République Algérienne Démocratique et Populaire Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la recherche Scientifique



UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI OUZOU FACULTE DU GENIE DE LA CONSTRUCTION DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme de MASTER

Option : Energétique

<u>Thème</u>

Etudes Expérimentale et Numérique du Transport de Particules Solides dans une Conduite Horizontale

<u>Réalisé par :</u>

M^{elle}. CHEKINI ZAKIA M^{elle}. MOKRANI TASSADIT Encadré par :

M. ZOUAOUI SALAH M. DJEBBOURI HASSENE

Promotion 2013/2014

Remerciement

Louange à ALLAH, que le salut et la bénédiction soient sur son prophète.

On tient d'abord à exprimer toute notre gratitude à nos promoteurs M. ZOUAOUI SALAH et M. DJEBOURI HASSENE pour leur disponibilité, leur gentillesse et surtout pour la confiance qu'il ont placée en nous pour donner le meilleur de nous même.

On souhaite témoigner toute notre reconnaissance à M. BEHTANI, M. TIACHACHT, M. MENGUELTI et à tout les enseignants ayant contribué et participé à notre formation.

Nous présentons nos respects et nos sincères remerciements aux membres du jury qui ont accepté d'évaluer notre travail.

Nous tenons à remercier tous ceux qui ont contribué de prés ou de loin à la réalisation de ce travail.

Dédicace

A mes très chers parent auxquels je dois beaucoup.

à mes sœurs et mon frère

à toute ma famille

à mon mari et toute ma belle famille

à tout mes amis

je dédie ce travail

ZAKIA

Dédicace

A mes très chers parent auxquels je dois beaucoup.

à mes sœurs et mes frères

à toute ma famille

à tout mes amis

je dédie ce travail

TASSADIT

Liste des figures

Figure	Désignation	Page
Fig. (I.1)	Ecoulement laminaire	4
Fig. (I.2)	Diagramme de Moody	5
Fig. (I.3)	Ecoulement turbulent	6
Fig. (I.4)	Effet de la rugosité dans une conduite cylindrique	7
Fig. (I.5)	Ecoulement d'un fluide parfait dans une conduite cylindrique	8
Fig. (I.6)	Ecoulement d'un fluide visqueux dans une conduite cylindrique	9
Fig. (III.1)	Le modèle à deux couches	20
Fig. (III.2)	Organigramme de la résolution des équations du cas d'un lit stationnaire	26
Fig. (IV.1)	Schéma du banc d'essai	30
Fig. (IV.2)	Particules solides utilisées	30
Fig. (V.3a)	Gradient hydraulique en fonction de la vitesse de mélange - Effets de la concentration de l'Alumine 06 mm -	33
Fig. (V.3b)	Gradient hydraulique en fonction de la vitesse de mélange - Effets de la taille pour $C = 5\%$ -	34
Fig. (V.3c)	Gradient hydraulique en fonction de la vitesse de mélange - Effets de la taille pour C = 10% -	34
Fig. (V.3d)	Gradient hydraulique en fonction de la vitesse de mélange - Effets de la densité pour $C = 5\%$ -	35
Fig. (V.3e)	Gradient hydraulique en fonction de la vitesse de mélange - Effets de la densité pour $C = 10\%$ -	35
Fig. (V.4a)	Gradient hydraulique en fonction de la vitesse de mélange - Effets de la concentration du Verre 16mm -	36
Fig. (V.4b)	Gradient hydraulique en fonction de la vitesse de mélange - Effets de la concentration du Verre 10mm -	37
Fig. (V.4c)	Gradient hydraulique en fonction de la vitesse de mélange - Effets de la concentration du Verre 5mm-	38
Fig. (V.4d)	Gradient hydraulique en fonction de la vitesse de mélange - Effets de la concentration du l'Alumine 15mm -	39
Fig. (V.5)	Gradient hydraulique en fonction de la vitesse de mélange - Effets de la taille pour C=10% -	40
Fig. (V.5a)	Gradient hydraulique en fonction de la vitesse de mélange - Effets de la taille pour C=5% -	41
Fig. (V.6)	Gradient hydraulique en fonction de la vitesse de mélange - Effets de la densité pour C=5% -	42
Fig. (V.6a)	Gradient hydraulique en fonction de la vitesse de mélange - Effets de la densité pour C=10% -	42

Fig.(V.1A)	Gradient hydraulique en fonction de la vitesse de mélange	43
Fig.(V.2A)	Gradient hydraulique en fonction de la vitesse de mélange	44
Fig.(V.3A)	Gradient hydraulique en fonction de la vitesse de mélange	44
Fig.(V.4A)	Gradient hydraulique en fonction de la vitesse de mélange	45
Fig.(V.5A)	Gradient hydraulique en fonction de la vitesse de mélange	45
Fig.(V.1V)	Gradient hydraulique en fonction de la vitesse de mélange	46
Fig.(V.2V)	Gradient hydraulique en fonction de la vitesse de mélange	47
Fig.(V.3V)	Gradient hydraulique en fonction de la vitesse de mélange	47
Fig.(V.4V)	Gradient hydraulique en fonction de la vitesse de mélange	48
Fig.(V.5V)	Gradient hydraulique en fonction de la vitesse de mélange	59
Fig.(V.6V)	Gradient hydraulique en fonction de la vitesse de mélange	50

Nomenclature

Symboles	désignation	Unité
Α	Section à l'entrée	m^2
A _b	Section de la couche basse	m ²
A _h	Section de la couche haute	m^2
C _b	Concentration de la couche basse	Kg/m ³
C _h	Concentration de la couche haute	Kg/m ³
Cs	Concentration volumique à l'entrée	Kg/m ³
C _{vd}	Concentration volumétrique fournie par CVD en solide	Sans dimension
Cvt	Concentration volumétrique	Kg/m ³
D	Diamètre de la canalisation	М
Dp	Diamètre des canalisations	Mm
d ₅₀	Diamètre des particules	Mm
F _b	La force agissant sur le fond de la canalisation	Ν
F _{bd}	La force de résistance hydrodynamique	Ν
F _{bL}	La force de résistance hydrodynamique	Ν
F _{bm}	Une force sèche de frottement	Ν
f _b	Coefficient de frottement de la couche du lit	Sans dimension
f _h	Coefficient de frottement de la couche hétérogène	Sans dimension
g	La force de gravitation	m/s ²
h _{w12}	Perte de charge totale entre les sections 1 et 2	Ра
i _f	gradient hydraulique pour l'écoulement liquide	Sans dimension
i _{fl}	Le gradient de pression du fluide	Pa
i _m	Le gradient de pression du mélange	Ра
k	Coefficient de rugosité de la conduite	m
L	Longueur du tube	М
Ν	La somme des forces normales exercé par les particules solides dans le lit sur le mur de canalisation.	Ν
N _w	La composante apparente du poids	N

Nø	La force normale	Ν
Р	Pression du fluide	Pa ou Bar
P _{er}	La perte relative de surpression	Ра
S _b	Périmètre de la couche du lit	М
Sh	Périmètre de la couche hétérogène	М
Si	Périmètre de la ligne qui sépare les deux couches	М
U _b	Vitesse de la couche basse	m/s
$\mathbf{U_h}$	Vitesse de la couche haute	m/s
$\mathbf{U}_{\mathbf{s}}$	Vitesse d'entrée	m/s
V _m	Vitesse moyenne de mélange dans une canalisation	m/s
\mathbf{V}_{\min}	Vitesse minimale de mélange	m/s
V _{ls}	La Vitesse limite de dépôt	m/s
V _t	La vitesse d'arrangement	m/s
$y_{\mathbf{b}}$	Hauteur de la couche basse (lit)	М

ΔΡ ου Η	Perte de charge linéaire	Pa
λ	Coefficient de perte de charge	nombre sans dimension
ρ_l	Masse volumique de l'eau	kg/m ³
μ	Viscosité dynamique du fluide	Pa.s ou Kg/m.s
υ	Viscosité cinématique du fluide	m
3	Rugosité relative	m^2/s^1
Ψ*	paramètre d'arrangement de particules	Sans dimension
μ _s	Coefficient de frottement	Sans dimension
ΔP _m	Perte de pression du mélange	Pa
ΔP_{f}	Perte de pression du fluide	Ра
dP/dx	Différence de pression pour les deux couches	Pa/m ¹
τ_h	L'effort de cisaillement agissant sur le périmètre $\mathbf{S_h}$	N/m ²
τ _b	L'effort de cisaillement agissant sur le périmètre $\mathbf{S_b}$	N/m ²
ρ_s	Densité du solide	Kg/m ³
ρ_L	Densité du liquide	Kg/m ³
Φ	L'angle de frottement interne	degré

Les nombres adimensionnels

- Re: Nombre de REYNOLDS.
- F_r : Nombre de FROUDE.

Fr_{fl}:Nombre de Froude du fluide.

