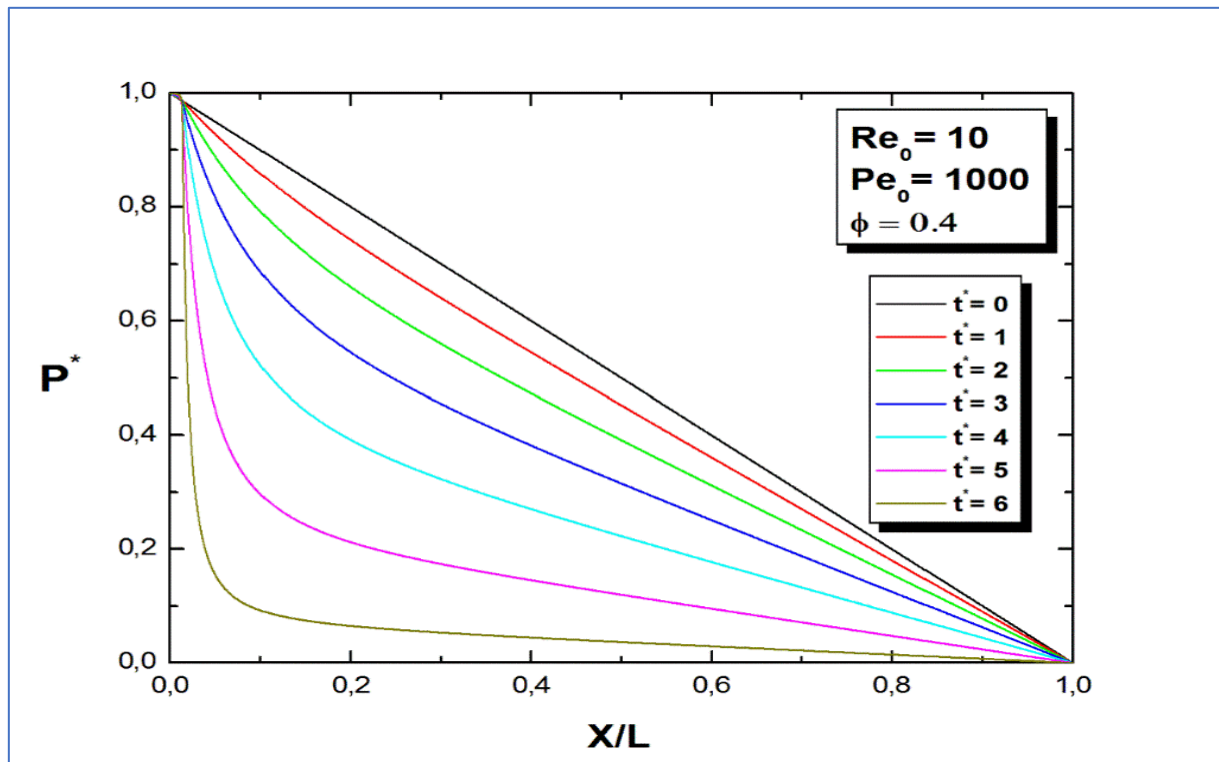


Figure 3.20: Répartition longitudinale de la pression.

3.7 Le débit

Sur la figure 3.21, nous avons le tracé de la variation du débit en fonction du temps adimensionnel pour des nombres de Peclet de l'ordre de ($Pe_0 = 100; 250; 500$ et 1000). On observe une décroissance du débit en fonction du temps jusqu'à l'obstruction complète de la conduite ($t^* = 6$). L'impact de nombre de Peclet sur l'évolution de débit pour un nombre élevé ($Pe_0 = 1000$) est linéaire, et prend la forme d'une parabole pour une faible valeur de ce nombre ($Pe_0 = 100$). En effet, l'évolution croissante de l'épaisseur de paraffine déposée sur la paroi du pipeline va construire un obstacle à l'écoulement de fluide visqueux. De plus, pour les faibles valeurs de nombre de Peclet l'écoulement est lent et, de ce fait, l'influence de l'épaisseur de paraffine sur la vitesse est petite, en conséquence l'évolution de débit est faible au début, mais elle est bien observée pour un temps avancé ($t^* \geq 4$) (début de bouchage). Par contre, pour un nombre de Peclet élevé, on remarque que l'influence de l'accumulation de paraffine sur l'évolution du débit est dès le début et ceci est due au fait que la vitesse est grande pour ce cas, elle est donc sensible à cet obstacle dès les premiers temps, et cette influence se traduit par la décroissance progressive du débit.

