

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

**UNIVERSITE MENTOURI-CONSTANTINE
FACULTE DES SCIENCES EXACTES
DEPARTEMENT DE PHYSIQUE**

N° de série :

N° d'ordre :

MEMOIRE

PRESENTE POUR OBTENIR LE DIPLOME DE MAGISTER EN PHYSIQUE

SPECIALITE: PHYSIQUE ENERGETIQUE

OPTION : PHOTO-THERMIQUE

THEME

**PERFORMANCE D'UN PUIITS DE PETROLE HORIZONTAL
APPLICATION CFD**

Par

Fayçal ZEBOU DJ

Soutenu le : 03/02/ 2010

Devant le jury :

Président :	M. AFRID	Prof	Univ. Mentouri	Constantine
Rapporteur :	L. BAHI	Prof	Univ. Mentouri	Constantine
Examineurs :	Z. NEMOUCHI	Prof	Univ. Mentouri	Constantine
	N. BELLEL	M. C	Univ. Mentouri	Constantine

Dédicaces

À mes chers parents

À ma femme

À mon enfant Joulène

À mes frères

À mes sœurs et leurs maris/enfants

À tous ceux qui m'ont aidés de près ou de loin

Remerciements

Mes remerciements vont tout premièrement à Dieu tout puissant pour la santé, la volonté et la patience qu'il m'a donné durant toutes ces années d'études.

Je tiens évidemment à débiter ces remerciements en témoignant de ma profonde reconnaissance envers toute personne qui ma poussé à reprendre le chemin des études et d'être de nouveau à l'université.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance à tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce travail. Particulièrement, Monsieur L.BAHI (1) pour m'avoir encadré, dirigé, et de m'avoir fait confiance dans les orientations scientifiques de ce mémoire.

Mes remerciements s'adressent aussi à Messieurs : Z.NEMOUCHI (2), M.AFRID (3) N.BELLEL (4) pour avoir accepté de participer à ce jury.

(1), (2), (3) Professeurs à l'Université Mentouri – CONSTANTINE
(4) Maître de conférence à l'Université Mentouri – CONSTANTINE

Table de Matières

Nomenclature

Liste des Figures

Liste des Tableaux

Résumé	I
Introduction	II
Objectif du Travail	III
Etude bibliographique	IV

CHAPITRE I

Généralités sur les puits Horizontaux

1.1 Concept industriel des puits déviés et Horizontaux.....	1
1. a Historique	1
1. b Définition et trajectoire.....	1
1.2 Classification des puits Horizontaux.....	3
1.3 Complétion des puits Horizontaux.....	4
1.4 Techniques de perforations.....	5
1.5 Processus de perforations.....	6

CHAPITRE II

Aperçu sur le Software Fluent

2.1	Présentation du code CFD	8
2.2	Etapas essentielles dans l'analyse CFD	9
2.a	Formulation du problème	9
2.b	Maillage	9
2.c	Spécification de l'écoulement	9
2.d	La solution numérique	9
2.e	Analyse des résultats	9
2.3	Organigramme CFD	10
2.4	Démarche numérique du solveur	10
2.5	Les conditions aux limites	14
2.6	Généralisation des calculs par Fluent	15

CHAPITRE III

Modélisation Géométrique et Mathématique

3.1	Géométries de la problématique	16
3.2	Hypothèses et simplifications	17
3.3	Maillage 3D	17
3.4	Turbulence	18
3.5	Equations gouvernants le mouvement	19
3.6	Modélisation de la turbulence	20
6.a	Modèle à une équation	20
6.b	Modèle à deux équations	21

CHAPITRE IV

Analyse des pertes de charges dans les drains Horizontaux perforés et non perforés

4.1 Analyse microscopique.....	23
4.2 Concept de l'écoulement développé.....	28
4.3 Visualisation des résultats de la simulation Fluent.....	30
4.4 Résultats numériques des pertes de charges.....	32
4.5 Modélisation de l'apport de matière 'flux radial'.....	34
4.6 Modèles des configurations du flux radial.....	34
4.7 Discussion des résultants.....	36

CHAPITRE V

Corrélations du Facteur de Frottement – f

5.1 Aperçu sur les différentes corrélations du facteur -f.....	37
1-a drain sans flux radial ($Re_w=0$).....	37
1-b drain avec flux radial.....	37
5.2 Comparaison des corrélations	39

Conclusion Générale et Perspectives

Bibliographie

Liste des Figures

1.1 Types des puits	2
1.2 Classification des puits Horizontaux.....	3
1.3 Complétion des puits Horizontaux.....	4
1.4 Relation Formation-puits	5
1.5 Test sur échantillons roche réservoir.....	6
1.6 Séquences détonation explosives.....	6
1.7 Exemple d'une perforation.....	7
2.1 Tracé des résidus.....	13
2.2 Tracé de l'historique d'une variable.....	13
3.1 Géométrie du drain Horizontal & conditions aux limites	16
3.2 Géométrie-vue sur Gambit.....	16
3.3 Vues de Maillage-Gambit & Fluent.....	17
4.1 Diagramme de Moody	26
4.2 Profile de la vitesse V_z (écoulement développé).....	29
4.3 Distribution de la pression statique.....	30
4.4 Distribution de la pression Totale.....	31
4.5 Contours de vitesses V_z	31
4.6 Contours de l'énergie cinétique K	31
4.7 Contours de y^+ parois.....	31
4.8 Types des pertes de charges.....	32
4.9 Histogramme des pertes de charges.....	33
4.10 Configuration: pénétration totale triangulaire symétrique.....	34
4.11 Configuration: pénétration totale triangulaire gauche.....	35
4.12 Configuration: pénétration totale triangulaire droite.....	35
4.13 Configuration: pénétration partielle uniforme gauche.....	35
4.14 Configuration: pénétration partielle uniforme droite.....	35
4.15 Influence du Flux radial 'pertes de charges'.....	36
5.1 Graphe de comparaison pour le facteur de frottement f	40

Liste des Tableaux

TAB 4.1	Distance de l'écoulement développé.....	28
TAB 4.2	Pertes de charges (résultats numériques).....	32
TAB 4.3	Résultats numériques des pertes de charges (profiles)...	36
TAB 5.1	Résultats numériques et expérimentales- f	40

Nomenclature :

δ_{ij} : Symbole de Kronecker

μ : Viscosité dynamique, kg/m.s

ρ : Masse volumique, m³/kg

τ_{ij} : Tenseur des contraintes visqueuses, N/m²

Ω_{ij} : tenseur du taux de vortacité, N/m²

ε : Taux de dissipation de la turbulence, m²/s³

ν_m : Viscosité cinématique moléculaire, m²/s

ν_t : Viscosité cinématique turbulente, m²/s

d : Diamètre des perforations, m

D : Diamètre de la conduite, m

L : Longueur de la conduite, m

q : Rapport des débits massiques

S_{ij} : Tenseur du taux de déformation, 1/s

t : Temps, s

y^+ : La distance à la paroi normalisée

A : Section de la conduite, m²

B : Facteur de correction de quantité mouvement

$C1\varepsilon$; $C2\varepsilon$: Constantes utilisées dans ε équation

C_μ : Constante utilisée dans le modèle de la turbulence

D : Diamètre de la conduite, m

f : Facteur de frottement dans conduites perforés

f_o : Facteur de frottement dans les conduites non perforées ' pipe' 'Fanning friction factor'

g : Force de gravité, m/s²

k : Energie de turbulence cinétique turbulent par unité de masse

L_e : Distance de l'écoulement développé, m

p : Pression, bar

Re : Nombre de Reynolds flux axial

Re_w : Nombre de Reynolds à travers les perforations flux radial

S : Périmètre de la conduite, m
 e : Rugosité de la conduite, mm
 u : Composante de la vitesse x , m/s
 u' : Fluctuation vitesse u , m/s
 v : Composante de la vitesse y , m/s
 v' : Fluctuation vitesse v , m/s
 w : Composante de la vitesse w , m/s
 w' : Fluctuation vitesse w , m/s
 σ_k : Nombre de Prandtl de la turbulence pour k
 σ_ε : Nombre de Prandtl de la turbulence pour ε
 τ_w : Contraintes de cisaillement sur parois.

d : Diamètre de la conduite (m).

g : Force de gravite (m/s²).

θ : Angle d'inclinaison (°).

Résumé :

L'étude du comportement d'écoulement du fluide (Huile ou gaz) dans un drain horizontal est très importante pour l'exploitation et le management des réservoirs dits non économique. Vu que, le contact entre roche poreuse et drain horizontal est beaucoup plus important que dans un puits conventionnel, alors l'impact du champ d'écoulement à l'intérieur du drain est très significatif sur le total de la production d'un réservoir d'Huile ou de Gaz, surtout dans les champs matures.

Ce qui rend l'écoulement au sein du drain totalement différent qu'un simple écoulement dans un pipe par la présence d'un flux entrant (puits producteur) ou bien un flux sortant cas d'un puits injecteur, mais aussi la spécificité de l'écoulement qui est dans un espace confiné et non pas à l'atmosphère.

Ceci dit, plusieurs paramètres agissent directement sur les paramètres affectant la performance d'un puits horizontal, parmi le coefficient de frottement, l'accélération, le comportement du fluide monophasique ou diphasique, la pénétration du flux entrant à travers les perforations.

Le software '**Fluent**', autant que code commercial, nous a permis de faire des sensibilités sur ces paramètres et aboutir à des résultats concrètes au compte de l'industrie pétrolière.

Introduction :

L'intensité de la chute de pression a été considérée négligeable dans beaucoup d'études, pour une raison simple, satisfaire les simplifications des différentes études dans la littérature, à titre d'exemple satisfaire le concept de conductivité, ainsi uniformiser les flux dans le drain horizontal.

Par contre cette chute de pression ne peut être négligée pour plusieurs raisons importantes, parceque elle affecte le comportement du fluide dans le drain et dans le réservoir lui-même, sans oublier l'influence des paramètres hydrauliques (le nombre de Reynolds, la rugosité du pipe...etc.) et les caractéristiques petrophysique de la roche réservoir.

Alors, la quantification de la chute de pression dans le drain horizontal demeure très importante et primordiale pour comprendre le comportement physique du fluide.

Une très bonne estimation de la chute de pression aide les ingénieurs réservoir à choisir une Complétion adéquate, qui augmente les performances du puits et lui donne une durée de vie aussi importante, ainsi à l'élaboration d'un plan efficace de déplétion du réservoir.

Ceci dit, le forage des drains horizontaux a pour objectif principale produire avec grand débit, mais il n'est pas toujours vrais, de forer le plus long drain possible, à cause de la chute de pression dans le trou "drain" du aux frottements dans les parois, cette chute de pression peut être comparable à celle du réservoir (champs mature).

A la fin, pour y atteindre l'objectif principal du travail, l'étude menée a été divisée sur cinq chapitres. Le premier chapitre consacré aux généralités sur l'application des puits horizontaux dans l'industrie pétrolière, dans le deuxième chapitre on aborde le software commercial utilisé dans la modélisation et la simulation numérique, ensuite on détail la formulation du problème dans un troisième chapitre.

Le quatrième chapitre exploite les résultats numériques, et pour finir on a essayé de comparer des résultats numériques de la présente étude, expérimentales et autre semi-empirique celle de Moody dans un cinquième chapitre.

Objectif de l'étude :

Le présent travail a comme objectif principal l'estimation de la chute de pression dans le drain (wellbore) d'un puits horizontal, en tenant compte du flux entrant à travers les perforations réalisées.

Il comprend aussi l'influence des paramètres hydrauliques (frottements, nombre de Reynolds, ...etc.), sur les performances du puits, ainsi la visualisation du comportement du fluide (champ de vitesse, pression...etc.) dans le drain par la simulation numérique.

Etude bibliographique :

Dans les deux dernières décennies, les études théoriques intensives sur les puits horizontaux ont prouvée l'intérêt d'incorporer l'influence des paramètres hydrauliques, Dans le but d'estimer les performances des forages horizontaux dans la récupération des réserves d'huile et de gaz et le maintien de pression.

On peut sans aucun doute dire : que c'est un sujet de grand challenge, Dikken [1] était le premier qui a évoqué le sujet d'influence de la friction des parois sur la chute de pression dans le drain horizontal et donc la productivité du puits. Il a développé une équation différentielle pour déterminer le débit à chaque position dans le drain, tout en supposant que l'indice de productivité relative à la longueur du drain constante. Ensuite, elle a été généralisée pour les puits à gaz.

Ozkan [2] et al ont, à leur tour, introduit le concept de conductivité pour modéliser l'effet de la chute de pression sur les performances d'un puits horizontal. Ainsi que, la compréhension du comportement transitionnel du fluide dans le réservoir.

Sarica et al [3] ont investigué l'effet de la friction et l'accélération dans le drain ainsi que la chute de pression dans les puits à gaz.

Ihira et Shinizu [4] ont développé un programme POPHOZN simulant l'écoulement multiphasique et le monophasique.

Le travail sur les puits horizontaux et de très grande cadence, Suzuki [5] a développé une solution semi analytique en tenant compte du type d'écoulement dans le drain (laminaire ou turbulent).

Folfac et al [6] ont estimé l'effet de la chute de pression sur la productivité du puits, par le couplage du modèle drift flux représentant l'écoulement multiphasique dans le drain.

Une autre étude celle du Seinees et al [7] a bien déterminée l'effet du diamètre de drain et des frottements sur la productivité du puits. Ils ont pu aussi prouver que la longueur du drain peut ne pas être productive sur une section assez importante (non économique).

Yieldiz et Ozkan [8] ont développé une corrélation qui prévoie l'influence de la chute de pression dans le drain. Pour se faire, un facteur a été introduit dans la solution analytique de l'écoulement pour estimer l'impact des facteurs hydrauliques sur la productivité du puits.

Chapitre I

Généralités sur les puits Horizontaux :

Cette section aborde les différentes applications des forages dites non conventionnels : les forages horizontaux et déviés. Ces nouvelles technologies ont pour but une meilleure récupération des Hydrocarbures inaccessibles, dont on aborde brièvement les types de forages conventionnels et non conventionnels, ainsi les complétions des puits.

I-1 Contexte industriel des puits déviés et horizontaux :

1-a Historique :

L'idée de forer des drains Horizontaux existait depuis longtemps, le premier puits date de 1940, avec le développement rapide des technologies de forages ce type de puits à trouver sa place et à participer énormément dans l'extraction des Hydrocarbures demeurant inaccessible.

1-b Définition et trajectoire:

Type de puits:

On peut citer les types de puits suivants (**Fig I.1**) :

- Verticale (forage conventionnel)
- Partiellement déviés 'Slant '
- Directionnel (multi drains)
- Horizontal (90° d'inclinaison)

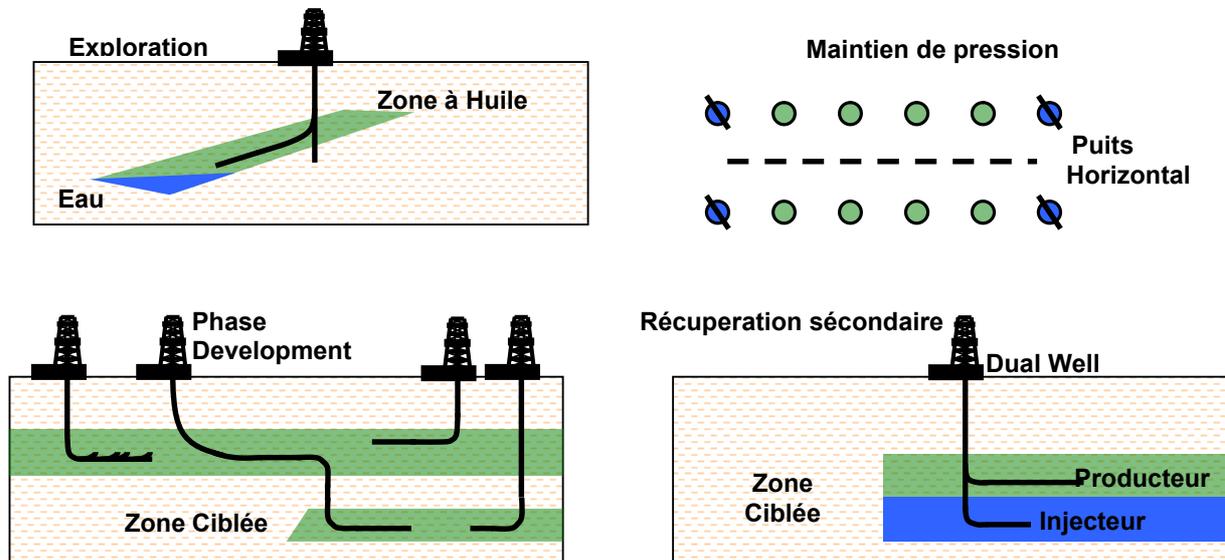


Fig I.1 Types de puits

Pourquoi on fore des drains Horizontaux ?