Tables des matières

Introduction	générale 1
	<i>O</i> = = = = = = = = = = = = = = = = = = =

Chapitre I : Rappel sur les pertes de charges dans une conduite

I. Introduction	.2
II. Définition	.2
III. Les pertes de charge linéaires	2
III.1.Calcul de perte de charge	2
III.2.Régime d'écoulement	3
III.2.1.Cas d'un écoulement laminaire	4
III.2.2.Cas d'un écoulement turbulent	.4
IV. La viscosité	.6
V. Dépendance de la température avec la viscosité	6
VI. Notion de rugosité des conduites	6
VII. Equation générale d'écoulement ou équation de Bernoulli	7
VII.1.Cas des fluides parfait (non visqueux)	7
VII.2.Cas des fluides réels (visqueux)	8

VIII.	Conclusion	 9

Chapitre II : Revues bibliographiques sur le transport solide

I. Introduction	10
1. Modèle de Durand et condolios(1952)	.10
2. Modèle de Newitt et autre (1952):	.12

2.1. Le Régime Hétérogène 1 2.2. Régime Coulissant 1	2 2
2.3. La Vitesse limite De Dépôt1	3
2.4. La transition hétérogène contre (le pseudo) transport homogène1	3

3 .Modèle de Gilbert 1960	13
3.1. Le coefficient de traînée de Durand et de Condolios contre le coefficient de réel	e traînée 14
3.2. Le coefficient de traînée de Gibert (1960)3.3. La densité submergée relative en tant qu'élément de l'équation	14 14

4. Modèle de Jufin et de Lopatin 1960	15
4.1. Perte principale de friction	15
4.2. Construction de la corrélation de Jufin - de Lopatin et sa version finale	15
4.3. Vitesse limite De Dépôt (Vitesse critique)	15
5. Modèle de Zandi et Govatos 1967	15
6. Modèle de Turian et de Yuan (1977)	16
7. Modèle de Wilson (GIW)	16
7.1. Perte principale de friction	16
7.1. 1. Observations expérimentales	16
7.1. 2. Construction de la corrélation et de sa version finale	16
8.Modèle de Florent Ravelet	17
II. Conclusion	17

Chapitre III : Présentation et résolution du modèle à deux couches

oduction
oduction1

II. Analyse du modèle à deux couches	18
II.1.Récapitulatif et formulation finale	24
II.1.1. Cas d'un lit stationnaire	24
II.1.1.1. Organigramme	
II.1.2. Cas d'un lit mobile	27
II.1.3. Cas d'un écoulement entièrement suspendu	
-	

Chapitre IV : Etude expérimentale

I. Introduction	.29
II. Description et principe de fonctionnement	29
II.1. Matériels utilisés	.30
II.2. Paramètres de contrôle	.31

Chapitre V : Résultats et discussions

I. Introduction	32
II.L'interprétation des résultats expérimentaux	32
II.1.Effet de la concentration	32
II.2.Effet de la taille	32
II.3.Effet de la densité	32
III. Interprétation des résultats du modèle à deux couches	43
III.1.Particule en Alumine	43
III.2.Particule en Verre	46
IV. Conclusion	51

Conclusion générale

Introduction générale

Dans l'industrie et la nature il existe une grande gamme de matériaux et de fluides. Nous appelons "Transport Solide " le transport de matériaux granulaires. Le transport solide étudie les phénomènes d'érosion, du transport et de sédimentation des solides au sein d'un écoulement liquide. La connaissance à la fois des propriétés de l'écoulement liquide mais aussi celles de la phase solide permet le traitement et l'amélioration de plusieurs procédés industriels (chimiques et minières) et environnementaux (côtiers et fluviaux).

Il existe de nombreuses formules de prédiction de la quantité de solide transporté par un écoulement liquide, mais la compréhension réelle du transport solide au-delà de la simple description pose de nombreuses difficultés. Les formules semi-empiriques permettent d'avoir une approche rapide et globale qui est souvent approximative.

L'objectif de ce travail est d'étudier expérimentalement le transport hydraulique des particules solides dans un liquide en écoulement (eau) à l'intérieur d'une conduite cylindrique horizontale. Premièrement nous nous sommes intéressés à la mesure du gradient hydraulique en fonction de la vitesse du mélange pour différents types de solides. Deuxièmement nous avons procédé à la résolution numérique du modèle de Doron à deux couches . Enfin, nous avons comparé nos résultats expérimentaux à ceux obtenus numériquement.

Ce mémoire comporte cinq chapitres:

Le premier chapitre est consacré aux rappels sur les pertes de charge linéaires dans une conduite. Nous supposerons toujours que le régime permanent est atteint, que la longueur des canalisations est infiniment plus grande que leur section et que la température est constante tout au long de l'écoulement. On admettra également que les canalisations où circulent les liquides seront toujours remplies totalement. On admet également que la pression est uniforme dans une section perpendiculaire à l'axe de l'écoulement en appliquant le principe fondamental de l'hydrostatique.

Le second est consacré à une revue bibliographique succincte qui présente quelques modèles d'écoulement dans le domaine du transport solide .

Le modèle dit de Doron à deux couches est présenté dans le troisième chapitre, où la différence de pression est considérée comme le paramètre le plus important dans ce dernier. Un récapitulatif du modèle ainsi que les paramètres physiques de l'écoulement sont extraits pour permettre la résolution numérique du problème.

Dans le quatrième chapitre, nous avons décrit le banc d'essai, les différents instruments de mesure et le type de solide utilisé.

Enfin, nous avons exposé les résultats obtenus dans le cinquième chapitre. Une conclusion générale termine notre travail.

Chapitre I

Rappel sur les pertes de charges dans une conduite

I. Introduction

Le calcul des pertes de charge est fondamental en mécanique des fluides et en hydraulique. Son utilisation dans le dimensionnement des conduites et des réseaux est très sollicitée. Les relations de calcul des pertes de charges, d'origine empiriques, intègrent le facteur "rugosité" défini par la hauteur des aspérités de la surface interne de contact de la conduite[1].

II. Définition:

En mécanique des fluides, la perte de charge correspond à la dissipation, par frottements, de l'énergie mécanique d'un fluide en mouvement sous forme de chaleur. Cette énergie doit être compensée afin de permettre au liquide de se déplacer. Pour une canalisation horizontale cette perte d'énergie se caractérise par une diminution de la pression dans le sens de l'écoulement [2].

IL existe deux sortes de pertes de charges :

- Les pertes de charges linéaires.
- Les pertes de charges locales (ou singulières).

III. Les pertes de charge linéaires :

Les pertes de charges linéaires sont aussi appelées «pertes de charges par frottement». Elles correspondent à une perte de pression dans une installation, dû aux frottements des fluides dans les canalisations. Plus la longueur de la conduite est importante plus il y aura de pertes. Les pertes de charges linéaires dépendent de plusieurs paramètres, les plus importants de ces derniers sont :

- Le type d'écoulement (Laminaire, turbulent, lisse ou rugueux).
- La masse volumique du fluide.
- La viscosité (dépendante elle même de la température).
- La vitesse du fluide.
- Le diamètre intérieur du tube.
- Le coefficient de rugosité de la canalisation.

III.1. Calcul de perte de charge :

On sait par l'analyse dimensionnelle que la perte de charges par frottement dépend à la fois de la dynamique du fluide et des dimensions géométriques de la conduite :

Le coefficient de perte de charge λ , dépend de la nature de l écoulement et de l'état de surface intérieure de la conduite. Cette perte est régie par un certain nombre d'équations [4].

On constate que les pertes de charges générales dépendent des éléments suivants :

- Logiquement la perte de charge est directement proportionnelle à la longueur de la canalisation : elle augmente avec l'augmentation de la longueur de la canalisation.
- Quand le diamètre diminue, la perte de charge augmente considérablement. Le liquide a plus de difficultés à s'écouler donc les frottements augmentent pour un débit identique.
- Plus le débit augmente (vitesse plus élevée), plus les forces de frottements augmentent pour un diamètre identique.

III.2. Régimes d'écoulement :

Le régime d'écoulement est laminaire lorsque les particules de fluide se déplacent parallèlement les unes des autres : c'est un écoulement ordonné qui a lieu à basse vitesse. Par contre, le régime d'écoulement est turbulent lorsqu'il y a formation de tourbillons qui perturbent la trajectoire des particules de fluide : c'est un écoulement désordonné. Entre les deux états, l'écoulement est en phase de transition. C'est Reynolds qui, le premier, observa ces phénomènes. Les expériences qu'il a conduites sur des tuyaux de différents diamètres avec de l'eau à différentes températures lui permirent de montrer que le rapport des forces d'inerties aux forces de viscosité constitue un bon critère pour déterminer l'écoulement. Ce nombre, adimensionnel, porte, d'ailleurs, son nom :

Re ≤2000 : écoulement laminaire.

 $\text{Re} \ge 4000$: écoulement turbulent.

2000< Re< 4000 : le régime est transitoire ou turbulent.

Cependant, la valeur de 2000 n'est, en aucun cas, stricte et rigoureuse.

L'écoulement peut demeurer laminaire jusqu'à Re=10 000 pour certaines précaution particulières.

On voit bien que la connaissance de λ suffit à déterminer la perte de charge de n'importe quelle canalisation en connaissant le débit qui transite par celle-ci et ses dimensions [1].

III.2.1. Cas d'un écoulement laminaire :

Dans ce cas on peut montrer que le coefficient λ est uniquement en fonction du nombre de Reynolds Re; l'état de la surface n'intervient pas et donc λ ne dépend pas de k (hauteurs moyennes des aspérités du tuyau), ni de la nature de la tuyauterie.



Figure (I.1) : Ecoulement laminaire

III.2.2. Cas d'un écoulement turbulent :

En régime turbulent l'état de la surface devient sensible et son influence est d'autant plus grande que le nombre de Reynolds Re est grand. Tous les travaux ont montré l'influence de la rugosité et on s'est attaché par la suite à chercher la variation du coefficient λ en fonction du nombre de Reynolds Re et de la rugosité k du tuyau.

La formule de **Colebrook** est actuellement considérée comme celle qui traduit le mieux les phénomènes d'écoulement en régime turbulent.

Elle est présentée sous la forme suivante :

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2\log[\frac{k}{3,7.D} + \frac{2,51}{Re.\sqrt{\lambda}}] \qquad (I.4)$$

L'utilisation directe de cette formule demanderait, du fait de sa forme implicite, un calcul par approximations successives ; on emploie aussi en pratique des représentations graphiques (abaques) comme le diagramme de Moody.



Figure (I.2): Diagramme de Moody

Pour simplifier la relation précédente, on peut chercher à savoir si l'écoulement est hydrauliquement lisse ou rugueux pour évaluer la prédominance des deux termes entre parenthèses dans la relation de Colebrook [3].



Figure (I.3) : Ecoulement turbulent

5

Zone critique : Le nombre de Reynolds situés entre 2000 et 4000 indique que l'écoulement est instable entre le régime laminaire et le régime turbulent.

Remarque :

On fait souvent appel à des formules empiriques plus simples valables pour des cas particuliers et dans un certain domaine du nombre de Reynolds, par exemple :

Formule de Blasius : (pour des tuyaux lisses et $\text{Re} < 10^5$) $\lambda = 0,316.\text{Re}^{-0,25}$.

IV. La viscosité :

La viscosité d'un liquide est sa caractéristique a être plus ou moins fluide ou, en d'autres termes, d'opposer plus ou moins de résistance au pompage ou au passage au travers d'un orifice ou d'une canalisation. La température exerce une grande influence sur la viscosité.