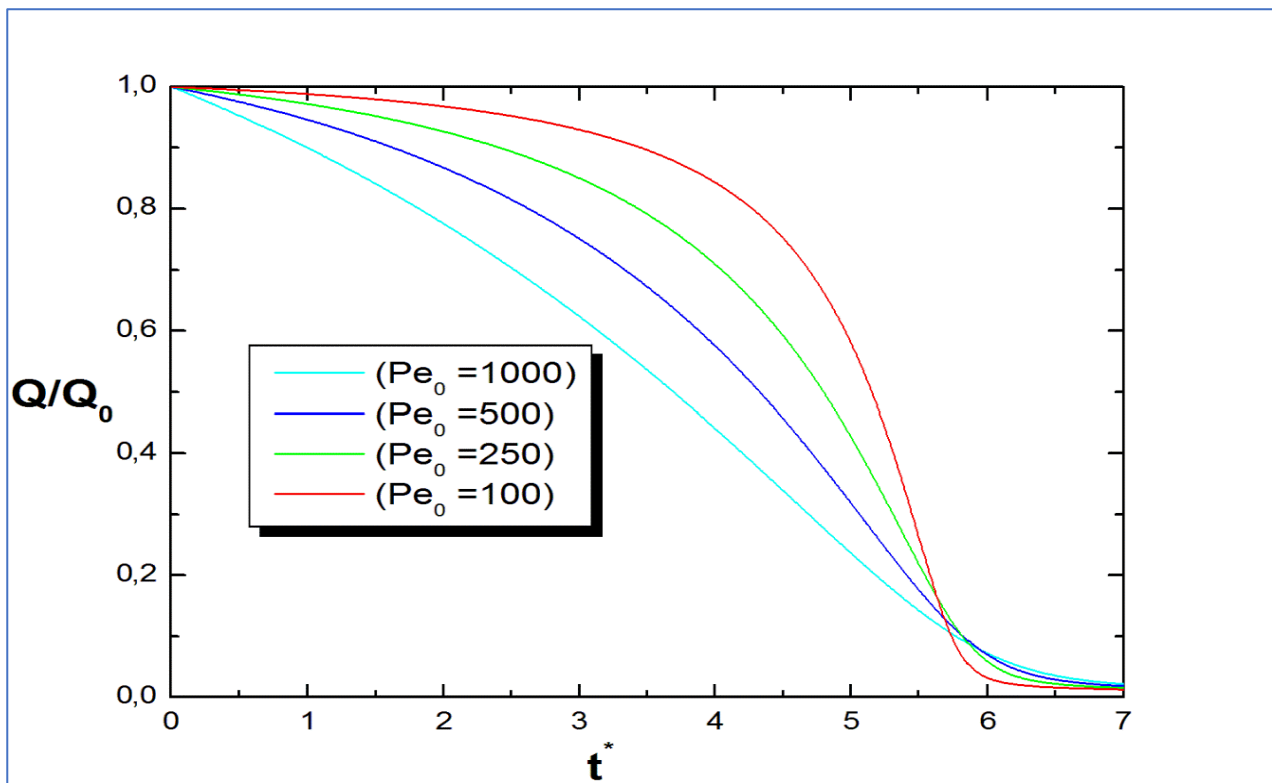


Figure 3.21 : Variation du débit en fonction du temps.

3.8 Le Peclet

Sur la figure 3.22, nous avons le tracé de l'évolution du nombre de Peclet en fonction du temps. Sur cette figure, pour des faibles valeurs de Peclet (soit $Pe_0 = 100$ et 250) nous remarquons une évolution quasi-statique jusqu'à $t^* = 5$, après ce temps on remarque une décroissance du nombre de Peclet. Mais, pour une valeur élevée de nombre de Peclet ($Pe_0 = 1000$) on observe une chute linéaire dès le départ jusqu'à $t^* = 6$. Cette décroissance est due à l'accumulation de paraffine, car l'accumulation de paraffine dans le pipeline va entraîner la diminution de la vitesse de l'écoulement, et cette diminution de la vitesse va baisser le transfert de chaleur par convection forcée. En conséquent, la convection forcée reste comme mode principal de transfert de chaleur responsable de la formation du dépôt de paraffines en pipeline.