La réponse à la question est :

- Avoir une productivité de 3 à 5 fois celle d'un puits vertical ;
- Réduire les venues de Gaz et d'Eaux ;
- Traverser le maximum de surface dans la formation (maximum de volume dans le réservoir) et par conséquent un rayon de drainage plus grand ;
- Augmenter le taux de récupération en traversant des régions et de strates isolées et non accessible ;
- Augmenter le taux d'injectivité (polymères, vapeur, gaz ...etc.) ;

I-2 Classification des puits Horizontaux :

En fonction de la longueur du drain traversant la formation, on distingue trois types (**Fig I.2**), [25] :

- Long radius : plus de 1000 m
- Medium radius : plus de 700 m
- Short radius : plus de 50 m

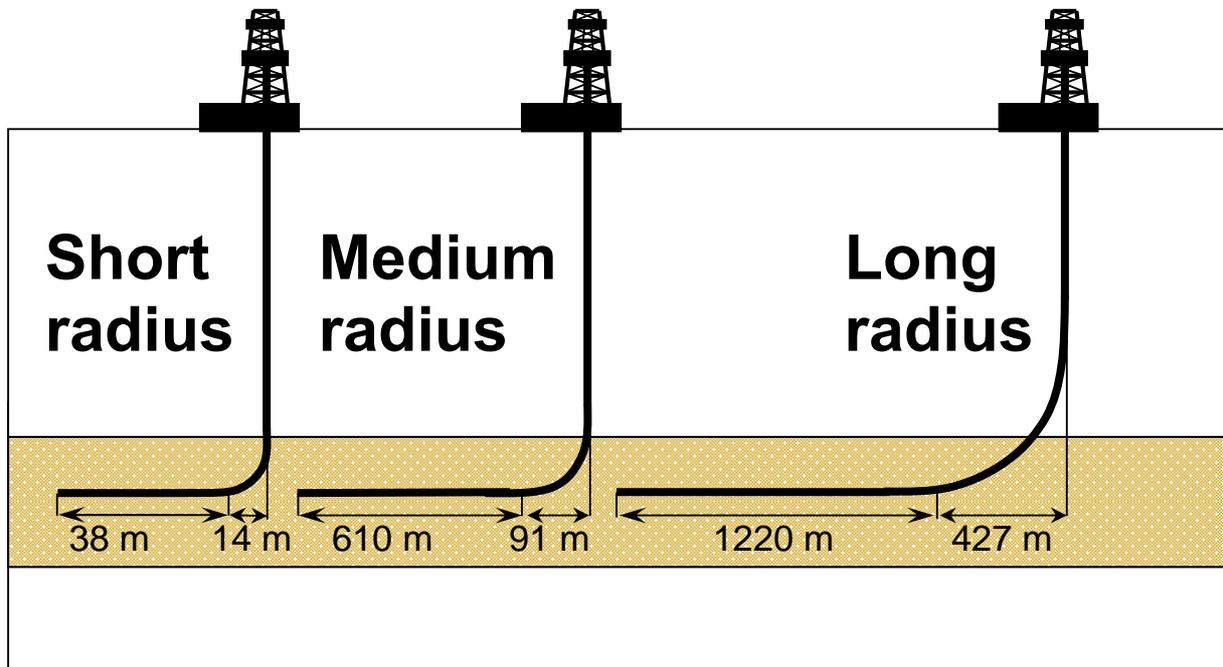


Fig I.2 Classification des puits Horizontaux

I-3 Complétion des puits Horizontaux [25] :

Les configurations ci-dessous [25] sont les plus utilisées dans l'industrie pétrolière, pour y faire face aux venues prématurées d'Eaux ou de Gaz, la complétion (d) est la plus choisie, de cela est venue l'idée de modéliser un prototype de celle-ci pour la simulation de l'écoulement et y étudier les performances.

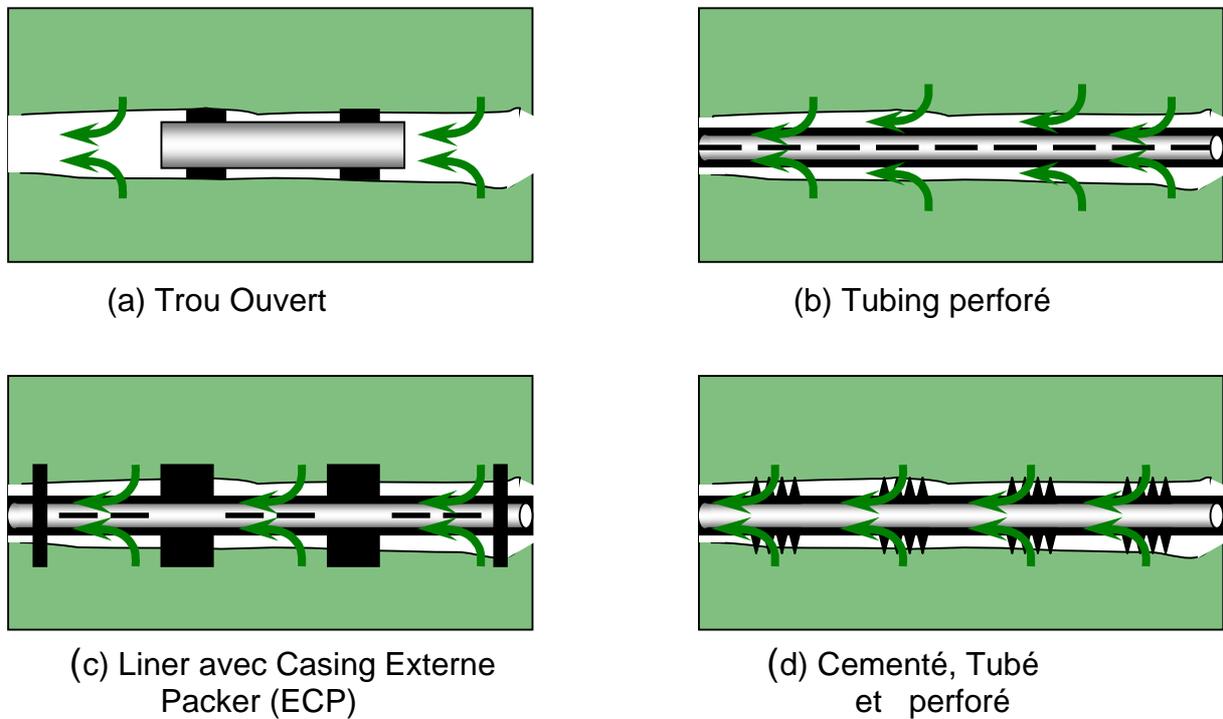


Fig I.3 complétion des puits Horizontaux

I-4 Techniques de perforations :

Une bonne complétion revient à dire : réaliser une bonne perforation. La perforation est la technique de créer une relation formation –puits (**Fig I.4**), dans le but de produire sur une longue période avec des meilleurs performances.

Chaque puits tubé et cimenté est sujet d'une perforation, pour permettre au fluide de s'écouler de la formation vers la surface, un pré-job 'design' doit être planifié et optimisé pour y avoir un tunnel propre et une perforation conductrice.

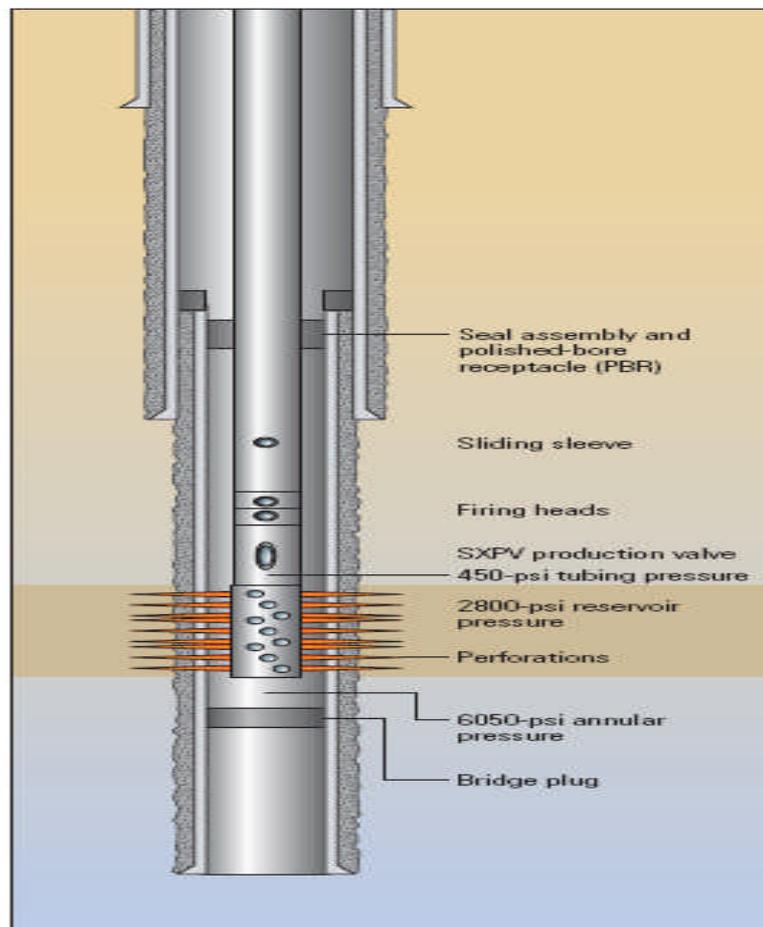


Fig I.4 Relation Formation-puits par la perforation (puits vertical)

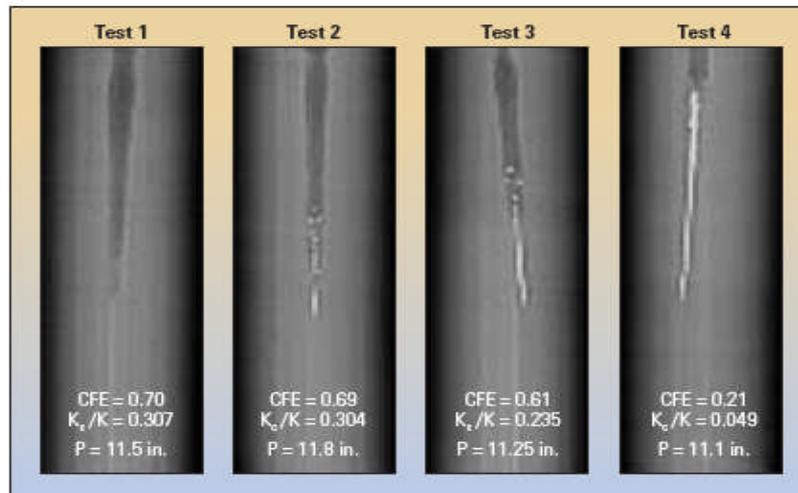


Fig I.5 Test sur échantillons roches réservoir

I-5 Processus de perforation :

La figure ci-dessous illustre les séquences de perforation à charges creuse, c'est une perforation à l'explosives parmi d'autres (il en existe plusieurs modes et types de perforation dans l'industrie pétrolière), ce type de perforation à ses inconvénients : il endommage la formation, et laisse des débris d'explosives qui réduisent la perméabilité et favorise les venues de sables surtout dans les réservoirs non consolidés. Les figures ci-dessous illustrent les séquences d'une détonation à la création d'un tunnel, ainsi une perforation type.

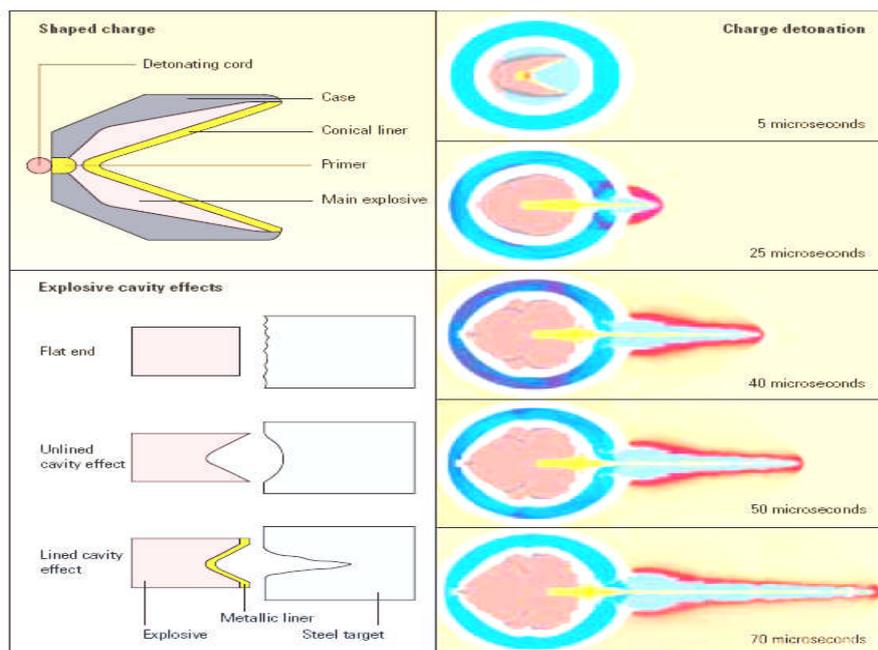
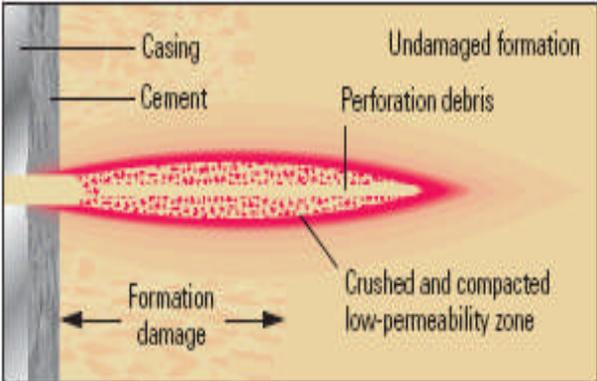
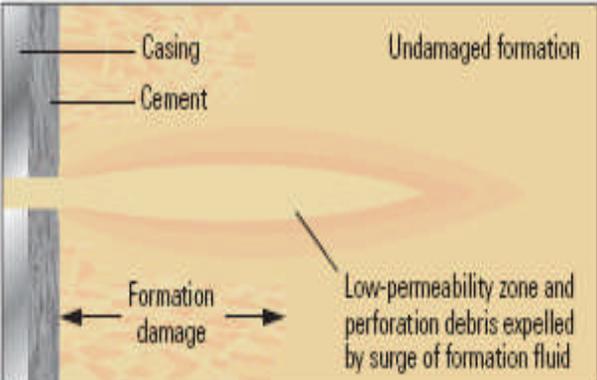


Fig I.6 Séquences 'détonation explosives'



Balanced Perforating



3000-psi Underbalanced Perforating



Fig I.7 Exemple d'une perforation

Chapitre II

Aperçu sur le software Fluent :

Toute étude de simulation est basée sur une méthode numérique, elle est choisie en fonction de la problématique et la précision des résultats numériques escomptées. Notre travail a été réalisé en utilisant le software **Fluent** de la famille **CFD**, qui est un code commercial programmé en langage **C** et basé sur la méthode numérique des volumes finis.

Pour la modélisation numérique, on a utilisé les deux softwares de **CFD** : **Gambit** (le mailleur) et **Fluent** (le solveur et le postproceseur).

Gambit et **Fluent** sont des logiciels, permettant de réaliser des simulations **2D** ou **3D** en mécanique des fluides allant de la construction du maillage avec Gambit à la résolution des équations de Navier Stokes et au post-traitement avec Fluent.

Largement répandus dans l'industrie (automobile, aéronautique, espace... etc.) en raison de leur interface graphique puissante et de l'abondance de leurs options, ils permettent de réaliser des simulations sur tous types de géométries complexes (fixes ou mobiles) associées à des maillages fixes ou adaptatifs et avec des modèles physiques variés (diphasique, turbulent, etc.).

II-1 Présentation du code CFD:

« Fluent » est un code de calcul qui permet de simuler les écoulements des fluides avec et sans transfert thermiques dans des géométries complexes. Il peut résoudre des problèmes d'écoulement avec des mailles structurées et non structurées, quelque soit la complexité de la géométrie, avec une facilité relative.