Le nombre de Reynolds est inversement proportionnel à la viscosité cinématique. La viscosité d'un fluide est une caractéristique qui permet de déterminer la résistance au mouvement du fluide. Plus la viscosité cinématique sera élevée et plus il sera difficile de déplacer le fluide dans une canalisation.

Plus le liquide est visqueux et plus les frottements sont élevés, donc la perte de charge augmente [5].

V. Dépendance de la température avec la viscosité :

- Fluides gazeux = La viscosité croît avec l'accroissement de la température.
- Liquides = La viscosité décroît avec l'accroissement de la température.
- La viscosité cinématique (*v*) est le rapport de la viscosité dynamique sur la densité du fluide.

Viscosité cinématique en centistokes (mm²/s).

VI. Notion de Rugosité des conduites :

Contrairement à une surface lisse, une surface rugueuse implique un état de surface dont les irrégularités ont une action directe sur les forces de frottements. Une surface rugueuse peut être considérée comme étant constituée par une série de protubérances élémentaires caractérisées par une hauteur, notée k, appelée Rugosité. Quand K tend vers zéro, on retrouve l'équation du régime turbulent lisse, alors que lorsque K tend vers l'infini, on obtient le régime turbulent rugueux.



Figure(I.4): Effet de la rugosité dans une conduite cylindrique.

Afin de comparer la rugosité par rapport au diamètre de la conduite, on introduit le rapport [5] :

$$\varepsilon = \frac{K}{D}$$
 Rugosité Relative(I.6)

VII. Equation générale d'écoulement ou équation de Bernoulli : VI.1. Cas des fluides parfaits (non visqueux) :





7

L'équation de Bernoulli exprime que, tout le long d'une canalisation le liquide en mouvement permanent, l'énergie totale par unité de poids du liquide reste constante (dH/dx = 0). D'après le schéma, on peut donc écrire que :

$$Z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} = H = C^{ste}$$
....(I.7)

Cette équation s'écrit donc dans le cas général :

VII.2. Cas des Fluides réels (visqueux) :

Contrairement au fluide parfait non visqueux, la charge H pour un fluide réel visqueux diminue dans la direction de l'écoulement (dH/dx < 0). Ceci est dû à la nature visqueuse de fluide qui dissipe une partie de l'énergie: cette perte d'énergie est appelée la perte de charge

La représentation graphique en cas de fluide réel est donc montrée par le schéma suivant :



Figure (I.6): Ecoulement d'un fluide réel dans une conduite cylindrique.

L'équation de Bernoulli, pour un liquide réel, devient donc :

Selon l'origine des pertes de charges, on distingue :

La perte de charge primaire ou repartie, noté **hr**, qui est la conséquence de la viscosité du fluide et de la rugosité des parois de la section d'écoulement.

La perte de charge secondaire ou singulière, noté **hs**, qui est la conséquence d'une modification brusque dans la nature physique de la section d'écoulement (élargissement, rétrécissement, changement de direction, etc...).

La perte de charge totale est donc la somme des deux pertes de charges répartie et singulière [5] :

VIII. Conclusion :

En conclusion, pour diminuer l'ensemble des pertes de charges dans une canalisation, les couts de fonctionnement dû aux pompes, il faut :

- diminuer la longueur de la canalisation.
- diminuer le nombre d'accidents sur la canalisation.
- diminuer le débit de circulation.
- augmenter le diamètre des canalisations.
- faire circuler les liquides les moins visqueux possibles. Utiliser des matériaux de Faible rugosité.

Chapitre II

Revue bibliographique sur le transport solide

I. Introduction:

Il y a presque 50 ans, le progrès substantiel dans l'exploitation du transport hydraulique des solides dans les canalisations lance des investigations systématiques dans ce domaine.

Avec la conception des nouvelles canalisations industrielles, dont certaines étaient de longueur considérable, la demande des modèles fiables capables de prévoir le comportement d'écoulement des solides s'est développée. Au cours des années, autant que les techniques expérimentales, théoriques et informatiques ont progressé, les modèles prédictifs ont été graduellement améliorés.

Les premiers outils prédictifs ont été développés dans les années 1950 et les années 1960 en utilisant des méthodes de modèle empirique. Les outils étaient des corrélations empiriques construites pour prévoir les caractéristiques de base de la canalisation comme la perte par frottement et la vitesse limite de dépôt pour les différentes conditions d'écoulement dans les canalisations.

Certains des modèles sont devenus populaires et sont toujours employés dans la pratique (par exemple Durand et Condolios, 1952, Jufin Et Lopatin, 1966).Ils sont simples à employer et facile à modifier selon les propres données de l'utilisateur.

Depuis les années 1980 des tentatives ont été faites pour construire un modèle général pour l'écoulement de solide-liquide dans les canalisations en employant une approche microscopique.

Newitt et autres (1955) étaient les premiers a appliquer les formulations d'équilibre à un volume macroscopique de commande pour obtenir les équations de perte par frottement pour différents régimes d'écoulement dans une canalisation. Wilson (1970) a présenté le concept d'un modèle mécaniste de force-équilibre pour prévoir la vitesse limite de dépôt stationnaire dans un écoulement plein-stratifié, il là développé ensuite en (1976) pour fournir un outil prédictif unifié, appelé modèle à deux couches, pour prévoir la vitesse limite de dépôt et les pertes par frottement dans des écoulements plein-stratifiés et partiel-stratifiés dans une canalisation [6].

• Parmi ces modèles :

1 . Modèle de DURAND et CONDOLIOS (1952)

Durand et Condolios (1952) et Durand (1953) ont effectué des expériences sur les solides (la plupart du temps sur du sable et du gravier) avec trois paramètres qui sont : diamètres des particules d_{50} , des canalisations D_P et des concentrations volumétriques C_{vt} . Un paramètre est possible pour définir l'effet de solides est la perte relative de surpression par [7]:

$$P_{er} = \frac{i_m - i_{fl}}{i_{fl}}$$
(II.1)

La première étape effectuée par Durand et Condolios (1952) était de définir le paramètre Φ qui est défini comme suit :

La concentration volumétrique C_{vt} est la concentration de transport. Pour des lignes de vitesses élevées et pour le transport hétérogène elle est présque égale à la concentration volumétrique spatiale C_{vs} .

La deuxième étape effectuée par Durand et Condolios (1952) était d'étudier l'influence du diamètre de la canalisation D_P , en employant le nombre de Froude $\mathbf{Fr_{fl}} = V_{ls} / \sqrt{\mathbf{g} \cdot \mathbf{D}_P}$.

Durand et Condolios (1952) disent que le paramètre Φ est proportionnel à la racine carré du diamètre.

L'équation finale de la première étape est :

$$\Psi = Fr_{fl}^2 Fr_p^{-1}$$
 et $\Phi = K \cdot \Psi^{-3/2}$ et K= 176(II.3)

Le nombre de 176 est déduit du graphe original de Durand et Condolios (1952), de la source Bain et du Bonnington (1970).

La prochaine étape était d'étudier l'influence de la densité submergée relative des particules.

Le nombre de Froude du fluide est modifié selon :

$$Fr_{fl,m} = \frac{V_{ls}}{\sqrt{g.D_p.R_{sd}}}$$
(II.4)

Pour des écoulements faibles, résultant de petits diamètres hydrauliques, le gradient de pression peut être si grand qu'il peut provoquer la production d'un lit coulissant.

2. Modèle de Newitt et autre (1952):

Newitt et autres (1955) ont effectué des expériences dans une conduite d'un pouce avec des sables de 0.0965 mm, 0.203 mm, et 0.762 mm, et gravier de 4.5 mm. Ils ont également effectué des expériences avec le gravier de 3.2mm à 6.4 mm, de charbon de 3.2mm à 4.8 mm($R_{sd} = 0.4$) et de MnO2 de 1.6 à 3.2 mm ($R_{sd} = 3.1$).Newitt et autres (1955) ont distingué un régime hétérogène et un régime de lit coulissant [8].

2.1. Le Régime Hétérogène :

Pour le régime hétérogène, ils ont supposé que la déperdition d'énergie dû aux solides est basée sur la continuité des particules a flotté. Basé sur la conservation de l'énergie potentielle des particules, on obtient l'équation suivante:

$$i_{\rm m} = i_{fl} \cdot \left(1 + K_1 \cdot (g \cdot D_P \cdot R_{sd}) \cdot V_t \cdot C_{Vt} \cdot \left(\frac{1}{V_{ls}} \right)^3 \right) \text{ avec} : K_1 = 1100 \dots (II.5)$$

Le coefficient K1 = 1100 ne suit pas la dérivation, mais d'un meilleur ajustement des points de repères. Il est clair que tous les points de repères de Newitt et autres soient audessus des courbes de Durand et de Condolios (1952). Il est très possible que l'écoulement de feuille se soit produit, en raison des gradients à haute pression dans une conduite très petite.

Il est noter que, la dérivation du modèle de Newitt et autres soit basée sur la vitesse d'arrangement des particules, l'arrangement gêné n'est pas considéré [8].