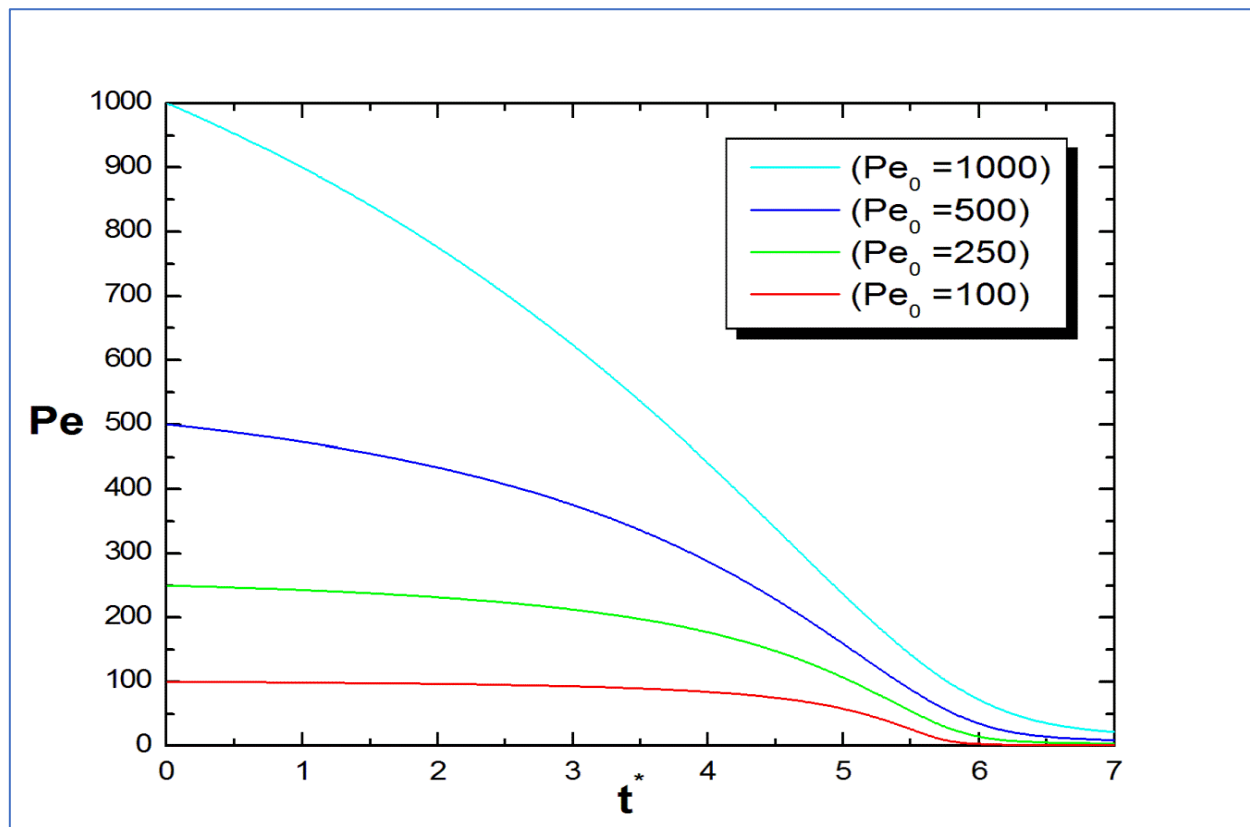


Figure 3.22: Variation du peclet en fonction du temps.

Conclusion Générale

Le travail de recherche mené au cours de ce mémoire a eu pour but d'apporter des éléments permettant de mieux prédire le problème des dépôts de paraffine dans les pipelines durant le transport d'un fluide visqueux chargé de paraffine et de développer un outil numérique approprié.