Les mailles supportées en **2D** sont de types triangulaires ou quadrilatéraux, elles sont tétraédriques, hexaédriques ou pyramidales en **3D**, ou des mailles (hybrides) mélangées. Le code « **Fluent** » est écrit en langage **C** et utilise pleinement la flexibilité et la puissance offertes par ce langage (allocation de l'espace mémoire dynamique). En outre, il utilise une architecture qui lui permet de s'exécuter en tant que plusieurs processus simultanés sur un seul PC de travail ou sur des machines en parallèles, pour une exécution plus efficace.

« Fluent » facilite à l'utilisateur sa manipulation à travers la simplicité de son interface graphique. Le code n'est limité uniquement par ces propres fonctions, mais il offre à l'utilisateur la possibilité d'y injecter sa propre fonction et définir toutes particularités de son problème. L'utilisateur avancé peut adapter ou augmenter aux besoins l'interface en programmant en langage C ou C++ ces propres macros et fonctions de menu, afin d'automatiser certaines procédures (ex. de condition aux

limite, périodique ou autres) par le moyens des UDF (User Defined Functions) sous forme de programme écrits en langage C, qui va être compilé par le compilateur intégré du code «Fluent », pour être exécuter après.

II-2 Etapes essentielles dans l'analyse CFD:

Le processus complet dit **CFD** est composé des étapes suivantes :

2-a Formulation du problème :

La physique du problème affecte les équations à résoudre, c'est-à-dire un problème compliqué nécessite un modèle de turbulence sophistiqué, généralement il est nécessaire de recourir à des simplifications sans en aucun cas affecté la précision de la solution pour simplifier le problème.

2-b Maillage :

C'est une étape critique dans une analyse **CFD**, car le problème peut changer en fonction des nombres et types des mailles utilisées. Généralement, les régimes d'écoulement à fort gradient de pression doivent être raffinés et encore plus recommandés au voisinage proche de parois.

2-c Spécification d'écoulement :

Une fois le maillage élaboré on passe à l'application des conditions aux limites et l'initialisation, ainsi l'introduction des propriétés du fluide.

2-d La solution numérique :

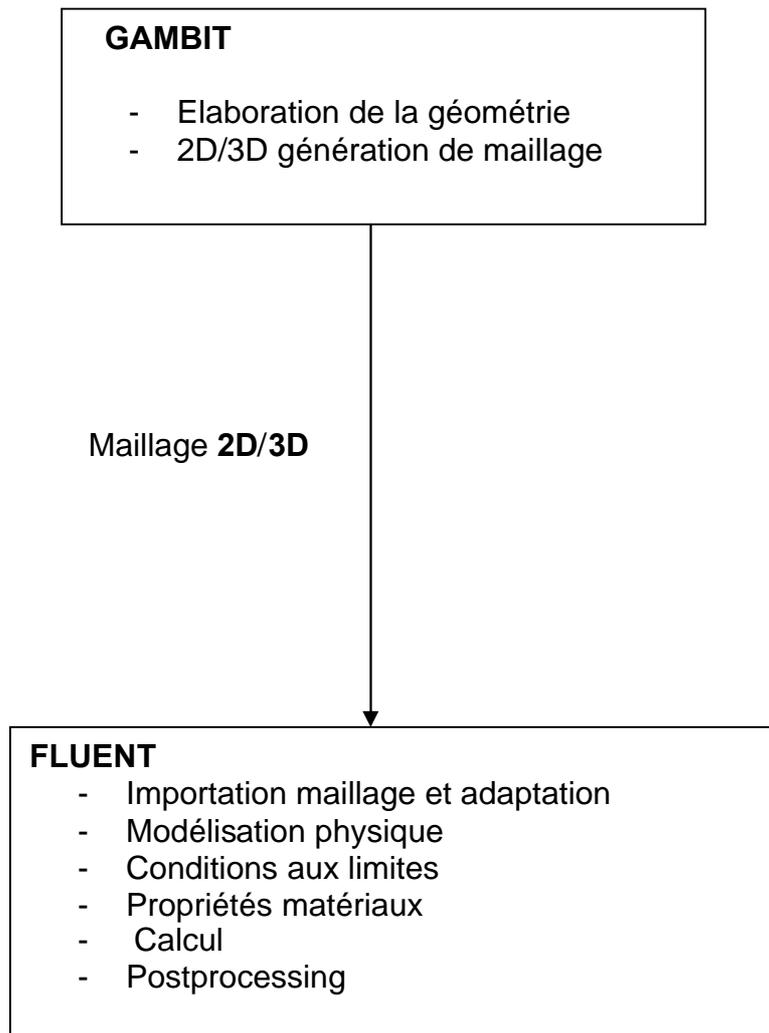
C'est la phase de la solution numérique des équations après discrétisation, en utilisant des critères de convergence après le choix de la méthode de résolution.

2-e Analyse des résultats :

Les résultats obtenus de l'étape (d) seront vérifiés avec l'aspect physique recherché et les différents paramètres d'écoulement seront représentés sous formes de graphes, contour...etc.

NB : les étapes **1, 2, 3** sont connues pour les analystes le stage de : **pre-processing** dans une analyse **CFD**.

II-3 Organigramme CFD:



II-4 Démarche numérique du solveur :

La procédure de simulation par le logiciel « **Fluent** » s'effectue suivant les étapes de l'algorithme ci-dessous, qui décrit les différents paramètres de la solution.

-Etape 1 : Choix du solveur

Les possibilités offertes sur « **Fluent** » pour définir le type du solveur sont : Coupled-Implicit, Coupled-Explicit, ou Segregated-Implicite.

Les 'Coupled solvers' sont recommandés si une forte interdépendance existe entre la densité, l'énergie, les moments, et/ou les espèces. (e.g, écoulement compressible à haute vitesse ou les écoulements réactifs).

En général, le solveur 'coupled-implicit' est recommandé par rapport au solveur 'coupled-explicit'. En gros, il est à noter que le temps nécessaire pour le solveur implicite est deux fois plus rapide et il nécessite une capacité mémoire deux fois plus que du 'coupled-explicit' ou 'segregated-implicit'. Il faut noter aussi que, le solveur

'coupled-explicit' doit être utilisé uniquement pour les écoulements instationnaires. Par contre, le solveur 'segregated-implicit' est préférable dans tous les autres cas, car l'approche segregated offre de la flexibilité dans le traitement de la solution et nécessite moins de mémoire que le solveur 'coupled-implicit'.

-Etape 2 : Schéma de discrétisation (Méthodes d'interpolation)

Les variables \emptyset (stockées au centre des cellules) doivent être interpolées aux faces des volumes de contrôle, « **Fluent** » propose de nombreux schémas d'interpolation:

- Schéma « Upwind » du 1^{er} Ordre: Facile à converger mais seulement au premier ordre.
- Schéma « Power Law » loi de puissance: Plus précis que le premier ordre quand $Re_{cell} < 5$ (Écoulement de type bas Reynolds).
- Schéma « Upwind » du 2nd ordre: Utilise des plus grands stencils pour une précision au 2^{ème} ordre, essentiel avec tri/tet maillage ou quand l'écoulement n'est pas aligné avec le maillage.
- Schéma « Quadratique Upwind Interpolation » (QUICK): Appliquer avec le maillage quad /hex et hybrides (pas aux tri.), utile pour les écoulements en rotation et swirlé, précis à l'ordre 3 sur un maillage régulier.
- Schéma « Bounded Central Differencing » : Appliquer au maillage mixte et non uniforme des géométries complexes. (nouveau sur la version 6.2).

-Etape 3 : Méthodes d'interpolation pour la pression

Des options supplémentaires sont disponibles sur le code « Fluent » pour calculer la pression aux faces en utilisant le solveur 'segregated'. Les schémas des méthodes d'interpolation pour les pressions aux faces sont:

- Standard : Schéma par défaut, précision réduite pour les écoulements avec forts gradients de pression normaux à la surface près des frontières.
- Linear : à utiliser quand les autres options ont des difficultés de convergence ou des comportements non physiques.
- Second-Order : à utiliser pour les écoulements compressibles; ne pas utiliser dans les matériaux poreux, discontinuités, turbines ou méthodes VOF.
- Body Force Weighted : à utiliser quand les forces de gravité sont importantes, (e.g, convection naturelle à Ra élevé ou écoulements fortement swirlés).
- PRESTO! : utiliser avec les écoulements swirlés, les milieux poreux ou les domaines fortement courbés.

Etape 4 : Couplage pression vitesse

Le couplage pression-vitesse se réfère à la manière dont la conservation de la masse est prise en compte quand on utilise le solveur «segregated ». On a trois méthodes possibles:

- **SIMPLE** : schéma par défaut, robuste.
- **SIMPLEC** : utiliser dans le cas des maillage complexe non uniforme, convergence plus rapide pour les problèmes simples.
- **PISO** : schéma utile pour les écoulements instationnaires ou pour les schémas contenant des cellules avec des skews plus élevé que la moyenne.

-Etape 5 : Initialisation

La procédure d'itération nécessite que toutes les variables soient initialisées avant le démarrage du calcul. Une initialisation 'réaliste' améliore la stabilité et la vitesse de convergence. Dans certain cas, une solution initiale correcte est nécessaire (e.g: le champ de température permettant l'initialisation d'une réaction chimique).

-Etape 6 : Convergence d'équation de transport de Φ se présente simplement:

$$a_p + \sum_{nb} a_{nb} \phi_{nb} = b_p$$

Les coefficients a_p , a_{nb} dépendent de la solution et mis à jour à chaque itération. au début de chaque itération, l'égalité est fausse. Le décalage est appelé le résidu, R_p , avec:

$$R_p = a_p \phi_p + \sum_{nb} a_{nb} \phi_{nb} - b_p$$

R_p doit devenir négligeable au fur et à mesure des itérations. Les résidus que vous suivez sont sommés sur toutes les cellules:

$$R = \sum_{mailles} |R_p|$$

Les résidus suivis pour le solveur couplé sont basés sur la rms du taux d'évolution temporelle de la variable conservative.

A la convergence, Toutes les équations de conservation discrétisées (momentum, energy, etc.) se conforment dans chaque cellule à une tolérance spécifiée et la solution ne change plus avec le temps.

-Etape 7 : Suivi de la Convergence

Le Suivi de la convergence se fait avec les résidus. Le tracé des résidus montre quand ceux ci atteignent le seuil de tolérance (fig. 2.1). En général, une décroissance d'un ordre 10^{-3} en magnitude des résidus indique une convergence au moins qualitative et les caractéristiques principales de l'écoulement sont établies. Les résidus de l'énergie doivent atteindre 10^{-6} et des espèces 10^{-5} afin d'obtenir la conservation.

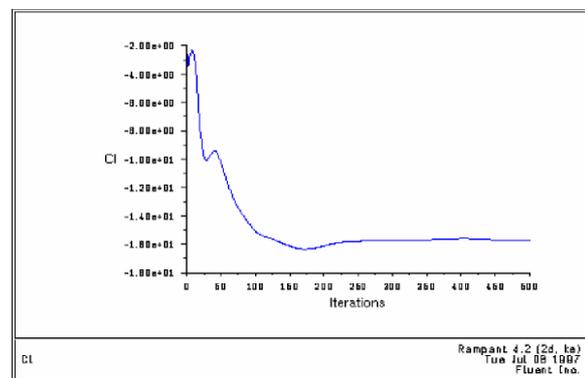
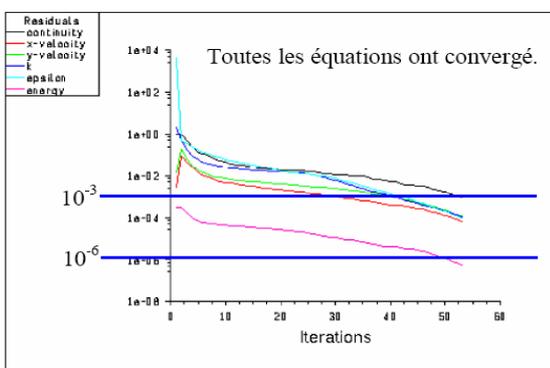


Fig II.1: Tracé des résidus

Fig II.2: Tracé de l'historique d'une variable

En plus des résidus, on peut aussi suivre des variables ou fonctions (e.g. surface integrals) à une frontière ou n'importe quelle surface définie et tracé l'historique d'une variable conservative (Fig II.2).

Nous pouvons vérifier la conservation de la masse et de l'énergie par le rapport minimum entre les flux entrants et sortants. Le déséquilibre doit être moins de 1% des plus faibles flux aux travers la frontière du domaine.

-Etape 8 : Stabilité

Des instabilités numériques peuvent apparaître avec un problème mal posé, un mauvais maillage et/ou un mauvais réglage du solveur. Cela est détecté par des résidus qui augmentent ou restent « bloqué », indiquant une divergence des résidus. C'est-à-dire qu'il y a un déséquilibre dans les équations de conservation. Les solutions possibles pour remédier ce problème sont:

- Vérifier que le problème est bien posé.

- Calculer une première solution avec un schéma à l'ordre 1.
- Diminuer la sous-relaxation pour les équations ayant des problèmes de convergence (segregated).
- Réduire le nombre de Courrant (coupled).
- Remailler ou raffiner le maillage.

-Etape 9 : Réglage des facteurs sous-relaxation

Le facteur de sous-relaxation, α , est utilisé pour stabiliser le processus itératif du solveur 'segregated'.

$$\phi_p = \phi_{p,old} + \alpha \Delta \phi_p$$

Si vos moniteurs indiquent que la solution est convergée, mais la solution change toujours ou a un déséquilibre de masse ou d'énergie! Il y a une possibilité de réduire le critère de convergence ou désactiver 'Test Convergence'. Diminuer les facteurs de la relaxation pour les 'momentum' aide à converger. Les réglages appropriés sont connus via les testées et l'expérience, alors calculer Jusqu'à ce que la solution converge.

II-5 Les conditions aux limites :

En plus d'un maillage adéquat, les conditions aux limites sont très importantes pour obtenir une solution précise avec une convergence rapide. Ce paragraphe présente de façon succincte les conditions aux limites disponibles.

Afin de définir un problème avec une solution unique, on doit fournir des informations sur les variables aux frontières du domaine. Spécifier les flux de masse, quantité de mouvement, énergie, etc. Définir les conditions aux limites implique :

- . Identifier la position des frontières (e.g, entrées, parois, symétrie)
- . Donner les informations sur ces frontières.

Les données dépendent du type de conditions aux limites et des modèles employés. On doit connaître l'information nécessaire aux frontières et positionner ces frontières ou l'information est connue ou peut être correctement approchée. Les mauvaises conditions aux limites ont toujours un impact sur les résultats. Les types de conditions aux limites disponibles sur le code de calculs Fluent sont comme suit :

- Types de conditions limites pour les surfaces externes 'External Faces'
 - General: 'Pressure inlet, Pressure outlet'
 - Incompressible: 'Velocity inlet, Outflow'
 - Écoulement compressible: 'Mass flow inlet, Pressure far-field'
 - Spécial: 'Inlet vent, outlet vent, intake fan, exhaust fan'
 - Other: 'Wall, Symmetry, Periodic, Axis'
- Types de conditions limites pour les cellules 'Cell Boundaries'
 - ✓ Fluide et Solide

Le logiciel « Fluent » offre la possibilité de changer le type de conditions aux limites et de régler les données suivant nos besoin (e.g. définir par des UDFs).

II-6 Génération des calculs par FLUENT :

La génération du calcul dans «FLUENT» passe par les étapes suivantes :

- 1- Charger la géométrie par Fluent. [File- Read- Case](#)
- 2- Vérification du maillage. [Grid- Check](#)
- 3- Afficher le maillage. [Display- Grid](#)
- 4- Définir le Model de solution. [Define- Solver](#)
- 5- Définir le Model de Turbulence. [Define- Models- Viscous](#)
- 6- Définir la Matière. [Define- Materials](#)
- 7- Définir les conditions aux limites. [Define- Boundary- Conditions](#)
- 8- Choix du control de solution. [Solve- Controls- Solution](#)
- 9-Enregistrer les informations liées au problème. [File- write- Case & dat](#)
Le fichier [Case](#) (regroupe toutes informations liées à la géométrie).
Le fichier [dat](#) (contient tous les paramètres et données des calculs).
- 10- Initialiser le calcul. [Solve- Initialize- Initialize](#)
- 11-Vérifier les résidus des calculs. [Solve- Monitors- Residual](#)
- 12-Choisir du nombre des itérations et lancer les calculs. [Solve- Iterate](#)
- 13-Post traitement des résultats. ([Display](#), [Plot](#), [Repport -etc](#))

Chapitre III

Modélisation Géométrique et Mathématiques:

Cette section aborde la modélisation géométrique, en utilisant Gambit, de la problématique, ainsi le modèle mathématique gouvernant le mouvement 'Equations de naviers stokes'. On discutera quelques détails sur la turbulence qui est un écoulement difficile à préciser mais, par contre, ces caractéristiques pourront être énumérées et spécifiées.