2.2. Régime Coulissant

Pour le régime coulissant Newitt et autres ont supposé que le poids de tous les solides est transféré au fond de la conduite, ayant pour résultat une force de frottement, qui est égale au poids des solides $\mathbf{R}_{C\rho}$ fois le coefficient de frottement μ . Au-dessous de la vitesse limite de dépôt pour un lit fixe, Newitt et autres ont trouvé :

$$\mathbf{i}_{\mathrm{m}} = i_{fl} \left(1 + \left(\frac{\lambda \cdot K_1}{2}\right) \cdot \frac{2 \cdot \left(g \cdot D_p \cdot R_{sd}\right) \cdot V_t}{\lambda} \cdot C_{vt} \cdot \left(\frac{1}{V_{ls}}\right)^3 \right) \text{ avec: } \lambda = 0.02 \text{ et } k_1 = 1100$$

ceci donne : $i_{\rm m} = i_{fl} \left(1 + \left(\frac{\lambda . K_1}{2}\right) \cdot \frac{2 \cdot (g . D_p . R_{sd}) . V_t}{\lambda} \cdot C_{vt} \cdot \left(\frac{1}{V_{ls}}\right)^3 \right) = 2 \left(g . D_p . R_{sd}\right) V_t$

$$\Delta p_r. 1 + \Delta p_r. 11. \frac{2.(g.D_p.R_{sd}).V_t}{\lambda}$$
(II.6)

$$i_{\rm m} = i_{fl} + 11. \quad \frac{R_{sd} \cdot V_t}{V_{ls}}. \quad C_{vt}$$

Dans une conduite de grand diamètre avec beaucoup moins de frottement du fluide, l'effet de solides devrait être le même que dans une conduite d'un petit diamètre. Afin de réaliser ceci, l'équation générale sera écrite sous la forme :

$$\mathbf{i}_{\mathrm{m}} = \mathbf{i}_{fl.} \left(1 + \left(\frac{\lambda K_1}{2}\right) \cdot \frac{2 \cdot (g \cdot D_p \cdot R_{sd}) \cdot V_t}{\lambda} \cdot C_{vt} \cdot \left(\frac{1}{V_{ls}}\right)^3 \right) \text{ avec} : \lambda = 0.02 \text{ etK}_2 = 66 \dots (II.3)$$

2.3. La Vitesse limite De Dépôt :

La vitesse limite de dépôt est souvent définie comme étant la vitesse au-dessous de la quelle les premières particules commencent à s'arranger et un lit commence a se formé au fond de la conduite. Pour la vitesse limite de dépôt Newitt et autres ont employé l'équation suivante:

2.4. La transition hétérogène contre (le pseudo) transport homogène

Newitt et autres (1955) ont constaté que l'excès du gradient de pression pour le transport homogène n'est pas exactement la résistance à l'eau avec la densité de mélange substituée à la densité de l'eau (fluide), mais environ 60% de la résistance supplémentaire, donnant :

3. Modèle de Gibert (1960)

Il y a trois questions à discuter [9]: 1. Le coefficient de traînée de Durand et de Condolios (1952) opposer au coefficient de traînée réel.

2. Le coefficient de traînée de Gibert (1960).

3. La densité submergée relative R_{sd} en tant qu'élément de l'équation.

3.1. Le coefficient de traînée de Durand et de Condolios opposer au coefficient de traînée réel

Il convient de noter que Durand et Condolios (1952), Gibert (1960), et Worster et de Denny (1955) ont utilisé le nombre de Froude de particules dans leurs équations et pas le coefficient de traîné des particules. Le coefficient de traînée virtuel, employé par Durand et Condolios (1952), Gibert (1960), et Worster et Denny (1955) est :

$$C_{x} = \frac{g.d}{v_{t}^{2}} = Fr_{p}^{-2} \ avec: \ Fr_{p} = \frac{V_{t}}{\sqrt{g.d}}$$
(II.7)

Le coefficient de traînée C_D utilisé dans l'équation pour la vitesse finale d'arrangement est :

3.2. Le coefficient de traînée de Gibert (1960)

Gibert (1960) a édité un tableau avec des valeurs numériques pour le coefficient virtuel de traînée ou le nombre de Froude des particules.

Supposant que la vitesse finale d'arrangement v_t est déterminée correctement pour les solides considérés (charge, Budryck, Rittinger ou Zanke).

$$\sqrt{C_{x,Gibert}} = \sqrt{C_x}^{1.78} = C_x^{0.89}$$
(II.9)

3.3. La densité submergée relative en tant qu'élément de l'équation

Gibert (1960) déclare clairement que la densité submergée relative devrait seulement être ajoutée au nombre de Froude d'écoulement Fr_{fl} et pas au nombre de Froude de particules F_{rp} . Ainsi, l'équation finale des modèles de Durand , Condolios (1952) et de Gibert (1960) est:

$$\mathbf{i}_{m} = \mathbf{i}_{fl} \cdot (1 + \boldsymbol{\Phi} \cdot \boldsymbol{C}_{Vt}) \ avec \ \boldsymbol{\Phi} = 85 \cdot \left(\frac{V_{ls}^{2} \cdot C_{x}^{0.89}}{g \cdot D_{p} \cdot R_{sd}}\right)^{\frac{-3}{2}}$$
.....(II.10)

Maintenant la question est si l'effet de solides peut être décrit physiquement par une seule équation. Donc Employer une équation pour l'effet de solides avec plus d'un terme, sans

fixer certains rapports, donnerait probablement une meilleure corrélation avec les données expérimentales.

4. Modèle de Jufin et de Lopatin (1966)

Ce modèle a été construit comme proposition pour la norme technique soviétique en 1966. Les auteurs n'ont pas soumis un nouveau modèle mais ont choisi la meilleure combinaison des corrélations pour la perte par frottement et la vitesse critique à partir de quatre modèles soumis par différents instituts de recherche soviétiques [10].

4.1. Perte par frottement

Quatre modèles ont été examinés pour avoir une grande base de données expérimentale rassemblée par un certain nombre de chercheurs.

Les données ont couvert un éventail des tailles de canalisation (103 - 800 mm) et des dimensions particulaires (sable et gravier, 0.25 - 11 mm).

4.2. Construction de la corrélation de Jufin-de Lopatin et sa version finale :

La corrélation a été basée sur l'expérience empirique suggérant que le gradient hydraulique I_m à la vitesse minimum V_{min} ont été indépendant des propriétés d'écoulement du mélange et il était trois fois plus haut que le gradient hydraulique de l'écoulement de l'eau à la même vitesse dans une canalisation.

La corrélation par Jufin et Lopatin (dans la version révisée par Kobernik, 1968) est :

La vitesse minimum V_{min} est indiquée par la corrélation empirique :

 $V_{min}=5.3 (C_{vd} . \Psi^*.D)^{1/6}$ Avec $\Psi^*=f(d)$.

4.3. Vitesse limite De Dépôt (Vitesse critique)

Jufin et Lopatin ont proposé pour la vitesse limite de dépôt la corrélation suivante:

$$V_{dl}=8.3D^{1/3}(Cvd. \Psi^*)^{1/6}$$
.....(II.12)

5. Modèle de Zandi et Govatos (1967)

Zandi et Govatos (1967) ont modifié la corrélation de Durand en divisant sa région d'applicabilité en deux parties, avec différentes valeurs de K et de n pour chacun d'eux [11].

6. Modèle de Turian et de Yuan (1977) :

Turian et Yuan (1977) ont employé des corrélations basées sur des points de repères très précis à divers régimes d'écoulement pour une gamme de diamètres de canalisation D=0.160m. Ils ont défini des configurations du nombre de régime qui permet la délinéation du régime de l'écoulement. Ils ont exprimé la chute de pression dans le terme de la densité liquide porteur \mathbf{p}_L et un facteur f de frottement comme donné par [12] :

$$i\rho_L g = \frac{2.f.V^2.\rho_L}{D} \qquad (II.13)$$

L'incertitude des résultats de la corrélation de Turian et de Yuan se remarque plus pour l'écoulement dans les grandes conduites (D>0.160m) ainsi que pour les mélanges.

7. Modèle de Wilson (GIW)

Le modèle semi-empirique de Wilson est basé sur la considération d'un écoulement hétérogène comme transition entre deux écoulements extrêmes régis par différents mécanismes pour l'appui d'une particule solide dans le jet du liquide porteur : l'écoulement plein-stratifié (toutes les particules sont transportées comme une charge de contact) et l'écoulement plein-suspendu (toutes les particules sont transportées comme charge suspendue)[13].

7.1. Perte principale par frottement:

7.1. 1. Observations expérimentales :

Les essais de circuit dans le laboratoire expérimental ont fourni une base de donnée pour une vérification de la corrélation de perte par frottement. Les circuits sont de la taille d'une canalisation de 200mm, 440mm respectivement.

7.1.2. Construction de la corrélation et de sa version finale :

Le modèle pour l'écoulement (hétérogène) partiel-stratifié fonctionne avec un paramètre V_{50} exprimant la vitesse moyenne de boue à laquelle une moitié des particules solides transportées contribuent à une charge suspendue et l'autre moitié à une charge de contact. à la vitesse $V_m = V_{50}$ la perte de pression due à la présence des solides ($\Delta P_m - \Delta P_f$) est dû au poids submergé du lit mobile contenant une moitié des temps de la fraction de solide total [0.5 C_{vd} ($\rho s - \rho f$)g] le coefficient de frottement (μ_s).Récrit pour les pertes principales cet équilibre de base est :

$$I_m - I_f = 0.5 \mu_s C_{vd}(S_{s-1})$$
(II.14)

 S_{S} :densité relative des solides

8. Travaux de Florent RAVELET

Il a étudier les pertes de charges et les régimes d'écoulement pour des sphères grandes devant le diamètre de la conduite (5, 10 et 15%), par mesures de pression et visualisations. Deux densités sont utilisées. La perte de charge est plus faible pour les grandes tailles de grains, et la densité a un effet fort sur le point de transition entre écoulement à lit stationnaire et dispersé. Des modèles basés sur le nombre de Froude sont testés. Il a étudié des mélanges de taille et/ou de densité[**23**].

II. Conclusion:

Environ 60 ans après que Durand et Condolios (1952) et Newitt et autres (1955) ont effectué leurs recherches, ces derniers restent valables et importants, malgré les critiques de Zandi et Govatos (1967), Babcock (1970), Wilson (1992) et beaucoup d'autres. Même si quelques questions restent indéfinies, menant à une fausse interprétation. Les principales de ces dernières sont : la fausse utilisation

- du nombre de Froude de la particule Fr_{pr} ,
- du coefficient de traînée C_D,
- de la densité submergée relative R_d dans le de nombre de Froude de la particule Fr.

L'inconvenant majeur de ces corrélations et qu'elles restent valable que pour des petits diamètres d'ordre de micro, se qui mène a l'insuffisance de ces modèles pour des tailles plus grandes. Il est a signaler aussi que la majorité de ces travaux considèrent le mélange (fluide - particules) comme un fluide non newtonien.

Notre travail s'inscrit dans la continuité des travaux de Florent RAVELET afin d'étudier et de comprendre le transport de grosse particules expérimentalement et numériquement.