Nous avons, proposé d'utiliser la diffusion moléculaire comme mécanisme responsable de la création du dépôt, comme cela est classiquement proposé dans la littérature.

Un modèle hydrodynamique basé sur cette approche qualitative a été mis au point puis implémenté numériquement. Ce modèle est un couplage subtil entre la dynamique de l'écoulement, l'équation de transfert thermique et le transfert de masse représenté par l'équation de Fick.

Cette étude a considéré l'écoulement laminaire ascendant d'un fluide visqueux chargé de paraffine dans un pipeline, avec une analyse détaillée des phénomènes de transfert de chaleur et transfert de masse.

La diffusion moléculaire est caractérisée par un gradient de la température qui guide principalement le phénomène de déposition de paraffine.

Les résultats obtenus, ont montré une influence accentuée du nombre de Peclet sur l'évolution des paramètres d'écoulement. La convection forcée reste comme mode principal de transfert de chaleur responsable de la formation du dépôt de paraffines au cours du transport des fluides visqueux chargés de paraffine par pipeline.

Le développement d'un modèle de prédiction de formation de dépôt universel s'avère alors indispensable. Cependant, les modèles existants parviennent rarement à être en bon accord avec les données expérimentales puisqu'il reste encore des inconnues concernant les paramètres d'entrées de ces modèles et en particulier le coefficient de diffusion moléculaire.

L'amélioration de la modélisation de la formation de dépôt nécessite une compréhension approfondie de la structuration des fluides chargés des paraffines et notamment des n-paraffines à des échelles allant du nanomètre (molécules) à quelques millimètres (dépôt) en passant par le micromètre (cristaux).

Bibliographie

Abass A. Olajire , “ Review of wax deposition in subsea oil pipeline systems and mitigation technologies in the petroleum industry”, Chemical Engineering Journal Advances , 100104 (2021)

Ali Agha Hamza. “ Cour initiation aux transferts thermiques”, université Abderrahmane mira Bejaia, (2019).

Boucetta, R., M. Kessal, “Modélisation du dépôt de paraffine lors d’un écoulement ascendant de pétrole”, The Canadian Journal of Chemical Engineering, Vol 88 Issue 2, pp.190-199, (2010).

Brid, R. B., R. C. Armstrong, et O. Hassager, “Dynamics of polymeric liquids”, Wiley, (1987).

Brown, T. S., V. G. Niesen, et D. D. Erickson, “Measurement and Prediction of the Kinetics of Paraffin Deposition”, Paper SPE 26548 presented at the 68th Annual Technical Conference and Exhibition of the Society of Petroleum Engineers, Houston, TX October 3-6 (1993).

Burger, E. D., T. K. Perkins et J. H. Striegler, “Studies of wax deposition in the trans- alaska pipeline”, J. Pet. Technol, 33, 1075-1086 (1981).

Craddock, H. A., K. Mutch, K. Sowerby, M. Johnson, S. Mcgregor, J. Cook and C. Strachan, “The application of wax dissolver in the enhancement of export line cleaning”, Society of Petroleum Engineers, Oilfield Chemistry in Houston, USA, (2007).

Danial, S., et J. Roberts, “The cliff head field development-flow assurance and production chemistry challenges in a marginal field context”, SPE 115612, (2008).

Démidovith, B., et I. Maron, “Eléments de calcul numérique”, Editions Mir Moscou (1987).

Ding, J., J. Zhang, H. Li, F. Zhang, et X. Yang, “Flow behavior of daqingwaxy crude oil under simulated pipelining conditions”, Energy & Fuel, 20, 2531-2536, (2006).

Dongxu Sun., Zuoliang Zhu., Zhiyong Hu., et Ming Wu, “Experimental and theoretical study on wax deposition and the application on a heat insulated crude oil pipeline in Northeast China”, Oil & Gas Science and Technology volume 75(2020)

Fadi Alnaimat., et Mohammed Ziauddin: “Wax deposition and prediction in petroleum pipelines”, Journal of Petroleum Science and Engineering, 0920-4105,(2019)

Grove, G., G. Saether, et G. Estrada, “Employing Flow Assurance in an Offshore Feed Study”, SPE 116254, (2008).