III-1 Géométrie de la problématique :

Un prototype, de la complétion (d) 'Fig I.3', a été pris pour être la base de notre modélisation, il s'agit d'une conduite à perforations ou il y a lieu à un apport de matière principal et un autre dit Flux radial à travers les perforations.

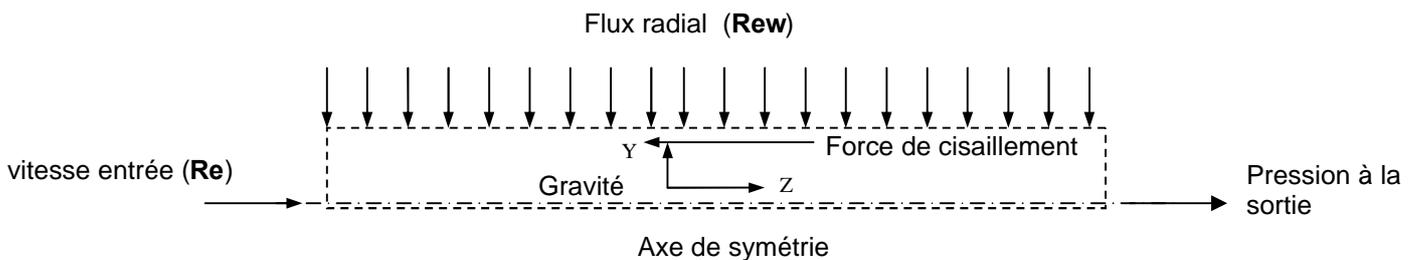


Fig III.1 Géométrie du Drain Horizontal et conditions aux limites (Profile-0 'pénétration Totale')

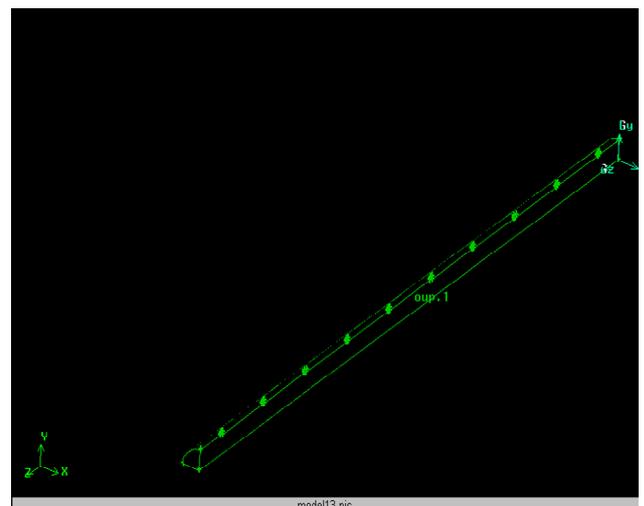
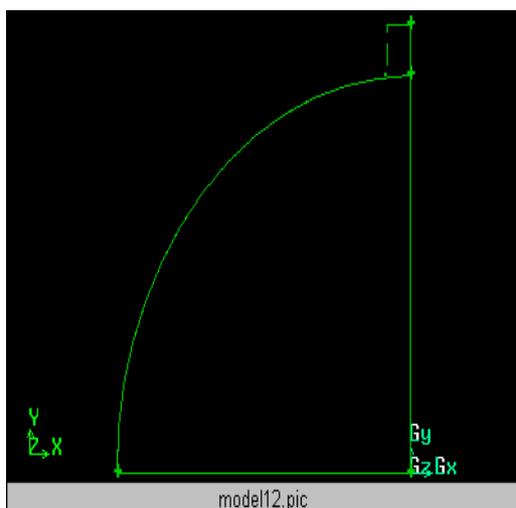


Fig III.2 Géométrie (vues sur Gambit)

III-2 Hypothèses et simplifications:

- Ecoulement **3D**, Newtonien, permanent, en coordonnées cartésiennes ;
- Ecoulement turbulent K- ϵ , avec considération de la force de gravité ;
- Ecoulement monophasique, sans échange de chaleur ;

III-3 Maillage 3D:

Le domaine a été subdivisé en mailles **3D**, en éléments tétraédriques pour la simulation sur Fluent.

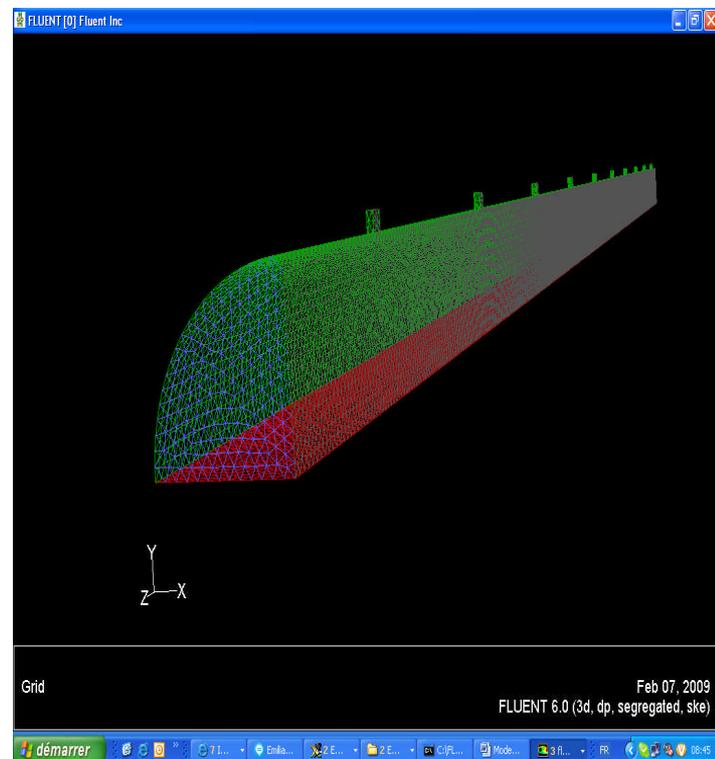
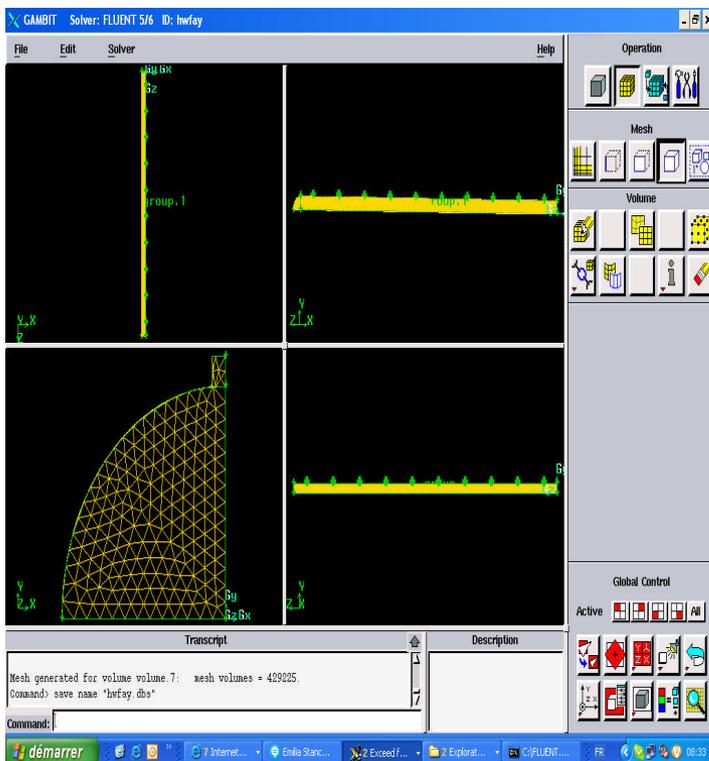


Fig III.3 Maillage du domaine ' drain horizontal '
Vues sur Gambit et Fluent

III-4 Turbulence :

Les caractéristiques de la turbulence se résument comme suit (Tennekes & Lunley, 1972) :

- ✓ **Irrégularité** : la première caractéristique de la turbulence est le caractère aléatoire, donc on a recours à des méthodes statistiques pour décrire le phénomène.
- ✓ **Diffusivité** : la diffusivité de la turbulence rend la mixture de la quantité de mouvement et de transfert de chaleur ainsi le transfert de masse rapide et augmente en quantité dans le temps.
- ✓ **Grandeur du nombre de Reynolds** : elle en résulte dans l'instabilité des écoulements laminaire, tellement la diffusion visqueuse et la non linéarité du terme inertie sont aléatoire, les équations de naviers stockes deviennent difficile à manipuler.
- ✓ **La fluctuation en 3D de la vorticité**
- ✓ **Dissipation** : les contraintes de cisaillement visqueuses le travail de déformation ce qui accélère l'énergie interne du fluide par rapport à l'énergie cinétique de la turbulence, donc la turbulence nécessite un apport continu d'énergie pour alimenter les pertes par viscosité.
- ✓ **Continuité** : la turbulence est un phénomène continu, gouvernée par les équations de la mécanique.
- ✓ **La turbulence est un écoulement** : la turbulence n'est pas une qualité de fluide mais une caractéristique d'un écoulement d'un fluide, la plupart des écoulements sont les même, quelque en soit liquide ou gaz, ils sont liés au nombre Reynolds.

On ajoute a ce paragraphe, que toutes les visualisations utilisées pour illustrer la turbulence ne réussissent pas à la quantifier, alors pour y résoudre le champ d'écoulement les équations sont en premier lieu discrétisées pour être résolu en programme informatique.

Cette résolution numérique directe de la turbulence est une discipline relativement nouvelle connue sous le nom "computational fluid dynamic" **CFD**.

Wite (1991) illustre la limitation de la programmation de la turbulence en étudiant un simple écoulement dans un conduit. La prédiction des détails d'un écoulement de $Re=10^7$ nécessite 10^{22} opérations numériques et un outil de 2 GHZ, un processeur 2ns par opération dans 160 000 années. En revanche, un super computer crayx1 (envisagé en 2010) avec une vitesse de 10^{-6} ns/opération (10^6 GHZ microprocesseur a besoin de 4 mois pour un simple écoulement), c'est pour cela des modèles empiriques approchés sont présentés avec le temps.

III-5 Equations gouvernants le mouvement :

Les équations de base sont dérivées de la masse, de quantité de mouvement et l'énergie d'un élément de fluide [14]. Pour un écoulement isothermique seulement la balance masse et quantité de mouvement sont considérés, et si le champ de vitesse est donné comme suit :

$$\vec{U} = u \vec{i}_x + v \vec{i}_y + w \vec{i}_z \quad (3.1)$$

Les équations gouvernant le mouvement s'écrivent :

- **Equation de continuité** (balance masse), dans le système cartésien s'écrit :

(Permanent, Incompressible, 3D)

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3.2)$$

- **Equations de quantités de mouvements :**

✓ Direction - x

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) - \rho g_x \quad (3.3)$$

✓ Directions - y

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) - \rho g_y \quad (3.4)$$

✓ Direction - z

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) - \rho g_z \quad (3.5)$$

Pour les écoulements à faible nombre de Reynolds, les équations de Navier-Stokes peuvent être utilisées, en revanche dans les écoulements à grand nombre de Reynolds, l'intensité des vitesses induit des fluctuations dans le temps et l'espace, ce qui rend la captivité de ces fluctuations très difficiles à capter, afin de faire face le concept de la ' **Modélisation de la turbulence**' a été introduit.

La plupart des modèles de la turbulence supposent que : la vitesse dans un point dans l'espace et dans le temps peut être décrite par la superposition d'une vitesse moyenne, qui peut varier relativement avec le temps et une vitesse de fluctuation qui varie rapidement. Mathématiquement s'exprime [14]:

$$\bar{u} = \bar{u} + u' \quad (3.6)$$

III-6 Modélisation de la turbulence :

La modélisation de la turbulence est l'opération d'exprimer les contraintes de Reynolds par d'autres termes de variables.

L'un des schémas de simplification est de remplacer les termes additionnés dans les équations de Naviers Stokes par des contraintes visqueuses produites par la turbulence, qui peuvent être décrites comme suit :

$$u_i u_j = \frac{\partial(u_t \frac{\partial \bar{u}}{\partial x})}{\partial x} + \frac{\partial(u_t \frac{\partial \bar{u}}{\partial y})}{\partial y} + \frac{\partial(u_t \frac{\partial \bar{u}}{\partial z})}{\partial z} \quad (3.7)$$

u_t : Viscosité liée à la turbulence, exprimant l'effet de la turbulence.

Le processus de modélisation peut être complété à condition que la viscosité due à la turbulence soit déterminée à partir d'autres variables de l'écoulement.

Ceci est achevé en pratique par deux modèles dits :

' **Modèle à zero équation** ' et ' **Modèle à une équation** ', qui seront discuté dans la section qui suit.

6-a Modèle à zero équation (zero équation model) :

$$u_t = \rho c_u \ell^2 \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} \right) \quad (3.8)$$

Ou : c_u est une constante qui doit être déterminé avec la longueur du mélange (lenth scale). Une valeur unique peut être utilisé pour ℓ et c_u en se basant sur l'expérience (écoulement dans les conduits, ou autre : plaques...etc.)

6-b Modèle à une équation :

- **Modèle K- ε standard** : dans ces modèles la viscosité turbulente est corrélée avec l'énergie cinétique turbulente (K) et sa dissipation ε

✓ **Viscosité turbulente** :

$$u_t = \rho c_u \frac{K^2}{\varepsilon} \quad (3.9)$$

✓ **Energie cinétique turbulente** :

$$K = \frac{1}{2}(u'^2 + v'^2 + w'^2) \quad (3.10)$$

Les équations de transport de l'énergie cinétique turbulente et sa quantité de dissipation sont résolues et la viscosité, ensuite la turbulente est aisément déduite pour les équations **RANS**.

Ces équations, pour un écoulement : incompressible, permanent, sans considérer l'énergie potentielle, peuvent être exprimé en indices de sommation (implique une somme en indice répété) :

- conservation de l'énergie cinétique turbulente :

$$\rho \overline{u_i} \frac{\partial k}{\partial x_i} = u_t \left(\frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} + \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} \right) \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ \left(\frac{u}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right\} - \rho \xi \quad (3.11)$$

- dissipation de l'énergie cinétique turbulente :

$$\rho \overline{u_i} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} = c_{1\varepsilon} \left(\frac{\varepsilon}{k} \right) + u_t \left(\frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} + \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} \right) \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ \left(\frac{u}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right\} - c_{2\varepsilon} \rho \left(\frac{\varepsilon^2}{k} \right) \quad (3.12)$$

- **Modèle RNG $K-\varepsilon$:**

Ce modèle est dérivé des équations de Naviers Stockes, il est le fruit d'une méthode mathématique nommée " Renormalization Group" RNG [14].

Sa forme générale est semblable au modèle $K-\varepsilon$, avec des différences dans les constantes de transports pour $K-\varepsilon$.

- **Modèle réalisable $K-\varepsilon$:**

Se modèle se diffère des autres disant le $K-\varepsilon$ standard par sa spécificité de satisfaire quelques contraintes mathématiques, en ce qui concerne les contraintes normales. Il consiste avec la physique de l'écoulement turbulent, ce modèle utilise une formulation nouvelle pour la viscosité turbulente ν_t , qui devient une variable [14].

- **Modèle -contraintes de Reynolds :**

Il assure la fermeture des équations dites : les équations de Reynolds Naviers Stockes moyennées, ainsi la conjonction de l'équation de dissipation et les équations de transport nous donne cinq équations à résoudre pour un système à 2 D, et sept pour un écoulement 3D.

A la fin, dans notre étude on a opté pour le Modèle $K-\varepsilon$, puisque ces résultats sont de grande précision dans les écoulements dans les conduites, prouvés par des expériences.

Chapitre IV

Analyse des pertes de charges dans les drains Horizontaux perforés et non perforés :

Dans ce chapitre, une analyse des pertes de charge va être discutée, il s'agit d'une analyse macroscopique et microscopique 'numérique', relativement profonde.

On dénote par un drain perforé, une conduite avec apport de matière à travers les perforations, modélisé par un flux radial (**Re_w**).

Un drain non perforé revient à dire un simple écoulement dans une conduite modélisé par le flux axial (**Re**). Ainsi, des résultats de simulation et des sensibilités vont être détaillés.