Chapitre III

Présentation et résolution du modèle à deux couches

I. Introduction

Le transport hydraulique des particules solides est une méthode bien connue dans les procédés industriels. Dans le cas des mélanges bruts de particule, les effets d'arrangement sont importants, ayant pour résultat des pertes par frottement et l'augmentation du gradient de pression.

Il y a une diversité dans la terminologie qui est employée dans la littérature pour les divers modèles d'écoulements. La classification la plus connue dans ce type d'écoulements est: le lit stationnaire, le lit mobile, la suspension hétérogène et la suspension pseudo-homogène. Il y a également de la confusion au sujet des vitesses de transition entre les modèles d'écoulement. Dans ce travail la vitesse au-dessus de laquelle aucun lit stationnaire n'existe se nomme la "vitesse de dépôt", la vitesse au-dessus de la quelle toutes les particules sont suspendues est la "vitesse de suspension ", la vitesse au-dessus de la quelle la concentration est à plat et que l'écoulement est homogène s'appelle " vitesse homogène ". La vitesse qui est associée à la chute de pression minimale se nomme la " vitesse critique ".

La gradient de pression est considérée comme le paramètre le plus important dans l'écoulement à deux couches. Le rapport entre le gradient de pression et la vitesse du mélange est différent de celui d'un écoulement de liquide pur. La prévision du gradient de pression et du type d'écoulement est un problème complexe qui est traitée dans la plupart du temps par des corrélations empiriques et semi-empiriques. Certaines corrélations empiriques peuvent s'appliquer à tous les types d'écoulement pour les systèmes liquide-solide. D'autres sont limitées à un ou deux types d'écoulement seulement [14].

II. Analyse du modèle à deux couches

Considérons un mélange solide-liquide (boue) s'écoulant à l'intérieur d'une canalisation horizontale. Les particules solides sont soumises à la force de gravité qui tente de les tirer vers le bas et des forces de turbulences qui tentent à les suspendre uniformément à travers toute la section de la canalisation.



La figure (III.1) Le modèle à deux-couches.

A des vitesses élevées, les particules solides sont presque symétriquement suspendues, en raison de la forte turbulence. La diminution de la vitesse moyenne des particules engendre la décroissance des forces de dispersion turbulentes et cause par conséquent une concentration plus élevée des particules solides au fond de la conduite. En s'éloignant de l'entrée de la conduite, la vitesse moyenne diminue davantage, les particules peuvent alors former un dépôt coulissant et la couche supérieure forme une suspension hétérogène. Si la vitesse est réduite encore plus, le lit a tendance à devenir stationnaire.

La hauteur de la couche basse devient constante quand la vitesse dans la couche haute est suffisante pour soutenir toutes les particules qui sont encore en suspension. Si le débit augmente, les forces de dispersion deviennent importantes, la concentration moyenne des particules de la couche supérieure augmente et la hauteur de la couche inférieure diminue.

L'étude de la perte de charge pour les différents types d'écoulement est basée sur le modèle à deux couches. A très faibles vitesses du mélange, on suppose qu'un lit stationnaire ou mobile s'est formé au fond de la conduite et un mélange hétérogène particules/ liquide s'écoule dans la partie supérieure (voir la figure 1).

En supposant que l'écoulement, dans chaque couche, est représenté par des propriétés moyennes et en négligeant le glissement entre les deux phases (la vitesse moyenne des particules solides égale à la vitesse moyenne du liquide dans chaque couche), les équations de continuité en régime stationnaire sont [14] :

• Pour la phase solide :

• Pour la phase liquide :

Le bilan des forces sur chaque couche est :

• Pour la couche haute:

• Pour la couche basse:

avec :

 F_b = force sec de frottement, elle se compose en deux:

- **F**_{bd} : force de frottement statique exercée par les particules du lit sur les parois de la conduite.
- F_{bL} : force de résistance hydrodynamique qui provient du mouvement du lit.

Dans le cas d'un lit stationnaire \mathbf{F}_{bd} est une force de frottement statique qui équilibre les forces d'entraînement ($\mathbf{A}_h \, dP/dx \,$ et $\mathbf{\tau}_i \mathbf{S}_i$) qui agissent sur le lit. Quand les forces d'entraînement augmentent, la force de frottement sec augmente aussi jusqu'à atteindre une certaine valeur maximale. Dans ce cas le lit est sur le point de glisser et la force de frottement \mathbf{F}_{bd} est égale à \mathbf{F}_{bm} qui est calculé par $\mathbf{F}_{bm} = \eta N$, où η est le coefficient de frottement qui est spécifique pour chaque solide.

Les forces normales N se composent en deux composantes, qui sont dû au poids submergé des particules solides N_w et une force supplémentaire N_{\emptyset} dû à la transmission des efforts normaux qui résulte du cisaillement de l'interface de lit en suspension.

Le calcul de la composante apparente du poids N_w est fondé sur l'hypothèse de la force normale exercée par les particules sur les parois de la conduite. Cette hypothèse est généralement utilisée pour des écoulements de boues. L'intégration de cette distribution de pression au-dessus du périmètre du lit (figure 1) est donnée par [13] :

$$N_w = 0.5(\rho_s - \rho_L)gC_bD^2\left[\left(\frac{2y_b}{D} - 1\right)\left(\theta_b + \frac{\pi}{2}\right) + \cos\theta_b\right] \dots (III.5)$$

La force normale additionnelle N_{ϕ} est dû à la transmission de l'effort normal qui résulte du cisaillement l'interface du lit en suspension. Bagnold (1954, 1957) a montré cela quand un fluide s'écoule sur un dépôt de particules solides, il existe un effort normal à l'interface qui est associé à l'effort de cisaillement exercé par le fluide sur le lit. La relation est donnée par [15] :

$$N_{\emptyset} = \frac{\tau_i S_i}{\tan \emptyset}$$
(III.6)

La valeur du $\tan \emptyset$ change entre 0.35 et 0.75 s'accordant au type de l'écoulement et des caractéristiques des particules.

Supposant que η est constant pour un solide donné \mathbf{F}_{bm} est évalué par :

La force hydrodynamique de résistance F_{bL} est dû au mouvement du lit qui est applicable seulement dans le cas d'un lit mobile. Il peut être exprimé comme suit :

Où τ_b est la contrainte de cisaillement agissant sur le périmètre de S_b (figure 1).

Les contraintes de cisaillement hydrodynamiques τ_h et τ_b peut être exprimé comme suit:

$$\tau_{\rm h} = \frac{1}{2} f_{\rm h} \rho_{\rm h} U_{\rm h}^2$$
 et $\tau_{\rm b} = \frac{1}{2} f_{\rm b} \rho_{\rm b} U_{\rm b}^2$ (III.9)

Les coefficients de frottement sont évalués à partir :

Avec:

 μ_h : Viscosités de la couche haute.

 $\mu_{\mathbf{h}}$: Viscosités de la couche basse.

 D_h et D_h : Diamètres hydrauliques des deux couches.

$$D_{h} = \frac{4A_{h}}{S_{h}+S_{i}}$$
 et $D_{b} = \frac{4A_{b}}{S_{h}+S_{i}}$(III.11)

les coefficients suivants ont été utilisés :

 $\alpha_h = \alpha_b = 0.046$ et $\beta_h = \beta_b = 0.2$

- Pour l écoulement turbulent : $\alpha_h = \alpha_b = 16$
- Pour l'écoulement laminaire : $\beta_h = \beta_b = 0.1$

La contrainte de cisaillement τ_i est exprimée en termes de la vitesse relative entre les deux couches:

$$\tau_{\rm i} = \frac{1}{2} f_{\rm i} \rho_{\rm h} (U_{\rm h} - U_{\rm b})^2$$
(III.12)
Le coefficient de frottement lié à l'interface f_i est évalué en utilisant la formule de Colebrook (1939) avec une interface d'une rugosité effective, supposée égale au diamètre de la particule. Pour tenir compte de l'effet des collisions de particules en suspension avec le lit ainsi que l'entraînement et le dépôt de particules à l'interface, ce qui tend à augmenter le coefficient de frottement, Televantos et al. (1979) ont suggéré de multiplier le coefficient f_i par 2 [14] d'où:

Les propriétés moyennes du mélange sont utilisées pour évaluer les nombres de Reynolds et les contraintes de cisaillements. Les masses volumiques sont calculées selon une moyenne pondérée qui est couramment utilisé dans l'analyse de l'écoulement diphasique:

$$\rho_{\rm h} = \rho_{\rm s} C_{\rm h} + \rho_{\rm L} (1 - C_{\rm h})$$
 et $\rho_{\rm b} = \rho_{\rm s} C_{\rm b} + \rho_{\rm L} (1 - C_{\rm b})$ (III.14)

Les particules dans le lit sont en contact mutuel d'où $C_b = 0.52$. La viscosité du mélange peut être considéré égale à celle du liquide porteur $(\mu_b = \mu_b = \mu_L)$.

En plus des équations de conservation, le phénomène de dispersion des particules solides dans la couche supérieure est pris en considération. Ceci est supposé être un processus de diffusion turbulent, qui est régie par les tourbillons à grande échelle et tend à rendre l'écoulement isotrope. Ainsi, il engendre un mouvement des particules solides de la zone de haute-concentration vers la zone de basse-concentration. Ce mécanisme est représenté par l'équation de diffusion :

$$\varepsilon' \frac{\partial^2 C(y)}{\partial y^2} + w' \frac{\partial C(y)}{\partial y} = \mathbf{0}.....(III.15)$$

Avec :

C(y): Concentration volumique de la couche haute.

y : Coordonnée verticale.

 $\boldsymbol{\varepsilon}'$: Coefficient de diffusion local .

w': vitesse de dépôt locale de la particule.

Une équation semblable a été présentée par Okuda (1980), supposant que la concentration dépend seulement de la position verticale, on intégrant deux fois l'équation (15) on obtient la distribution de la concentration dans la couche dispersée [17] :

On suppose que la concentration à l'interface dans la couche dispersée est égale à la concentration du lit.