Hamouda, A. A., et S. Davidsen, “An approach for simulation of paraffin deposition in pipelines as a function of flow characteristics with a reference to teesside oil pipeline”, Society of Petroleum Engineers, SPE 28966, (1995).

Huang, Q., J. Wang, et J. Zhang, “Physical properties of wax deposits on the walls of crude pipelines”, Pet Sci, 6, 64-68, (2009).

Jessen, F. W., J. N. Howell, “Effect of flow rate on paraffin accumulation in plastic, steel, and coated pipe”, Petroleum Transactions, AIME, 80-84 (1958).

Kenneth. D., et Lesinwiabu, “Development of model and flow loop for predicting wax deposition in oil pipelines under lamina flow regime”, American Journal of Engineering Research, Vol.7, Issue-5, pp 414-424 (2018).

Lund,HJ. “Investigation of paraffin deposition during single phase flow in pipelines”, M.Sc. Thesis, The University of Tulsa, pp 158 (1998).

Manfield, P., W. Nisbet, et J. Balius, “Understanding and mitigating wax deposition in a deepwatersubsea gas/gondensateflowline”, OTC 188341, (2007).

Matlach, W. J., et M. E. Newberry, “Paraffin deposition and rheological evolution of high wax content altamontcrude oils”, SPE 11851, (1983).

Maurel, P., P. Gateau, F. Brucey, A. Barbey, N. Bonnet, et E. Peuriere, “ Bruts paraffiniques, maîtrise des dépôts”, Tests en Boucle BHR Group Multiphase, 99, (1999).

Magnini, M., et O.K. Matar, “Fundamental Study of Wax Deposition in Crude Oil Flows in a Pipeline via Interface-Resolved Numerical Simulations”, Industrial & Engineering Chemistry Research, (2019).

Martins, O., et P. T. Elijah, “Dynamic modeling and prediction of wax deposition thickness in crude oil pipelines”, Journal of King Saud University – Engineering Sciences, (2020).

Mehrotra, K. A, S. Haj-Shafiei and S. Ehsani, “Predictions for wax deposition in a pipeline carrying paraffinic or ‘waxy’ crude oil from the heat-transfer approach”, Journal of Pipeline Science and Engineering, 428–435, (2021)

Mustapha Bordjane. “Mode de transfert de chaleur cours et exercices”, université d’Oran Mohamed Boudiaf, (2017).

Porto. T. R. N. et A. G. B. Lima, “Transient flow of waxy oil in a circular pipeline: modeling and simulation”, Holos, N 33, Vol. 01pp. 155-173, (2017).

QingMiao, “ Numerical Study on the Effect of Wax Deposition on the Restart Process of a Waxy Crude Oil Pipeline”, China University of Petroleum ; Volume, Article ID 973652, 10 pages (2012)

Said Hamdaoui. “Cours des transferts thermiques”, Université Sidi Mohamed Ben Abdellah Ecole Supérieure de technologie –Fès”, (2020).

Schoppa, W., S. Jayawardena, T. Agbaje, D. Ebere, et S. Lyer, “Bonga-flow assurance benchmarking via field surveillance”, OTC, 18949, (2007).

Svendsen, J. A., “Mathematical modeling of wax deposition in oil pipeline systems”, AIChE J. 39, 1377-1388 (1993).

Souza Mendes, P. R., and S. L. Braga, “Obstruction of pipelines during the flow of waxy crude oils”, Trans. ASME, J. Fluids Eng. 118, 722-727 (1996).

Theyab. M. A. “Experimental methodology followed to evaluate wax deposition process”, Journal of petroleum and environmental biotechnology, Vol. 09 Issue 1pp 1-8 (2018).