IV-1 Analyse macroscopique :

Pour un écoulement newtonien, incompressible, monophasique, sans échange de chaleur avec l'environnement et unidimensionnel. L'équation de conservation de masse en régime permanent s'écrit :

$$\frac{d(\rho v)}{dL} = 0 \quad (4.1)$$

En termes de conservation de quantité de mouvement, entre les deux extrémités de la conduite, elle est égale à la somme des forces exercées sur les parois, exprimée par :

$$\rho_2 v_2^2 A - \rho_1 v_1^2 A = (P_1 - P_2)A - \tau_w \pi d \Delta L - A \Delta L \rho g \sin \theta \quad (4.2)$$

En divisant Eq (4.2) par $A \Delta X$ et utilisant l'Eq (4-1) on obtient la forme suivante :

$$\frac{dp}{dx} = - \rho \frac{d}{dx} \left(\frac{u^2}{B} \right) - \zeta_w \frac{S}{A} - \rho g \sin \theta \quad (4.3)$$

Dans le cas d'apport de matière à travers les perforations, cas de notre étude, on ajoute un terme qui représente cet apport analytiquement, qui donne la formule suivante [16]:

$$\frac{dP}{dx} = - \frac{\rho}{g_c} \frac{d}{dx} \left(\frac{v^2}{B} \right) - \tau_w \frac{S}{B} + \frac{n\rho}{B_1 g_c} \frac{A_I}{A} v_r v_x - \rho \frac{g}{g_c} \sin \theta \quad (4.4)$$

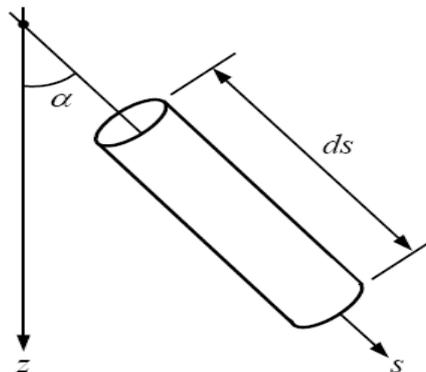
Cette formule, du gradient total des pertes de charges, englobe trois formes de pertes et de conservation d'énergie qui peuvent être distinguées l'une de l'autre :

- Les pertes de charges par accélération dû à l'énergie cinétique causée par le flux radial (sortant/entrant), cas de notre étude. En générale, c'est la conséquence de la différence de densité ou un changement de diamètre de la conduite. Dans le cas des écoulements sans apport de matière à travers les perforations, ce terme s'annule ;
- Les pertes par frottement (sur les parois), ce terme dépend des deux flux axial et radial à travers les perforations ;
- Le terme de la gravité, pour un drain horizontal ce terme s'annule ;

Elle est définie comme suit :

$$F_g(\rho, s) = -\rho g \sin \theta(s) ds$$

Dans l'engineering puits, la géométrie est la même qu'un simple pipe, avec une légère différence dans les paramètres, l'angle α est l'inclinaison entre le puits et l'axe verticale.



$\cos \alpha$ est alors la mesure dans la profondeur verticale connu sous le nom : TVD (True vertical depth). La force de graviter devient :

$$F_g(\rho, s) = \rho g \cos \alpha(s) ds$$

N.B : on note que la direction du puits est positive mais l'écoulement est négative (exprimer par une vitesse négative vers le haut).

Les pertes de charges par frottement, pour un écoulement monophasique, sans transfert de chaleur, dans une conduite circulaire, ont été présentées par Brill et Mukherjee (1999) comme suit :

$$\frac{F_f(\rho, v, s)}{A} = -\frac{\rho}{2d} f(\mu, \rho, v) * v|v| = -\frac{8\rho}{\Pi^2 d^5} f(\mu, \rho, v) * q|q|$$

On note que l'utilisation du signe valeur absolue, pour la vitesse (débit), explique que le facteur frottement est opposé à l'écoulement, il est fonction de la densité du fluide ρ , la viscosité μ , et la vitesse v (ou débit q). Donc, au nombre de Reynolds exprimée comme suit :

$$\text{Re} = \frac{\rho d |v|}{\mu} = \frac{4 \rho |q|}{\Pi \mu d}$$

Le nombre de Reynolds à son tour dépend de la rugosité de la conduite ε , définie :

$$\varepsilon = \frac{e}{d}$$

✓ Pour un écoulement laminaire : $\text{Re} < 2000$

$$f = \frac{64}{\text{Re}}$$

✓ Pour un écoulement turbulent : $\text{Re} > 3000$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 1.74 - 2 \log \left(2\varepsilon + \frac{18.7}{\text{Re} \sqrt{f}} \right)$$

Le facteur de frottement f est déduit de la figure suivante, cas sans apport de matière à travers les perforations :

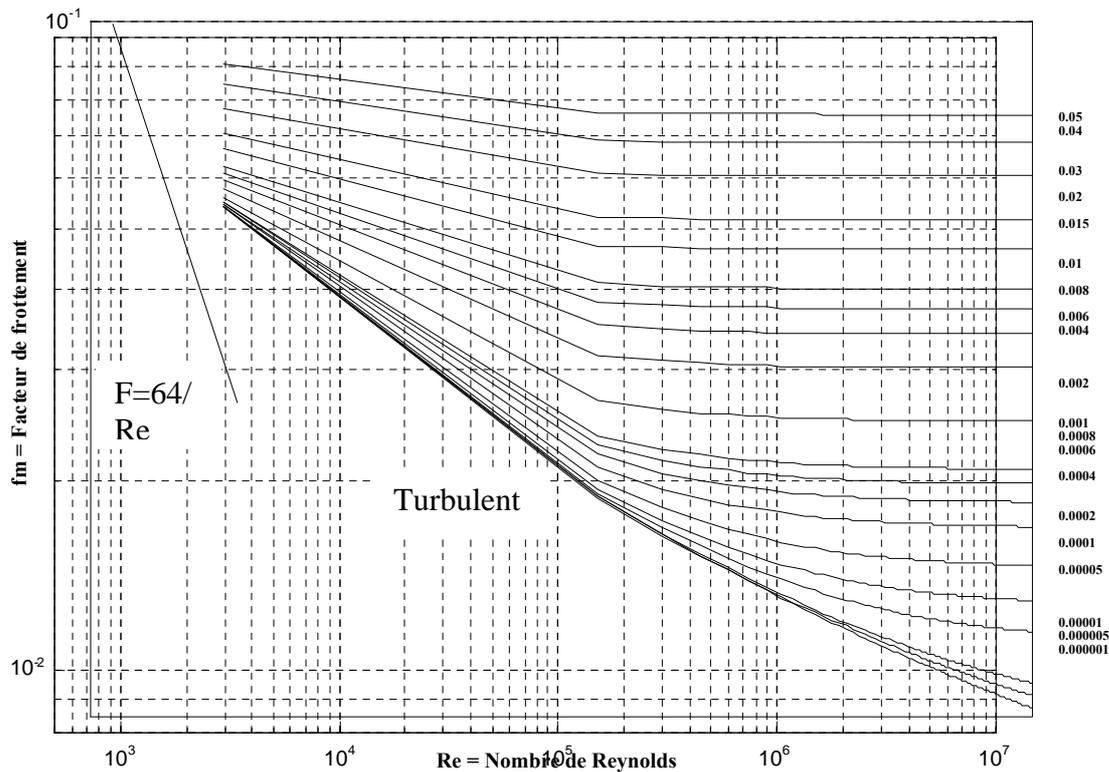


Fig IV.1 Diagramme de Moody

Ce Diagramme souvent utilisé pour l'estimation du facteur de frottement f est désormais non représentatif, en considérant l'apport de la matière à travers les perforations.

Cela dit, toute étude de simulation ou expérimentale exprime deux types de pertes charges dans les drains perforés [16] :

$$\Delta p_{\text{Totale}} = \Delta p_{\text{accélération}} + \Delta p_{\text{frottement}}$$

Dans l'équation (4-3) apparaît un facteur de correction B, introduit pour corriger la quantité de mouvement [16], définie pour un écoulement incompressible comme suit :

$$B = \frac{1}{Aq_{av}} \int q^2 ds \quad (4-5)$$

Ce facteur ajuste la quantité de mouvement dans l'équation (4-4), pour la raison d'utilisation d'une vitesse moyenne sur la section de passage.

L'incertitude dans le calcul de la vitesse (Débit) influe directement l'incertitude dans le calcul de l'intégral (4-5) et donc le facteur B.

Ce facteur est généralement pris égal à 1 pour l'écoulement turbulent sans apport de matière par un flux radial (conduite perforée). Vu que le profil de vitesse est relativement uniforme sauf au voisinage tous près des parois.

En revanche, pour les écoulements à travers les drains perforés, le flux radial affecte considérablement la distribution de la vitesse au long de la conduite, la vitesse axial devient instable est très variable ce qui rend l'estimation du facteur B très difficile.

Toute erreur dans l'estimation du facteur B induit une erreur dans la quantification des pertes de charges par accélération et par conséquent les pertes par frottements.

Grâce aux études **CFD-Fluent**, aujourd'hui on est capable par la simulation numérique de calculer les pertes de charges et les distinguées sans passer par le facteur B. Fluent nous permet d'estimer les pertes de charges par un intégral sur toutes la surface des parois des contraintes tangentiels, et par conséquent on obtient les pertes par accélération.

IV-2 Le concept de l'écoulement développé :

Dans cette section, on va discuter le concept de l'écoulement développé, quand un fluide arrive à l'entrée d'une conduite provenant d'une source extérieure, le profile de vitesse varie tout au long de la longueur de celle-ci, jusqu'à une distance bien déterminer il demeure constant.

Cette distance où le profile de vitesse se stabilise est connue sous le nom de " l'écoulement développé " (entrance Length).

C'est un concept très important dans les écoulements à travers les conduites et les canaux. C'est la distance à la quelle le profile de vitesse est stable et celle ou le gradient de pression dp/dx (x, la direction de l'écoulement) devient constant.

L'écoulement développé dans les écoulements laminaire a été défini par la formule [14] :

$$Le=0,035ReD \quad (4.6)$$

En revanche, l'écoulement développé dans les écoulements turbulents n'est pas défini dans la littérature [14], il est indiqué, considérablement, à une distance petite que celle de l'écoulement laminaire.

La simulation par Fluent, nous a permis de déterminer l'écoulement développé dans un drain horizontal perforé, ceci pour différent nombre de Reynolds (régimes turbulents).

Les résultats numérique, nous ont indiqué un écoulement développé de 10 à 15 fois le diamètre de la conduite voir TAB IV-1 et Fig IV-1.

Ces résultats concordent avec une autre étude numérique et expérimentale [16], dont l'auteur a quantifier l'écoulement développé entre 10 à 15 fois le diamètre de la conduite numériquement, et 30 fois le diamètre de la conduite expérimentalement (fluide d'expérience l'eau).

Re (10 ³)	Le (m)
140	95
130	95
120	80
100	80
90	80
80	92
70	92
60	90
50	105
40	105

TAB IV-1 : la distance Le (m) de l'écoulement développé pour différents Re

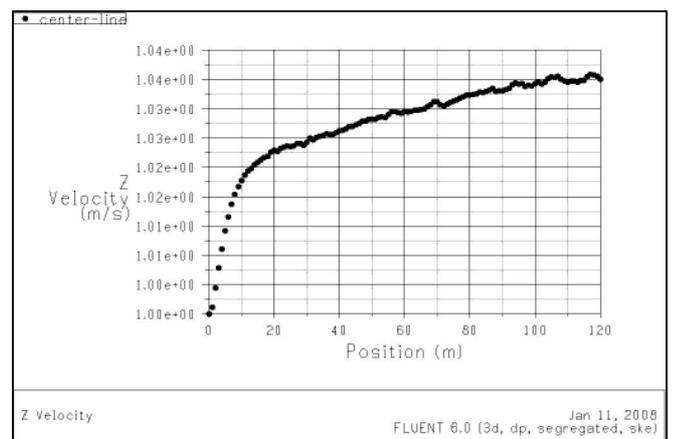
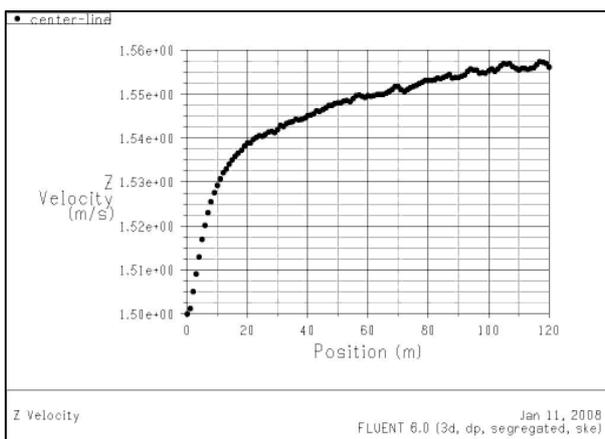
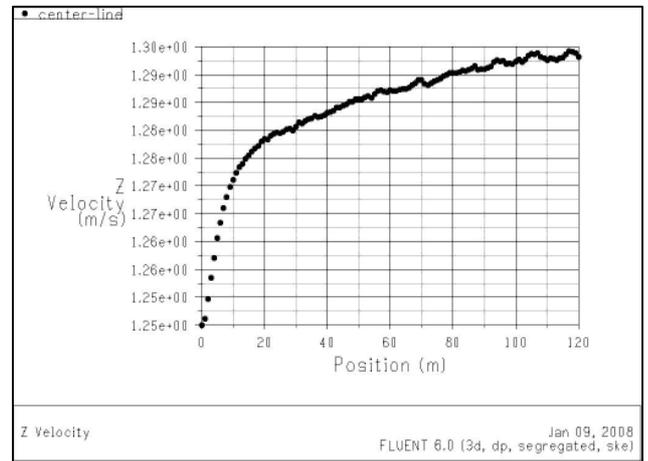
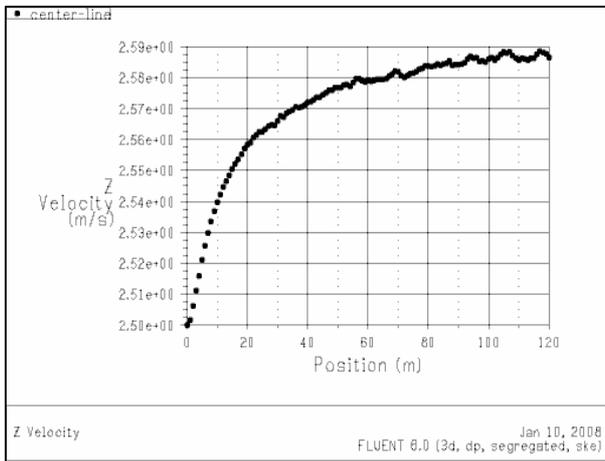
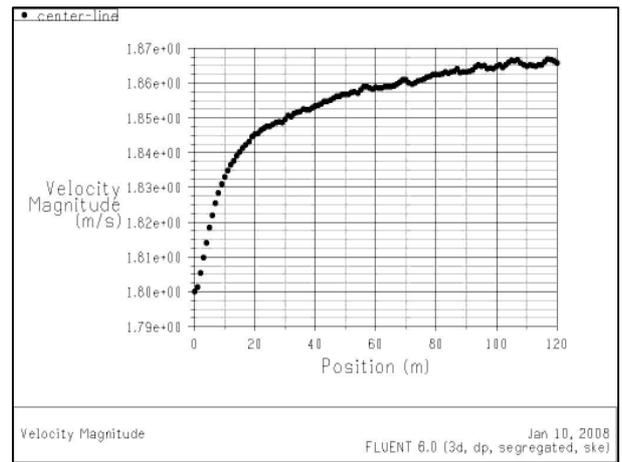
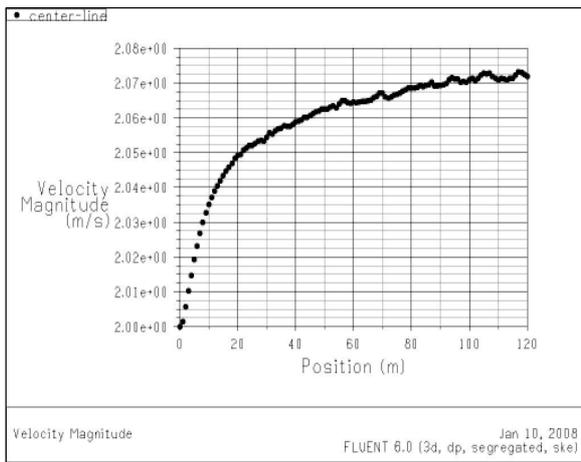


Fig IV.2 Profil de vitesse Z au long du pipe (écoulement développé)

IV-3 Visualisation des résultats de la simulation –Fluent :

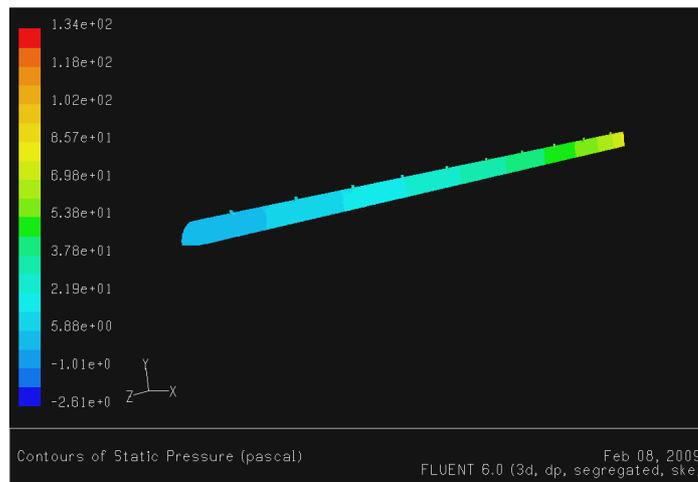


Fig IV.3 Distribution de la pression Statique

La figure IV.3 de la distribution de la pression statique montre la linéarité de cette grandeur scalaire le long du drain, due à la faible épaisseur de la conduite par rapport à la longueur. Cette grandeur scalaire se voit plus grand, au fur et à mesure, en s'éloignant de l'apport principal axial de la matière.