Le coefficient moyen de diffusion transversale ε est évaluée selon Taylor (1954)[8] par:

$$\epsilon = 0.052 \, U_* r$$
(III.17)

Avec

$$U_* = U_h \sqrt{\frac{f_1}{2}}$$
 : est la vitesse de cisaillement

r : Rayon hydraulique de la coupe de la couche haute.

La vitesse d'arrangement terminale d'une particule simple w_0 est évaluée à partir d'un équilibre de force entre la force de la gravité et la force de frottement :

$$w_0 = \sqrt{\frac{4}{3} \frac{(s-1)d_p.g}{C_D}}$$
(III.18)

Avec

 C_{D} : dépend du nombre de Reynolds de la particule $Re_p = \frac{\rho_L \cdot w_0 \cdot d_p}{\mu_L}$

$$C_D = 18.5 Re_p^{-0.6}$$
 Pour $0.1 < Re_p < 500$
 $C_D = 0.44$ Pour $500 < Re_P < 10^5$ (Bird et autres. 1960).

La vitesse de dépôt de plusieurs particules *w* est évaluée par la corrélation de Richardson et le Zaki (1954) [18] :

$$\frac{w}{w_0} = (1 - C)^m$$
(III.19)

Le paramètre $m=4.45 Re_w^{-0.1}$ pour $1 < Re_w < 500$ et 2.39 pour $Re_w > 500$ où Re_w est le nombre de Reynolds basé sur la vitesse w.

L'intégration de l'équation (16) donne la concentration moyenne dans la couche dispersée supérieure en fonction de θ_b :

II.1. Récapitulatif et Formulation Finale

Pour nous permettre de procéder à la résolution numérique de ce modèle, nous avons résumé les divers équations et paramètres régissant ce type d'écoulement.

La situation d'écoulement est donc représentée par un système d'équations non linéaires suivant:

$$U_h C_h A_h + U_b C_b A_b = U_s C_s A \qquad (III.21)$$

$$U_h(1 - C_h)A_h + U_b(1 - C_b)A_b = U_s(1 - C_s)A$$
(III.22)

$$A_b \frac{dP}{dx} = -F_{bd} - \tau_b S_b + \tau_i S_i \qquad (\text{III.24})$$

On note que $\theta_b, A_h, A_b, S_h, S_i$, et S_b peuvent être exprimer en termes de la taille y_b de lit (voir la Figure 1).

Avec :

 y_{b} : Hauteur de la couche basse.

II.1.1. Cas d'un lit stationnaire

Une faible vitesse du mélange engendre un lit stationnaire $U_b = 0$. Dans ce cas les équations (21) et (22) deviennent:

$$C_h = C_s$$
 et $U_h = U_s \frac{A}{A_h}$(III.26)

L'équation (25) peut maintenant être transformée en équation à une seule variable y_b , puisque C_h est connu et toutes les propriétés géométriques et d'autres paramètres peuvent être exprimés en fonction de y_b . Chapitre III

Une fois que la hauteur de la couche basse à été trouvée, toutes les propriétés géométriques aussi bien que U_h et les contraintes de cisaillement liés à la couche haute peuvent être calculés. Le gradient de pression peut être calculer a partir de l'équation (23).

La force de frottement sec statique F_{bd} peut maintenant être calculée à partir de l'équation (24) et comparé au frottement sec maximum F_{bm} qui correspond au point de glissement et qui est calculé à partir de l'équation (7) pour la même hauteur y_b . Le lit est en effet stationnaire aussi longtemps que [13]:

 $F_{\rm bd} < F_{\rm bm}$ (III.27)

Cette condition a été présentée par Wilson (1970).

II.1.1.1.Organigramme:



Figure(III.2):Organigramme de la résolution des équations dans le cas d'un lit stationnaire.

II.1.2. Cas d'un lit mobile

Dans ce cas les composantes de la force de frottement sec est une fonction de la hauteur de la couche basse $[\mathbf{F}_{bd} = \mathbf{F}_{bm} = \boldsymbol{\eta}(N_w + N_{\emptyset})]$ est calculée par l'équation (7). Cependant, aucune autre variable ne peut être estimée a priori. Par conséquent le système d'équations, de (21) jusqu'à (25), doit être résolu. Pour la concentration dans la couche dispersée supérieure peut être évaluer par l'équation (16).

II.1.3. Cas d'un écoulement entièrement suspendu

À mesure que la vitesse du mélange augmente d'avantage, la hauteur de la couche basse diminue et tend ver zéro, l'écoulement entièrement suspendu se produit. Pour cet écoulement la perte de charge est calculée avec :

$$\frac{\mathrm{d}P}{\mathrm{d}x} = \frac{2}{\mathrm{D}}\rho_{\mathrm{M}}\mathrm{U}_{\mathrm{s}}^{2}f_{\mathrm{M}}....(\mathrm{III.28})$$

Avec :

 $\rho_{M} = \rho_L (1 - C_s) + \rho_s C_s$ et f_M calculé dans l'équation (10)

Avec: $U_{\rm h} = U_{\rm s}$ et $D_{\rm h} = D$

La concentration se calcule en utilisant l'équation (16) avec $y_b = 0$ comme suit:

$$C(y) = C_{\rm B} \exp(-\frac{w}{\varepsilon} y) \quad \dots \quad (\text{III.29})$$

 C_B : Concentration au fond de la conduite peut être calculé a partir de l'équation (25). Puisque $C_h = C_s$. En remplaçant A_h par A et $\theta_b = (-\pi/2)$ dans l'équation (25), on obtient :

La concentration locale dans la partie supérieure de la conduite, C_T , est obtenu en utilisant l'équation (29) avec y = D. La vitesse augmente et la valeur de ε augmente également, et le rapport C_T/C_B s'approche de l'unité. Le passage de l'écoulement hétérogène vers pseudo homogène, est supposé, se produire quand la distribution de la concentration est pratiquement uniforme, par exemple $C_T/C_B \approx 0.95$. Le gradient de pression pour le modèle d'écoulement pseudo homogène est également évaluer par l'équation (28).

Pour l'ensemble des données et des conditions de fonctionnement telles que le diamètre de la conduite, le débit du mélange, la concentration à l'entrée, les propriétés des particules solides (densité et diamètre), propriétés du liquide porteur (masse volumique et viscosité) et le coefficient de frottement, on peut évaluer le type d'écoulement, le gradient de pression, la hauteur de la couche basse , les vitesses dans les deux couches et la concentration dans la couche dispersée. La vitesse critique peut également être évaluée en trouvant le minimum du gradient de pression dans le graphe en fonction de la vitesse du mélange.

III. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons exposé le modèle de Doron à deux couche. Nous avons également présenter des différentes approches pour différents modèles d'écoulement (lit stationnaire, lit mobile et entièrement suspendu). Ce modèle permet la prédiction du gradient de pression et la configuration d'écoulements, une fois que le débit du mélange, la concentration à l'entrée, la géométrie de la conduite et les propriétés de solide-fluide sont précisées.

Dans le cadre de ce travail nous avons procéder à la résolution numérique par la méthode de Newton-Raphson du modèle de Doron à deux couche. Les résultats sont présentés dans le chapitre V.

Chapitre IV

Etude Expérimentale

I. Introduction :

Le transport hydraulique de particules solides est un procédé largement utilisé dans les industries chimiques et minières. De nombreux modèles prédictifs existent dans le cas de suspensions, c'est-a-dire lorsque le diamètre des particules est petit devant le diamètre du tuyau [13, 19]. Il est alors possible de prédire les pertes de charges en conduite horizontale ou verticale. Ces dernières années, la forte augmentation de la demande en matières premières rend intéressante l'exploitation de nouvelles ressources, en particulier l'exploitation de champs situées au fond des océans [20]. Dans ce cas, il s'agit de transporter des solides de taille grande devant le diamètre du tuyau, dans un circuit de forme complexe, incluant des parties verticales, horizontales, et éventuellement des coudes et des formes en S. Pour le transport en conduite verticale, il existe des modèles prédictifs basés sur les travaux de Newitt et al.et Richardson et al. [8].

L'objectif de ce travail est le transport hydraulique de particules solides grosses dans un écoulement d'eau à l'intérieur d'une conduite cylindrique horizontale. De nombreux paramètres sont à priori importants dans ce type d'écoulement tel que le débit d'eau, débit de particules solides et la pression dans la conduite. Cette pression influe sur les interactions entre l'eau et les particules solides. Pour mesurer toutes ces grandeurs et extraire les informations nécessaires à la compréhension du transport solide, un dispositif expérimental a été réalisé. Nous avons visualisé et étudié les pertes de charge pour des particules sphérique assez grandes relativement au diamètre de la conduite (20, 24 et 60%) [22].

II. Description et principe de fonctionnement :

La manipulation, et les différents matériels utilisés sont décrits ci dessous:

Nous nous intéressons à l'écoulement des particules solide dans un tube rigide horizontal de longueur 2x2m et de diamètre D=25mm dans lequel circule un mélange liquide/solide. Ce tube effectue une courbe horizontale à 180° de diamètre de 30 cm. Une pompe alimente le circuit en eau claire. Un dispositif d'injection de particule solide a été réalisé. Les particules tombent par gravité dans un tube flexible est reliant le fond du _{réservoir} des particules à la conduite en passant par une zone tampon. Le débit de grains est réglé à l'aide d'une vanne sphérique. Le mélange arrive dans un système de séparation solide/liquide.

Ce système est constitué d'un premier vase muni d'un filtre, pour récupérer les particules solide, et permettre uniquement à l'eau de passer dans un deuxième réservoir qui lui aussi est relié a la pompe qui le refoule dans le circuit, ainsi on réalise un circuit fermer pour l'eau (figure1) [22].



Figure (IV.1): Schéma du banc d'essai

II.1. Matériels utilisés:

Le circuit est réalisé par des tubes en plexiglas pour permettre la visualisation de l'écoulement. Trois types de particules de différents diamètres et différentes densité sont utilisées (billes en verre et en alumine). La figure 2 illustre les différentes particules ainsi que leurs propriétés **[22-23]**.



Particule en Alumine de 6 mm de diamètre et d'une densité de 3650 Kg/m³



Particule en Verre de 5 mm de diamètre et d'une densité de 2500 Kg/m³



Particule en Alumine de 15mm de diamètre et d'une densité de 3650 Kg/m³

Figure(IV. 2): Particules solides utilisées.