Wei, L., D. Li, C. Liu, Z. He and Y. Ge, “Study of wax deposition pattern of high wax-bearing crude oil based on Cold Finger experiment”, Processes, 10(1) 103, (2022)

Zhenyu Huang, Sheng Zheng, H. Scott Fogler, “Wax Deposition: Experimental Characterizations, Theoretical Modeling, and Field Practices”, (2015)

Site web

Pour les Figures (Chapitre 1)

Figure1.1 <https://constructionreviewonline.com/wp-content/uploads/2019/11/Subsea-pipeline.jpg>

Figure 1.1 https://static.latribune.fr/full_width/1797616/gaz-pipeline.jpg

Figure1.5 <https://cdn5.vectorstock.com/i/1000x1000/68/09/methods-heat-transfer-vector-33546809.jpg>

Figure1.8 https://parlonssciences.ca/sites/default/files/2021-01/Courants_de_convection.png

Annexe

Détermination du coefficient global de transfert de chaleur :

Dans le cas de problèmes mono ou bidimensionnels la réalisation des modèles électriques peut se faire très simplement. En appliquant la méthode d'analogie électrique (figure.1) :

$$\text{On sait que : } q = \frac{T_b - T_0}{Re_q} = 2\pi RL U (T_b - T_0) \quad (*)$$

$$\text{Avec : } Re_q = R_1 + R_2 + R_3 + R_4$$

$$R_1 = R \text{ convection} = \frac{1}{2\pi L(R-\delta)h_i}$$

$$R_2 = R \text{ conduction} = \frac{1}{2\pi k_d L} \int_{R-\delta}^R \frac{dr}{r} = \frac{1}{2\pi k_d L} \ln \frac{R}{(R-\delta)}$$

$$R_3 = R \text{ conduction} = \frac{1}{2\pi k_w L} \int_R^{R_0} \frac{dr}{r} = \frac{1}{2\pi k_w L} \ln \frac{R_0}{R}$$

$$R_4 = R \text{ convection} = \frac{1}{2\pi L R_0 h_0}$$

$$Re_q = \frac{1}{2\pi L(R-\delta)h_i} + \frac{1}{2\pi k_d L} \ln \frac{R}{(R-\delta)} + \frac{1}{2\pi k_w L} \ln \frac{R_0}{R} + \frac{1}{2\pi L R_0 h_0}$$

$$Re_q = \frac{1}{2\pi RL} \left[\frac{1}{(1-\delta^*)h_i} + \frac{R}{k_d} \ln \frac{1}{(1-\delta^*)} + \frac{R}{k_w} \ln \frac{R_0}{R} + \frac{R}{R_0 R_0} \right]$$

Par identification avec l'équation (*) on obtient :

$$U = \left[\frac{R}{R_0} \frac{1}{h_0} + \frac{R}{k_w} \ln \left(\frac{R_0}{R} \right) + \frac{R}{k_d} \ln \left(\frac{1}{1-\delta^*} \right) + \left(\frac{1}{1-\delta^*} \right) \frac{1}{h_i} \right]^{-1}$$

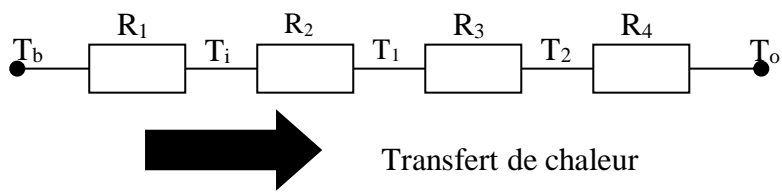
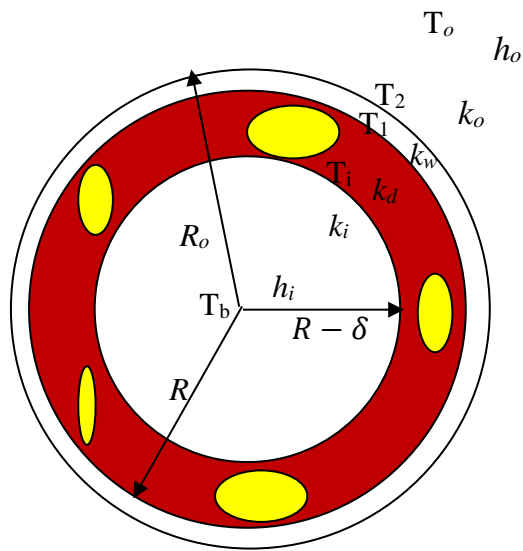


Figure 1: Analogie électrique.