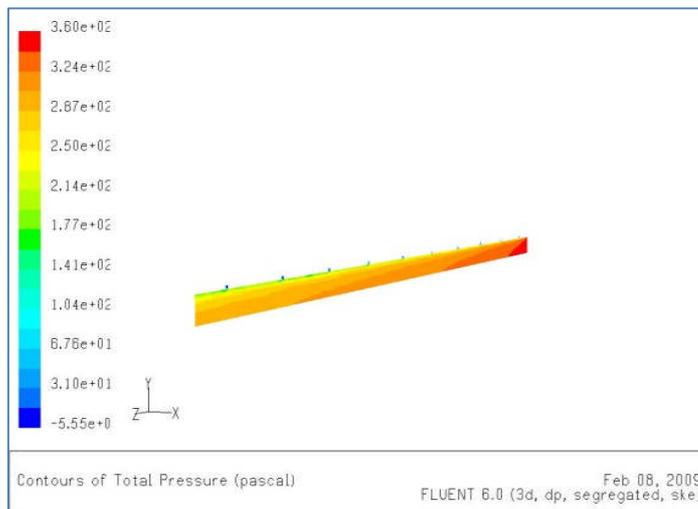


Fig IV.4 Distribution de la pression Totale

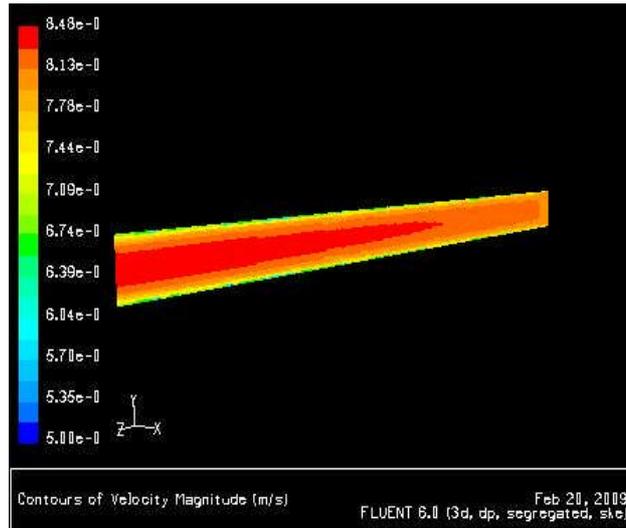


Fig IV.5 Contours de vitesses V_z

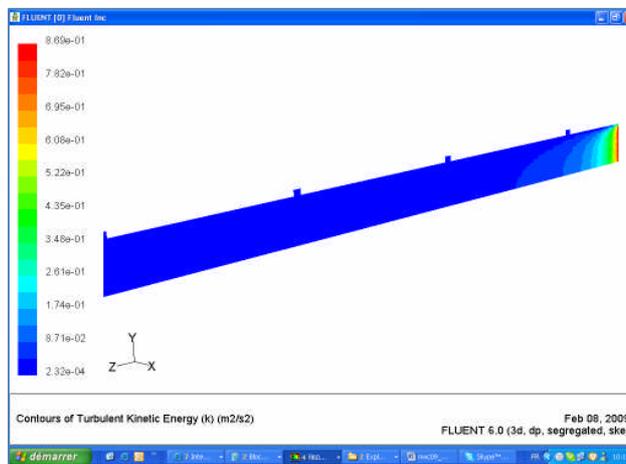


Fig IV.6 Contours de l'énergie cinétique K

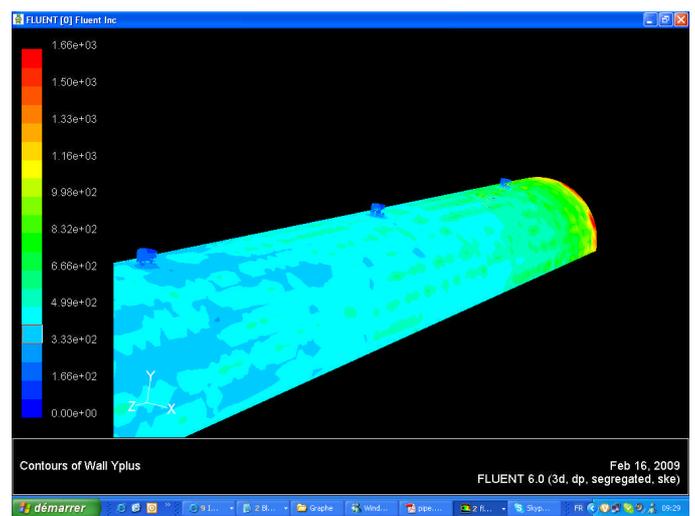
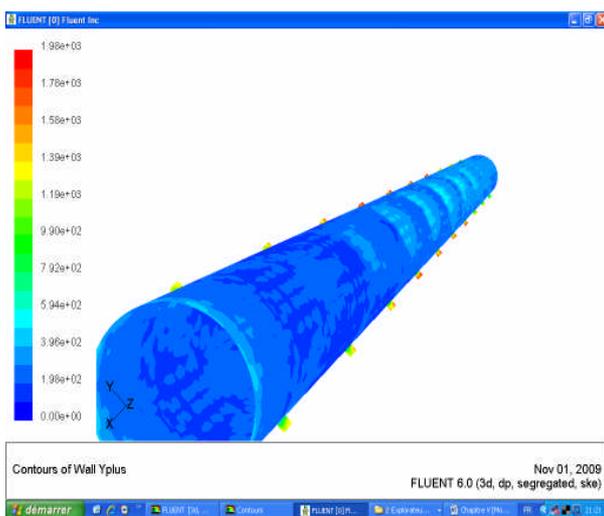


Fig IV.7 Contours de y^+ parois

IV-4 Résultats numériques des pertes de charges :

Re (10 ³)	f-frottement	ΔP -frottement (Pas)	ΔP -accélération (Pas)	ΔP -total (Pas)
140	0,0084	10,16	5,00	15,16
130	0,0085	8,64	4,18	12,83
120	0,0086	7,69	3,68	11,38
100	0,0090	5,54	2,56	8,10
90	0,0092	4,40	1,99	6,39
80	0,0094	3,71	1,64	5,35
70	0,0096	3,07	1,33	4,40
60	0,0099	2,21	0,94	3,15
50	0,0109	1,60	0,65	2,25
40	0,0108	1,07	0,41	1,49

TAB IV-2 Pertes de Charges

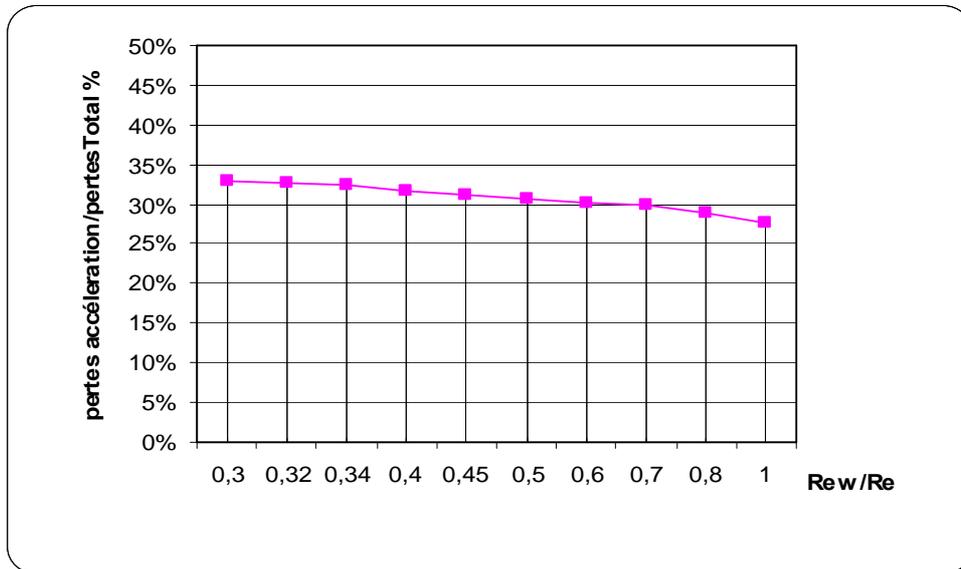


Fig IV.8 Type de pertes de charges

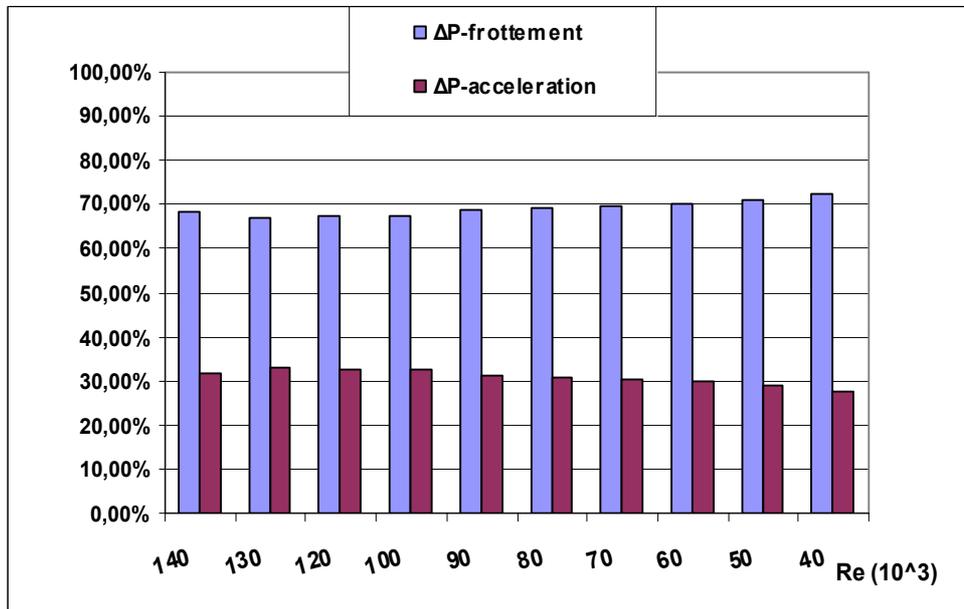


Fig IV.9 Histogramme des pertes de charges

Il est clair des résultats de la simulation TAB IV-2 et du graphe Fig IV.4, que les pertes de charges dues au changement de vitesse axial par apport de matière radial (acceleration) sont considérables et estimer à **30%** des pertes totales.

Ce qui confirme l'importance de les prendre en considération dans les corrélations du facteur de frottement **f**. Donc, le coefficient de frottement déduit du graphe de Moody n'est plus valable dans les calculs des pertes de charges.

IV-5 Modélisation de l'apport de matière (perforations radiales) :

On a essayé de modéliser l'apport de matière à travers les perforations et étudié son influence sur les pertes de charges totales, plusieurs modèles sont à proposer.

IV-6 Modèles des configurations du flux radial :

Différents modèles de pénétration de fluide sont simulés pour y quantifier les pertes de charges, ainsi proposer une configuration pour obtenir la meilleure performance du puits foré et par conséquent la meilleur complétion.

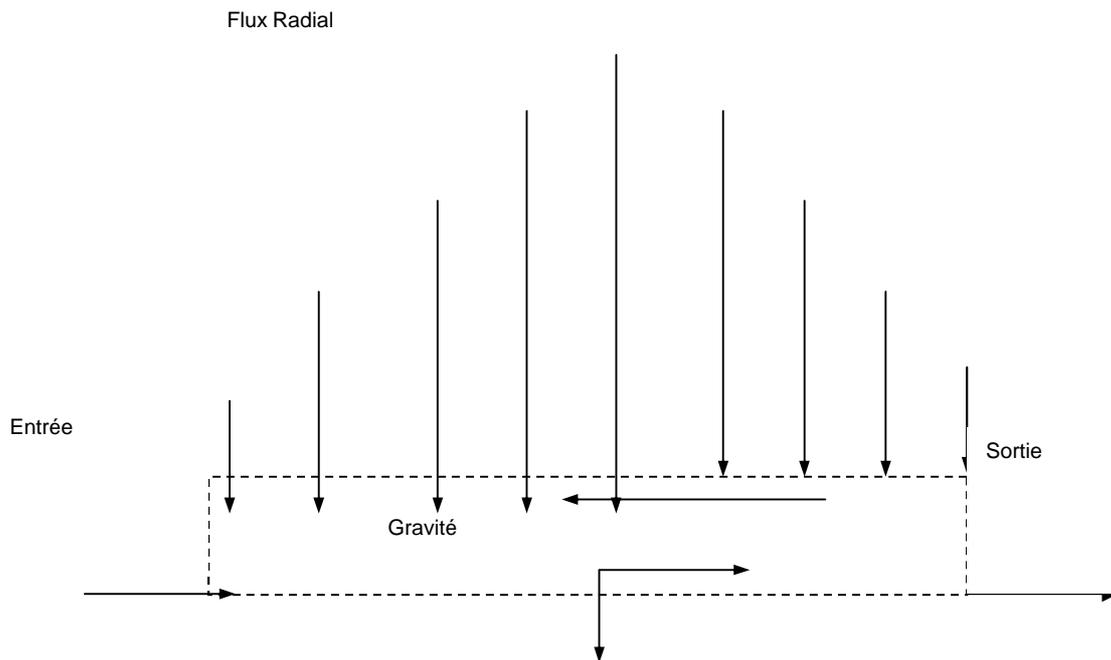


Fig IV.10 Pénétration totale triangulaire symétrique
Profil-1

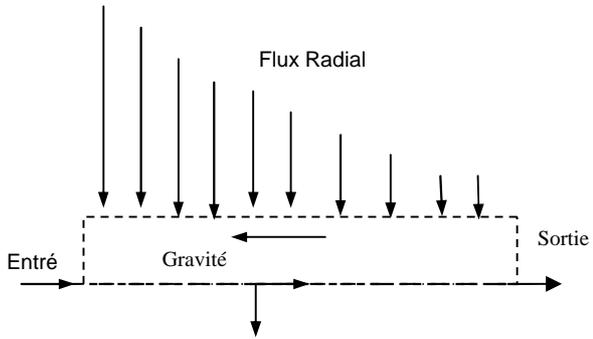


Fig IV.11 pénétration totale triangulaire gauche (Profil-2)

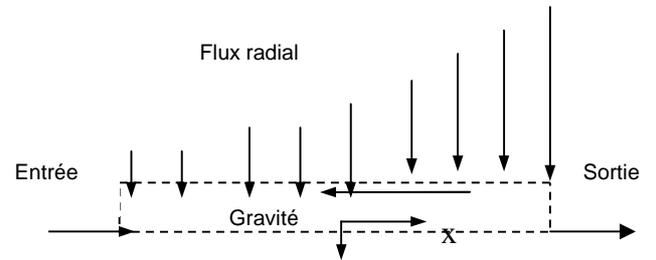


Fig IV.12 pénétration totale triangulaire droite (Profil-3)