II.2. Paramètres de contrôle:

On mesure pour chaque type de solide la perte de charge, pour différentes concentrations, et différente vitesses.

Les paramètres de contrôles sont: Qs le débit volumique du solide et Q_1 le débit volumique de l'eau (liquide). La vitesse du mélange U_m et la concentration du solide C sont respectivement:

$$U_m = \frac{Q_{s+Ql}}{S} \qquad \qquad C = \frac{Q_s}{Q_{s+Ql}}$$

où S est la section de la conduite.

Les pertes de charge G sont exprimées en gradients hydrauliques (mètres de colonne d'eau par mètre de conduite) :

$$\mathbf{G} = \frac{\Delta \mathbf{P}}{\mathbf{\rho} \mathbf{I} \mathbf{g} \mathbf{L}}$$

Les résultats seront illustrés dans le chapitre suivant.

Chapitre V

Résultats et Discussions

I. Introduction:

Nous présentant dans ce qui suit les résultats numériques du modèle à deux couches superposées aux résultats expérimentaux obtenus.

II. l'interprétation des résultats expérimentaux :

Les figures ci-dessous représentent une évolution du gradient hydraulique (G) en fonction de la vitesse de mélange des particules (U). Les effets de la concentration, de la taille des billes et de leur densité sont présentés en Fig.V.3.

Cas de référence l'Alumine 6mm et Verre 5mm .

II.1. Effet de la concentration:

L'accroissement de la concentration (C) augmente la perte de charge et vue que les courbes ne sont pas monotones donc il existe un minimum U_{crit} qui varie avec la concentration, qui semble augmenter très faiblement, voire décroître pour C = 20% (Fig.V.3a).

II.2. Effet de la taille:

Ces dernières sont différentes L'augmentation de taille diminue la perte de charge ainsi que la vitesse critique (figure V. 3b, 3c).

II.3. Effet de la densité:

L'augmentation de la densité engendre une augmentation significative des pertes de charges et la vitesse critique (figure V. 3d, 3e). On remarque aussi que la perte de charge est beaucoup plus élevée que dans le cas d'eau claire pour toutes les vitesses dans la Fig.V.(3a,3c,3e) contrairement au Fig.V.(3b,3d) on constate que pour les deux dernière vitesse la perte de charge dans le cas d'eau claire et légèrement plus élevées que celle de l'Alumine et du Verre.



Figure (V.3a): Gradient hydraulique en fonction de la vitesse de mélange - Effet de la concentration de l'Alumine 06 mm -



Figure (V.3b): Gradient hydraulique en fonction de la vitesse de mélange - Effet de la taille pour C = 5% -



Figure (V.3c): Gradient hydraulique en fonction de la vitesse du mélange - Effet de la taille pour C = 10% -



Figure(V. 3d): Gradient hydraulique en fonction de la vitesse de mélange - Effet de la densité pour C = 5% -



Figure (V.3e) : Gradient hydraulique en fonction de la vitesse de mélange - Effet de la densité pour C = 10% -

Pour mieux comprendre le phénomène, on utilise d'autres diamètres de particules différents de ceux déjà utilisé, on obtient les résultats qui s'expriment comme suit:

Effet de la concentration

• Verre 16mm

On constate que l'augmentation de C accroit la perte de charge et elle reste toujours plus élevée que dans cas d'eau claire sauf pour les deux dernières vitesse de C=5% la perte de charge baisse légèrement au dessous de C=0% tandis que U_{crit} semble augmenter largement car elle passe de $U_{crit} \approx 1.4$ m/s pour C=5% à $U_{crit} \approx 3$ m/s pour C=10%, et décroître pour C =15% (Fig.V.4a).



Figure(V.4a): Gradient hydraulique en fonction de la vitesse de mélange - Effet de la concentration du Verre 16mm -

• Verre 10mm

L'augmentation de C accroit la perte de charge et elle reste toujours plus élevée que dans le cas d'eau claire sauf pour les deux dernières vitesse où C=5% la perte de charge baisse légèrement au dessous de C=0%.tandis que U_{crit} semble décroitre légèrement de U_{crit} \approx 1,8m/s pour C=5% à 1,67m/s pour C =15% (Fig.V.4a).



Figure(V.4b): Gradient hydraulique en fonction de la vitesse de mélange - Effet de la concentration du Verre 10mm -

• Verre 5mm

L'augmentation de C accroit la perte de charge et elle reste toujours plus élevée que dans le cas d'eau claire sauf pour les deux dernière vitesse pour C=5% peuvent être confondues avec C=0%. Tandis que U_{crit} semble décroitre de U_{crit} \approx 1,8m/s pour C=5% à 1,2m/s pour C =10% (Fig.V.4b).



Figure(V.4c): Gradient hydraulique en fonction de la vitesse de mélange - Effet de la concentration du Verre 5mm-

• Alumine 15mm

L'augmentation de C engendre l'accroissement de la perte de charge ainsi que de U_{crit} qui passe de $U_{crit}=2,2m/s$ pour C=5% à $U_{crit}=1,5m/s$ pour C=10% (Fig.V.4b).



Figure(V.4d): Gradient hydraulique en fonction de la vitesse de mélange -Effet de la concentration du l'Alumine 15mm -

Effets de la taille

• Verre C=10%:

Pour différents diamètres du Verre (16mm, 10mm, 5mm) et une C=10% l'augmentation de taille augmente la perte de charge ainsi que la vitesse critique (Fig.V.5).



Figure(V.5): Gradient hydraulique en fonction de la vitesse de mélange - Effet de la taille pour C=10% -

• Verre C=5%

On constate une légère augmentation de la perte de charge dû a l'augmentation de la taille du verre sauf pour les deux dernières vitesses des trois courbes qui se trouve légèrement au-dessous de celle de l'eau claire (Fig.V.5a)



Figure(V.5a): Gradient hydraulique en fonction de la vitesse de mélange - Effet de la taille pour C=5% -

Effet de la densité

• Concentration C=5%

L'augmentation de la densité engendre une augmentation de la pertes de charge et de la vitesse critique .On remarque aussi que la perte de charge est plus importantes que dans le cas d'eau claire pour les premières vitesses et diminuer ensuite pour descendre légèrement audessous de celle d'eau claire pour les deux dernières vitesses(Fig.V.6).



Figure(V.6): Gradient hydraulique en fonction de la vitesse de mélange - Effet de la densité pour C=5% -

• Concentration C=10%

L'augmentation de la densité engendre une augmentation significatives des pertes de charges et la vitesse critique. On remarque aussi que la perte de charge est beaucoup plus élevée que dans le cas d'eau claire pour toutes les vitesses (Fig.V.6a).



Figure(V.6a): Gradient hydraulique en fonction de la vitesse de mélange - Effet de la densité pour C=10% -

On constate que la variation du diamètre, la concentration et la densité de la particule ont une grande influence sur le gradient de pression car elle engendre la croissance et la décroissance de ce dernier.

III. Interprétation des résultats du modèle à deux couches:

Nous avons superposé les résultats obtenus expérimentalement avec ceux de Doron et l'interprétation de ces derniers sont données par les figure ci-dessous:

III.1. Particule en Alumine :

Pour divers concentrations et diamètre de l'alumine on constate que la perte de charge dans le modèle à deux couches et beaucoup plus élevé que pour l'alumine seul ou bien l'eau claire , et que le gradient de pression est au minimum au point de la vitesse critique, on remarque que la courbe de Doron (modèle à deux couches) a la même allure que celle d'eau claire mais la perte de charge reste plus importantes dans le modèle à deux couches Fig. V.(1A,2A,3A,4A,5A).



Figure(V.1A): Gradient hydraulique en fonction de la vitesse de mélange

- Cas Alumine 15mm, C=10% -



Figure(V.2A): Gradient hydraulique en fonction de la vitesse de mélange



- Cas Alumine 15mm, C=5% -

Figure(V. 3A): Gradient hydraulique en fonction de la vitesse de mélange

- Cas Alumine 6mm, C=5% -



Figure(V.4A): Gradient hydraulique en fonction de la vitesse de mélange

- Cas Alumine 6mm, C=10% -



Figure(V.5A): Gradient hydraulique en fonction de la vitesse de mélange

- Cas Alumine 6mm, C=15% -

III.2. Particules en Verre :

Pour le verre on constate que les courbes diffèrent avec la variation du diamètre et la concentration. Les résultats sont présentés ci-dessous :

• Verre 16mm:

Contrairement à l'alumine la perte de charge du verre change avec la variation de la concentration ainsi que du diamètre, pour C=15% on constate que cette perte de charge est beaucoup plus élevée pour le mélange.

Par contre pour une C= 10% la perte de charge décroit jusqu'au dessous de celle de l'eau claire pour atteindre sa valeur minimal G= 0.04m/m et U_{crit}=2.08 m/s et remonté ensuite pour atteindre G=0.24m/m.

Finalement pour C=5% on distingue une légère augmentation de la perte de charge.



Figure (V. 1V): Gradient hydraulique en fonction de la vitesse de mélange

-Verre 16mm, C=15%-



Figure (V. 2V): Gradient hydraulique en fonction de la vitesse de mélange

-Verre 16mm, C=1	0%-
------------------	-----



Figure (V.3V): Gradient hydraulique en fonction de la vitesse de mélange

-Verre 16mm, C=5%-

• Verre 10mm:

Pour une C=10% on constate que la perte de charge du modèle à deux couches (Doron) décroit jusqu'a se confondre avec celle de l'eau claire et sa quand U_{crit} =2.58m/s et remonté ensuite.

Pour C=5% on remarque une légère augmentation de la perte de charge pour le mélange si on le comparent à l'eau et au verre seul.



Figure (V.4V): Gradient hydraulique en fonction de la vitesse de mélange

-Verre 10mm, C=5%-

• Verre 5mm:

Pour C=5% la perte de charge et plus élevé pour le modèle à deux couches que dans le cas d'eau claire et du verre seul. Et pour C=10% on constate le même résultat que dans le cas du verre à 16mmet C=10%.



Figure (V. 5V): Gradient hydraulique en fonction de la vitesse de mélange

-Verre 5mm, C=5%-



Figure (V. 6V): Gradient hydraulique en fonction de la vitesse de mélange

-Verre 5mm, C=10%-

Dans le cas de l'Alumine on constate que le gradient de pression est plus élevés dans le modèle de Doron que dans l'expérimentale, contrairement au Verre le gradient de pression varie avec la variation de la concentration ainsi que le diamètre jusqu'à descendre au-dessous de la courbe d'eau claire ou à ce confondre en certains point.

IV. Conclusion

Nous avons donc mesuré les pertes de charges en fonction de la vitesse de mélange pour des billes calibrées de taille et de densités différentes, ainsi que pour des mélanges eau/ particules solides, dans une conduite horizontale. Plusieurs conclusions partielles peuvent être tirées :

- La perte de charge est significativement élevée comparativement au cas sans solides.
- Pour $V_m < V_c$, on observe des régimes avec un lit stationnaire au-dessus duquel se trouve un lit de grains en mouvement. Par conséquent, la perte de charge est très importante au début puis elle diminue avec le vitesse du mélange.
- Lorsque la vitesse augmente davantage ($V_m > V_c$), les billes sont maintenues en suspension, et les courbes de pertes de charges suivent la tendance de la courbe en eau claire.
- A densités et concentration identiques, les pertes de charges en écoulement horizontal décroissent avec la taille des particules.
- Les courbes de Doron ont la même allure que celle de l'expérimentale, car on observe une décroissance de la perte de charge jusqu'à un minimum locale et finir par une augmentation jusqu'à une certaine valeur
- Les courbes de Doron en générale sont supérieure à celles de l'eau claire ainsi qu'a l'expérimental.

Conclusion générale

Les verrous scientifiques et technologiques du transport solide sont vastes et se trouvent dans diverses applications industrielles où phénomènes naturels. Ce type d'écoulement est un phénomène complexe qui depuis 1950 n'est traité que de manière expérimentale.

Ce travail se veut comme une contribution à la compréhension du transport solide dans les conduites . Il comporte deux parties essentielles. La première partie consiste à exploiter des résultats obtenus à partir d'une série d'expériences. La deuxième porte sur la résolution numérique du système d'équations non linéaires de Doron à deux couches. Dans cette dernière partie, un code de calcul a été élaboré sous le logiciel Matlab.

La comparaison des résultats montre une certaine concordance entre les résultats obtenus par les deux approches. Toutefois, nous avons constaté que les résultats s'éloignent lorsque la taille, la concentration et la densité des particules varient. Nous avons également remarqué que :

- Pour une densité spécifique donnée et une concentration fixée, le gradient hydraulique diminue avec l'augmentation du diamètre de la particule .
- La perte de charge est significative comparativement en l'absence de solides.
- Les courbes obtenues expérimentalement possèdent la même allure que celles du modèle à deux couches. Ces courbes décroissent jusqu'à atteindre un minimum local pour ensuite accroitre et suivre l'allure de celles en eau claire.

Au terme de ce travail, des perspectives peuvent être envisagées, à savoir :

- Les corrélations empiriques existantes donnent des résultats satisfaisants mais les constantes classiques correspondantes restent insuffisantes pour les grosses particules. Cela fera l'objet d'autres études nécessaires pour l'amélioration du modèle quelque soit la taille de la particule.
- Il serait très intéressant de développer et d'étendre le code initié pour une large gamme de conditions d'écoulements.
- L'élargissement du canal est aussi envisagé pour passer à d'autre séries d'essais avec d'autres types de solides pour lever certaines incertitudes et confirmer davantage certains résultats.

Résumé

Le contexte générale de ce mémoire rentre dans le cadre de la modélisation des écoulements biphasiques (solide/liquide). Le travail effectué porte sur l'étude expérimentale et la modélisation des phénomènes de transport de particules solides dans un écoulement d'un fluide incompressible a l'intérieure d'une conduites horizontales. Des modèles physiques ont été présenté pour la prévision de la chute de pression et du comportement de l'écoulement.

Les résultats des données expérimentales sont comparés à ceux issus des modèles existant dans la littérature.

Mots-clés: Transport solide, écoulement diphasique, conduite horizontale, pertes de charge.

Abstract

The general context g of this memory returns within the framework of the modeling of the biphasic flows (solid/liquid). The carried out work concerns the experimental study and the modeling of the phenomenon of transport of solid particles in a flow of an incompressible fluid inside horizontal pipes. Physical models were presented for the prediction of the pressure drop and flow patterns.

The results of the experimental data are compared with those resulting from the models existing in the literature.

Key words: hydraulic transport, solid-liquid flow, horizontal pipes, pressure drop.

Références bibliographiques

[1] ZELLA L., KETTAB A., CHASSERIAUX G. Simulation hydraulique d'une rampe de micro-irrigation par la méthode dite des volumes de contrôle, Revue Agronomie, 23(1):37-44. (2003).

CARLIER M. Hydraulique générale et appliquée. Ed. Eyrolles, Paris, 556p. (1980).

CHRISTIANSEN J.E. Irrigation by sprinkling. Université Californie. Agric. Expt. Bull., n° 670, Berkeley. (1942).

- [2] Mecafluide (1).pdf
- [3] Ning Hsing Chen, « An Explicit Equation for Friction Factor in Pipe », American Chemical Society, 1979
- [4] J. CARBONNET M.ROQUES. Fichier : Poly-mecaflu.doc © académie de Nancy-Metz Page 10 / 14.
- [5] Mr.SELLAM FOUAD. cours hydraulique fait à l'institut national agronomique département du génie rural section hydraulique agricole
- [6] Journal of Dredging Volume 14, No. 1, March 2014 ,Official Journal of the Western Dredging Association
- [7] Durand, R., & Condolios, E. (1952). "Etude experimentale du refoulement des materieaux en conduites en particulier des produits de dragage et des schlamms." Deuxiemes Journees de l'Hydraulique, pp. 27-55.

-Durand, R. (1953). "Basic Relationships of the Transportation of Solids in Pipes -Experimental Research." Proceedings of the International Association of Hydraulic Research. Minneapolis, MN.

[8] Newitt, D. M., Richardson, M. C., Abbott, M., & Turtle, R. B. (1955). "Hydraulic conveying of solids in horizontal pipes." Transactions of the Institution of Chemical Engineers Vo.I 33., 93-110.

-Richardson, J. F., & Zaki, W. N. (1954). "Sedimentation & Fluidization: Part I". Transactions of the Institution of Chemical Engineering 32, 35-53.
[9] Gibert, R. (1960). "Transport hydraulique et refoulement des mixtures en conduites." Annales des Ponts et Chausees, 130(3), pp. 307-374, 130(4), pp. 437-494.

-Fuhrboter, A. (1961). "Über die Förderung von Sand-Wasser-Gemischen Rohrleitungen." Mitteilungen des Franzius-Instituts, H. 19.

- [10] Jufin, A. P., & Lopatin, N. A. (1966). "O projekte TUiN na gidrotransport zernistych materialov po stalnym truboprovodam." Gidrotechniceskoe Strojitelstvo 9, pp. 49-52.
- [11] Zandi, I., & Govatos, G. (1967). "Heterogeneous flow of solids in pipelines." Proc. ACSE, J. Hydraul. Div., 93(HY3)., 145-159.
- [12] Turian, R. M., & Yuan, T. F. (1977). "Flow of slurries in pipelines." AIChE Journal, Vol. 23., 232-243.
- [13] Wilson, K. C., Addie, G. R., Clift, R., & Sellgren, A. (1997). "Slurry Transport using Centrifugal Pumps." Glasgow, UK.: Chapman & Hall, Blackie Academic & Professional.

Wilson, K. C., Addie, G. R., & Clift, R. (1992). "Slurry Transport using Centrifugal Pumps." New York: Elsevier Applied Sciences.

WILSON, K. C. Slip point of beds in solid-liquid pipeline flow. Proc. ASCE, J. Hydraul.

- P. DORON, D. GRANICA and D. BARNEA
 Department of Fluid Mechanics and Heat Transfer, Faculty of Engineering, Tel-AUniversity, Ramat-Aviv 69978, Israel
- [15] BAGNOLD, R. A. The flow of cohesionless grains in fluids. Phil. Trans. R. Soc. A249, 235-297. 1957.
- [16] TELEVANTOS, Y., SHOOK, C. A., CARLETON, A. & STREAT, M. Flow of slurries of coarse particles at high solids concentrations. Can. J. chem. Engng 57, 255-262. 1979.
- [17] OKUDA, K. Mechanism for suspension and dispersion for coarse solid particles in the hydraulic transport line. In Proc. 7th Int. Conf. on the Hydraulic Transport of Solids in Pipes, Sendai, Paper G3, pp. 291-300. 1980.

[18] TAYLOR, G. The dispersion of matter in turbulent flow through a pipe. Proc. R. Soc. A223, 446-468. 1954.

BIRD, R. B., STEWART, W. E. & LIGHTVOOT, E. N. Transport Phenomena, Chap. 6. Wiley, New York. 1960.

RICHARDSON, J. F. & ZAKI, W. N. Sedimentation and fluidization, part I. Trans. Instn chem. Engrs 32, 35-53. 1954.

- [19] Baha Abulnaga P.E. 2002 Slurry Systems Handbook, McGraw-Hill.
- [20] Pougatch K., Salcudean M. 2008 Numerical modelling of deep sea air-lift. Ocean Eng.35 1173-1182
- [21] Richardson J.F., Zaki W.N. 1957 Sedimentation and uidisation. Trans. Inst. Chem. Engrs. 3235-53
- [22] S. ZOUAOUI, H.DJEBOURI, A. MENGUELTI, K. MOHAMMEDI and A. OUAKED. "Analytical Approach Modeling of the Motion of a Solid Particle in a Fluid Flow inside a Pipe". Proceedings of the 5thInternational Symposium on Aircraft Materials Marrakech, MOROCCO, April 23-26, 2014 ACMA 2014 pp: 353.
- [23] Ravelet F., Bakir F., Khelladi S., Rey R., "Experimental study of hydraulic transport of large particles in horizontal pipes", Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 45, pp. 187-197, 2013.