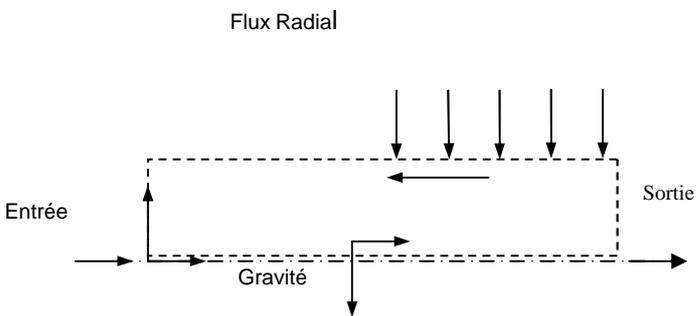


Fig IV.13 pénétration partielle uniforme gauche (Profil-4)

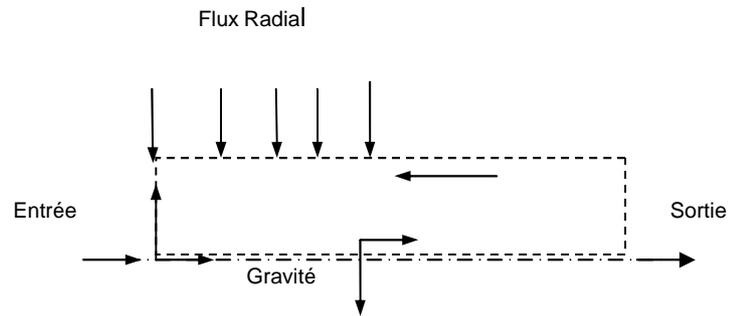


Fig IV.14 pénétration partielle uniforme droite (Profil-5)

IV-7 Discussion des résultats:

Les configurations Fig IV.10 à Fig IV.14 ont été simulées (pour différentes valeurs du nombre de Reynolds), les résultats sont représentés sur le tableau IV-3 et le graphe IV.15 suivant :

	Profil-0	Profil-1	Profil-2	Profil-3	Profil-4	Profil-5
ΔP-frottement (bars)	0,720469	0,008408	0,695512	0,016949	0,695513	0,694921
ΔP-total (bars)	0,984867	0,016172	0,756439	0,112718	0,756093	0,758257

TAB IV-3 Résultats numériques des pertes de charges

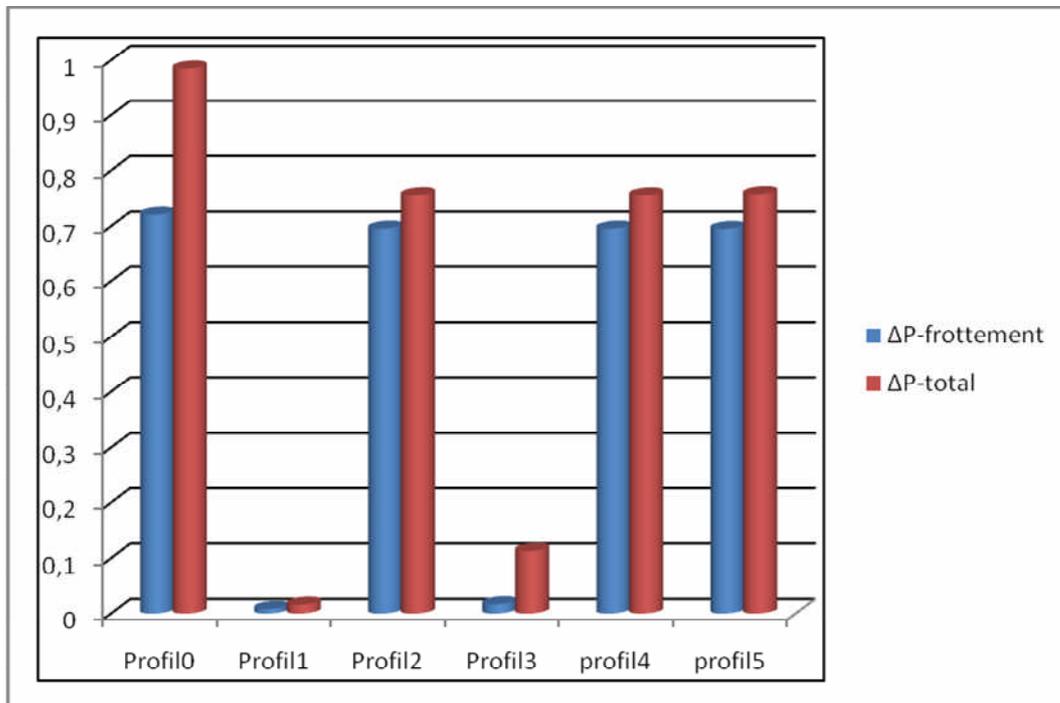


Fig IV.15 Influence du Flux radial ‘ Pertes de charges ‘

Il est évident que les profile-1 & 3 présentent la meilleure configuration du point de vue performance puits, ces deux profiles ont les pertes de charges les moins faibles par rapport aux autres. Précisément, le profile-1 est d’une configuration perforé sur toute la longueur du drain, l’apport de la matière est maximal au milieu et diminue progressivement d’une manière symétrique.

La configuration du profile-3 présente un apport de matière qui diminue progressivement vers la sortie du drain (ce flux radial s’ajoute au flux axial), il n’est pas à exclure, il présente une bonne performance par rapport aux autres profiles-0, 4 & 5.

Chapitre V

Corrélations du Facteur de Frottement – f

Cette section aborde les corrélations obtenues dans la littérature pour exprimer le coefficient de frottement **f**.

Ces corrélations empiriques ou semi- empiriques ont été élaborée pour un écoulement incompressible, monophasique sans échange de chaleur avec l'environnement.

Le facteur de frottement **f** est connu par le facteur de Fanning, qui exprime la force exercée par le fluide sur les parois, définie pour les écoulements dans les conduites par :

$$f = \frac{1}{4} \left(\frac{D}{L} \right) \left(\frac{\Delta p_{\text{frottement}}}{1/2 \rho u^2} \right) \quad (5.1)$$

V-1 Aperçu sur les différentes corrélations du facteur -f [16]:

1-a drain sans flux radial (Rew=0) :

On a pu trouver deux corrélations pour un écoulement, monophasique, sans transfert de chaleur et incompressible.

Moody propose la corrélation suivante :

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 1.74 - 2 \log \left(2\varepsilon + \frac{18.7}{\text{Re} \sqrt{f}} \right) \quad (5.2)$$

Haaland propose une autre corrélation, exprimée comme suit :

$$f^{0.5} = -3.6 \log \left(6.9 / \text{Re} + (t / 3.7D)^{1.11} \right) \quad (5.3)$$

Cette formulation donne des valeurs aberrantes, non significatives.

1-b drain avec flux radial :

Dans l'analyse qui se suit, on dénote par f le facteur de frottement en présence du flux radial à travers les perforations (entrant/sortant) puits producteur ou injecteur. Et f_0 le facteur de frottement sans apport de matière à travers les perforations.

La majorité des corrélations dans la littérature en présence de flux radial sont exprimées par le rapport f/f_0 , Ces flux sont modélisés par deux nombres de Reynolds Re (flux axial), Re_w (flux radial).

L'étude [16] présente une corrélation pour un écoulement monophasique basé sur des données expérimentales, cas d'une conduite poreuse :

$$1 - \frac{f}{f_0} = 29.03 \left(\frac{Re_w}{Re} \right)^{0.8003} \quad (5.4)$$

Cette formule exprime des résultats non significatifs.

Oyang et al [22] ont appliqué cette corrélation dans l'analyse de l'écoulement dit ``1995 stanford horizontal welbore`` [16], ils ont trouvé que la formule ci-dessus surestime le facteur de frottement.

Ce qui leur conduit à développer une nouvelle corrélation qui dépend du Reynolds lié au flux (entrant/sortant), puits producteur/injecteur :

$$1 - \frac{f}{f_0} = 29.03 (Re_w)^{0.3978} \quad (5.5)$$

Cette formule implique que pour un flux radial quelconque, le rapport f/f_0 doit être constant sur toute la longueur du drain.

D'après les résultats et pour différents nombre de Reynolds (disant différents flux axial le rapport) f/f_0 n'est pas le même, ce qui est n'est pas reflété pas la corrélation (5.5).

Autre analyse expérimentale a été menée au niveau du laboratoire de l'université stanford [16], sur une longueur de 10 - 21mètres perforées, trois formes ont été considérées :

$$\frac{f}{f_o} = aR_e^b R_{ew}^c \quad (5.6)$$

d'ou $a=1.9598$ et $b=-0.2390$, $c=-0.01612$

avec un coefficient de corrélation de $r^2=0.770$

$$1 - \frac{f}{f_o} = aR_e^b R_{ew}^c \quad (5.7)$$

d'ou $a=3.34 \cdot 10^{-10}$ $b=2.25$ $c=-1.55$

Cette équation est similaire dans sa forme aux équations ci-dessus avec un coefficient de corrélation $r^2=0.725$.

$$1 - \frac{f}{f_o} = a + \log Re + c \log Re w \quad (5.8)$$

d'ou $a=-1.822$ $b=0.2246$ $c=0.158$

L'équation démontre une relation semi-log entre la variable dépendante et indépendante, le degré de corrélation est d'ordre $r^2=0.830$ est important, plus représentatif donc choisi pour la comparaison simulation-expérimentale.

V-2 Comparaison des corrélations :

Rew/Re	f- Exp	f- Fluent	f0- Moody
0,29	0,01575	0,00897	0,0168
0,32	0,01606	0,00839	0,0170
0,34	0,01648	0,00854	0,0173
0,41	0,01746	0,00865	0,0180
0,46	0,01804	0,00920	0,0184
0,51	0,01865	0,00938	0,0188
0,59	0,01950	0,00958	0,0194
0,68	0,02040	0,00993	0,0200
0,82	0,02169	0,01086	0,0209
1,03	0,02331	0,01083	0,0220

TAB IV-1 Résultats numériques et expérimentaux

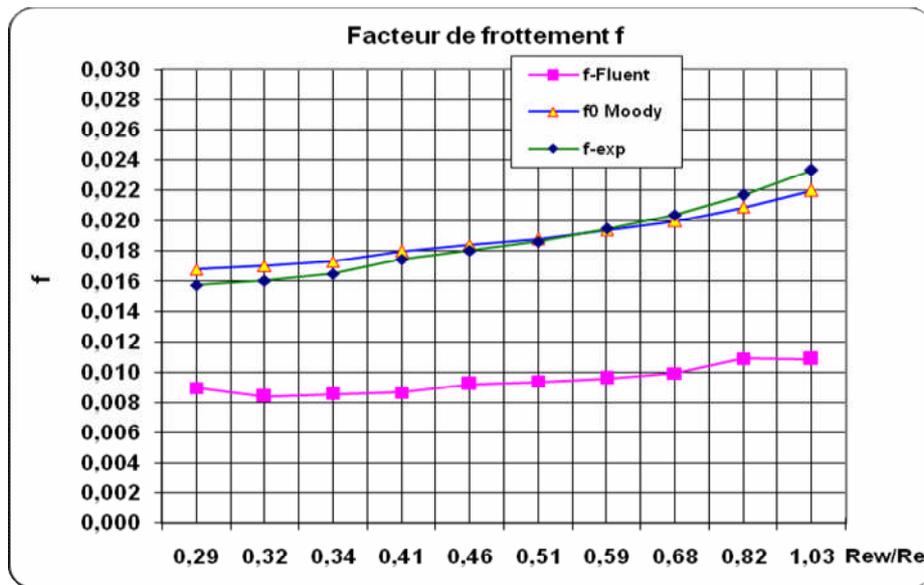


Fig V.1 Graphe de comparaison

On s'est contenté de comparer la corrélation expérimentale de l'étude [16], celle de Moody et les résultats de la simulation 'Fluent' de la présente étude. Pour la simple raison qu'elles présentent des résultats significatifs et acceptables.

Le graphe Fig V.1 montre une superposition dans les résultats du facteur f entre l'expérimentale et Moody, elles sont de même allure et très proches en valeurs.

On note que l'expérimentale prendrait en considération le flux radial et donc l'apport de matière à travers les perforations pour un fluide qui est l'Eau.

Le facteur de frottement f obtenu par simulation est de même allure que celui du Moody et l'expérimentale mais il reste proche en valeur, dont l'erreur maximale absolue est de 1.25.

Conclusion Générale et Perspectives :

Au terme de cette modeste étude, on a abouti aux résultats suivants :

- Les pertes de charges due à la pénétration du fluide à travers les perforations sont importantes, ces pertes sont liées aux changements de la vitesse au long de la conduite, elles sont quantifiées à pas moins de 30% des pertes totales dues au frottement sur parois du drain horizontal.
- L'écoulement développé se produit à une distance estimée de 10 à 15 fois le diamètre de la conduite, concorde avec l'étude [16] dans la littérature.
- Les sensibilités réalisées, sur le flux radial à travers les perforations, ont confirmé qu'il est inutile de perforer la totalité du drain horizontal. Des profils de flux ont été testés, cela nous a aidé à proposer une configuration à moindre pertes et par conséquent à moindre coût de complétion, ceci favorise la production avec meilleures performances.
- L'étude a démontré que les corrélations proposées pour l'estimation du facteur de frottement f s'avèrent approximatives, elles sont sujet d'être revues, on doit considérer les pertes par accélération du aux apports de la matière à travers les perforations.

A la fin, on recommande dans les futures travaux de travailler sur :

- une nouvelle corrélation pour l'estimation du facteur de frottement f , qui prendrait en considération les flux radial et axial ;
- prendre en considération les échanges de chaleur avec le milieu extérieur ;
- reprendre l'étude pour des écoulements multiphasique car dans la réalité l'écoulement est tri-phasique (Eau-Huile-Gaz) ;

ملخص

المحور الأساسي لهذه الدراسة هو استعمال البرنامج "Fluent" للمعالجة الرقمية لحركة الموائع،

حيث تم تطبيقه

لدراسة حركة مائع البترول عند استخراجة بتقنية الحفر الأفقي.

إن معرفة تغيرات السرعة و الضغط للمائع داخل الأنبوب الذي يخترق خزان البترول يساعدنا على

الحفاظ على إنتاج البترول لمدة زمنية أطول. لأجل بلوغ الهدف تم تمثيل الحركة على ثلاث أبعاد دون

تغيير مع الزمن و لأعداد رينولدز عالية.

Abstract

A study of a fluid flow (oil or gas) in long horizontal wells is very important for a better use and a good management of the non economical reservoirs. As the contact between the porous rock and the horizontal drain, is more important than the conventional well, the effect of flow field inside the drain is very significant on the total output of an oil or gas reservoir, especially in the mature fields.

Which makes the drain flow, totally different from a simple one in a pipe, is the inlet flux (producer well) or the outlet flux (injector well), besides the flow which is a in a closed space and not open to the atmosphere.

Many parameters act directly on the performance of a horizontal well, among them the friction coefficient, the acceleration, the one phase and two phases flow, the penetration inflow through the perforation. A code called "**Fluent**", has allowed us to study the effect of the different parameters on the results and their impacts on the petroleum industry.

Bibliographie

- [1] Dikkeek, B.J. : 'Pressure Drop in Horizontal Wells and Its Effect on production performance,' JPT (Nov.1990) 29.
- [2] Ozkan, E. et. al.: 'Effect of Conductivity on Horizontal Well Pressure Behavior,'
- [3] Sarica, C. et al.: "The Influence of Wellbore Hydraulics on Pressure Behavior and Productivity of Horizontal Wells," paper SPE 28486 presented at the 1994 ATCE, New Orleans, Sep. 25-28.
- [4] Ihira, M. and Shimizu, N.: "Effect of Acceleration Pressure Drop in a Horizontal Wellbore," papier SPE 26519 présenté en 1993 à l'ATCE, Houston, Oct. 3-6.
- [5] Suzuki, K.: 'Influence of Wellbore Hydraulics on Horizontal Well Pressure Transient Behavior,' papier SPEFE (Sept. 1997) 175.
- [6] Folefac, A.N. et al.: "Effect of Pressure Drop along Horizontal Wellbores on Well Performance," paper SPE 23094 presented at the 1991 Offshore Europe Conference, Aberdeen, Sept. 3-6.
- [7] Seinees, K. et al.: "Considering Wellbore Friction Effects in Planning Horizontal Wells," paper SPE 29961 presented at the 1995 International meeting on Petroleum Engineering, Beijing, Nov. 14-1998
- [8] Ozkan, E. and Raghavan, R.: 'Horizontal Well Pressure Analysis,' SPEFE (Dec. 1989).
- [9] FLUENT Inc. *FLUENT 5 Users Guide*, Vol 1-4, published by FLUENT Inc., Lebanon, New Hampshire, USA, 1998.
- [10] FLUENT Inc. *GAMBIT Users Guide*, published by FLUENT Inc., Lebanon, New Hampshire, USA, 1998.
- [11] Versteeg, H.K. and Malalasekera, W. *An Introduction to Computational Fluid Dynamics - the Finite Volume Method*, Longman Scientific and Technical, Essex, England, 1995.

-
- [12] Shaw, C. T. *Using Computational Fluid Dynamics*, Prentice Hall International (UK), Hertfordshire, UK, 1992.
- [13] Pnueli, D. and Gut_nger, C. *Fluid Mechanics*, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1992.
- [14] Schlichting, H. *Boundary Layer Theory*, McGraw-Hill Book Company, Taiwan, 1979.
- [15] Schulkes, R. "Modeling Flow Characteristics in a Horizontal Well", FLUENT Users Conference, London, May 1996.
- [16] Hozef arif, R. "Application of Computational Fluid Dynamics (CFD) to the Modelling of Flow in Horizontal Well", Master of Science Thesis, Stanford University, Jun 1999.
- [17] Andreopolous, J. and Rodi, W. "Experimental Investigation of Jets in Cross Flow", *J. Fluid Mech.*, Vol. 138, pp. 93-127, 1984.
- [18] Bird, R.B., Stewart, W.E. and Lightfoot, E.N. *Transport Phenomena*, John Wiley and Sons, Inc. USA, 1990.
- [19] Margason, R.J. "Fifty Years of Jets in Cross Flow Research", Proceedings of AGARD Meeting on 'Computational and experimental assessment of jets in cross flow', April 1993.
- [20] Patankar, S.V., Basu, D.K. and Alpay, S.A. "Prediction of the Three Dimensional Velocity Field of a Deflected Turbulent Jet", *Trans. ASME J. Fluids Engng*, pp. 758-762, 1997.
- [21] Ouyang, L., Arbabi, S. and Aziz, K. "A Single-Phase Wellbore-Flow Model for Horizontal, Vertical and Slanted Wells", *SPE Journal*, June 1998.
- [22] Ouyang, L., et al. "An Experimental Study of Single-Phase and Two-Phase Fluid Flow in Horizontal Wells", SPE paper 46221, presented at the 1998 SPE Western Regional Meeting, Bakers_eld, California, USA, 1998.
- [23] Ouyang, L. "Single Phase and Multiphase Fluid Flow in Horizontal Wells", PhD Thesis, Department of Petroleum Engineering, Stanford University, California, USA, 1998.
- [24] Aziz, K. and Ouyang, L. "Steady State Gas Flow in Pipes", *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Vol. 14, pp. 137-158, 1996.
- [25] Joshi, S.D.: "Horizontal Well Technology," Students' Book. Pennwell Publishing company, Tulsa, Oklahoma

Autres:

www.fluent.com

« Génération du maillage avec gambit »:

<http://www.stanford.edu/class/me469b/handouts/geoandgrid.pdf>

« Aperçu sur Fluent »:

<http://widget.ecn.purdue.edu/~jmurthy/me608/overview.ppt>

Annexes

Annexe A

A-1 Traitement des parois dans un écoulement turbulent :

La vitesse moyenne dans les écoulements turbulents est affectée par la présence des parois. Par conséquent la condition de non glissement doit être satisfaite, dont plusieurs paramètres sont à l'origine, parmi : la réduction de l'amplitude de la viscosité réduit la fluctuation de la vitesse tangentielle. La vitesse cinématique à son tour affecte la vitesse normale.

En s'éloignant des la région des parois, la turbulence augmente rapidement par la production de l'énergie cinématique à cause de la grandeur du gradient basé sur la vitesse moyenne.

Le traitement des parois est primordial car il affecte la fidélité des résultats numériques. Les différents modèles **K- Epsilon**, **RMS**, **LES** sont valables plus ou moins à la proximité des parois pour les modélisations numériques soutenues par la littérature.

Nombreux sont les expériences divisant la région à la proximité de la paroi en trois couches ci-dessous, la zone très proche à la paroi connu sous le nom la sous couche visqueuse, l'écoulement est considéré laminaire, dont la viscosité moléculaire joue le rôle prépondérant et domine dans les équations de quantités de mouvements et de transfert de chaleur.

Allant vers la zone un peu à l'extérieur, la turbulence joue le rôle primordial c'est la zone dite couche totalement turbulente.

Entre les deux couches suscitées, il y a la zone intermédiaire c'est la couche intérim, dans cette zone la viscosité moléculaire et turbulente sont à effet équitable (voir figure si dessous en semi-log).

Dans la littérature, la région près de la paroi est traité par deux modèles, dans une première approche la viscosité affecte la région intérieur, des formules semi empiriques appelées " wall functions" sont utilisées pour modéliser l'effet de la viscosité entre la paroi et la zone ou l'écoulement turbulent est dominant.

Ces fonctions éliminent le recours à la modification du modèle turbulent pour prendre en compte l'effet des parois.

L'autre approche, le modèle turbulent est modifié pour y prendre en compte l'effet de la paroi connu sous le nom " near wall modelling".

FLUENT prévoit dans ces traitements de la turbulence les deux approches : "near wall wadelling" et "wall functions" Fig.

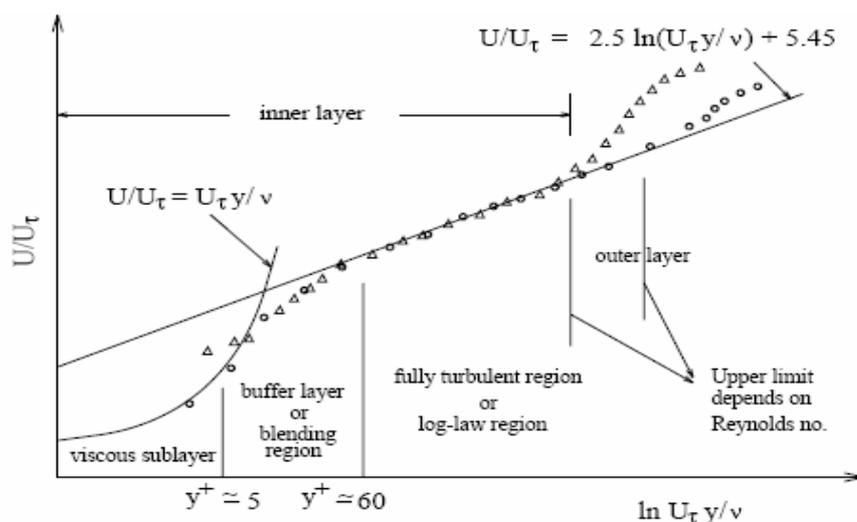


Figure 10.8.1: Subdivisions of the Near-Wall Region

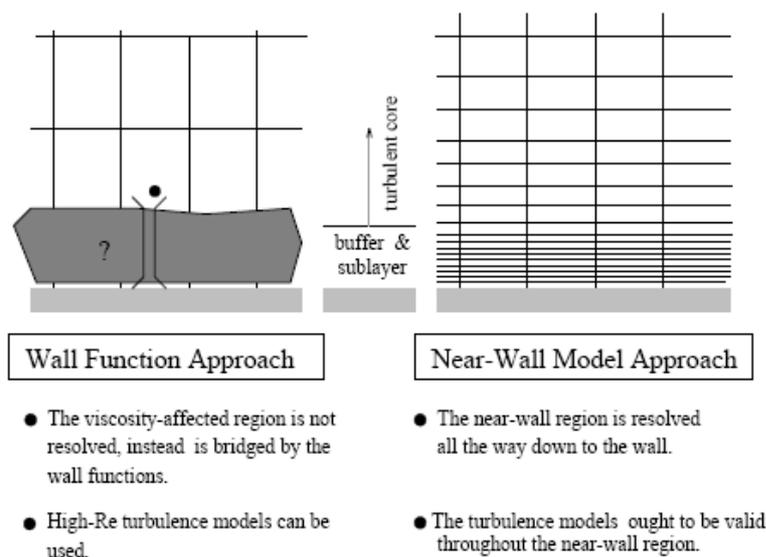


Figure 10.8.2: Near-Wall Treatments in FLUENT

Annexe B

RAPPORT DE SIMULATION FLUENT

FLUENT

Version: 3d,dp, segregated, ske (3d, double precision, segregated, standard k-epsilon)

Release: 6.0.12

Title:

Models

Model	Settings
Space	3D
Time	Steady
Viscous	Standard k-epsilon turbulence model
Wall Treatment	Standard Wall Functions
Heat Transfer	Disabled
Solidification and Melting	Disabled
Species Transport	Disabled
Coupled Dispersed Phase	Disabled
Pollutants	Disabled
Soot	Disabled

Boundary Conditions

Zones		
name	id	type
fluid.11	2	fluid
velocity_inlet.8	6	mass-flow-inlet
wall	3	wall
symmetry.10	4	symmetry
symmetry.9	5	symmetry
velocity_inlet.7	7	velocity-inlet
pressure_outlet.6	8	pressure-outlet
default-interior	10	interior

Boundary Conditions

fluid.11	Value
Condition	
Material Name	gasoil-liquid
Specify source terms?	no
Specify fixed values?	no
Local Coordinate System for Fixed Velocities	no
Motion Type	0
X-Velocity Of Zone	0
Y-Velocity Of Zone	0
Z-Velocity Of Zone	0
Rotation speed	0
X-Origin of Rotation-Axis	0
Y-Origin of Rotation-Axis	0
Z-Origin of Rotation-Axis	0
X-Component of Rotation-Axis	0
Y-Component of Rotation-Axis	0
Z-Component of Rotation-Axis	1
Laminar zone?	no
Porous zone?	no
Conical porous zone?	no
X-Component of Direction-1 Vector	1
Y-Component of Direction-1 Vector	1
Z-Component of Direction-1 Vector	1
X-Component of Direction-2 Vector	0
Y-Component of Direction-2 Vector	1
Z-Component of Direction-2 Vector	0
X-Coordinate of Point on Cone Axis	1
Y-Coordinate of Point on Cone Axis	0
Z-Coordinate of Point on Cone Axis	0
Half Angle of Cone Relative to its Axis	0
Direction-1 Viscous Resistance	0
Direction-2 Viscous Resistance	0
Direction-3 Viscous Resistance	0

Direction-1 Inertial Resistance	0
Direction-2 Inertial Resistance	0
Direction-3 Inertial Resistance	0
C0 Coefficient for Power-Law	0
C1 Coefficient for Power-Law	0
Porosity	1

velocity_inlet.8	
Condition	Value
-----	-----
Mass Flow Specification Method	0
Mass Flow-Rate	1.4
Mass Flux	1
Average Mass Flux	1
Upstream Torque Integral	1
Supersonic/Initial Gauge Pressure	0
Direction Specification Method	1
Coordinate System	1
Radial-Component of Flow Direction	1
Tangential-Component of Flow Direction	0
Axial-Component of Flow Direction	0
X-Component of Axis Direction	1
Y-Component of Axis Direction	0
Z-Component of Axis Direction	0
X-Coordinate of Axis Origin	0
Y-Coordinate of Axis Origin	0
Z-Coordinate of Axis Origin	0
Turbulence Specification Method	0
Turb. Kinetic Energy	1
Turb. Dissipation Rate	1
Turbulence Intensity	0.1
Turbulence Length Scale	1
Hydraulic Diameter	1
Turbulent Viscosity Ratio	10

Wall	Condition	Value
	-----	-----
	Enable shell conduction?	no
	Wall Motion	0
	Shear Boundary Condition	0
	Define wall motion relative to adjacent cell zone?	yes
	Apply a rotational velocity to this wall?	no
	Velocity Magnitude	0
	X-Component of Wall Translation	1
	Y-Component of Wall Translation	0
	Z-Component of Wall Translation	0
	Define wall velocity components?	no
	X-Component of Wall Translation	0
	Y-Component of Wall Translation	0
	Z-Component of Wall Translation	0
	Wall Roughness Height	0
	Wall Roughness Constant	0.5
	Rotation Speed	0
	X-Position of Rotation-Axis Origin	0
	Y-Position of Rotation-Axis Origin	0
	Z-Position of Rotation-Axis Origin	0
	X-Component of Rotation-Axis Direction	0
	Y-Component of Rotation-Axis Direction	0
	Z-Component of Rotation-Axis Direction	1
	X-component of shear stress	0
	Y-component of shear stress	0
	Z-component of shear stress	0

symmetry.10	
Condition	Value
-----	-----

symmetry.9	
Condition	Value
-----	-----

velocity_inlet.7

```

Condition                                     Value
-----
Velocity Specification Method                 2
Reference Frame                              0
Velocity Magnitude                           2.5
Coordinate System                            0
X-Velocity                                   0
Y-Velocity                                   0
Z-Velocity                                   0
X-Component of Flow Direction                1
Y-Component of Flow Direction                0
Z-Component of Flow Direction                0
X-Component of Axis Direction                1
Y-Component of Axis Direction                0
Z-Component of Axis Direction                0
X-Coordinate of Axis Origin                  0
Y-Coordinate of Axis Origin                  0
Z-Coordinate of Axis Origin                  0
Angular velocity                             0
Turbulence Specification Method              0
Turb. Kinetic Energy                         1
Turb. Dissipation Rate                       1
Turbulence Intensity                         0.1
Turbulence Length Scale                      1
Hydraulic Diameter                           1
Turbulent Viscosity Ratio                    10

pressure_outlet.6
Condition                                     Value
-----
Gauge Pressure                              0
Radial Equilibrium Pressure Distribution     no
Turbulence Specification Method              0
Backflow Turb. Kinetic Energy                1
Backflow Turb. Dissipation Rate              1
Backflow Turbulence Intensity                0.1
Backflow Turbulence Length Scale             1
Backflow Hydraulic Diameter                  1
Backflow Turbulent Viscosity Ratio           10

default-interior
Condition Value
-----

Solver Controls
-----
Equations
Equation      Solved
-----
Flow          yes
Turbulence    yes

Numerics
Numeric                               Enabled
-----
Absolute Velocity Formulation          yes

Relaxation
Variable                               Relaxation Factor
-----
Pressure                                0.30000001
Density                                  1
Body Forces                              1
Momentum                                  0.69999999
Turbulence Kinetic Energy                0.80000001
Turbulence Dissipation Rate              0.80000001
Turbulent Viscosity                       1

Linear Solver
Variable                               Solver      Termination  Residual Reduction
                                         Type        Criterion    Tolerance
-----
Pressure                                V-Cycle     0.1          0.7
X-Momentum                              Flexible    0.1

```

Y-Momentum	Flexible	0.1	0.7
Z-Momentum	Flexible	0.1	0.7
Turbulence Kinetic Energy	Flexible	0.1	0.7
Turbulence Dissipation Rate	Flexible	0.1	0.7

Discretization Scheme

Variable	Scheme
Pressure	Standard
Pressure-Velocity Coupling	SIMPLE
Momentum	First Order Upwind
Turbulence Kinetic Energy	First Order Upwind
Turbulence Dissipation Rate	First Order Upwind

Solution Limits

Quantity	Limit
Minimum Absolute Pressure	1
Maximum Absolute Pressure	5000000
Minimum Temperature	1
Maximum Temperature	5000
Minimum Turb. Kinetic Energy	1e-14
Minimum Turb. Dissipation Rate	1e-20
Maximum Turb. Viscosity Ratio	100000

Material Properties

Material: gasoil-liquid (fluid)

Property	Units	Method	Value(s)
Density	kg/m3	constant	830
Cp (Specific Heat)	j/kg-k	constant	2050
Thermal Conductivity	w/m-k	constant	0.135
Viscosity	kg/m-s	constant	0.0033199999
Molecular Weight	kg/Kgmol	constant	221.16
L-J Characteristic Length	angstrom	constant	0
L-J Energy Parameter	k	constant	0
Thermal Expansion Coefficient	1/k	constant	0
Degrees of Freedom		constant	0

Material: air (fluid)

Property	Units	Method	Value(s)
Density	kg/m3	constant	1.225
Cp (Specific Heat)	j/kg-k	constant	1006.43
Thermal Conductivity	w/m-k	constant	0.0242
Viscosity	kg/m-s	constant	1.7894e-05
Molecular Weight	kg/kgmol	constant	28.966
L-J Characteristic Length	angstrom	constant	3.711
L-J Energy Parameter	k	constant	78.6
Thermal Expansion Coefficient	1/k	constant	0
Degrees of Freedom		constant	0

Material: aluminum (solid)

Property	Units	Method	Value(s)
Density	kg/m3	constant	2719
Cp (Specific Heat)	j/kg-k	constant	871
Thermal Conductivity	w/m-k	constant	202.4

Annexe C

Convergence de la simulation numérique:

