République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université YAHIA FARES de MEDEA

Faculté de Technologie



Département de Génie Mécanique

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

En Vue de l'obtention du diplôme de master en génie mécanique

Option : Energétique

Thème :

Etude numérique de l'écoulement de pétrole brute dans les tubes capillaires

Présenté par :

- BRAHIM BELHAOUARI OUSSAMA

- SERAYA MOHAMED TAKI EDDIN

Encadré par :

- Dr RAHAL SOUFIAN

- Dr REBHI REDHA

2020/2021

Remerciement

Nous tiens tous d’abord remercions « Allah » qui nous donne le courage et le pouvoir pour étudier et résoudre tous les problèmes.

Nous exprimons nos profonds remerciements à notre promoteur, Dr RAHAL SOUFIANE pour l'aide compétente qu'il nous a apportée, pour sa patience, sa confiance, son encouragement, et Son œil critique qui nous a été très précieux pour structurer le travail,

Nous le remercions vivement. Nous remercions très chaleureusement notre promoteur Dr REBHI REDHA qui nous a suivi et dirigé tout au long de la réalisation de ce travail, et qui a été d’une aide très précieuse sur le plan scientifique et moral pour sa précieuse aide au sujet du logiciel ANSYS- CFX.

Nous souhaiterions également remercier tous les enseignants ayant assurés mes cours pendant nos années d’études.

Dédicaces

Je dédie ce travail

A ma très chère mère qui m'a soutenu durant toute ma vie.

A mon père qui m'a bien construit.

A mes frères.

A toute ma famille.

A mon binôme TAKI EDDIN

A tous mes amis sans exception

Oussama

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

A ma mère qui a consacré sa vie et son temps à mon éducation

Celle qui a passé sa jeunesse à veiller sur moi depuis ma petite enfance

À mon arrivée pour cette étape

A mon père, le professeur de mon enfance, qui était et sera toujours mon ombre et mon seul soutien

A toutes ma famille

A tous mes amis fidèles dont je peux pas dire les noms

Qui m'a appris le sens du devoir et de l'ambition : Fethiya

A tous les professeurs et enseignants qui ont pour ma bonne formation depuis

Mes début jusqu'à la fin de mon cursus universitaire.

A mon binôme Oussama

A mes amies de la promotion 2020-2021

***A tous ceux qui m'aiment et à ma réussite et à tous ceux que j'aime*.**

TAKI EDDINE

TABLE DES MATIERES

ملخص

Résumé

Abstract

Liste des figures

Liste des tableaux

Nomenclature

Liste des abréviations

Introduction générale …… 2

Chapitre I : Généralité sur les hydrocarbures

I.1. Généralités : ……..... 5

I.2. Types et classifications des hydrocarbures..... 5

I.3. Définition de Pétrole brut ……..... 6

I.4. Composition de pétrole brut……. 6

I.5. Classification du pétrole…..... 7

I.5.1. Selon le degré API .....…..... 7

I.5.2 Selon teneur en soufre…… 7

I.6. Les bruts de références…… 8

I.6.1. Le west Texas Intermediation (WTI).....……..... 8

I.6.2. Le Bret …..... 8

I.6.3. Le Dubaï light……..... 8

I.6.4. En Algérie…… 8

I.6.4.1. Principales caractéristiques…… 9

I.6.4.2. Répartition des produites issus du fractionnement du Sahara Blend…….. 9

Chapitre II : différent types de transport des hydrocarbures

II.1 Introduction…… 11

II. 2. Transport par pipeline…… 11

II. 2.1 Historique du transport par pipeline……..... 11

II. 2.2. Les types de transport par canalisation…….... 12

II. 2. 3. Composants des réseaux de transport par canalisation……..... 13

II. 2.4. Caractéristiques des tubes pipelines……..... 13
II. 2.5. Revêtement des tubes……..... 15
II. 2.6. Le type d'acier utilisé..... 16
II. 2.7. La Rugosité……. 16
II. 2.8. Le mode de pose……. 17
II. 2 .9. Avantages de transport par pipeline…..... 19
II. 2.10. La capacité maximale de transport…….……. 19
II. 2.11. Défauts rencontrés dans les canalisations……..... 20
II.2.12 Réseau de Transport du pétrole brut…….... 21
II. 3. Transport par maritime…….. 23
II. 3.1 Historique des navires pétroliers……. 23
II. 3.2 Définition et catégories…… 23
II. 3.3. Fonctionnement…….. 24
II. 3.3.1. Par taille…….. 24
II. 3.3.2. Par rayon d'action……..... 25
II. 3.3.3. Par type de produits……..... 26
II. 3.4. Les risques associés au transport pétrolier maritime……..... 26
II. 3.5. Les marées noires …… 27
II. 3.6. Chiffres clés sur les navires pétroliers…… 28
II. 3.7. Zone de transport ……... 28
II. 3.8. Les avantages de transport par maritime…… 29
II. 3.9. Les inconvénients de transport par maritime……. 29
II. 4. Transport par voie routier……. 30
II. 4.1. Le transport des hydrocarbures par camion-citerne…….. 30
II. 4.2. Les avantages de transport par voie routière.....…… 31
II. 4.3. Les inconvénients de transport par voie routière……... 31
II. 5. Transport par voie ferroviaire……..... 31
II. 5.1. Les avantage du transport par ferroviaire…….. 32
II. 5.2. Les inconvénients du transport par ferroviaire…….. 32

Chapitre III : Formulations mathématiques

III. 1. Introduction…….. 33

III.2. Les écoulements…… 33

III.2.1. écoulement incompressible……. 33

III.2.2 Ecoulements stationnaires et instationnaires…….. 34

III.3. Les régimes d'écoulement…….. 34

III.4. Nombre de Reynolds……..... 34

III.5. Équations fondamentales…… 35

III.5.1 Equation de continuité.....…..... 35

III.5.2 Équation de quantité de mouvement (Navier-Stokes)……..…….. 35

III.6. Modèles de turbulence……..... 36

III.7. Problème physique……..... 37

III.8. Les conditions aux limites…… 37

III.9. Le maillage…… 38

Chapitre IV : Méthodologie

IV.1. Introduction…… 39

IV.2. La mécanique des fluides numérique(MFN)……. 39

IV.2.1 Méthode de travail…….. 40

IV.2.2. Applications de la CFD……..... 40

IV.2.3. Méthodes de discrétisation……..... 41

IV.2.3.1. Méthodes de différences finies……..... 41

IV.2.3.2. Méthode des volumes finis……. 41

IV.2.3.3. Méthode des éléments finis…… 41

IV.2.4. Principe de la méthode des volumes finis……. 41

IV.3. ANSYS, In……. 41

IV.3.1. Principaux produits……. 42

IV.3.2. Les Modules d'ANSYS…….. 42

IV.4. ANSYS CFX……. 42

IV.5. Environnements logiciels.....…..…..... 43

IV.6. Mettre en place une simulation à l'aide d'ANSYS CFX se fait en 4 étapes……. 43

IV.6.1 ANSYS ICEM…… 44
IV.6.2. CFX-pré……. 44
IV.6.3. CFX-solver……..... 45
IV.6.4. CFX-post…… 46

Chapitre V : Résultats et discussions

V.1. Introduction…… 49
V.2. Résultats et discussions…….. 49
Conclusion générale……..... 70
Références Bibliographiques……..... 72

ملخص :

هذه الدراسة تهتم بصفة خاصة بمحاكاة التدفق المضطرب في انابيب نقل البترول. النتائج الرقمية تحصلنا عليها بواسطة النموذج القائم على نظام معادلات " Stockes-Navier " مع الأخذ بعين الاعتبار نموذج الاضطرابات K- ϵ تهتم الدراسة باستغلال نتائج المحاكاة الرقمية المتعلقة بالخصائص المختلفة التي تؤثر على دراسة التدفق بالتركيز على خصائص سرعة التدفق وكذلك الاقطار وخشونة السطح .النتائج الرقمية تحصلنا عليها بالاعتماد على البرنامج الرقمي" ANSYS CFX" النتائج المتحصل عليها تبين لنا ان سرعة الدخول و خشونة السطح و قطر الانبوب لهما تاثيركبير على تكلفة الطاقة.

كلمات مفتاحية: خطوط الانابيب , المحاكاة العددية ,الاضطراب ,البترول.

Résumé :

Cette étude s'intéresse en particulier à la simulation d'écoulements turbulents dans des pipelines transportant du pétrole. Les résultats numériques ont été obtenus par le modèle basé sur le système d'équations "Stockes-Navier", prenant en compte le modèle K-ε.

L'étude que basés sur le programme numérique "ANSYS CFX", les résultats obtenus nous montrent que la vitesse d'entrée, la rugosité et le diamètre de conduit ont un effet significatif sur l'écoulement Par conséquent il est préférable d'utiliser des conduites lisses ou des conduites avec un coefficient de rugosité faible et grand diamètre afin de diminuer le cout énergétique

Mots clés : pipelines, simulation numérique, turbulence, pétrole

Abstract:

This study is particularly interested in the simulation of turbulent flows in pipelines that transport oil. The numerical results were obtained by the model based on the system of "Stockes-Navier" equations, taking into account the model K. The study based on the numerical program "ANSYS CFX" The results obtained showed that the speed d The inlet, the roughness and the diameter of the pipe have a great influence on the flow rate, so it is better to use smooth pipes or low voltage pipes. Large diameter and rough Wall to reduce on energy cost.

Most clefs: pipelines, Analyse numérique, turbulent, pétrole.

Liste des figures

Figure II.1	les Oléoducs	12
Figure II.2	les gazoducs du gaz	13
Figure II.3	Caractéristiques des tubes	14
Figure II.4	Schéma d'un tube	14
Figure II.5	Le revêtement interne externe de canalisation	15
Figure II.6	Comme une rugosité de la surface.	17
Figure II.7	Canalisation enterré	18
Figure II.8	Canalisation aérienne	18
Figure II.9	Réseau de Transport du pétrole brut en Algérie	22
Figure II.10	Pipeline en Algérie	22
Figure II.11	Aframax Longueur: 245 m	25
Figure II.12	Suez max Longueur: 275 m	25
Figure II.13	ULCC Hellespont Alhambra a Longueur: 380 m	25
Figure II.14	principaux points transit des navires pétroliers	29
Figure II.15	Camion-citerne	31
Figure II.16	Les wagons citernes	32
Figure III.1	différents régimes d'écoulement	34
Figure III.2	Géométrie de conduite	37
Figure III.3	maillage e du la conduit	38
Figure IV.1	Les modules principaux du CFX	43
Figure IV.2	Domaine de calcul par ICEM-CFX	44
Figure IV.3	Interface graphique du module CFX-pré	45
Figure IV.4	Interface graphique du module CFX-Solver	46
Figure IV.5	Interface graphique du module CFX-post.	47
Figure V.1	contours de pression pour V = 1.94 m/s, D = 0.7 m et L = 500 m	50
Figure V.2	contours de vitesse pour V =1.94 m/s, ε = 0.9 mm, D = 0.7 m	51
Figure V.3	contours de vitesse pour V = 1.94 m/s et D = 0.6 m ε =2 mm	51
Figure V.4	contours de vitesse pur D = 0.7m, V =1 m/s, ε = 0.9 mm	52
Figure V.5	contours de vitesse pur D = 0.7 m, V = 5 m/s, ε = 0.9 mm	52

Figure V.6	la variation de perte de charge en fonction de longueur pour la vitesse V = 1 m/s	53
Figure V.7	la variation de perte de charge en fonction de longueur pour la vitesse V=1.94 m/s	54
Figure V.8	la variation de perte de charge en fonction de longueur pour la vitesse V = 5 m/s a différent diamètres	54
Figure V.9	la variation de perte de charge en fonction de longueur pour la vitesse V =10 m/s	55
Figure V.10	la variation de perte de charge en fonction de longueur pour la vitesse V = 15 m/s	55
Figure V.11	la variation de perte de charge en fonction de longueur pour la vitesse V = 20 m/s	56
Figure V.12	Profils des vitesses en fonction de diamètre à différentes distances pour ε = 0 mm	57
Figure V.13	Profils de vitesse en fonction de diamètre à différentes distances pour ε = 0.9 mm	57
Figure V.14	Profils de vitesse en fonction de diamètre à différentes distances pour ε = 2 mm	58
Figure V.15	Profils de vitesse en fonction de diamètre à différentes distances pour ε = 5 mm	58
Figure V.16	perte de charges en fonction de diamètre à différentes vitesse	59
Figure V.17	perte de charges en fonction de diamètre à différentes longueur pour V =1.94 m/s	60
Figure V.18	perte de charges en fonction de diamètre à différentes rugosité pour V =1.94 m/s	60
Figure V.19	perte de charge en fonction de longueur pour la vitesse 1.94 m/s	61
Figure V.20	Profils de vitesse en fonction de longueur pour différent rugosité et V = 1.94 m/s et D = 0.7 m	62
Figure V.21	la variation des pertes charges en fonction des vitesses pour différent diamètre et L = 500 m	63
Figure V.22	la variation des pertes charges en fonction des vitesses pour différent longueur et D = 0.7 m	64

Figure V.23	la variation des pertes charges en fonction de rugosité pour V = 1.94 m/s et L = 500 m	65
Figure V.24	la variation de la vitesse en fonction de louangeur pour V = 1.94 m/s et L = 400 m	66
Figure V.25	la variation de la vitesse en fonction de louangeur pour V = 1.94 m/s et D = 0.6 m	67

Liste des tableaux

Tableau I.1	Classification de pétrole brut selon la densité	7
Tableau I.2	Caractéristiques du pétrole brut	9
Tableau II. 2	Propriétés mécanique des aciers pour tubes selon la norme API	16
Tableau II. 3	rugosité interne du tuyau	17
Tableau III.1	valeurs des constantes du modèle K- ε	35
Tableau V.1	la variation des paramètres physique	49

Nomenclature

ρ	:	Masse volumique.	[kg/m^3]
τ	:	Contraintes de cisaillement.	[N/m^2]
μ	:	Viscosité dynamique.	[kg/m.s]
ν	:	Viscosité cinématique.	[m^2/s]
ν_t	:	Viscosité cinématique turbulente	[m^2/s]
ε	:	Rugosité	[mm]
V	:	Vitesse.	[m/s]
D	:	Diamètre de la conduite.	[m]
D_h	:	Diamètre hydraulique.	[m]
L	:	Longueur de la conduite.	[m]
M	:	Nombre de Mach.	
R_e	:	Nombre de Reynolds.	
P	:	Pression.	[Pa]
T	:	Température.	[K]
f	:	Facteur de frottement	
C_μ	:	Coefficient de fermeture du modelé de turbulence	
ϵ	:	Taux dissipation d'énergie cinétique turbulent	[m^2/s^3]
K	:	l'énergie cinétique turbulente	
Z	:	position	[m]
ΔP	:	perte de charge	[Ps]

Liste des abréviations

HA : Hydrocarbures aliphatiques

HAP : Hydrocarbures aromatiques polycycliques

CFD : Computational Fluid Dynamics

API : American Petroléum Institute, Etats-Unis

TPL : tonnes de port en lourd

GPL : gaz de pétrole liquéfié

AIE : L'Agence internationale de l'énergie

OMI : L'Organisation Maritime Internationale

MVF : méthode des volumes finis

MEF : Méthode des éléments finis

ANSYS : Analysi system

Introduction générale

Introduction générale

Le pétrole brut est considéré comme un combustible liquide, et il occupe une position distinguée parmi les différentes sources d'énergie, car il croît rapidement par rapport à la taille des quantités consommées ou par rapport à son importance relative dans les différentes sources d'énergie. Comme dans les industries pétrochimiques, le pétrole se caractérise par sa facilité de transport sur de longues distances par oléoducs ou par pétroliers géants, camions de transport et par voie ferrée, ainsi que la facilité de son stockage dans de grands réservoirs, Ainsi que le coût de production, de transport et de raffinage relativement bas, et son excellente efficacité thermique par rapport aux combustibles solides différents types de pétrole sont produits, dont la densité, la viscosité, la teneur en soufre et d'autres caractéristiques de base varient souvent. La variation de ces caractéristiques affecte généralement la fabrication, la commercialisation et le raffinage du pétrole brut et l'utilisation de ses différents produits.

Le Transport par Canalisation représente une dimension stratégique en termes d'acheminement des hydrocarbures vers les autres segments du marché et assure la cohérence des flux de toute la chaîne des hydrocarbures. L'Activité est également un maillon incontournable de cette même chaîne. Elle est également un secteur vital pour l'économie dont ce mode de transport contribue sensiblement à la réduction à la fois des coûts, des délais de livraison, du trafic routier et assure aussi des transports massifs d'hydrocarbures en veillant au respect de l'environnement avec des conditions de sécurité les plus strictes. Actuellement, le transport par canalisations assure l'acheminement du pétrole brut depuis les champs de production jusqu'aux complexes et unités de traitement, de transformation, de stockage, d'expédition et d'exportation. Le transport des hydrocarbures par canalisations nécessite l'installation des stations de pompage le long de la ligne

Les travaux sont basés sur la simulation numérique pour discrétiser et résoudre les systèmes des équations (Naviers-Stocks) en régime turbulent stationnaire en utilisant le modèle standard de turbulence K-epsilon.

L'objectif de notre présent travail est la simulation CFD de l'écoulement de pétrole brut par l'application d'une approche RANS (Reynolds Aver code CFD (Computationnel Fluide Dynamics) ANSYS CFX.

Ce mémoire est organisé en cinq chapitres

Le Chapitre 01 : généralités sur les hydrocarbures

Le Chapitre 02 : présente les différent types de transport des hydrocarbures.

Le Chapitre 03 : présente les équations mathématiques.

Le Chapitre 04 : alors en détail l'approche CFD que nous avons appliqué pour la simulation de l'écoulement du pétrole brut Algérien dans les pipelines en utilisant le code ANSYS CFX.

Le Chapitre 05 : on a présenté les résultats numériques et leurs interprétations.

Enfin, nous terminons notre mémoire par une conclusion générale résumant l'essentiel de notre travail.

CHAPITRE I :

GÉNERALITE SUR LES HYDROCARBURES

I.1. Généralités :

Les hydrocarbures sont des molécules composées uniquement d'atomes de carbone et d'hydrogène. On distingue trois séries distinctes d'hydrocarbures : la série aliphatique, la série alicyclique et la série aromatique. Les hydrocarbures aliphatiques (HA) sont constitués de chaînes carbonées linéaires qui peuvent être saturées ou posséder une ou plusieurs doubles ou triples liaisons (alcanes/alcènes/alcynes). Les hydrocarbures alicycliques peuvent également être saturés ou posséder une ou plusieurs doubles liaisons, on parle alors respectivement de cyclanes et de cyclènes (Arnaud, 1983). Cependant, la structure cyclique est incompatible avec les triples liaisons du fait de leur géométrie linéaire, à moins que la molécule ne contienne un minimum de 8 carbones (cyclènes). Il existe aussi des hydrocarbures bi- voir tricycliques (Arnaud, 1983 ; Brandt, 1992).

Enfin, la série aromatique ne comprend que des hydrocarbures insaturés. Elle rassemble tous les composés renfermant un ou plusieurs noyaux aromatiques. Les hydrocarbures aromatiques contenant plusieurs noyaux aromatiques accolés sont appelés hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP). [1].

I.2. Types et classifications des hydrocarbures

Le pétrole brut est formé essentiellement d'hydrocarbures (combinaison exclusive de carbone et d'hydrogène), où le carbone présente 83 à 87% en volume et l'hydrogène 10 à 14 %, [5,6]. Les hydrocarbures contenus dans le pétrole sont regroupées en trois familles :

- Les paraffines (Alcanes)
- Les naphtènes (Cyclo-alcanes)
- Les aromatiques

Pour la famille des paraffines on trouve deux types :

- **Les alcanes linéaires (n-alcanes, C_nH_{2n+2}),** dont la longueur de chaîne varie de 7 à 4 atomes de carbone, constituent une des classes les plus abondantes (10 à 40 % des hydrocarbures totaux d'un brut pétrolier)

- **Les alcanes ramifiés** : Ce sont des alcanes linéaires auxquels on a remplacé un H par un groupement alkyle (par exemple ; le méthyle : CH_3, ou l'éthyle : CH_2-CH3), les plus abondants sont les iso-alcanes (groupement méthyle en position 2).

- **Les naphtènes (cyclo-alcanes)** : renferment des composés cycliques (à 5 ou 6 atomes de carbone) saturés et le plus souvent substitués. Quelques dérivés

polycycliques sont aussi présents et certains d'entre eux tels que les sternes et les triterpanes sont caractéristiques d'un pétrole brut. Cette famille peut représenter entre 30 et 50 % des hydrocarbures totaux d'un pétrole brut.

- **Les hydrocarbures aromatiques :** Ce sont des structures insaturées cycliques avec trois doubles liaisons dans chaque cycle. Plusieurs familles d'hydrocarbures aromatiques et poly aromatiques dont le nombre de noyaux varie de 2 à 6 sont présentes dans les pétroles bruts. Ces composés sont dominés par des composés mono-, di- et tri-aromatiques.

En général, les hydrocarbures aromatiques sont moins abondants que les alcanes, et ne représentent que 10 à 30 % des hydrocarbures totaux d'un brut pétrolier. [2].

I.3. Définition de Pétrole brut :

Le Pétrole brut ou « Crude Oil en Anglais » c'est un mélange complexe d'hydrocarbures non traité il est de densité de 0.8 à 9.5 piégée dans des formations géologiques particulières. C'est la combinaison chimique de l'élément de carbone « C » et l'élément d'hydrogène « H », il contient aussi de faible quantité de soufre, des traces d'azote, oxygène et plusieurs métaux. Il se différencie par : [3]

- Densité.
- La composition.
- La teneur en soufre.

I.4. Composition de pétrole brut :

Le pétrole brut est formé essentiellement d'hydrocarbures (combinaison de carbone et d'hydrogène) ou le carbone présente 83% à 87% en volume et hydrogène de 10 à 15 % associé à des composés oxygénés, azotés et sulfurés ainsi qu'à des traces de métaux particuliers (vanadium, molybdène, nickel), Les hydrocarbures contenus dans le pétrole sont regroupés en trois familles : [4]

- Les paraffines (alcanes).
- Les naphtènes (cyclo-alcanes).
- Les aromatiques.

I.5. Classification du pétrole :

À la découverte d'un gisement du pétrole, ce dernier subit une série d'analyse permettant sa classification. La classification du pétrole est d'une extrême importance car elle nous permet de connaitre les méthodes de traitement de ce même pétrole depuis le plus léger et le moins sulfureux qui est le condensat jusqu'au plus lourd et plus sulfureux qui est le brut, l'assortiment et les qualités des produits à obtenir. On distingue deux types de classification : [5]

I.5.1. Selon le degré API° :

Les bruts sont classés selon leur degré API (American Petroleum Institute) qui est une fonction de leur densité (Tableau I-1). L'équivalence entre la densité et le degré API° est exprimée par la formule :

$$\text{API°} = \frac{141.5}{\text{d}(15°\text{c})} - 131.5 \qquad \text{(I-1)}$$

Selon la valeur API° on distingue :

Tableau I-1 : Classification de pétrole brut selon la densité.

Classification	API°	Densité
Pétrole léger	>31.1°	<0.870
Pétrole moyen	22.3 – 31.1°	0.870 – 0.920
Pétrole lourd	10 – 22.3°	0.920 – 1
Pétrole extra-lourd	< 10°	> 1

Les pétroles plus légers sont les plus demandés par les raffineurs, car ils donnent directement beaucoup de coupes légères de grande valeur (diesel, essence, naphta). [5]

I.5.2 Selon teneur en soufre :

- Pétrole peu sulfureux si la teneur ne dépasse pas 0.5%.
- Pétrole sulfureux si la teneur est comprise entre 0.5 -2 %.
- Pétrole très sulfureux si sa teneur > 2 %.

I.6. Les bruts de références :

Plus de 130 types de pétroles bruts sont commercialisés à travers le monde, sur un total de 400 types de bruts connus. Leur prix est établi par différentiel à partir de bruts de référence dont la qualité standard est connue. Les acheteurs et les vendeurs situent les prix des diverses variétés de brut à un niveau plus élevé ou moins élevé que celui du brut de référence. [6]

Les principales variétés de bruts de références sont :

I.6.1. Le West Texas Intermédiation (WTI):

Ce type de brut est utilisé comme référence Aux États Unis et en Amérique du nord. C'est un brut léger, peu sulfuré. Ce pétrole brut est plus léger que le Brent, ce qui explique son cours généralement légèrement supérieur à celui du Brent européen. Ce pétrole brut léger est de grande qualité et est idéal pour la fabrication d'essence.

Densité API de 39,6 degrés et teneur en soufre de 0,24%.

I.6.2. Le Brent :

Le Brent est un type de pétrole brut assez léger et peu soufré, issu de champs de la Mer du Nord, C'est surtout le brut de référence en Europe.

Aujourd'hui la production est limitée mais c'est malgré tout ce brut qui reste la référence internationale en pétrole brut, et c'est son cours mondial qui détermine environ 60% des cours des pétroles bruts du monde entier.

Densité API de 38,3 degrés et teneur en soufre de 0,37%.

I.6.3. Le Dubaï light :

Dans le Golfe Persique, le Dubaï light est utilisé comme référence pour fixer le prix de vente d'autres bruts de la région à destination de l'Asie ; le Moyen-Orient et Asie. Ceci est dû au fait que le Dubaï est l'un des rares brut vendu dans le Golfe Persique.

Densité API de 31 degrés et teneur en soufre de 2%. [6]

I.6.4. En Algérie :

Le brut de référence est appelé « Sahara Blend », c'est un mélange de bruts issus de plusieurs champs du Sud Algérien.

I.6.4.1. Principales caractéristiques :

- Un brut léger : API entre 43.5 et 47.5 ;
- Un brut à très basse teneur en soufre : moins de 0.1%.

I.6.4.2. Répartition des produites issus du fractionnement du Sahara Blend :

- GPL: 4%
- Naphta: 34%
- Kérosène: 12%
- Gas-oil: 25%
- Résidus: 2

Le Pétrole brut algérien utilisé a été obtenu à partir de centre de collecte située à Haoudh El Hamra (Hassi Messaoud, sud de l'Algérie). Les propriétés physico-chimiques du pétrole brut sont illustrées dans le Tableau I.2.

Tableau I.2. : Caractéristiques du pétrole brut. [2]

Propriétés	Valeurs
API°	45.8
Densité (25°C)	0.7980
Teneur en Sel (%)	0.0039
Viscosité cinématique (m^2/s) (25°C)	$0.243\ 10^{-6}$
Viscosité dynamique (kg/m.s) ou (Pa s)	$193.914\ 10^{-6}$

CHAPITRE II :

DIFFERENT TYPES DE TRANSPORT DES HYDROCARBURES

II.1 Introduction

Il existe plusieurs moyens de transport des hydrocarbures, répartis selon le milieu exploité, chaque moyen ayant ses propres exigences, avantages et inconvénients, parmi ces moyens il y a :

– Le transport par pipeline

– Le transport par voie maritime.

– Le transport par voie routier.

– Le transport par voie ferroviaire.

II. 2. Transport par pipeline :

Les pipelines sont des outils essentiels de transport massif de fluides (liquides, liquéfiés ou gazeux) sur de grandes distances comme sur de petites liaisons. Ils allient débit important et discrétion et confirment année après année qu'ils sont le mode le plus sûr et le plus écologique de transport des hydrocarbures notamment [7].

La plupart des pipelines transportent le pétrole ou du gaz entre les zones d'extraction et les zones de consommation ou d'exportation.

La longueur totale des pipelines dans le monde est estimée à environ un million de km, soit deux trajets entre la Terre et la Lune. La plupart des conduites souterraines sont soit enfouies profondément dans environ un mètre des zones peuplées, soit installées à terre dans la région désertique, ou dans la zone solide ou sous-marine. [8]

II. 2.1 Historique du transport par pipeline :

Depuis les temps historiques les plus anciens. Certains de ces réseaux utilisaient déjà sur certains tronçons des canalisations maçonnées ou en bois ou en métal ductile

A Des réseaux d'aqueducs pour la collecte et la distribution d'eau potable et d'irrigation existent le dix-neuvième siècle, la civilisation industrielle a vu se développer des installations complexes (hauts fourneaux, usines à gaz, centrales de vapeur, etc.) qui comprenaient des systèmes de transports locaux par canalisations en fonte, bois, acier, céramique, d'ampleur modeste

Le premier concept industriel de transport par canalisation aurait été formulé par le Russe Dimitri Mendeleïev en 1863. Il suggéra une solution technique utilisant des tubes pour transporter du pétrole, Un autre Russe, Vladimir Choukhov, avec la société Branobel

(acronyme de Brothers Nobel) passent pour avoir construit l'un des premiers oléoducs à la fin du dix-neuvième siècle, en 1878-1880 près de Bakou.

Peu de temps auparavant, un oléoduc reliant un champ de production de Pennsylvanie à une gare de chemin de fer à Oïl Creek aurait été construit vers 1860 par Oïl Transport Association.

Les réseaux de transport par canalisation sont composés de tronçons de conduites et d'ouvrages connexes remplissant des fonctions précises. [9]



Figure II. 1 : les Oléoducs.

II. 2.2. Les types de transport par canalisation :

Le nom et le type d'une canalisation dépendent des caractéristiques physiques et des conditions d'acheminement du produit à déplacer.

- Pour le gaz naturel, transporté par gazoduc.
- Pour le pétrole, on parle d'oléoduc.
- Pour l'eau on parle d'aqueduc.
- Pour l'eau salée, on utilise le terme de saumoduc.
- Pour l'oxygène, on utilise le terme d'oxygénoduc ou d'oxyduc.
- Pour l'hydrogène, on utilise le terme d'hydrogénoduc. [10]



Figure II.2 : les gazoducs du gaz.

II. 2. 3. Composants des réseaux de transport par canalisation :

Les composants principaux dans les réseaux de pipelines sont les zones opérationnelles et le segment de pipeline. Les zones opérationnelles peuvent être des centres de distribution, des ports ou bien des raffineries, ces zones sont reliées entre eux par un ou plusieurs segments du pipeline, où le transfert des différents types de carburants se fait par les pipelines.

a) Les stations d'injection ou de départ : Elles constituent les points d'entrée du réseau de transport. Suivant leur configuration et leur position géographique peuvent être des terminaux, des stations d'entrée.

b) Les stations de compression (pour les gaz) ou stations de pompage (pour les liquides): Sont réparties régulièrement le long des réseaux de transport pour maintenir la pression et la vitesse du fluide dans les canalisations.

c) Les postes de livraison : Permettent de mettre la matière transportée à disposition des destinataires intermédiaires ou finaux. [11]

II. 2.4. Caractéristiques des tubes pipelines :

La plupart des pipelines sont faits d'acier, bien que le plastique et l'aluminium soient parfois utilisés pour les réseaux de distribution de gaz naturel. Les pipelines d'acier est fabriqué en soudant de courtes sections de tuyaux (20 m) les uns aux autres. Après la radioscopie de l'assemblage, le tuyau est ensuite enveloppé d'une couche protectrice avant d'être enterré. Tous les pipelines, sans exception, font l'objet d'une inspection en plus d'être soumis à une épreuve de pression avant leur utilisation. [12]

Ces caractéristiques principales (diamètres, épaisseur, type d'acier, spécifications de construction, température et pression d'exploitation) sont régies par tout un ensemble de règles et font l'objet de multiples calculs et de compromis économiques. (Figure Ⅱ.3)

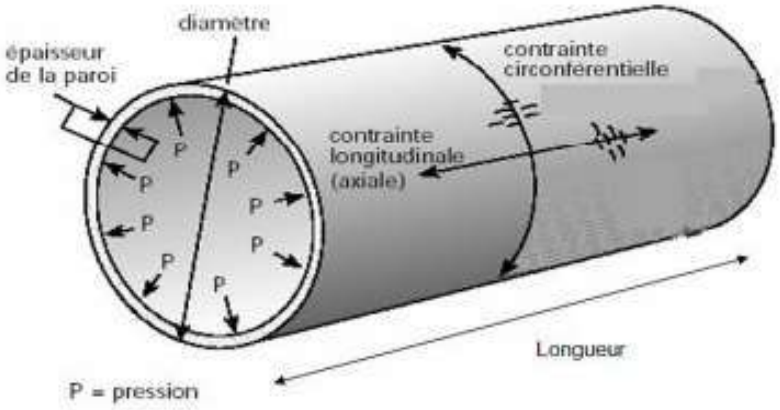


Figure II. 3 : Caractéristiques des tubes

Le diamètre d'une canalisation est déterminé en fonction du débit des produits à acheminer, de leur viscosité et de leur densité, de façon à réaliser un compromis économique entre la puissance des stations de pompage ou de compression à installer et l'importance de l'investissement total à réaliser. [12]

Le diamètre varie entre 50 mm (2 pouces) et 1400 mm (56 pouces) pour le plus grand, selon la nature de son utilisation Il faut aussi préciser que:1 pouce = 0.0254(m) [8]

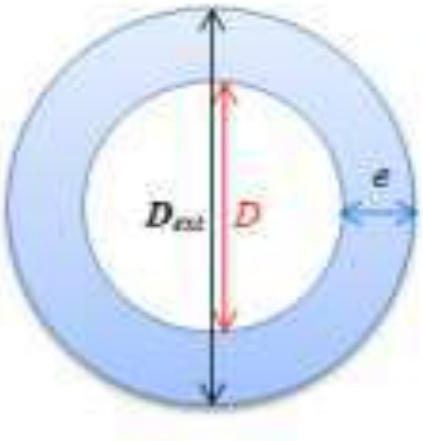


Figure Ⅱ.4 : Schéma d'un tube. [13].

Les autorités administratives des différents pays responsables de la sécurité des populations dont le territoire est traversé par les pipelines, ne restent pas indifférentes à ces calculs qui déterminent le niveau de sûreté de l'installation.

Dans la plupart des pays où l'on pose des pipelines, des règlements fixent les lois générales que doivent suivre les constructeurs et les installateurs. Ces réglementations reposent sur les notions de pression maximum de service, de coefficient de sécurité et d'autres conditions de construction comme le mode d'inspection des tubes, les modalités des essais sous pression devant être menés à bien avant la mise en service de toute canalisation, les dispositions spéciales de protection à prendre contre les fuites dans les zones où celles-ci auraient des conséquences particulièrement dangereuses). [12].

Les caractéristiques principales d'un pipeline sont :

- Une grande longueur.
- Une pression de service élevée (100 bars).
- Un gros diamètre.
- Des épaisseurs variant de 6,35 mm à 30 mm et même plus.
- La profondeur d'enfouissement dans le sol varie de 0,6 à 1 mètre selon son ancienneté et ses lieux de passages.

II. 2.5. Revêtement des tubes :

On utilise généralement la technique classique des trois couches et du Fusion-Bonded Epoxy (FBE) pour l'isolation extérieure. Nous utilisons aussi bien de la polyoléfine que du polyéthylène (PE) et du polypropylène (PP). L'objectif principal est de protéger le tube par le processus de Revêtement de la corrosion interne et externe voir la (figure II . 5). [14]



Figure II.5 : Le revêtement interne externe de canalisation [14].

II. 2.6. Le type d'acier utilisé :

Les qualités d'acier couramment utilisés dans la construction des pipelines sont définies dans deux spécifications de l'API (American Pétroleum Institute) qui sont adoptées depuis 1992 par l'industrie pétrolière américaine dénommée : [15].

- 5L pour les qualités normales.
- 5LX pour les qualités a haute résistance.

Les qualités d'acier les plus employées ont les propriétés mécaniques présentes dans le Tableau II .1

Tableau II .1 : Propriétés mécanique des aciers pour tubes selon la norme API [16].

Spécification API	Grade	Limite d'élasticité (Kg/mm^2)	Résistance à la rupture (Kg/mm^2)
5L	A	21	34
5L	B	25	42
5LX	X42	29	42
5LX	X 46	32	45
5LX	X52	37	47
5LX	X 56	39	52
5LX	X 60	41	55
5LX	X 65	46	56
5LX	X70	48	56

II. 2.7. La Rugosité :

La rugosité relative εr est le rapport entre la rugosité absolue ε de la conduite et son diamètre D : $\varepsilon_r = \varepsilon / D$ La rugosité absolue ε représente la hauteur des aspérités présentes dans toutes les conduites industrielles, on donne quelques valeurs de ε qui dépendent essentiellement du matériau en contact avec le fluide.

La rugosité absolue représente l'épaisseur moyenne des aspérités de surface des matériaux composant la conduite, on la note ε , et on exprime le plus souvent en mm [17].

ε : Rugosité (dimension moyenne des aspérités de la paroi)



Figure II .6 : Comme une rugosité de la surface.

Tableau II- 2 : rugosité interne du tuyau [18].

matériau du tuyau	*Rugosité* in	*Rugosité* Mm
Acier riveté	0.0354 à 0.354	0.9 à 9.0
Acier commercial / acier soudé	0.0018	0.045
Fonte de fer	0.0102	0.26
Fer galvanisé	0.0053	0.15
Fonte asphaltée	0.0047	0.12
Fer forgé	0.0018	0.045
PVC, tube étiré, verre	0.000059	0.0015
Béton	0.0118 à 0.118	0.3 à 3.0

Ⅱ . 2.8. Le mode de pose :

Dans le mode de pose, on distingue deux types de pipelines [19].

- ✓ Les pipelines aériens (en surfaces) :
- ✓ Les pipelines enterrés :



Figure II.7 : Canalisation enterré



Figure II. 8 : Canalisation aérienne

Selon l'option choisit, les avantages et Les inconvénients s'ensuivent. [20]

- **Les pipelines aériens :**

  Avantages

- Les fuites sont facilement détectables.
- Les travaux de réparation des fuites sont moins coûteux et plus faciles.

  L'inconvénient

- L'installation n'est pas à l'abri des actes de sabotage.

- **Les pipelines enterrés** :

  Les inconvénients

- Les fuites ne sont pas détectables facilement.
- Les travaux de réparation sont fastidieux et nécessitent une mise à nu du réseau.

- La pose des pipelines se fait selon des techniques qui font intervenir un matériel important :

- ✓ Des tracteurs à grue qui transportent et posent des tubes sur les tracés.
- ✓ Bulldozers : ouverture de la voie.
- ✓ Trancheuses, pelles ou explosifs : le creusement de la tranchée.

- ✓ Machines à revêtir.

- La pose se décompose comme suit : [20]

- ✓ La préparation de la piste ou l'ouverture de la voie. Il s'agit de l'ouverture d'une voie de 10 à 15m de large permettant le passage du matériel.
- ✓ L'alignement des tubes le long du tracée.
- ✓ La soudure des tubes : c'est l'opération la plus délicate, c'est elle qui garantit la solidité de l'ouvrage ; en effet une soudure mal faite transforme les zones de soudure en zones de faiblesse susceptibles de laisser passer le produit.
- ✓ Les revêtements : l'application du revêtement sur la conduite se fait au moyen de machines à revêtir qui se déplacent sur la canalisation déjà soudée.
- ✓ Le remblaiement et la remise en état des lieux.

II. 2 .9. Avantages de transport par pipeline :

Un pipeline présente de nombreux avantages, dont certains sont décisifs, par rapport aux autres moyens de transport. En effet, c'est :

- ➢ Un mode de transport massif (Atteint 60 M. litres/Jour par exemple).
- ➢ Un transport à haut degré de sécurité avec moins de deux incidents pour 10.000 Km de pipeline par an.
- ➢ Un approvisionnement sûr insensible aux intempéries et aux conditions atmosphériques,
- ➢ L'oléoduc fonctionne 24 heures sur 24 sur tous les jours de l'année.
- ➢ Le mode de transport massif le moins cher sur moyenne et longue distance,

Le pipeline représente la manière la plus fiable et la plus optimale en terme de coût et capable de délivrer de grands volumes des produit raffinés à partir des raffineries aux dépôts éloignés. [11].

II. 2.10. La capacité maximale de transport :

C'est la quantité de produit que l'on peut transporter à travers le pipeline sur une période donnée.

Le coefficient de sécurité

C'est le rapport autorisé de la pression maximale de service sur la résistance à la rupture de l'acier. $C_S = \frac{P_{max}}{R_P}$

C_S = coefficient de sécurité.

P_{max} = pression de service en N/m².

R_p = la résistance à la rupture en N/m².

Les coefficients de sécurité autorisés figurent dans les règlements élaborés par les autorités administratives. Il varie en fonction de la densité des populations des zones traversées. Les coefficients de sécurité sont d'autant plus sévères que la densité correspondante est grande. On distingue trois catégories dans le tracé des pipelines [20]:

- **Catégorie 1 :** le coefficient de sécurité est de 0.675 ; on a deux cas :

-Les Zones situées à moins de quarante (40m) mètres d'un établissement public

-Les Zones situées à moins de quinze (15m) mètres d'un immeuble.

- **Catégorie 2 :** Cs = 0.82 pour les zones désertiques
- **Catégorie 3 :** Cs = 0.75 autres types de terrain.

II. 2.11. Défauts rencontrés dans les canalisations :

Bien que le transport de produits dangereux par pipeline soit considéré comme un moyen de transport sûr et malgré la gestion rigoureuse du réseau de pipelines, des défaillances sont identifiées principalement dans la surveillance des travaux effectués dans ce couloir. La sécurité du réseau de transport et la disponibilité, exempte de perturbations de l'agent énergétique gaz naturel sont incontournables si l'on veut garantir la prospérité économique.

La multiplication des accidents plus ou moins graves, notamment dus à la corrosion, ainsi que leur incidence sur l'économie mondiale et leur impact sur l'environnement rondelle transport des hydrocarbures de plus en plus préoccupant. Les cas les plus fréquents sont relatifs à des incidents amorcés à partir de défauts issus soit de l'élaboration du matériau, soit de la fabrication, de l'assemblage, de la réparation ou des conditions d'exploitations des tubes et qui ont conduit à la naissance et à la propagation des fissures superficielles où travers antes suivies de fuites. On trouve six catégories principales de causes des accidents [21]:

- Agression externe ou activité tierce (les plus répandus).

- Corrosion interne ou externe.
- Défaut de construction ou défaillance de matériels ou défaut mécanique.
- Mouvement de terrain ou risques naturels en général.
- Erreurs opérationnelles.
- Autres et causes inconnues.

II.2.12 Réseau de Transport du pétrole brut:

Le Réseau de Transport des Hydrocarbures Liquides est constitué d'un ensemble de canalisations, de stations de pompage et de parcs de stockage, assurant le transport des effluents issus des champs de production, d'un centre de stockage ou d'un dispatching, vers les pôles industriels de raffinage, d'alimentation du marché national ou d'exportation. Le Réseau de Transport du pétrole brut (Figure II.9) s'étend sur une longueur de 9946 km, composé de 21 oléoducs avec une Capacité de transport de 248,36 Millions TM/an. [22]

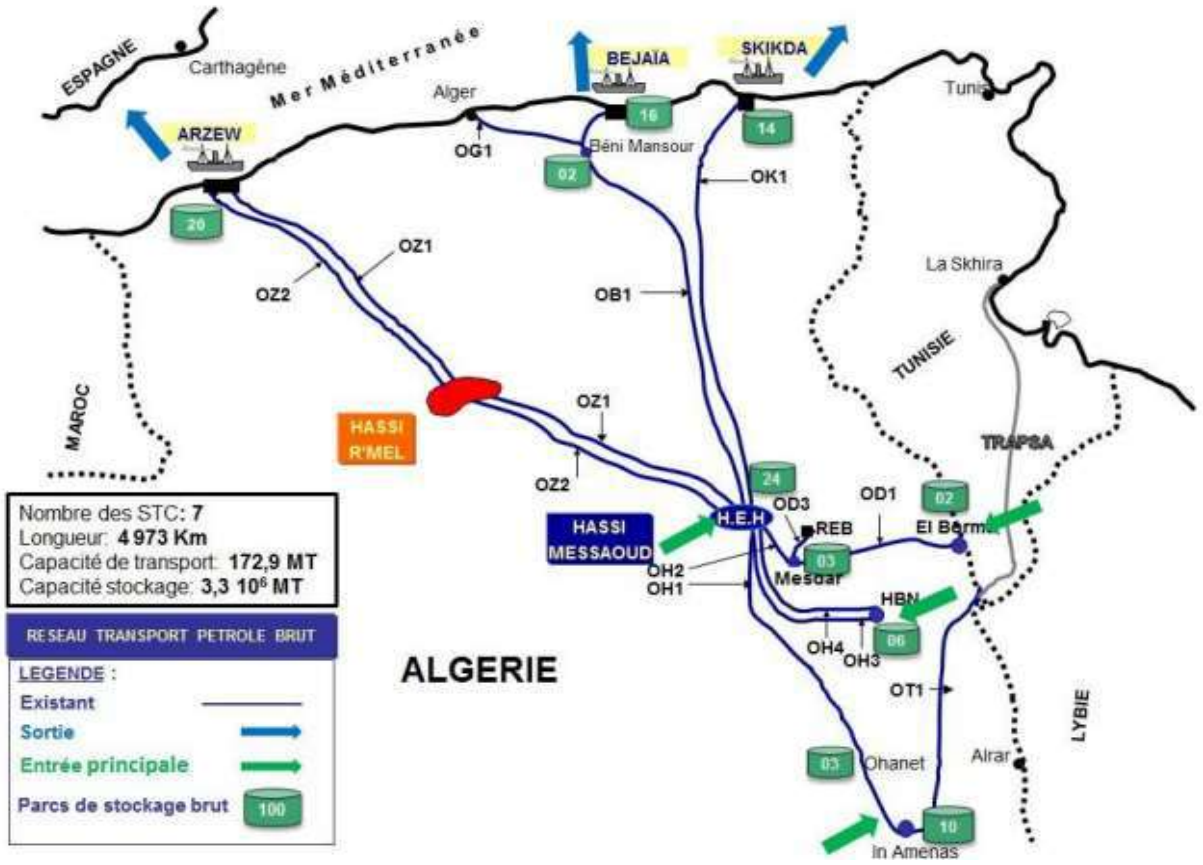


Figure II.9 : Réseau de Transport du pétrole brut en Algérie.

L'Algérie prévoit d'investir près de 10 milliards de dollars dans le développement de son réseau de transport des hydrocarbures



Figure II.10 : Pipeline en Algérie [23].

II. 3. Transport par maritime :

II. 3.1 Historique des navires pétroliers :

Le premier pétrolier à vapeur fait son apparition en 1878 à Bakou (Azerbaïdjan), le Zoraster. Il brûle du fioul lourd et non pas du charbon, Au début des années 1890, l'arrivée de pipelines accroît le trafic du pétrole dans le nord-est américain et la demande pour un meilleur trafic sur l'océan Atlantique : d'anciens voiliers sont reconvertis par l'ajout de citernes et de « *cofferdams* » (longues cloisons étanches permettant de contenir les fuites). Les coques métalliques apparaissent en 1896 et l'acier supplante le fer quelques années plus tard. La voile est elle aussi peu à peu remplacée par la vapeur.

Dans la seconde moitié du 20ieme siècle, le rôle des navires pétroliers s'accroît pour devenir un élément stratégique pour les États qui les contrôlent. Il se stabilise ensuite, concurrencé par les pipelines. Aujourd'hui, près de 60 % du transport mondial de brut reste assuré par voie maritime selon l'EIA américaine.

À la suite d'accidents maritimes comme l'Exxon Valdez ou l'Erika, les États-Unis et l'Europe ont voulu prendre des mesures visant à garantir une meilleure sécurité des navires. L'Organisation Maritime Internationale (OMI) a mis en place un accord sur la généralisation progressive de la double coque (différentes réglementations ont mis fin à la navigation des derniers pétroliers à simple coque en 2015. [24]

II. 3.2 Définition et catégories :

Les pétroliers sont des navires citernes servant à transporter le pétrole ainsi que ses produits dérivés comme l'essence. On les nomme également « tankers » ou « supertankers » pour les plus grands d'entre eux (« *tank* » signifie citerne en anglais).

Il existe plusieurs catégories de navires qui se différencient soit par des caractéristiques nautiques soit par des caractéristiques techniques ou des options, décisions techniques prises lors de la construction en fonction des trafics que l'on souhaite exercer .on peut distinguer : [25]

- ✓ Les navires travaillant uniquement sur les bruts (en général grande navire 50 000 tonnes)
- ✓ Les navires travaillant sur les produits raffinés réchauffés ou non (Product tankers)
- ✓ Les chimiquiers ou mixtes chimiquier/pétrolier.

- ✓ Les gaziers transportant les gaz liquéfiés (GPL) ou le gaz naturel (GNL).

II. 3.3. Fonctionnement :

Selon leur taille, leur rayon d'action ou les produits transportés, les pétroliers sont désignés par des appellations différentes.

II. 3.3.1. Par taille :

La capacité de transport des navires pétroliers s'est largement accrue par rapport aux traditionnels « Jumbo » capables de transporter 5 000 tonnes de pétrole brut. Cette capacité est exprimée en « *tonnes de port en lourd* » (tpl ou DWT pour « *deadweight tons* » en anglais), ce qui correspond au chargement maximum du navire.

Dans la terminologie des transports maritimes, on distingue notamment (selon la classification retenue par l'Agence internationale de l'énergie.

- les « Handymax » capables de transporter entre 38 000 et 49 999 tpl ;
- les « Panamax » entre 55 000 et 70 000 tpl.
- les « Aframax » entre 75 000 et 120 000 tpl.
- les « Suezmax » de 120 000 à 200 000 tpl.
- les VLCC (pour « *Very Large Crude Carriers* ») à partir de 200 000 tpl et jusqu'à 320 000 tpl.
- les ULCC (pour « *Ultra Large Crude Carriers* ») au-dessus de 320 000 tpl. et plus Ces pétroliers font partie des plus grandes structures mobiles construites par l'homme. [26].



Figure II.11 : Aframax Longueur:245 m



Figure II.12 : Suezmax Longueur: 275 m [27]



Figure II.13 : ULCC Hellespont Alhambra a Longueur: 380 m [27].

II. 3.3.2. Par rayon d'action :

- Les supertankers transportent les produits pétroliers sur de grandes distances (ex : Amérique - Moyen Orient).
- les pétroliers classiques sur de moyennes distances (ex : bassin méditerranéen) ;
- les ravitailleurs et navires d'allègement permettent de ravitailler les autres navires, ou d'alléger les pétroliers trop volumineux pour accoster à certains terminaux ; ils

possèdent des équipements spéciaux permettant l'amarrage à couple et le transfert de pétrole. Certains sont conçus pour s'approcher des plateformes pétrolières.

- les pétroliers côtiers transportent différents types de produits dans les estuaires et le long des côtes. Ils doivent avoir des dimensions limitées et une bonne manœuvrabilité pour pouvoir se glisser dans les passages étroits.
- les barges, particulièrement utilisées sur le continent nord-américain (environ 60 % du trafic intérieur de pétrole). Elles peuvent être poussées ou tirées par un remorqueur. [24].

II. 3.3.3. Par type de produits :

Les transporteurs de pétrole brut acheminent le pétrole depuis les champs de production jusqu'aux raffineries, généralement sur de grandes distances. Ce sont souvent de grands navires, capables de transporter plus de 100 000 tpl.

La flotte peut être divisée en plusieurs catégories :

- ✓ les navires qui peuvent transporter du pétrole brut
- ✓ les navires qui peuvent transporter du pétrole brut et des produits pétroliers
- ✓ les navires qui peuvent transporter des produits chimiques et des produits pétroliers
- ✓ les navires destinés exclusivement aux produits pétroliers [28].

II. 3.4. Les risques associés au transport pétrolier maritime :

Six risques principaux peuvent affecter les navires pétroliers :

- les conditions maritimes (chavirage, accident d'équipage, etc.).
- la collision ou l'échouement.
- le feu ou l'explosion.
- les fissures de coque ou les déformations des citernes.
- le risque de pollution en opérations de chargement ou de déchargement.
- la piraterie. [29]

II. 3.5. Les marées noires :

Les marées noires sont générées par le déversement généralement accidentel dans le milieu marin du contenu d'un pétrolier ou d'une installation de production suite à un accident. Avec des conséquences très néfastes d'un point de vue écologique (et économique), elles jalonnent l'histoire du transport maritime d'hydrocarbures. Cette longue litanie de marées noires qui débute avec le naufrage du Torrey Canyon en 1967 est marquée par plusieurs faits marquants que l'on peut résumer ainsi : [30]

- ✓ **Torrey Canyon** (1967, Angleterre) : échouement du navire, déversement de 119 000 tonnes de pétrole brut, 1ère pollution majeure, dérive de nappes en mer atteignant les côtes françaises, usage de dispersants plus toxiques que le pétrole lui-même, naissance des politiques de prévention et de lutte contre les marées noires.
- ✓ **Amoco Cadiz** (1978, France) : avarie de barre, déversement de 227 000 tonnes de pétrole brut, la plus importante marée noire près des côtes, 360 km de côtes polluées, procès sur 14 ans, indemnisation : 191 millions d'Euros.
- ✓ **Exxon Valdez** (1989, Alaska) : échouement, déversement de 37 000 tonnes sur un chargement de 180 000 tonnes de pétrole brut, 1700 km de côtes touchées, c'est la marée noire la plus chère avec une facture qui s'élève à plus de 3,8 milliards d'Euros.
- ✓ **Aegean Sea** (1992, Espagne) : échouement et incendie du navire, déversement de 80 000 tonnes de pétrole brut, plus de 4000 pêcheurs, ramasseurs de coquillages, aquaculteurs sont directement touchés par la pollution
- ✓ **Braer** (1993, Ecosse) : échouement, déversement de 85 000 tonnes de pétrole brut, interdiction de pêche sur un vaste secteur, les maisons et les prairies sont souillées par les aérosols d'hydrocarbures.
- ✓ **Sea Empress** (1996, Pays de Galles) : avarie du navire, transport de 130 000 tonnes de pétrole brut, décision des autorités brittaniques de ramener le navire à la côte, déversement de la moitié de la cargaison, 1ère coopération européenne pour la lutte antipollution (6 navires) dans le cadre de l'application de l'Accord de Bonn.
- ✓ **Erika** (1999, France) cassure d'un navire en charge, transport de 31 000 tonnes de fuel lourd, déversement de 20 000 tonnes, nouvelle application de l'Accord de Bonn, allègement de l'épave (11 000 tonnes) gisant par 200 m de fonds..

II. 3.6. Chiffres clés sur les navires pétroliers :

- Avec une capacité de 561 millions de tpl en 2018, les navires pétroliers (transportant du pétrole brut ou des produits pétroliers) comptaient pour 29,2% de la flotte maritime mondiale en tonnage cette année-là (contre 49,7% en 1980), d'après les dernières données de l'UNCTAD (Conférence des Nations unies sur le commerce et le développement).
- L'âge moyen de la flotte mondiale de navires pétroliers était de 19 ans en 2018.
- Les navires pétroliers circulent principalement sous pavillon des îles Marshall, du Libéria, de Panama et de Singapour (par ordre de valeur en 2018).
- Près de 1,87 milliard de tonnes de pétrole brut ont été transportées par voie maritime en 2017.
- La construction d'un navire pétrolier de grande taille (330 000 tpl) coûte 100 à 125 millions de dollars, selon euro pétrolé.
- La vitesse moyenne d'un navire transportant 250 000 tonnes est d'environ 15 nœuds. [27]

II. 3.7. Zone de transport :

Certains points de passage sont considérés comme « stratégiques » dans l'approvisionnement du pétrole :

- **en Afrique** : le détroit de Bâb el-Mandeb reliant la mer Rouge au golfe d'Aden et le canal de Suez.
- **en Amérique** : le canal de Panama.
- **au Moyen-Orient et en Asie** : le détroit d'Ormuz dans le golfe Persique, principal point de trafic de pétrole au monde, et le détroit de Malacca entre Singapour et l'Indonésie qui alimente l'Asie (Inde, Chine, Corée du Sud, Japon) ;
- **en Europe** : le détroit du Bosphore qui relie la mer Noire à la Méditerranée permettant d'acheminer le pétrole originaire de la mer Caspienne ou de Russie. [28].

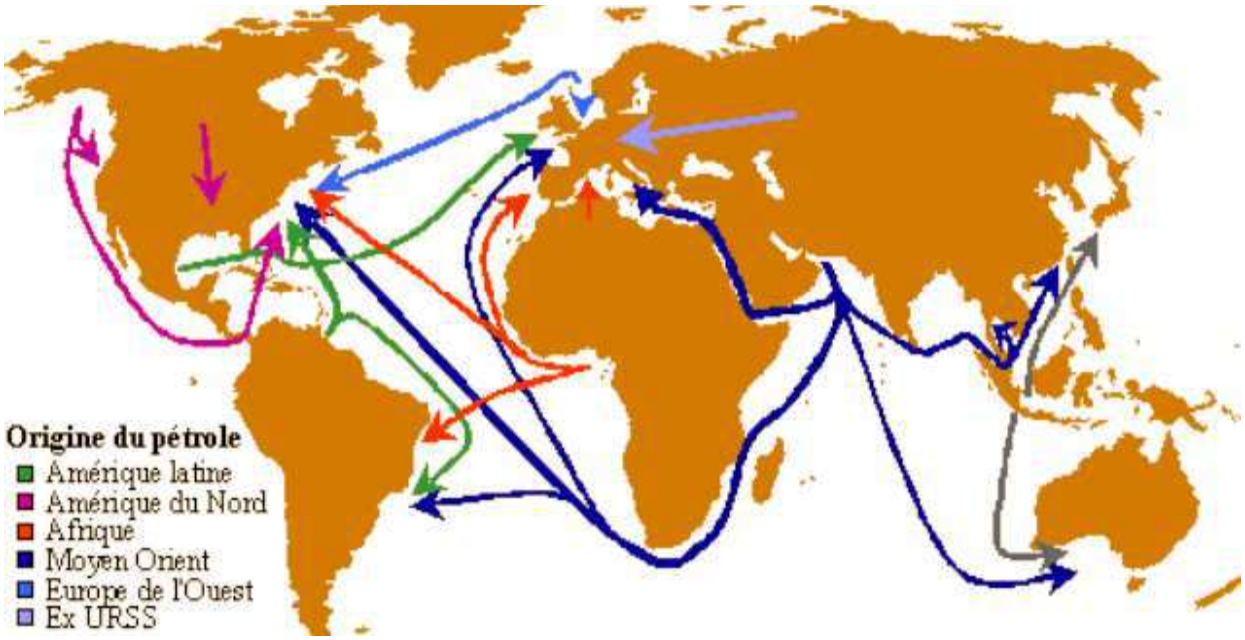


Figure II.14 : principaux points transit des navires pétroliers

II. 3.8. Les avantages de transport par maritime :

- Gros volumes.
- Prix compétitifs.
- Peu polluant.
- Alternative à la route bénéficiant de mesures politiques et légales incitatives.
- Convient aux longues distances. [31].

II. 3.9. Les inconvénients de transport par maritime :

- Besoins de manutention et ruptures de charge.
- Dépendance vis-à-vis de la route pour la partie finale du transport.
- Pas très flexible.
- Infrastructures limitées et hétérogènes en Europe.
- Temps de transit plus longs. [31].

II. 4. Transport par voie routier :

C'est le mode de transport qui répond le mieux aux besoins d'efficacité pour atteindre les attentes des consommateurs moyens et finaux (usagers, populations). C'est le mode employé exclusivement en distribution pour la mise en place finale des produits au niveau des stations-services. Il se fait par camion-citerne de capacité atteignant 45000 L. [20]

II. 4.1. Le transport des hydrocarbures par camion-citerne:

Un camion-citerne est utilisé pour le transport de liquides, de gaz ou encore de pulvérulents stockés en vrac. Les camions citernes sont généralement caractérisés par une longue cuve (ou citerne) d'acier inoxydable placée à l'arrière de la cabine, parfois sur une remorque articulée, avec une apparence similaire aux wagons-citernes des trains, constituée d'un cylindre et de deux extrémités hémisphériques. Les cuves peuvent être de différents types suivant la cargaison à contenir : pressurisée, réfrigérée ou isolée, divisée en plusieurs compartiments, résistante à l'acide, conçue pour transporter des produits alimentaires et munies d'une ou plusieurs ouvertures trous d'homme (dites trappes de visite).

La variation de la capacité typique d'un transporteur d'essence se situe entre 15 et 35 m^3 par cuve, bien que l'on trouve de petits camions de 10 m^3 ou parfois moins utilisés pour la vidange de fosses septiques, et d'autres de moins de 4 m^3 pour le transport du GPL sous pression.

Le nombre d'essieux se situe bien en fonction du poids total au sol, soit le poids du véhicule plus la charge, et varie d'un pays à l'autre. La forme des citernes transportant les pulvérulents est influencée par les contraintes liées à la vidange. Il y a deux principaux concepts :

La citerne « plate » ou les pis, la vidange se fait par dessous, par des orifices coniques

La citerne « basculante », la citerne entière est soulevée vers l'arrière, à la manière des camions-benne.

La basculante a en général un volume bien supérieur à la plate. Tous les cuves pour les pulvérulents sont généralement en aluminium pour diminuer la tare ce qui permet de charger plus. [32]



Figure II.15 : Un camion citerne pétrolier en plein chargement

II. 4.2. Les avantages de transport par voie routière :

- Service en porte à porte.
- sans rupture de charge.
- Délais relativement rapides.
- Moyen de transport direct
- Plus de flexibilité. [33]

II. 4.3. Les inconvénients de transport par voie routière :

- Sécurité et délais fonction des pays parcourus et des conditions climatiques.
- Développé surtout sur l'Europe continentale pour les distances moyennes.
- Restriction sur les temps de conduite.
- Saturation des infrastructures.
- Moyen de transport polluant.
- Augmentation des restrictions légales.
- Risque pour la sécurité routière dû au nombre de camion sur les routes; [33]

II. 5. Transport par voie ferroviaire :

Le chemin de fer présente l'avantage de pouvoir toucher une clientèle très importante et de transporter des quantités importantes de produits pétroliers en un seul trajet. Le transport des produits pétroliers peut se faire par wagons-citernes isolés ou par train complet. On distingue trois types de wagon-citerne:

Les wagons-citernes ordinaires qui sont destinés au transport des produits pétroliers ne nécessitant pas de grandes mesures à prendre.

Les wagons-citernes munis de réchauffeurs qui sont destinés au transport des fiouls lourds.

Les wagons-citernes munis de réchauffeurs et de calorifuge qui sont destinés pour le transport des bitumes et des lubrifiants. [20]



Figure II.16 : Les wagons citernes

II. 5.1. Les avantage du transport par ferroviaire :

- Développement du transport combiné et possibilité de porte à porte
- Fluidité du trafic et respect des délais.
- Adaptation aux longues distances et aux tonnages importants.
- Économique pour les longues distances. [33]

II. 5.2. Les inconvénients du transport par ferroviaire :

- Inadapté aux distances courtes.
- Limite du réseau ferroviaire, Ruptures de charge.
- Nécessite un pré- et un post-acheminement en dehors du combiné. [33]

CHAPITRE III : FORMULATIONS MATHEMATIQUE

III. 1. Introduction :

En réseaux de canalisation, les écoulements sont presque toujours turbulents .Il est donc naturel de s'intéresser à la turbulence et de son traitement par différentes méthodes afin de rendre compte des phénomènes au niveau physique, dans ce chapitre nous allons traiter

Les modèles mathématiques principaux utilisés dans la simulation d'un écoulement du pétrole brut dans une conduite, qui sont en général : Le principe de la conservation de la masse (équation de continuité) et les équations de base de **NAVIER STOKS.** [34]

Le rôle de la méthode des volumes finis **MVF** dans les résolutions des équations différentielles obtenues par les modèles mathématiques indiqués au-dessus. Ces méthodes sont à la base du logiciel simulation utilisée dans notre étude.

Nous avons fait un aperçu sur ANSYS CFX qu'on aura utilisé dans notre modélisation numérique. Il est décomposé en trois sous logiciel : Design Modeler pour la schématisation de la géométrie, le deuxième est pour faire le maillage, et le troisième le solveur manager qui fait la simulation.

III.2. Les écoulements :

III.2.1. écoulement incompressible :

Un fluide est dit incompressible lorsque le volume occupé par une masse donné ne varie pas en fonction de la pression extérieure : ($\rho = \rho_0 = \text{constant}$)

Les liquides peuvent être considérés comme des fluides incompressibles (eau, huile…). Un écoulement incompressible est un déplacement d'une quantité de fluide dont la masse volumique est considérée comme constante au cours du processus, soit une dérivée particulaire du champ scalaire de masse volumique négligeable (description eulérienne). Dans la pratique, on considère généralement que les écoulements liquides sont approximativement incompressibles [35]

III.2.2 Ecoulements stationnaires et instationnaires :

- On dit qu'un écoulement est **stationnaire** si toutes les variables décrivant le mouvement sont indépendantes du temps. Ainsi la pression p, la vitesse V, la densité ρ, l'énergie e d'un écoulement stationnaire sont des quantités indépendantes du temps.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \qquad \text{(III-1)}$$

- Un écoulement est dit instationnaire si les variables décrivant le mouvement dépendent du temps.

III.3. Les régimes d'écoulement :

Les expériences réalisées par **Reynolds** (1883) lors de l'écoulement d'un liquide dans une conduite cylindrique rectiligne dans laquelle arrive également un filet de liquide coloré, ont montré l'existence de trois régimes d'écoulement : laminaire, transitoire et turbulent. L'écoulement laminaire est caractérisé par une seule direction (composante) de vitesse (vecteurs vitesse parallèles), un écoulement turbulent est caractérisé par des tourbillons dans le fluide, le passage du régime laminaire au régime turbulent est dit régime d'écoulement transitoire (Figure III-1). [35]

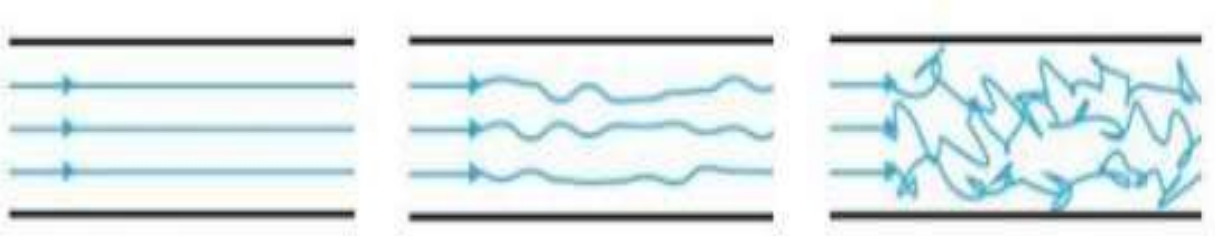


Figure III.1 : différents régimes d'écoulement.

En utilisant de fluide divers (viscosité), en faisant varier la vitesse et le diamètre de la canalisation, Reynolds a montré que le paramètre qui permettait de déterminer si l'écoulement est laminaire ou turbulent est un nombre sans dimension appelé **nombre de Reynolds.**

III.4. Nombre de Reynolds :

Il permet de déterminer le régime d'écoulement du fluide. Il est donné par la relation suivante

$$\mathbf{Re} = \frac{\mathbf{V.D}}{\boldsymbol{\nu}} \quad \mathbf{Ou} \quad \mathbf{Re} = \frac{\boldsymbol{\rho}.\mathbf{V.D}}{\boldsymbol{\mu}} \qquad \text{(III-2)}$$

Avec :

V : vitesse d'écoulement (m/s).

D : diamètre du conduit (m).

ν : Viscosité cinématique (m^2/s).

μ : viscosité dynamique ($N.s/m^2$).

ρ : Masse volumique du fluide (kg/m^3).

D'après la relation ci-dessus, le nombre de Reynolds représente une balance entre les forces d'inertie et les forces visqueuses (forces de frottement). De l'expérience, Il est montré que pour un écoulement dans une conduite, que :

- Si **Re < 2000 :** l'écoulement est laminaire.
- Si **2000 < Re < 3000 :** l'écoulement est transitoire
- Si **Re > 3000 :** l'écoulement est turbulent.

Ces valeurs doivent être considérées comme des ordres de grandeur, le passage d'un type d'écoulement à un autre se fait progressivement. [35]

III.5. Équations fondamentales:

Dans son ensemble, la mécanique des fluides est gouvernée par trois équations fondamentales : l'équation de continuité, l'équation de quantité de mouvement (**Navier-Stockes**).

III.5.1 Equation de continuité :

C'est l'équation qui exprime la loi de conservation de la masse pour un volume de contrôle matériel. Elle s'exprime mathématiquement sous la forme suivante : [36]

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla.(\rho.\vec{V}) = 0 \qquad \text{(III-3)}$$

L'équation (III-3) est souvent appelée équation de continuité (forme différentielle).

III.5.2 Équation de quantité de mouvement (Navier-Stokes):

En tenant compte de la condition d'incompressibilité, défini par [36]

$$\nabla.\vec{V} = 0 \qquad \text{(III-4)}$$

On aboutit aux équations de Navier-Stokes, qui expriment la conservation de la quantité de mouvement d'un fluide incompressible, newtonien et visqueux et dont l'expression est : [35]

$$\rho.\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \rho(\vec{V}.\nabla).\vec{V} = \vec{f} - \nabla.p + \mu.\nabla^2.\vec{V} \qquad \text{(III-5)}$$

III.6. Modèles de turbulence :

Le modèle *K*− ϵ est le plus simple des modèles complets dits à deux équations. Ce modèle suppose que le régime de turbulence est pleinement établi dans tout le domaine et que les effets de la viscosité moléculaire sont négligeables par rapport à ceux de la viscosité turbulente (loin des parois). Il est basé sur l'hypothèse de « Boussinesq », à savoir qu'il existe une analogie entre l'action des forces visqueuses et les contraintes de Reynolds dans l'écoulement moyen. [37]

Dans le modèle *K*−ϵ Deux grandeurs sont introduites : *K* est l'énergie cinétique turbulente et ε le taux de dissipation turbulente. La viscosité turbulente est alors égale à :

$$\nu_t = C_\mu + \frac{k^2}{\epsilon} \tag{III-6}$$

K est modélisé par l'équation :

$$\frac{\partial \rho \mathrm{K}}{\partial \mathrm{t}} + \overline{U}_j \frac{\partial \rho \mathrm{K}}{\partial \mathrm{x}_j} = \frac{\partial}{\partial \mathrm{x}_j}\left[\left(\frac{\mu}{\sigma_k} + \frac{\mu_t}{\sigma_{k.t}}\right)\frac{\partial \mathrm{K}}{\partial \mathrm{x}_j}\right] + \mu_\mathrm{t}\,\mathrm{G} - \rho\epsilon \tag{III-7}$$

Où G est la production de k par le mouvement moyen, elle s'exprime sous la forme :

$$G = \frac{\partial \bar{\mathrm{U}}_j}{\partial \mathrm{x_i}}\left(\frac{\partial \bar{\mathrm{U}}_j}{\partial \mathrm{x_i}} + \frac{\partial \bar{\mathrm{U}}_i}{\partial \mathrm{x_j}}\right) \tag{III-8}$$

La dissipation de k dénotée par ε est modélisée par : [37]

$$\frac{\partial \rho \epsilon}{\partial \mathrm{t}} + \overline{U}_j \frac{\partial \rho \epsilon}{\partial \mathrm{x}_j} = \frac{\partial}{\partial \mathrm{x}_j}\left[\left(\frac{\mu}{\sigma_\epsilon} + \frac{\mu_t}{\sigma_{\epsilon.t}}\right)\frac{\partial \epsilon}{\partial \mathrm{x}_j}\right] + C_{\epsilon\,.1}\frac{\epsilon}{\mathrm{k}}\mu_\mathrm{t}\,\mathrm{G} - C_{\epsilon\,.2}\rho\frac{\epsilon^{\,2}}{\mathrm{K}} \tag{III-9}$$

Les constantes qui se trouvent dans les équations ci-dessus sont données par le tableau suivant:

Tableau III.1 : valeurs des constantes du modèle K- ε [38]

σ_K	σ_ϵ	C_μ	$C_{\epsilon 1}$	$C_{\epsilon 2}$
1	1.3	0.09	1.44	1.92

III.7. Problème physique

La figure III 2 représenter la zone à étudier par un ensemble de figures géométriques simples raccordées les unes aux autres représente la géométrie à étudiée dans notre cas. C'est un tronçon d'un pipeline cylindrique horizontal en 3D, de diamètre (D) et de longueur (L) et la rugosité (ε) avec une vitesse d'entrée varie. Dans cette partie on a étudié l'écoulement de fluide (brut Algérien).

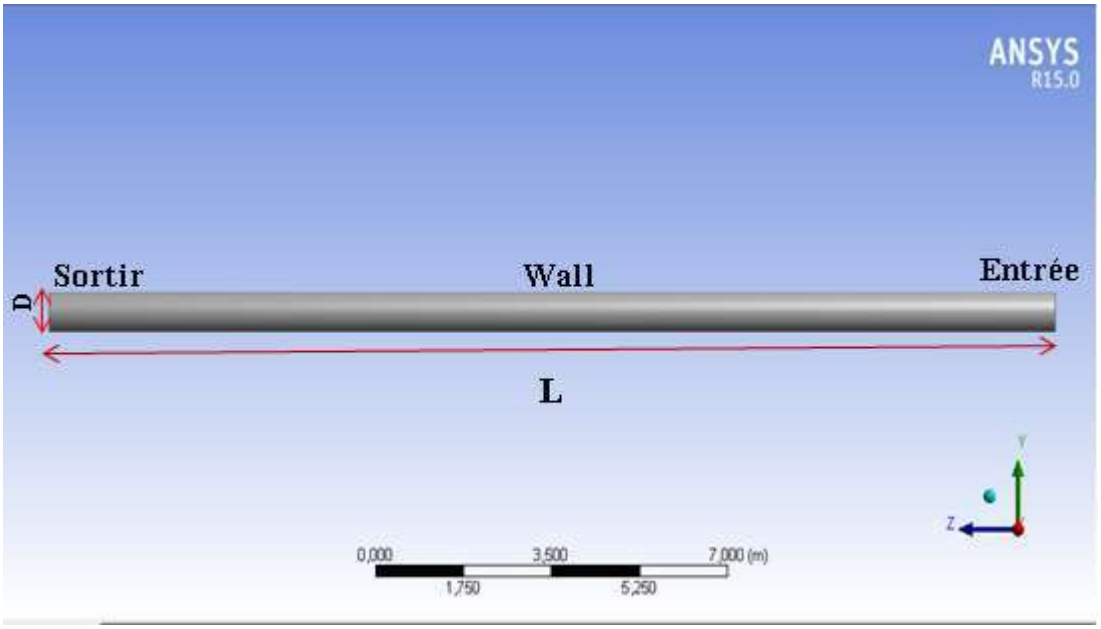


Figure III.2 : Géométrie du conduit

III.8. Les conditions aux limites

Afin de définir un problème pour une solution unique, on doit fournir des informations sur les variables aux frontières du domaine. Dans ce contexte, les conditions aux limites définissent la valeur des paramètres hydrauliques (vitesse, pression…) Plusieurs types de conditions aux limites sont proposés dans le code ANSYS CFX, nous utilisons essentiellement trois : vitesse d'entrée, pression de sortie, et la condition de paroi.

La première condition aux limites «velocity-inlet» correspond à une vitesse imposée.

La deuxième condition «pressure-outlet» (pression de sortie) est appliquée au niveau de la sortie.

La troisième condition «Wall », est utilisé pour délimiter les régions solides des régions fluides. En général deux approches sont proposées par CFX : smooth Wall et rough Wall [34]

III.9. Le maillage

La génération du maillage (3D) est une phase très importante dans une analyse CFD, vu l'influence de ses paramètres sur la solution calculée. La génération d'une très bonne qualité de maillage est essentielle pour l'obtention d'un résultat de calcul précis, robuste et signifiant. La spécification du maillage dépend de la complexité de la géométrie et du code de simulation utilisé [34]

Le premier travail à accomplir dans la réalisation d'une simulation numérique est la définition d'un maillage adapté à l'écoulement, dont la qualité infecte directement la précision des calculs. Un nombre de mailles insuffisant fera diverger les calculs ou sera responsable d'une diffusion numérique trop importante. Il faut trouver un compromis entre le nombre de mailles et le temps de calcul qui augmente considérablement avec le raffinement de la discrétisation du domaine de calcul. [34]

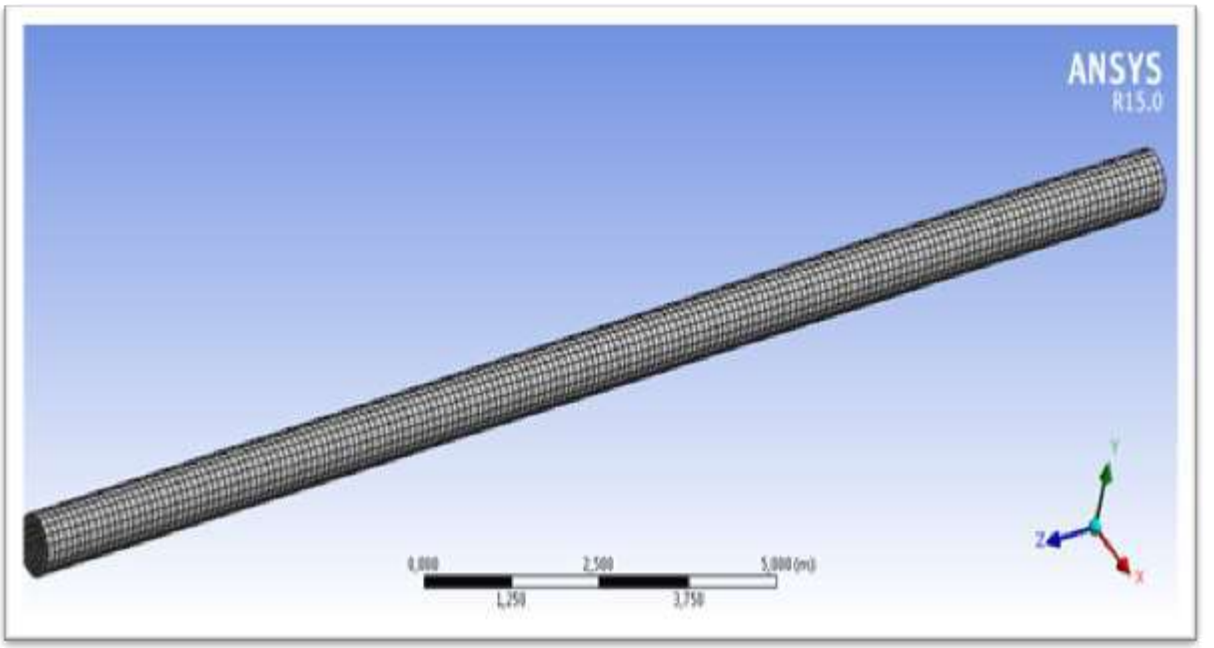


Figure III.3 : maillage de conduite

CHAPITRE IV :

MÉTHODOLOGIE

IV.1. Introduction :

Il existe différentes approches pour simuler l'écoulement de pétrole dans un pipeline. Il parait cependant difficile de diviser les approches selon les échelles. Parmi les approches utilisées et largement répandues nous citons l'approche CFD « **Computationnel Fluide Dynamics**» dont se base notre présente étude. C'est une méthode numérique basée sur les équations de la mécanique des fluides lesquelles sont impliquées dans l'étude numérique de l'écoulement de pétrole brute dans les tubes capillaires. Les simulations numériques se rapprochent le plus de la réalité des phénomènes vu qu'elles résolvent les équations de continuité, de quantité de mouvement, de l'énergie et du transport d'une quantité scalaire (la concentration), tout en tenant compte du phénomène de turbulence. Parmi les codes **CFD** commerciaux les plus utilisés nous citons: [39]

FLUENT et ANSYS CFX.

La résolution de ces équations se fait par des méthodes numériques telles que la méthode des volumes finis, la méthode des différents finis et la méthode des éléments finis.

IV.2. La mécanique des fluides numérique(MFN) :

Plus souvent désignée par le terme anglais computationnel fluide Dynamics (CFD), consiste à étudier les mouvements d'un fluide, ou leurs effets, par la résolution numérique des équations régissant le fluide. En fonction des approximations choisies, qui sont en général le résultat d'un compromis en terme de besoins de représentation physique par rapport aux ressources de calcul ou de modélisation disponibles, les équations résolues peuvent être les équations d'Euler, les équations de Navier-stokes.

La CFD permet de construire un prototype virtuel d'un produit ou d'un processus afin de simuler des conditions de fonctionnement réel, l'approche CFD est un complément aux techniques expérimentales et autres modélisations pour obtenir une description précise des problèmes d'écoulement de fluides. Ce procédé complexe, à l'origine excessivement coûteux, était réservé aux bureaux d'ingénierie des hautes technologies, comme l'industrie aéronautique.

Aujourd'hui, les coûts, les temps de calcul se sont considérablement réduits et la CFD est devenue un outil performant au service de toutes les industries qui manipulent des fluides ou rencontrent des mouvements de fluide dans leurs projets ou procès.

IV.2.1 Méthode de travail :

Pour les écoulements stationnaires dans une conduite, les équations de Navier Stokes sont directement intégrées et résolues par méthode analytique. Il s'agit de méthodes locales. Dans le cas général, une méthode de discrétisation est appliquée pour l'approximation des équations différentielles. Ces dernières sont remplacées par des équations algébriques qui sont résolues par méthode numérique. Un maillage est généré dans un domaine d'étude qui entoure l'obstacle considéré (aile, avion, voiture, hélice…) ou un domaine délimité par le contenant du fluide. Les équations algébriques sont résolues pour chaque nœud du maillage. Le plus souvent, une méthode itérative est appliquée. Les calculs sont exécutés à l'aide d'un code CFD.

En pratique, les simulations CFD s'effectuent en trois étapes :

-Pré-processing.

-Solver.

-Post processing.

Au cours de la première étape**, Pré-processing**, on construit la géométrie et on définit le domaine d'étude. Le maillage est ensuite généré à l'intérieur de ce domaine. Ensuite, on spécifie les propriétés physiques du fluide et on choisit les modèles à appliquer l'algorithme de calcul, les méthodes d'interpolation et autres schémas.

La deuxième étape, **Solver,** c'est la phase de calcul, ou de résolution des équations algébriques.

La troisième et dernière étape, **Post processing,** c'est la phase de traitement et d'interprétation des résultats.

Avec la CFD, on peut faire plus de simulations avec la possibilité de faire varier à moindre coût plus de paramètres et simuler différentes configurations. Mais des résultats expérimentaux sont nécessaires pour valider les calculs CFD. [39]

IV.2.2. Applications de la CFD :

Elles sont très nombreuses. On peut citer celles de :

- L'aérodynamique
- De la médecine : circulation du sang.

- L'hydrodynamique.
- Des turbomachines
- Du génie électrique pour le refroidissement des machines et autres microcircuits électroniques.
- Du bâtiment : chauffage/ventilation ou action du vent sur les structures. [39]

IV.2.3. Méthodes de discrétisation :

IV.2.3.1. Méthodes de différences finies :

La méthode des différences finies a une importance historique et est simple à programmer. Elle n'est actuellement utilisée que dans quelques codes spécialisés.

IV.2.3.2. Méthode des volumes finis :

La méthode des volumes finis est une approche commune utilisée dans les codes MFN. Les équations qui régissent le fluide sont résolues sur des volumes de contrôle discret.

IV.2.3.3. Méthode des éléments finis :

La méthode des éléments finis(MEF) est utilisée dans l'analyse structurale des solides, mais est également applicable aux fluides.

IV.2.4. Principe de la méthode des volumes finis :

La méthode des volumes finis est une technique de discrétisation qui convertit les équations de conservation aux dérivées partielles en équations algébriques qui peuvent être résolue numériquement. La technique des volumes de contrôle consiste dans l'intégration des équations aux dérivées partielles sur chaque volume de contrôle pour obtenir les équations discrétisées qui conservent toutes les grandeurs physiques sur un volume de contrôle. La formulation différences finies adoptées contrôle. Son principe est basé sur le fait de proposer un champ de pression qui permet d'obtenir une première approximation du champ de vitesse de l'écoulement. Puis on applique des corrections du champ de pression dans le but de rendre le champ de vite conforme avec l'équation de continuité. [34]

IV.3. ANSYS, In :

ANSYS, In c'est un éditeur de logiciels spécialisé en simulation numérique. L'entreprise a son siège à Canonsburg en Pennsylvanie aux États-Unis. La société possède de nombreuses filiales à travers le monde, notamment en Europe et en Asie.

IV.3.1. Principaux produits :

ANSYS Structural : Ce produit permet d'effectuer des simulations mécaniques en calcul de structures. Ses principales capacités sont :

- L'analyse statique
- L'analyse modale
- L'analyse harmonique (réponse forcée)
- L'analyse temporelle
- a gestion de différentes situations non-linéaires (contact, plasticité matériaux, grands déplacements ou grandes déformations).

IV.3.2. Les Modules d'ANSYS :

- ANSYS Mechanical
- ANSYS CFX et Fluent.
- ANSYS AUTODYN et ANSYS LS-DYNA
- ANSYS Electromagnetics et Ansolf
- ANSYS Multiphysics

Dans le présent travail, on a utilisé le code ANSYS CFX, qui utilise comme plate-forme la méthode des volumes finis.

IV.4. ANSYS CFX :

ANSYS CFX est un outil de dynamique des fluides (CFD) très performant qui fournit rapidement des résultats fiables et précis pour un large éventail d'applications CFD et multi physiques. ANSYS CFX est reconnu pour sa précision, sa robustesse et sa rapidité exceptionnelle pour les machines tournantes (pompes, ventilateurs, compresseurs, turbines à gaz et hydrauliques).

ANSYS CFX est un logiciel de CFD généraliste extrêmement performant, utilisé pour résoudre une large variété de problèmes d'écoulement de fluide depuis plus de 20ans. Grâce à son solveur avancé, moderne et parallélisé, les utilisateurs obtiennent rapidement des solutions fiables et robustes. Le vaste choix de modèles physiques proposé permet de représenter la quasi-totalité des phénomènes d'écoulement de fluide. Le solveur tout comme

les modèles physiques, sont accessibles via un environnement utilisateur graphique moderne, intuitif, flexible, personnalisable et automatisable (fichiers de session, scripts, générateur d'expression…). [35]

IV.5. Environnements logiciels :

Deux environnements logiciels permettent de mettre en œuvre le code ANSYS :

- **ANSYS Classic :** Chronologiquement, c'est la première solution logicielle développée par le constructeur. Elle est destinée à la construction de modèles éléments finis à la géométrie simple, facilement constructible à l'aide d'opérations basiques. À partir de cet environnement, l'utilisateur construit directement un modèle éléments finis en utilisant le langage de script APDL *(ANSYS Parametric Design Language*). ANSYS classic est donc destiné à des utilisateurs compétents dans le domaine de la simulation numérique.
- **ANSYS Workbench :** Cette plateforme propose une approche différente dans la construction d'un modèle en réutilisant le logiciel ANSYS initial. Elle est particulièrement adaptée au traitement de cas à la géométrie complexe (nombreux corps de pièces) et aux utilisateurs non confirmés dans le domaine du calcul. Dans cet environnement, l'utilisateur travaille essentiellement sur une géométrie et non plus sur le modèle lui-même. La plateforme est donc chargée de convertir les requêtes entrées par l'utilisateur en logiciel ANSYS avant de lancer la résolution. [39]

IV.6. Mettre en place une simulation à l'aide d'ANSYS CFX se fait en 4 étapes :

ICEM, CFX-pre, CFX-solve et CFX-pos

Chaque module a une utilisation bien spécifique (figure IV.1)

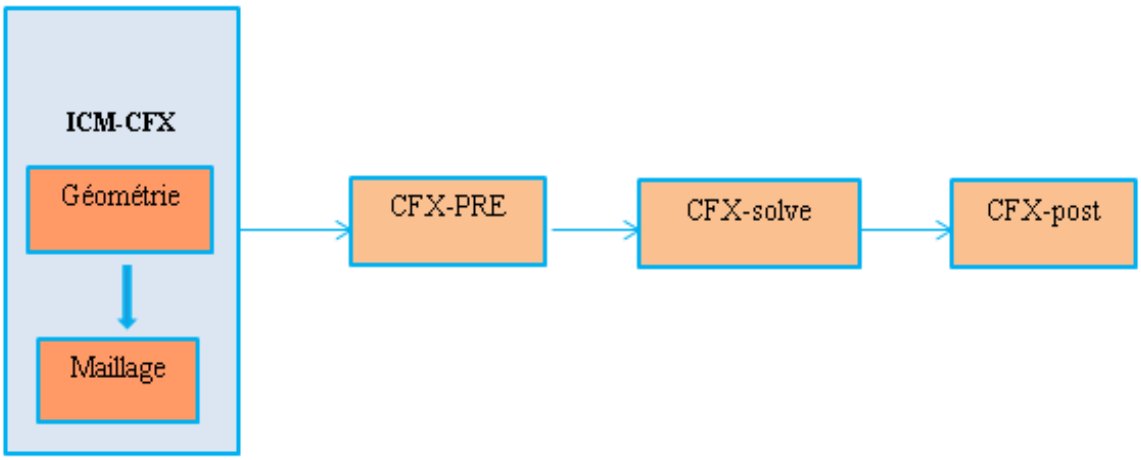
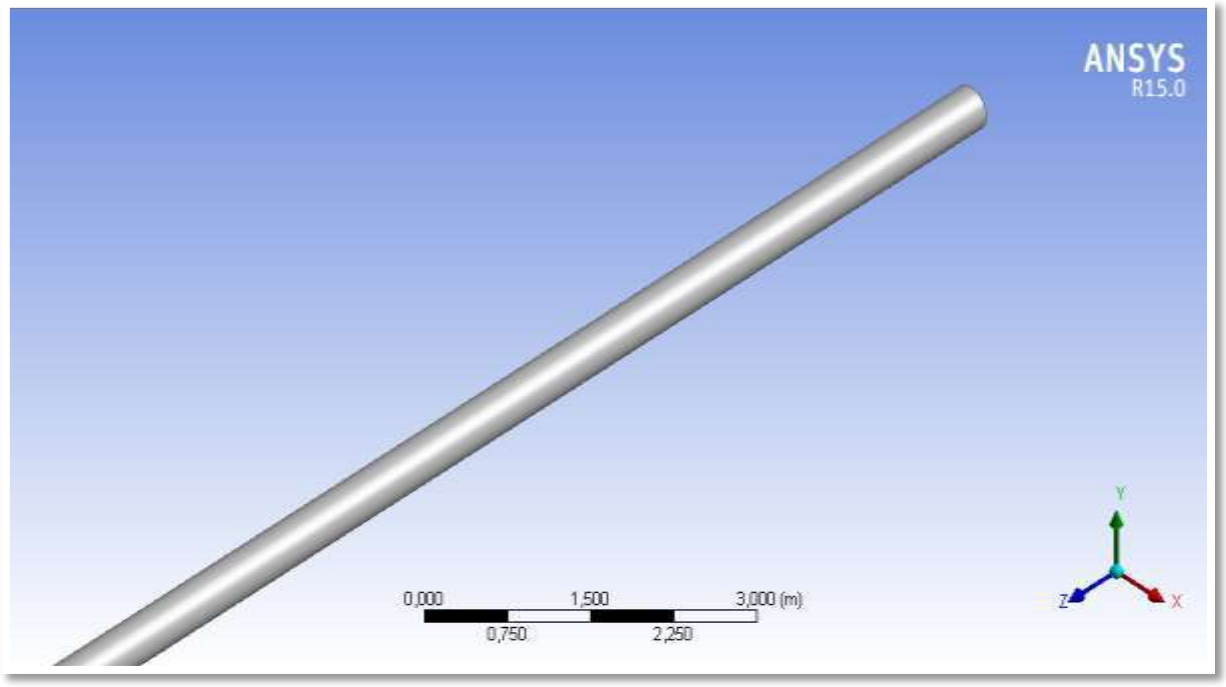


Figure IV.1 : Les modules principaux du CFX

IV.6.1 ANSYS ICEM :

Le module ICEM permet d'établir la géométrie du système étudié. Il est utilisé comme un logiciel de CAO traditionnel : la géométrie est construite à partir de points, de courbes, de surface et de volume (figure IV.2). C'est également ce module qui permet de générer un maillage s'appuyant sur la géométrie [41]



. **Figure IV.2 :** Domaine de calcul par ICEM-CFX

IV.6.2. CFX-pré :

Le module CFX-pré, Figure (IV.3) permet de définir les conditions aux limites et initiales du système, ainsi que les équations à résoudre, le type de résolution (régime permanent ou transitoire), les paramètres du solver, parmi lesquels : le pas de temps, le nombre d'itération, le critère de convergence ainsi que la nature des fluides (ou solides) en présence.

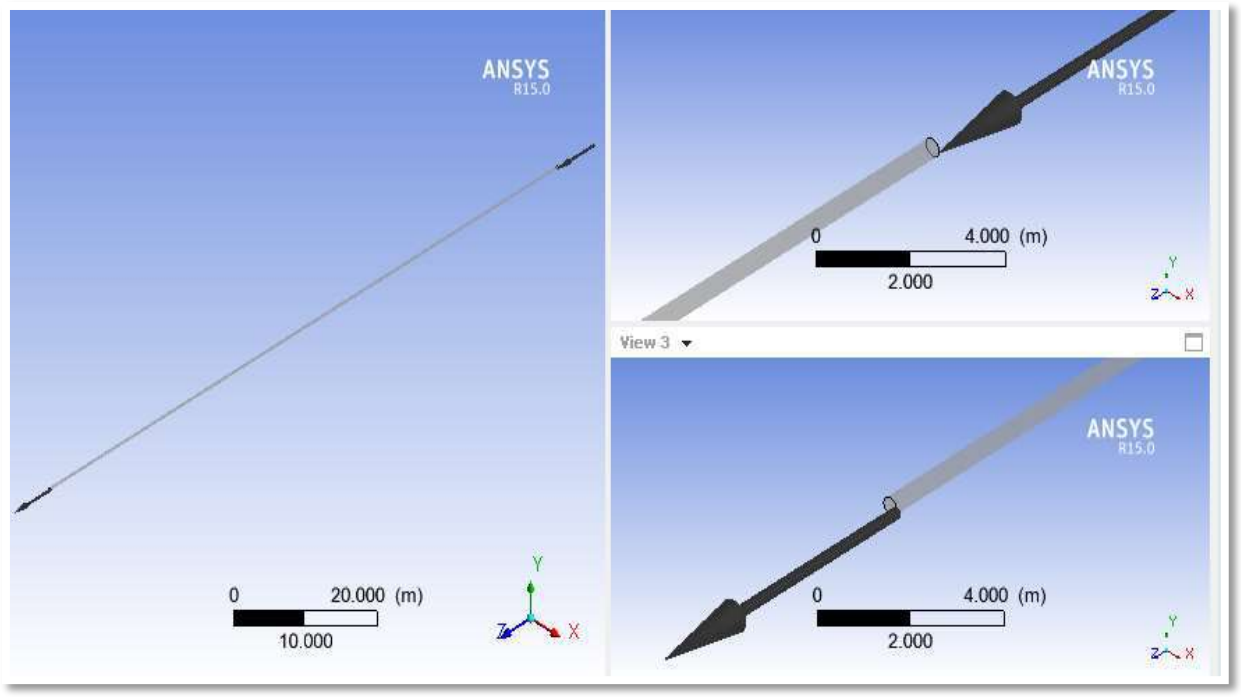


Figure IV.3 : Interface graphique du module CFX-pré

Une fois tous les paramètres définis, **CFX-pré** génère un fichier **«.def**» qui contient toutes les informations relatives au maillage, aux conditions aux limites et initiales, ainsi que tous les autres paramètres introduit dans **CFX-pré.** C'est ce fichier qui va être à la base de travail du solver. [39]

IV.6.3. CFX-solver :

Le module **CFX-solver,** figure (IV.4) est le module qui effectue les calculs. Il est basé sur l'intégration des équations de Navier Stockes dans chaque maille et dispos de modèles additionnels pour prendre en compte la turbulence, le rayonnement thermique. L'organigramme de mise en œuvre d'un calcul est présenté dans la (figure IV.4).

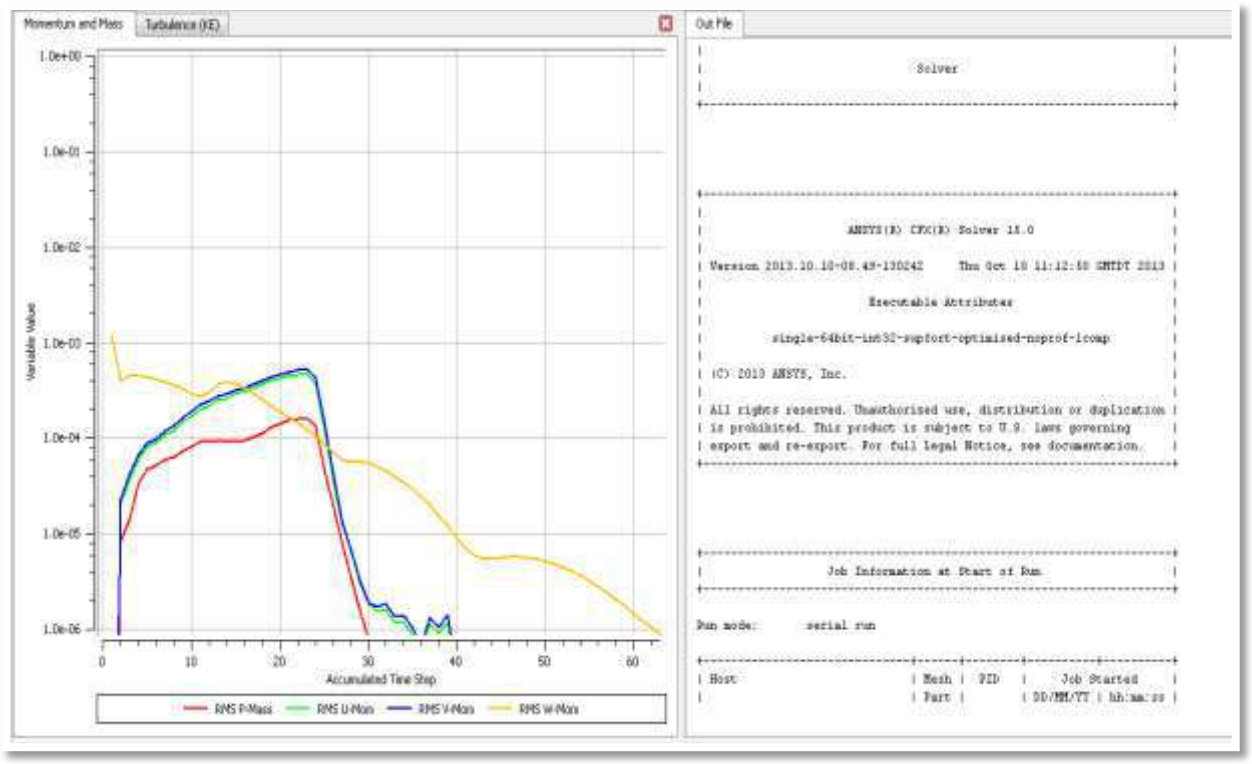


Figure IV.4 : Interface graphique du module CFX-Solver.

Dans le cas d'une résolution en régime permanent, le calcul se poursuit jusqu'à ce que, soit le nombre maximal d'itération demandé par l'utilisateur est atteint, soit la solution satisfait au critère de convergence. Dans le cas d'une résolution en régime transitoire, le calcul prend fin lorsque la durée de résolution du phénomène étudiée est atteinte.

A la fin de son calcul, CFX-solver génère deux types de fichiers :

- Un fichier **«.out»** lisible par un éditeur de texte. Ce fichier résume le déroulement du calcul. Il contient, entre autres, les informations du.def, ainsi que le bilan masse du système.

- Un fichier **«.res**» qui contient l'ensemble des résultats. Ce fichier est directement exploitable par CFX-post.

IV.6.4. CFX-post :

Le module CFX-post, est un outil graphique permettant la visualisation facile et le traitement quantitatif des résultats des simulations figure IV.6, Il dispose d'outils graphiques très puissants permettant la présentation et l'analyse des résultats on forme de :

- lignes de courant, des champs de vitesse
- visu de différents paramètres définis par l'utilisateur
- Nouveaux variables de calcule

De même, il permet également l'exportation des résultats en différentes formats afin de les traiter sur d'autres logiciels graphique [40]

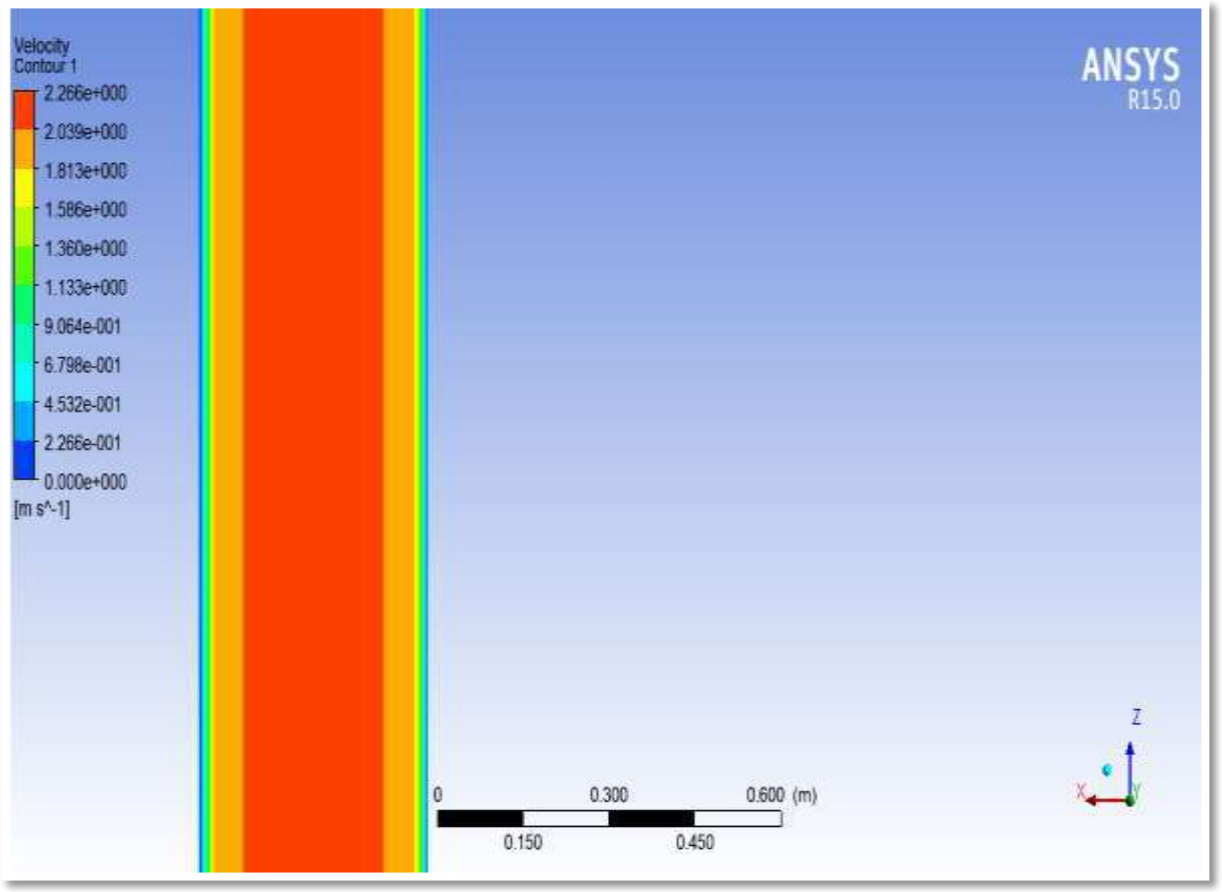


Figure IV.5 : Interface graphique du module CFX-post.

CHAPITRE V :

RESULTATS ET DISCUSSIONS

V.1. Introduction :

Après avoir obtenu les bons réglages sous "**ANSYS CFX**", comme expliqué au chapitre précédent, on procèdera maintenant à l'analyse des résultats des simulations. Ce chapitre est consacré à la simulation numérique aux différentes géométries pour les canalisations de distribution de pétrole brute, la rugosité des conduites et la vitesse d'écoulement qui décrit le comportement en régime turbulent, La discussion sera basée principalement sur les distributions de pression et de vitesse.

Le tableau V.1 récapitule la variation des différentes paramètres étudiera

Tableau V.1 : la variation des paramètres physique

D (m)	L (m)	V (m/s)	ε (mm)
0.3	100	1	0.9
0.5	200	1.94	2
0.6	400	5	5
0.7	500	10	
		15	
		20	

V.2. Résultats et discussions

❖ **Le contour de pression pour longueur de 500 m et pour une vitesse de 1.94 m/s**

La figure V.1 : représente le contour de chute de pression au niveau du tronçon étudié. On remarque que la chute de pression attient une valeur maximale à l'extrémité droite du tronçon, cette chute de pression est due à cause du frottement entre le pétrole brut et la paroi du pipeline.

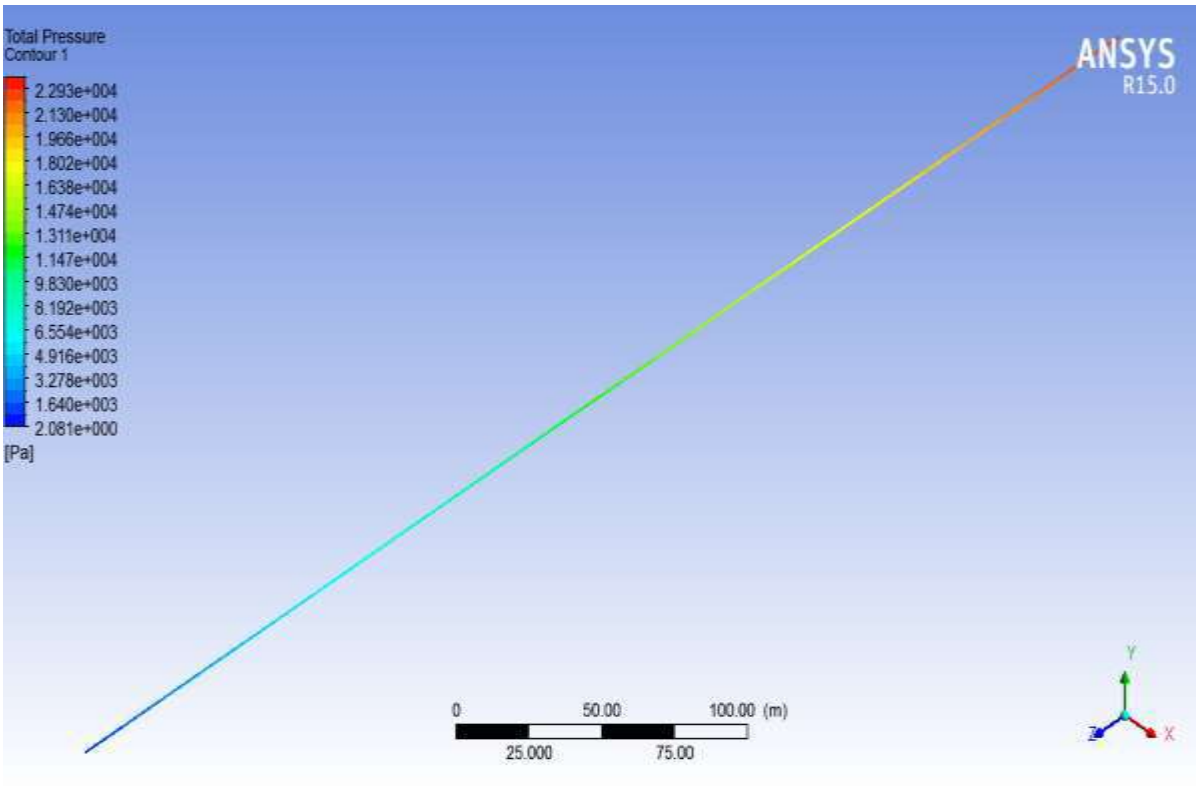


Figure V.1 : contour de pression pour v = 1.94 m/s et D = 0.7 m et L = 500 m

❖ **Les contours de vitesse pour longueur L = 500 m et déférente vitesse et diamètre et rugosité**

Les figures (V.2-V.5) représentent les contours de vitesse le longue du tronçon. On remarque que la vitesse de l'écoulement près de la paroi décroit et attient une valeur maximale au centre axiale du tronçon

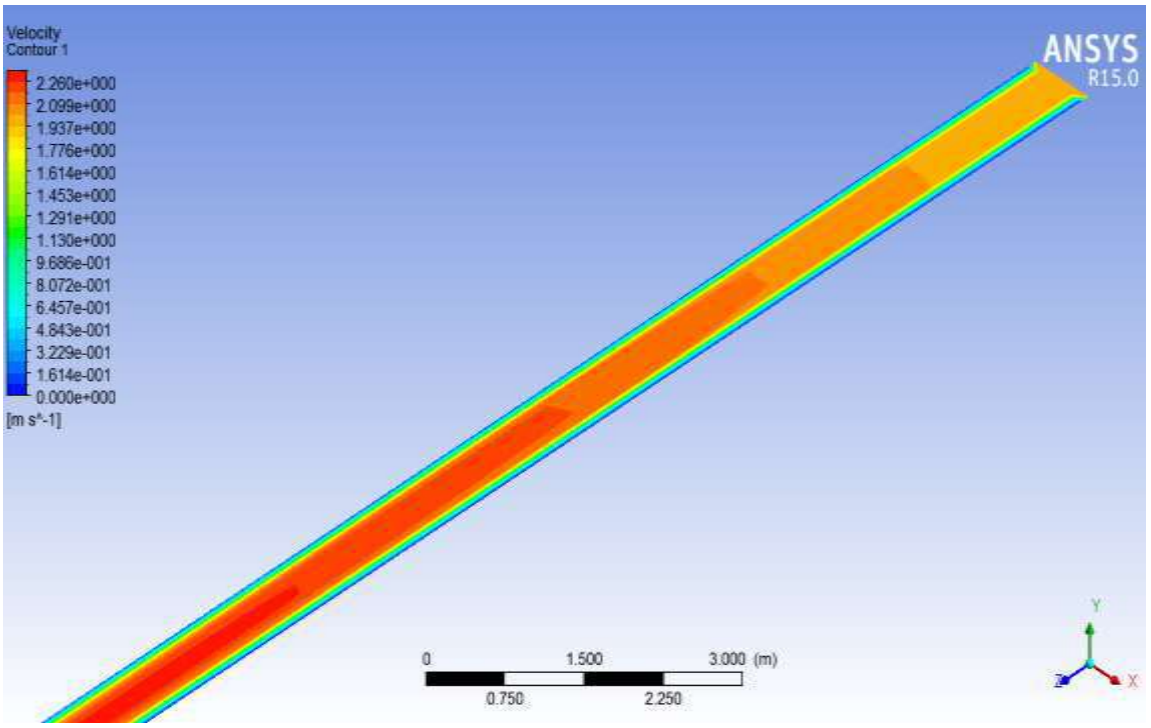


Figure V.2 : contour de vitesse pour V = 1.94 m/s, ε = 0.9 mm, D = 0.7m

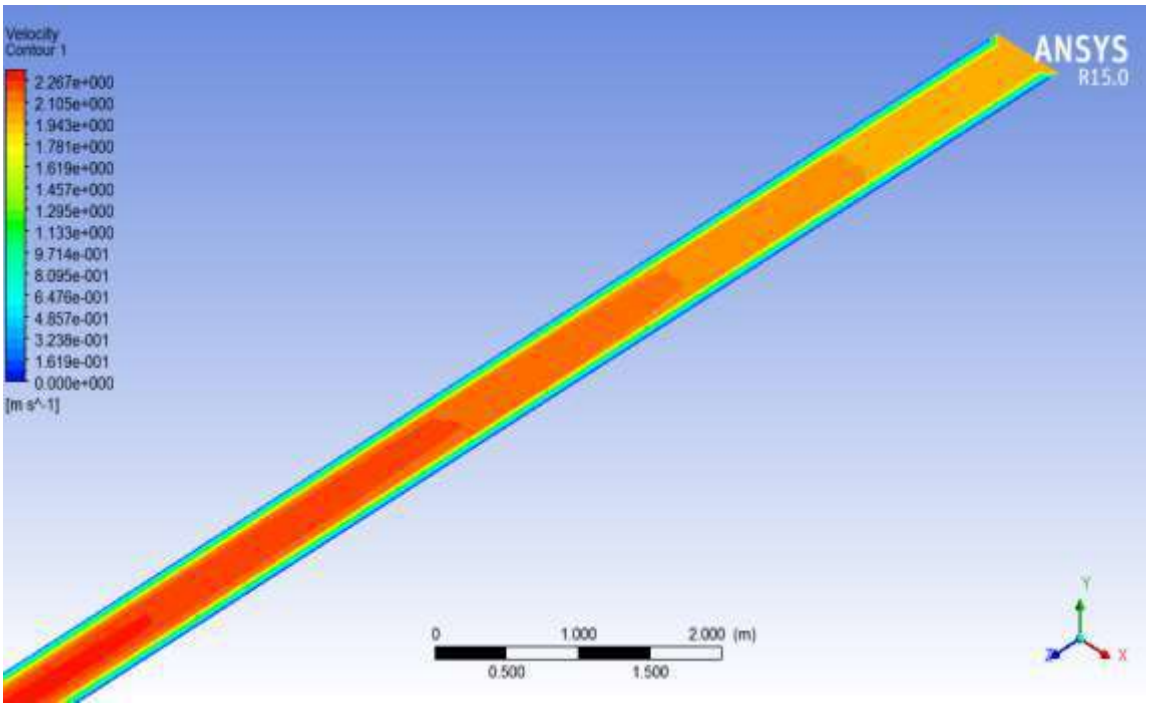


Figure V.3 : contour de vitesse pour V = 1.94 m/s et D = 0.6 m, ε = 0.9 mm

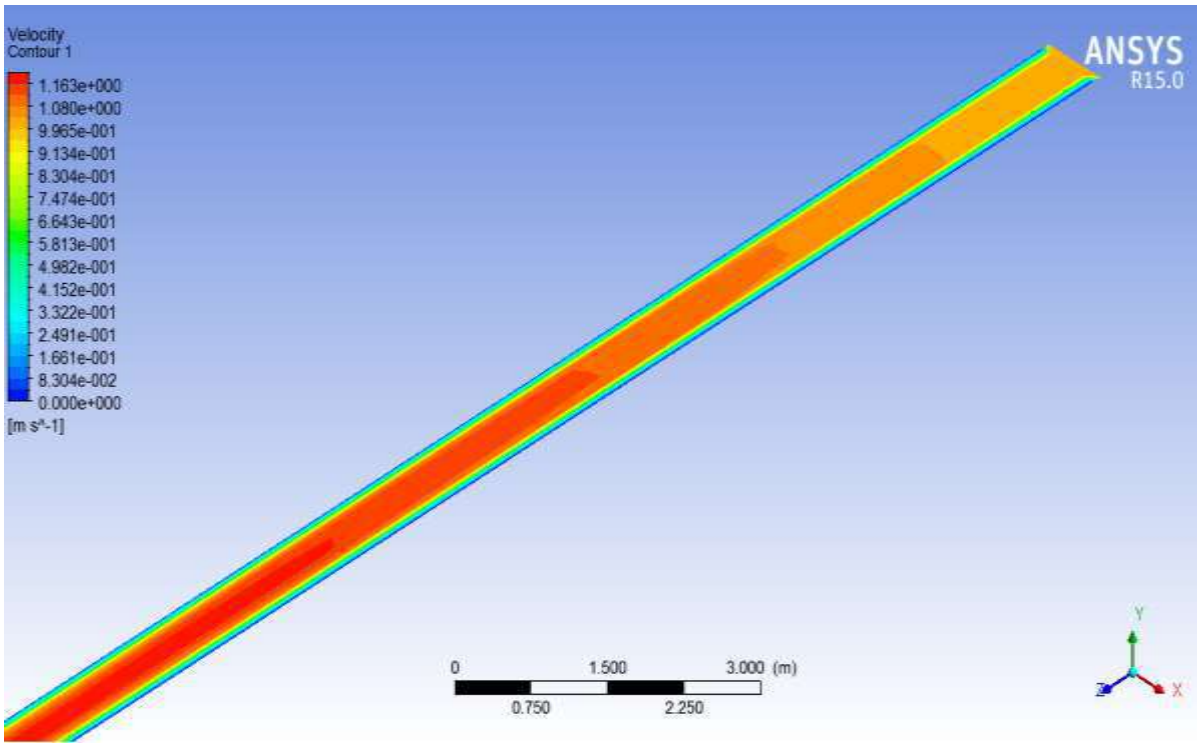


Figure V.4 : contour de vitesse pur V =1 m/s, D = 0.7 m, ε = 0.9 mm

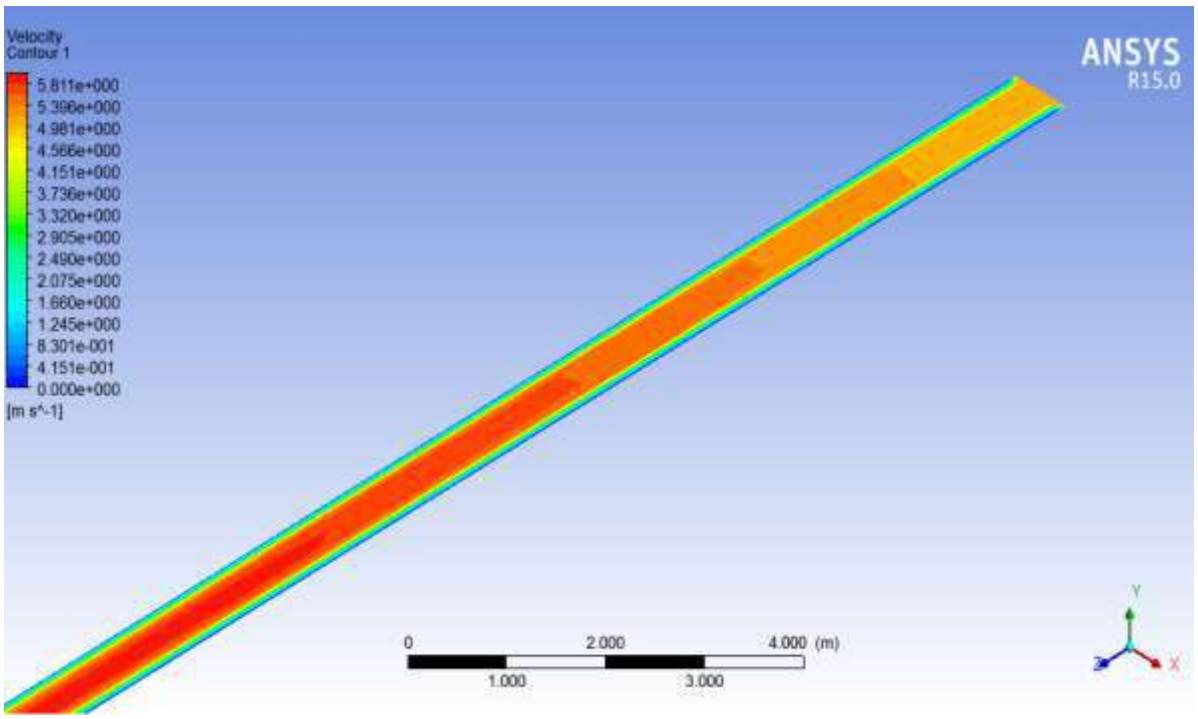


Figure V.5 : contour de vitesse pur V = 5 m/s, D = 0.7 m, ε = 0.9 mm

Les figures « V.6-V.11 » représentent la variation des profils des pertes de charges en fonction de la longueur des conduites lisses (100 m-500 m) pour différentes diamètres (0.3 m-0.7 m).

On constate une nette diminution des pertes de charges en fonction de la longueurs des conduites et que la longueur des conduites a un effet remarquable sur les profils des pertes de charge, les conduites qui possèdes des longueurs petit possède une perte de charge modéré et on contrepartie les conduites avec des longueurs grand possède une perte de charge élevé, on remarque encore un effet des diamètres des conduites sur les profils des pertes de charge, pour des conduites avec des petits diamètres on constate des pertes de charge élevé et le contraire est juste pour les grands diamètres des pertes de charge faible.

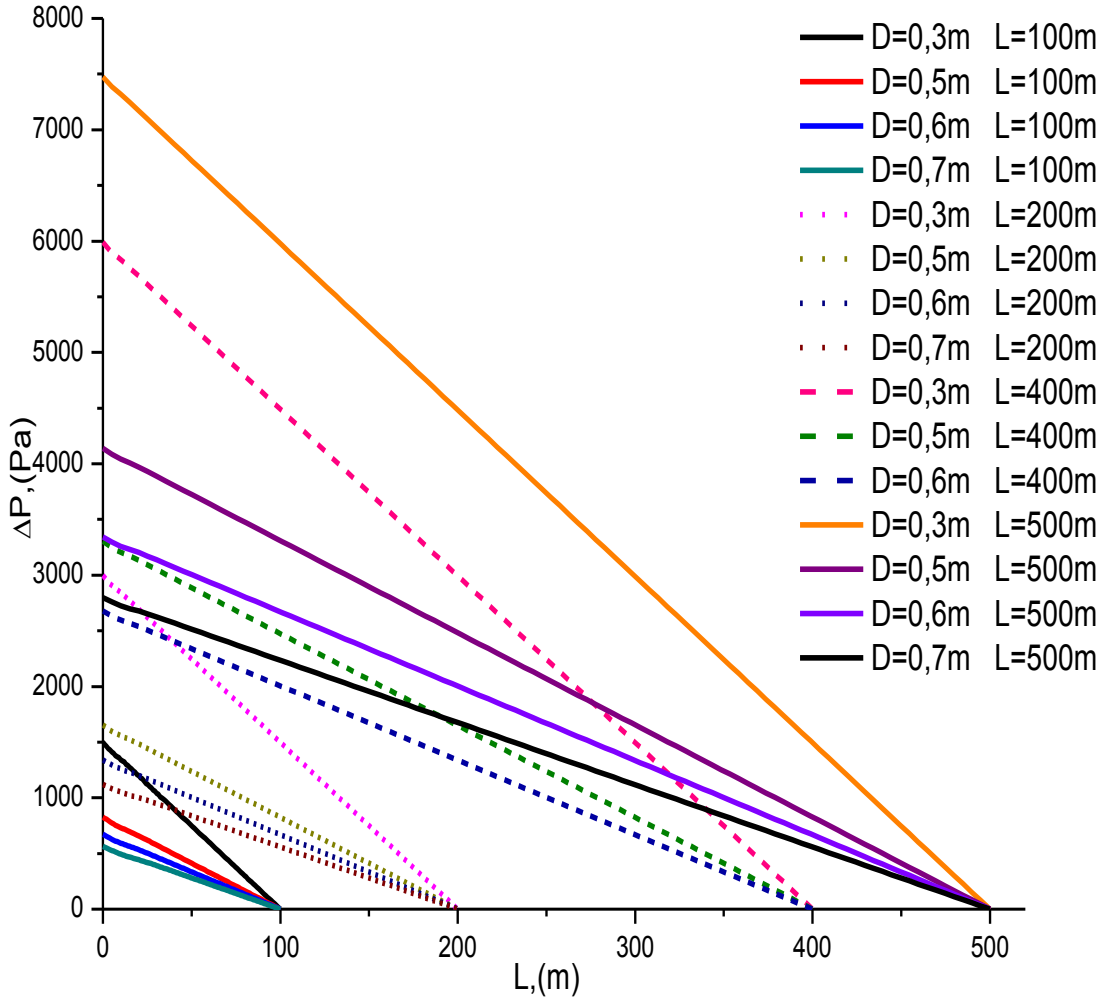


Figure V.6 : la variation de perte de charge en fonction de longueur pour la vitesse v=1 m/s

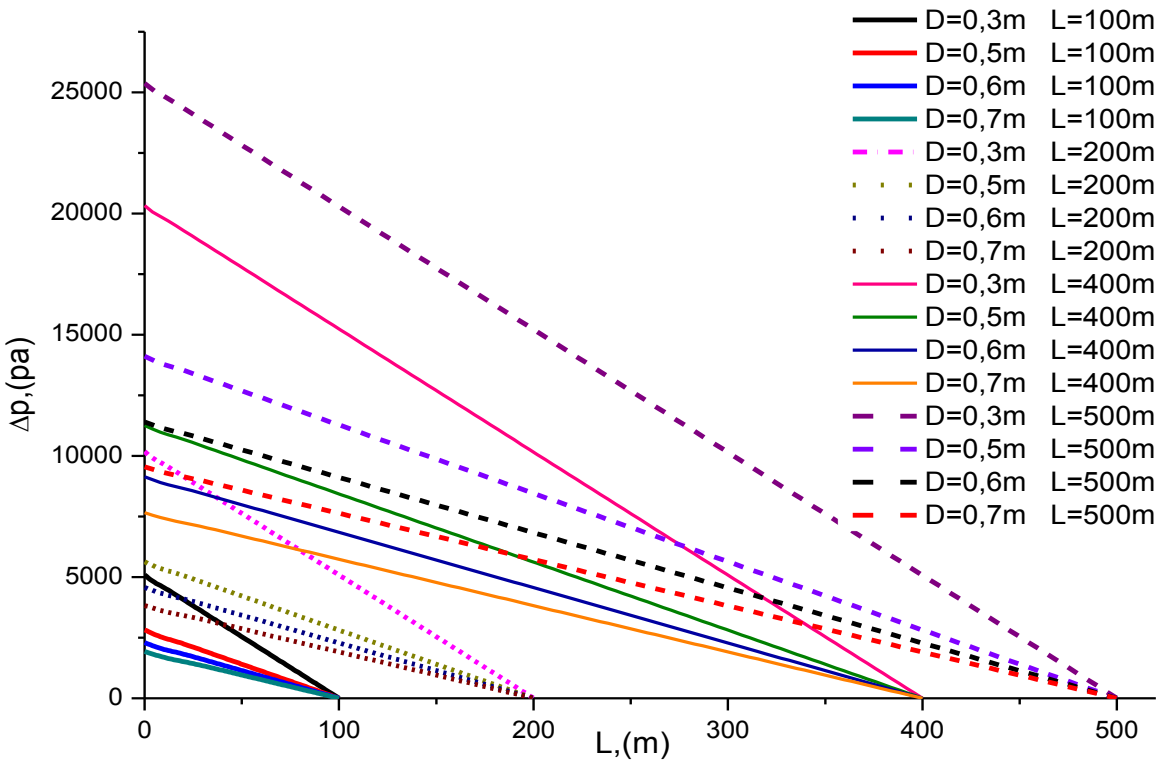


Figure V.7 : la variation de perte de charge en fonction de longueur pour v = 1.94 m/s

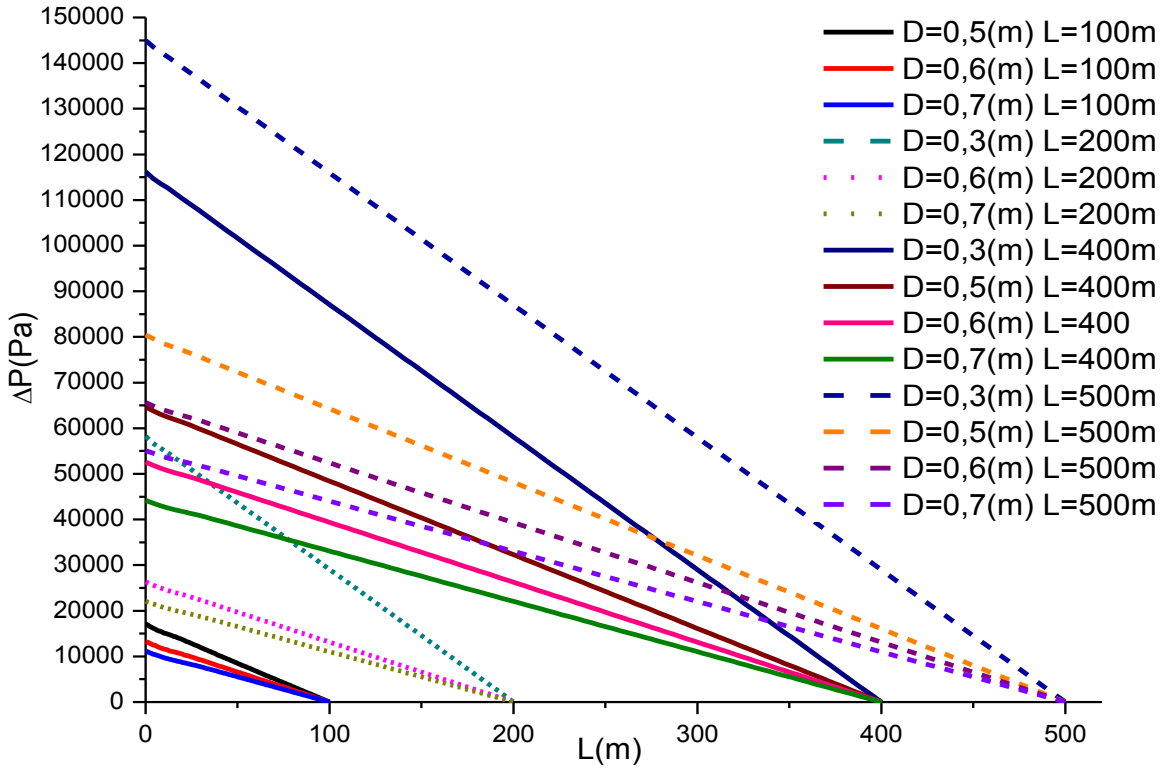


Figure V.8 : la variation de perte de charge en fonction de longueur pour vitesse = 5 m/s a différent diamètres

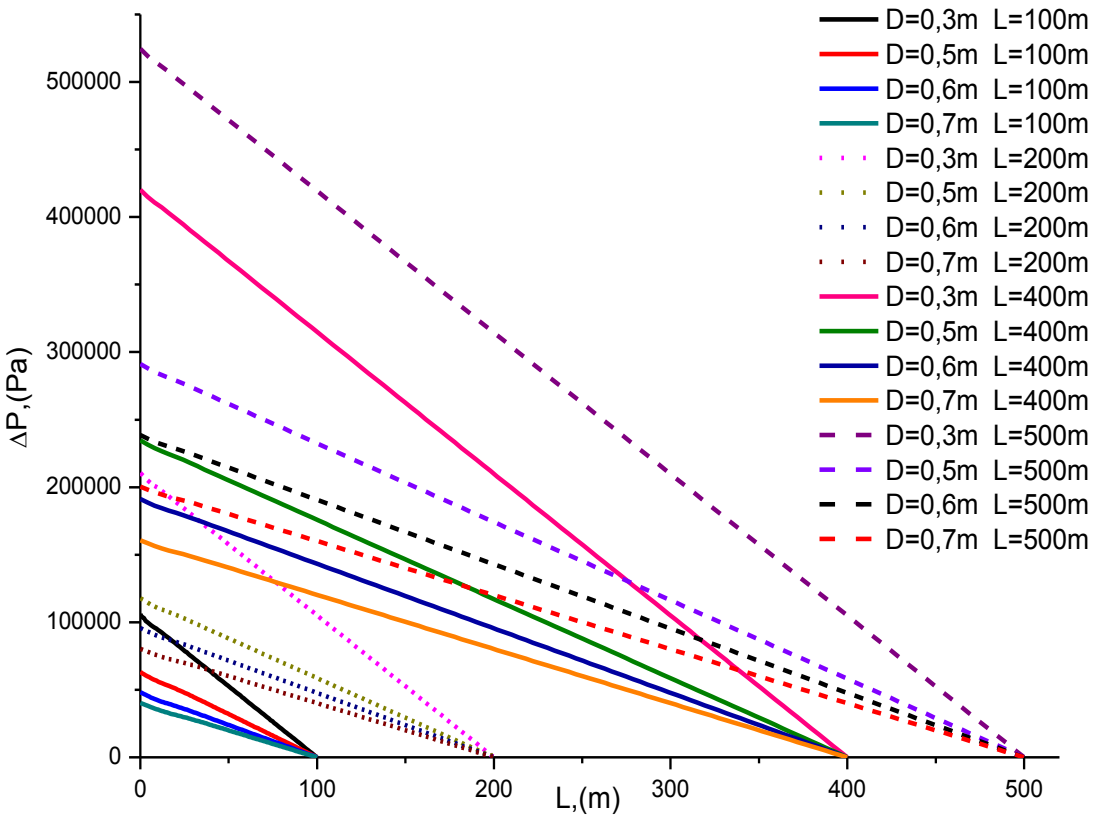


Figure IV.9 : la variation de perte de charge en fonction de longueur pour la vitesse v=10 m/s

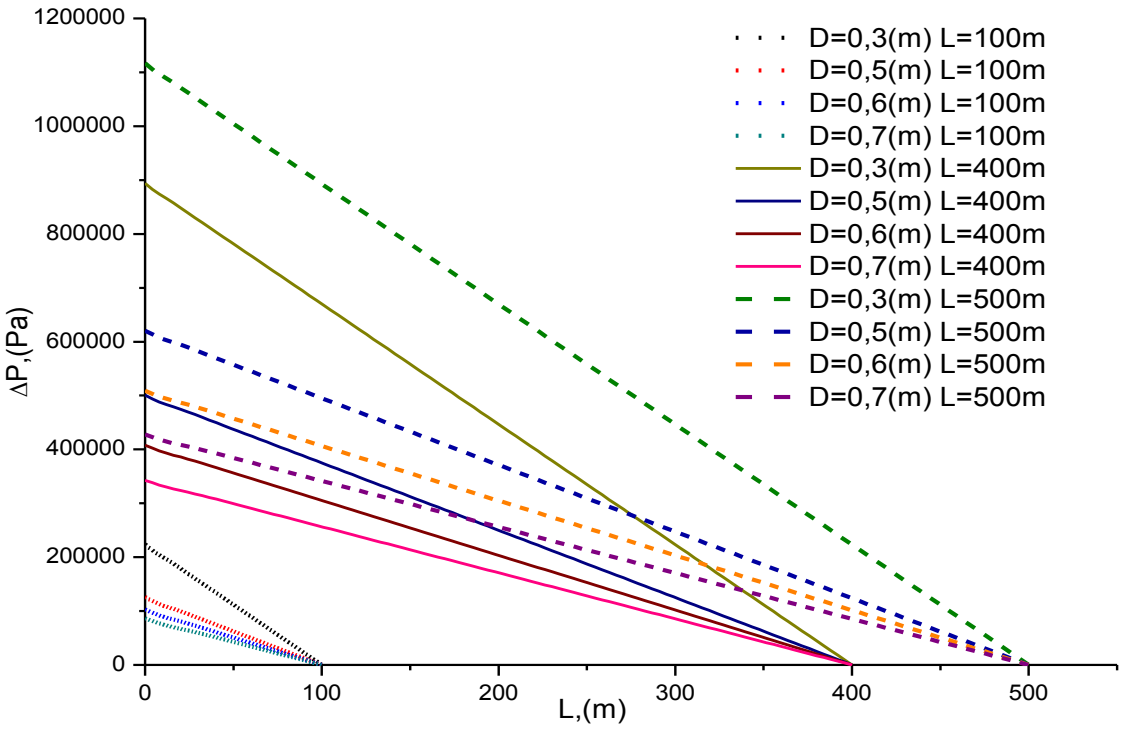


Figure V.10 : la variation de perte de charge en fonction de longueur pour la vitesse v=15 m/s

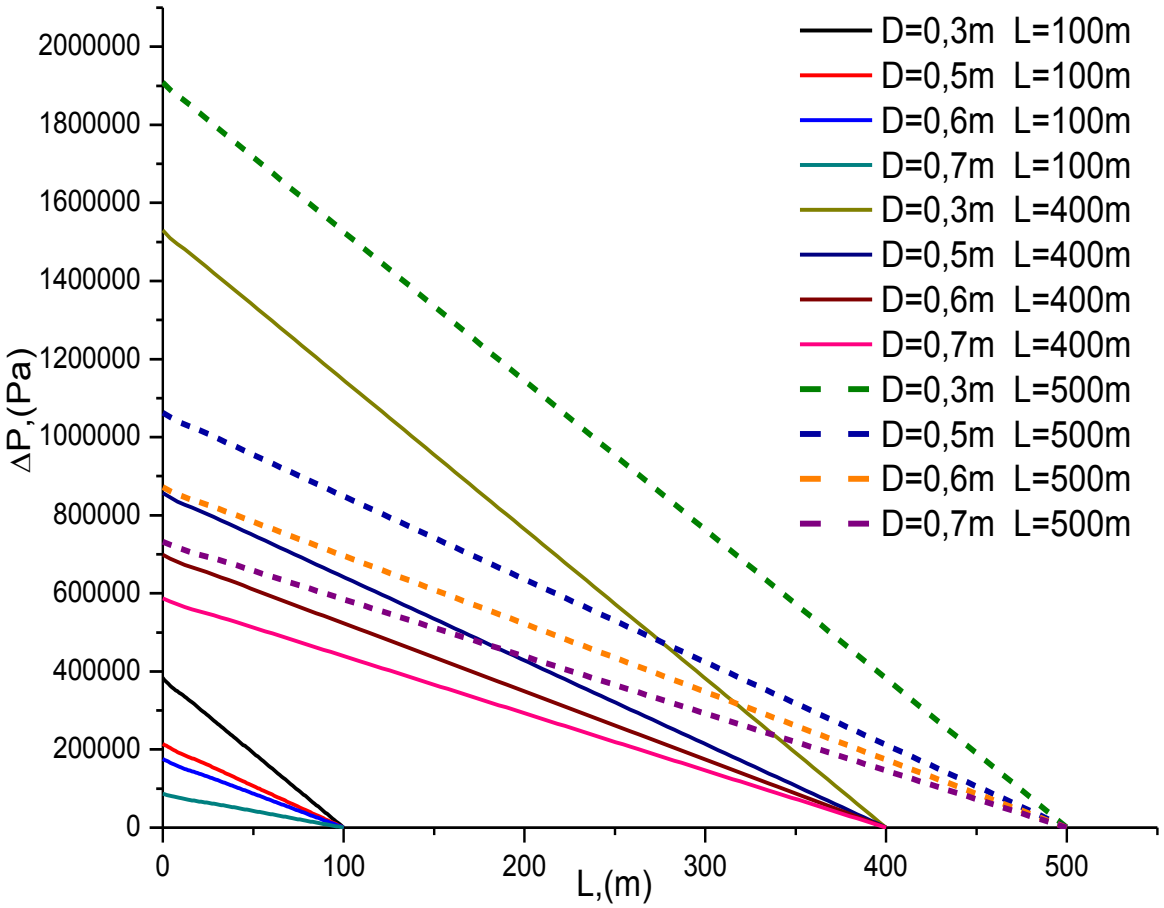


Figure V.11 : la variation de perte de charge en fonction de longueur pour la vitesse v=20 m/s

Les figures (V.12-V.15) représentent la distribution axiale des profils de vitesse, on constate qu'on a une distribution parabolique on fonction de diamètres ce qui est logique parce que le fluide utilisé est un fluide réel non newtonien qui possède des forces de frottements entre fluide paroi qui tend la valeur de la vitesse vers 0 ce qui confirme l'hypothèse suivante : la présence de pétrole près de la paroi solide provoque un ralentissement des particules de pétrole brut donc un ralentissement de vitesse, et des forces de frottements fluide ou la vitesse augmente d'une manière parabolique jusqu'à une valeur maximale au centre de la conduite. On remarque aussi que la vitesse de l'écoulement a un effet sur la distribution axiale des profils de vitesse, plus la vitesse est grand plus le profil de vitesse est grand et lorsque la vitesse est petite le profile est petit.

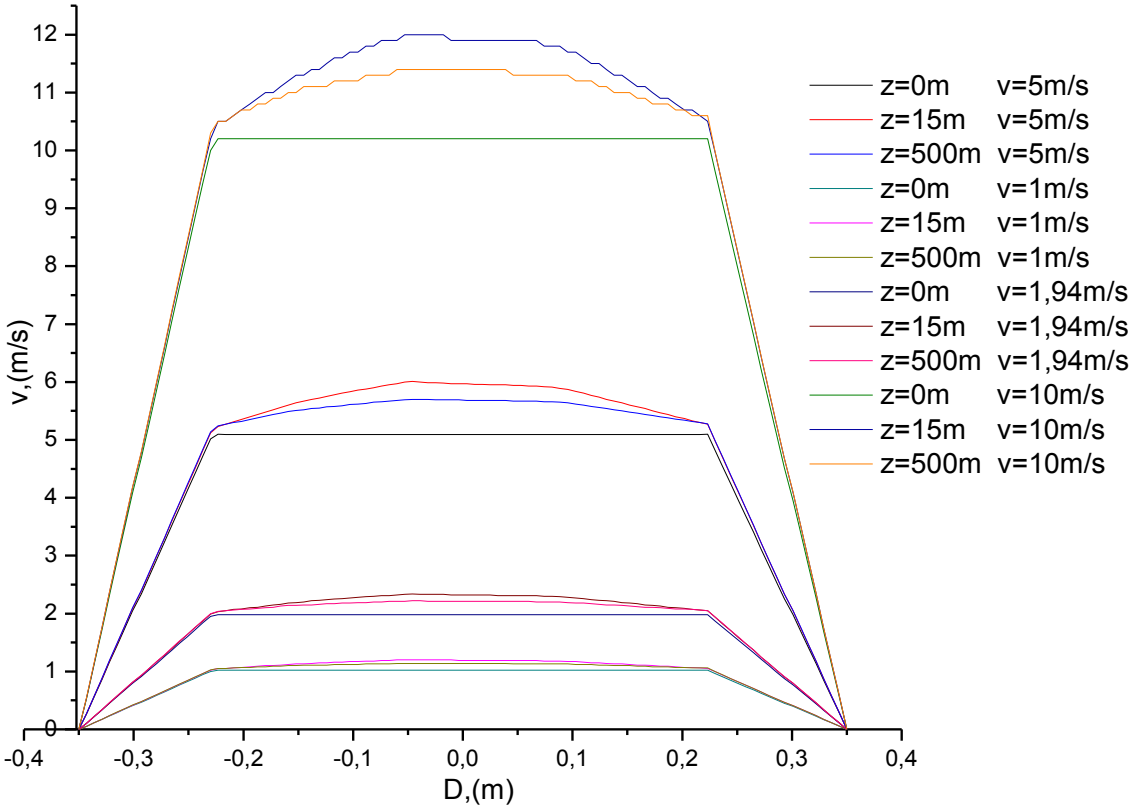


Figure V.12 : Profils des vitesses en fonction de diamètre à différentes distances pour conduite lisse

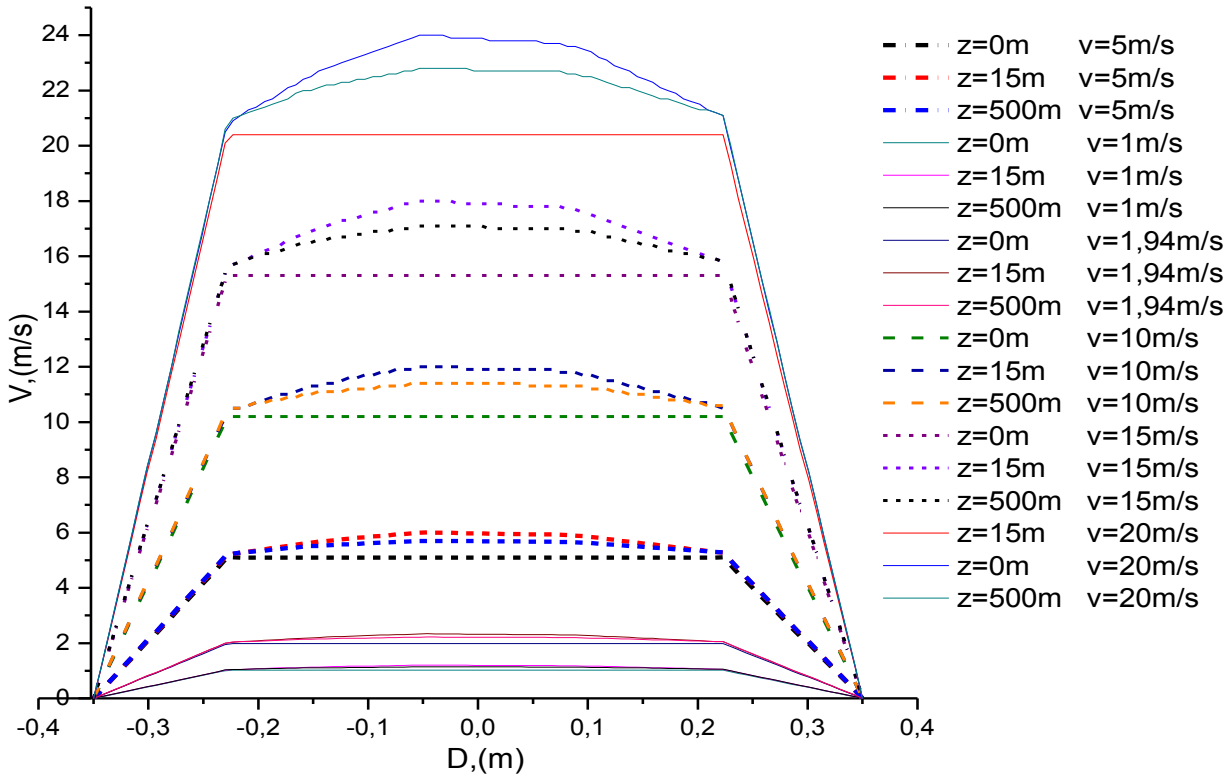


Figure V.13 : Profils de vitesse en fonction de diamètre à différentes distances pour ε=0.9mm

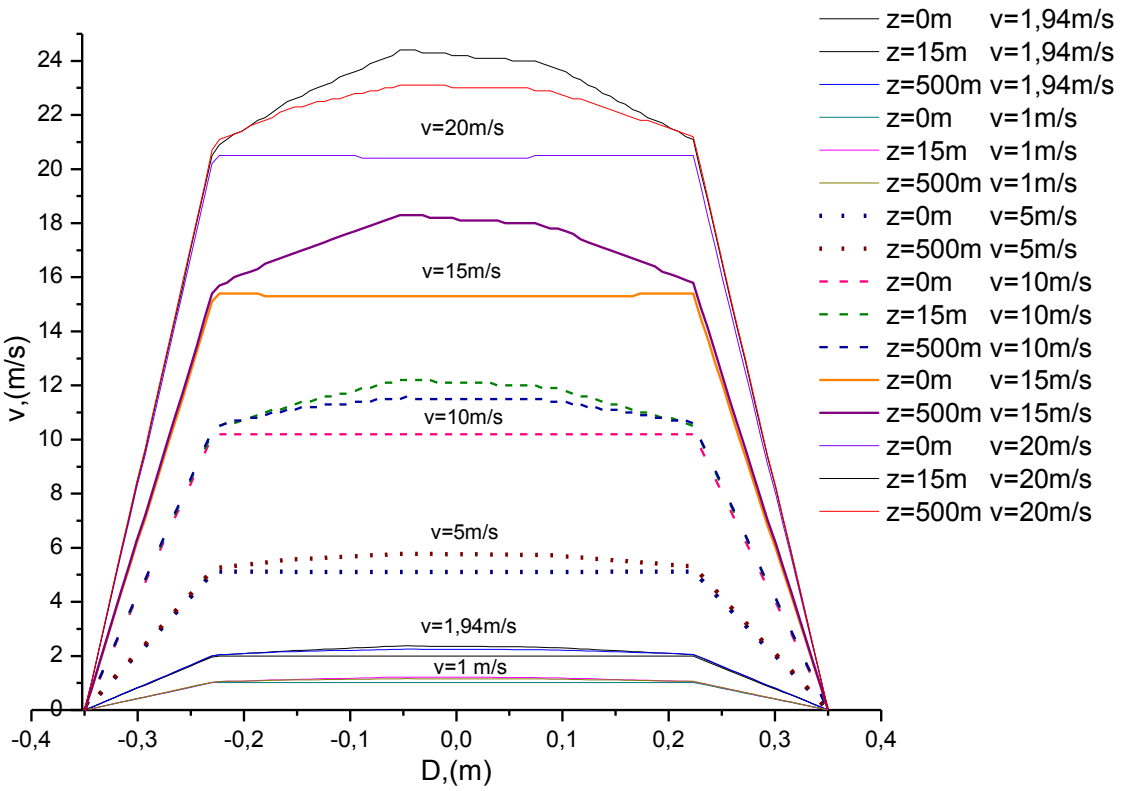


Figure V.14 : Profils de vitesse en fonction de diamètre à différentes distances pour ε=2 mm

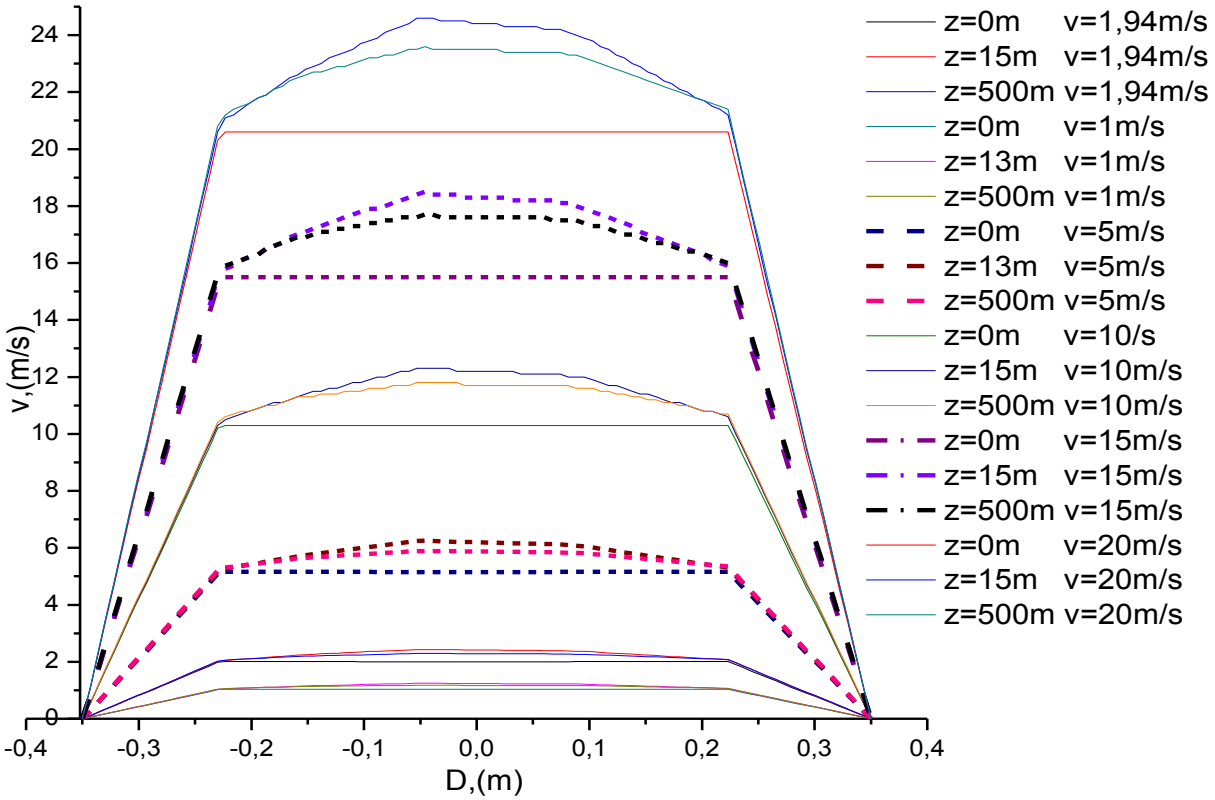


Figure V.15 : Profils de vitesse en fonction de diamètre à différentes distances pour ε=5 mm

Les figures (V.16-V.18) illustrent la variation des pertes charges en fonction des diamètres des conduites pour différents vitesses et longueur, on remarque une diminution des pertes de charges en fonction de l'augmentation des diamètres, plus que les diamètres est petit les des frottements devient important et par conséquent une augmentions aux pertes de charges et plus que les diamètres est grand les pertes de charges diminue. D'après les figures on remarque une augmentation des pertes de charges on fonction de la vitesse d'écoulements.

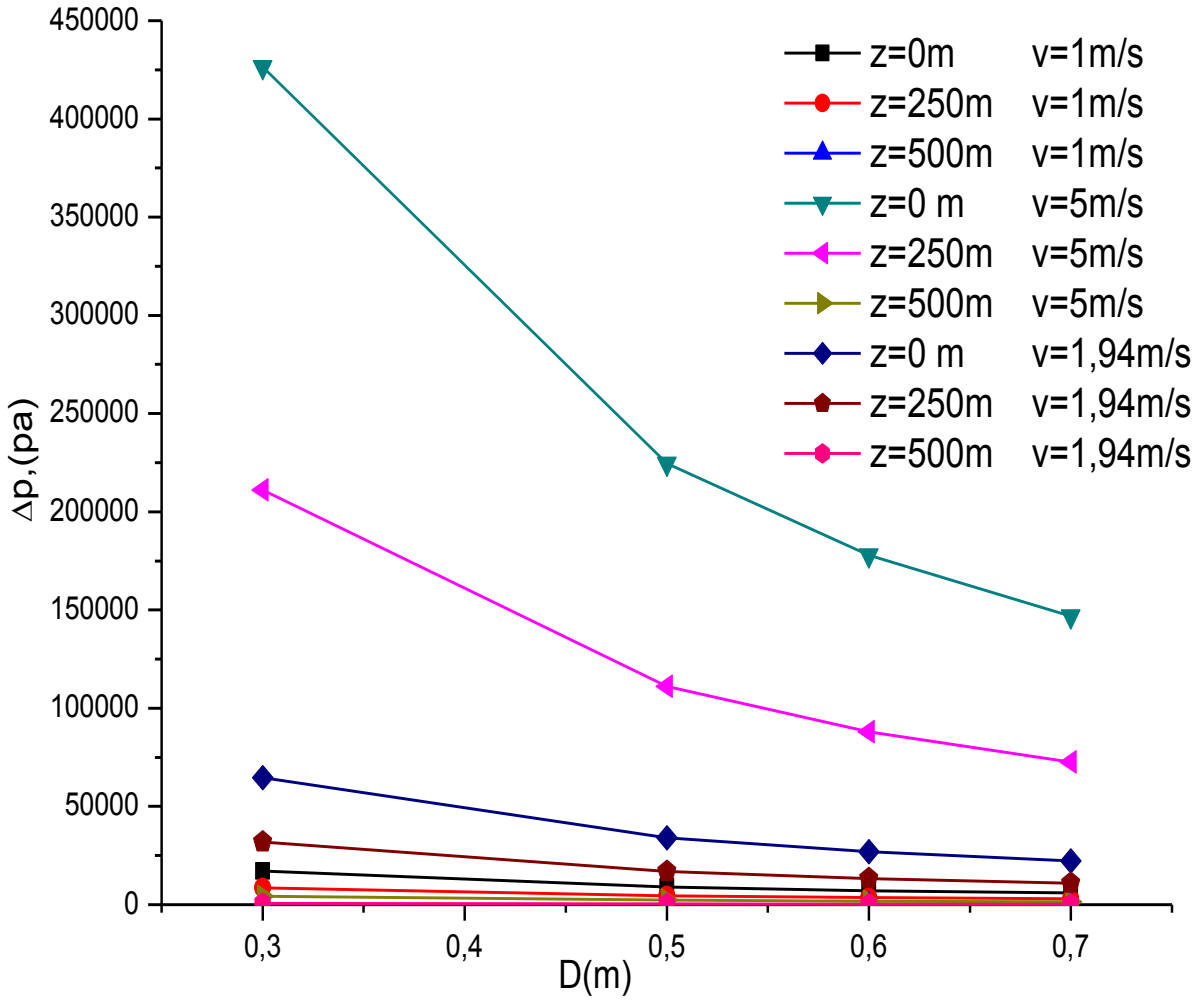


Figure V.16 : perte de charges en fonction de diamètre à différentes vitesse et longueur de 500 m

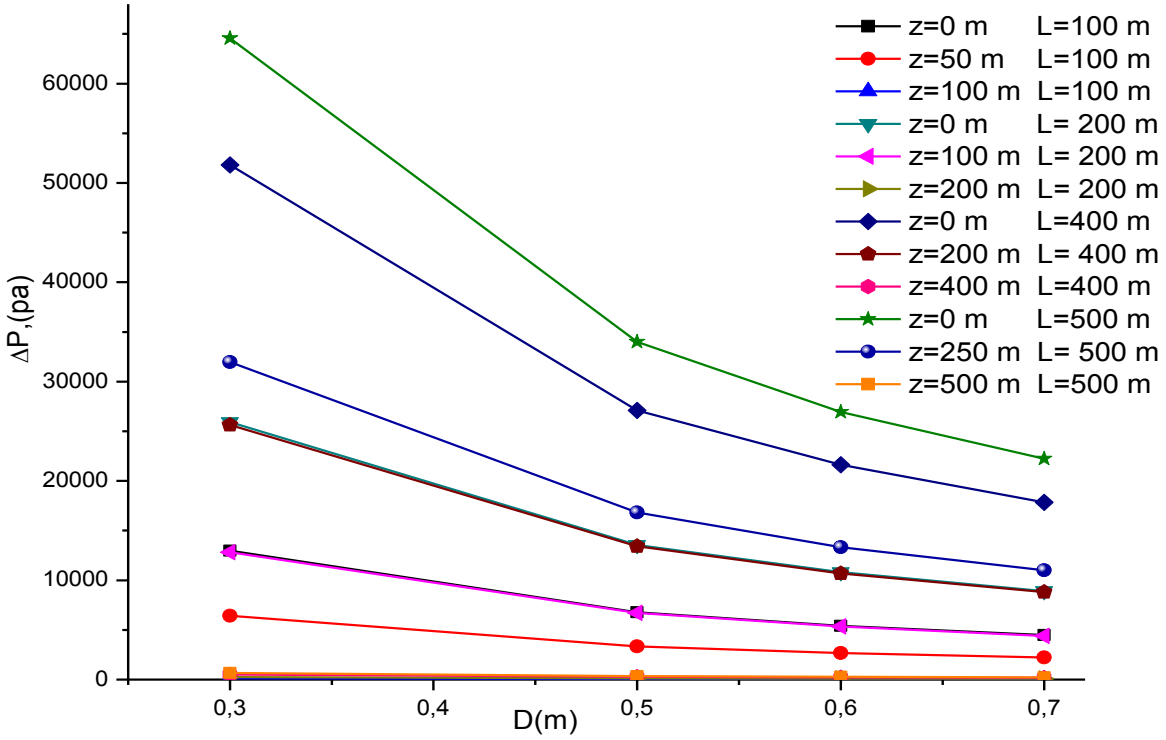


Figure V.17: perte de charges en fonction de diamètre à différentes longueur pour v=1.94 m/s

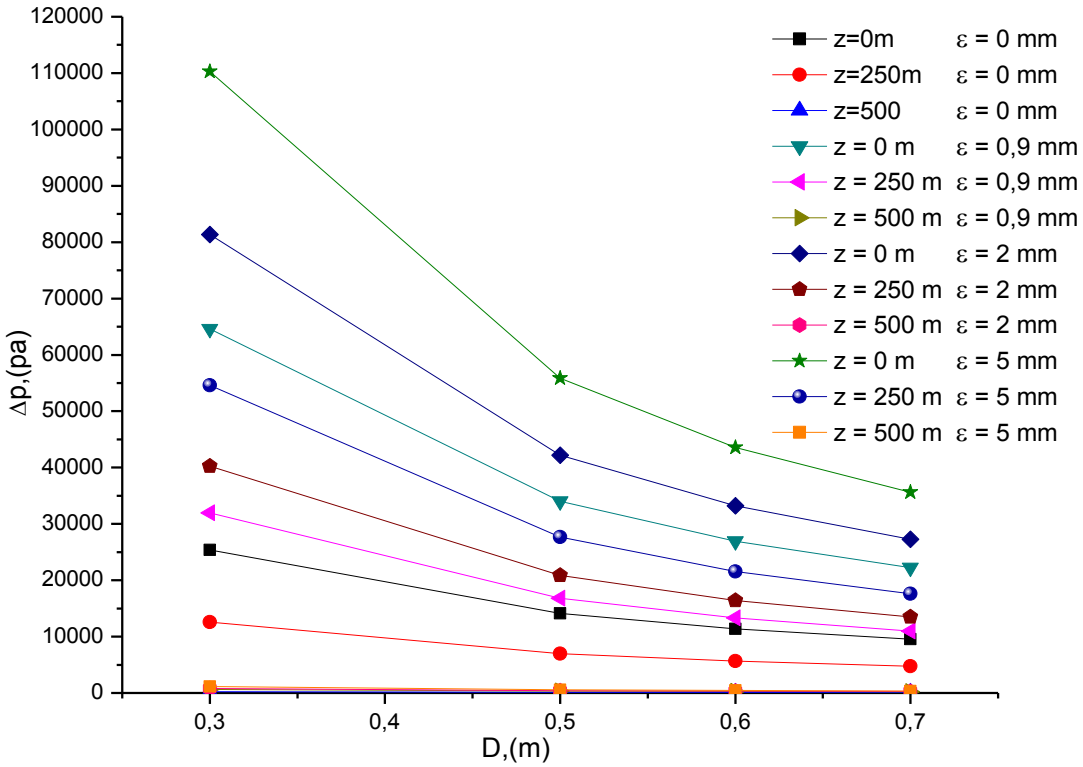


Figure V.18 : perte de charges en fonction de diamètre à différentes rugosité pour v=1.94 m/s

La figure V.19 représente les profils des pertes de charges en fonction de la longueur des conduites à différentes coefficient de rugosité (ε) avec un diamètre de 0.7m. On remarque une diminution de pertes de charges fonction des coefficients de rugosité et dans le domaine de transport on cherche toujours des pertes de charges faible donc il est préférable d'utiliser des conduite lisse ou des conduite avec un coefficient de rugosité faible afin de diminuer le cout énergétique.

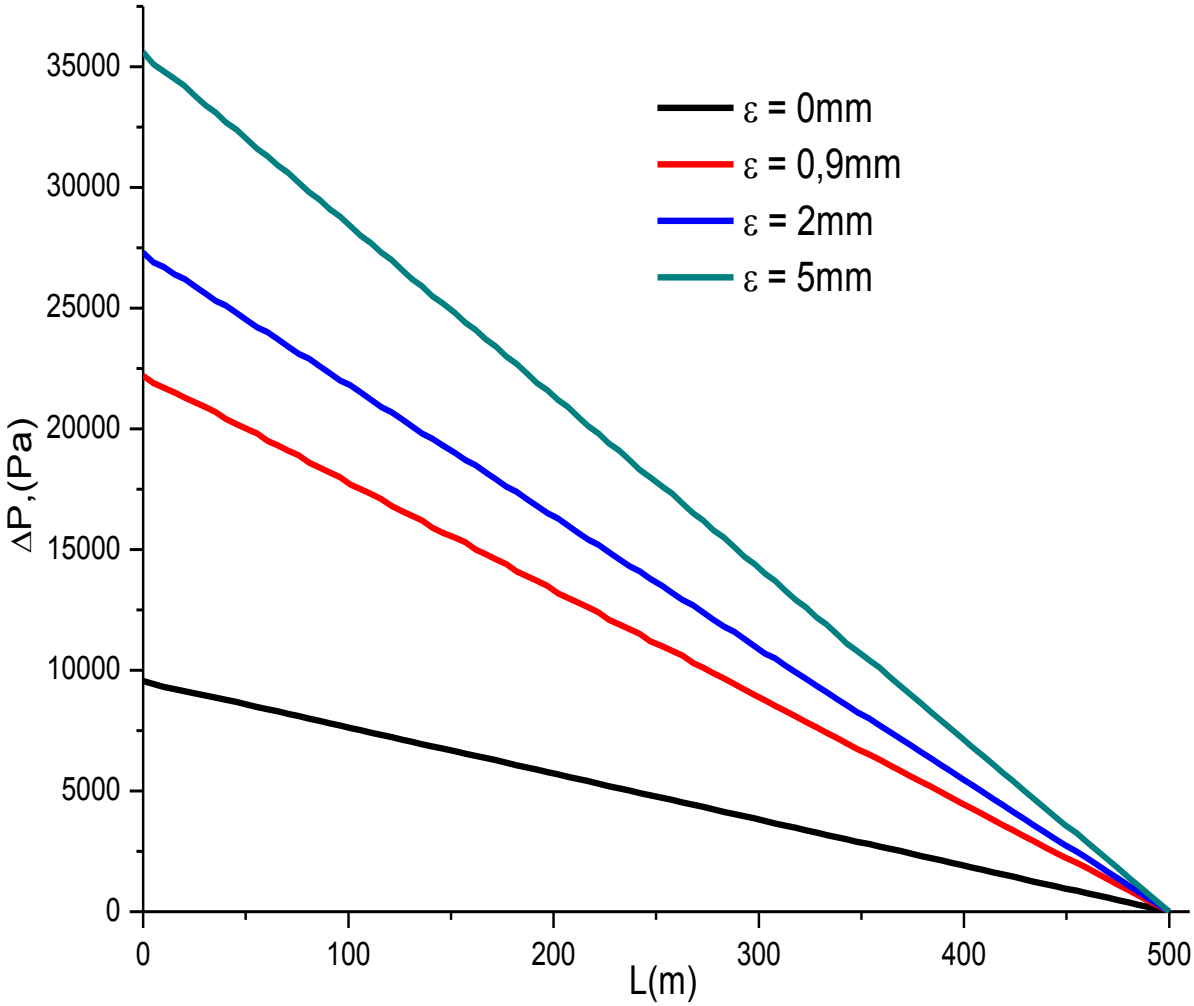


Figure V.19 : perte de charge en fonction de longueur pour la vitesse 1.94 m/s

La figure V.20 représente les profils de vitesse en fonction de la longueur des conduites à différentes coefficient de rugosité. D'après le graphe la stabilisation de vitesse change en fonction des coefficients de rugosité ou ce dernier a un effet remarquable sur la vitesse finale, une valeur élevée du coefficient de rugosité implique une vitesse enlevée est l'inverse est juste, cette résultat est bénéfique lorsque on veut l'augmentation de vitesse, mais on contre implique une augmentation des pertes de charges ce qui est mauvais pour le transport des hydrocarbures puisque ça nécessite augmentation énergétique (pompe) et par conséquent une augmentation des prix de transport.

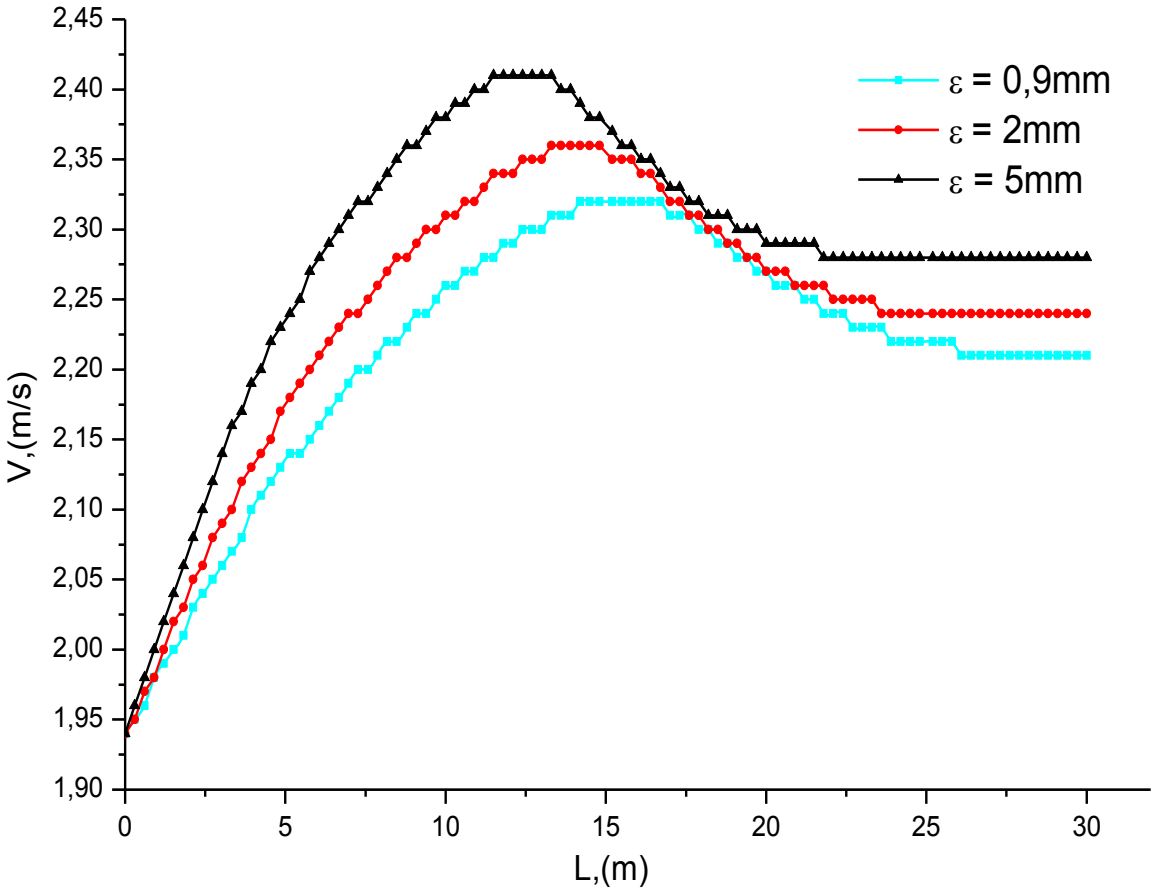


Figure V.20 : Profils de vitesse en fonction de longueur pour différent rugosité et v =1.94 m/s et D = 0.7m

La figure V.21 représente les variations des profils de perte de charge en fonction de la vitesse d'entrée pour déférents diamètres. On remarque que la perte de charge augmente avec l'augmentation de la vitesse d'entrée. Et suivent un profile parabolique contrairement à la loi de poiseuille qui est appliquer uniquement pour les régimes laminaires a et qui donne un profile linéaire, d'après la figure V.21 on constate que les quatre profils ont la même forme et lorsqu'on on augmentant les diamètres les pertes de charges démunie pour cette étude les meilleurs résultats est trouver pour un diamètre de 0.7 m.

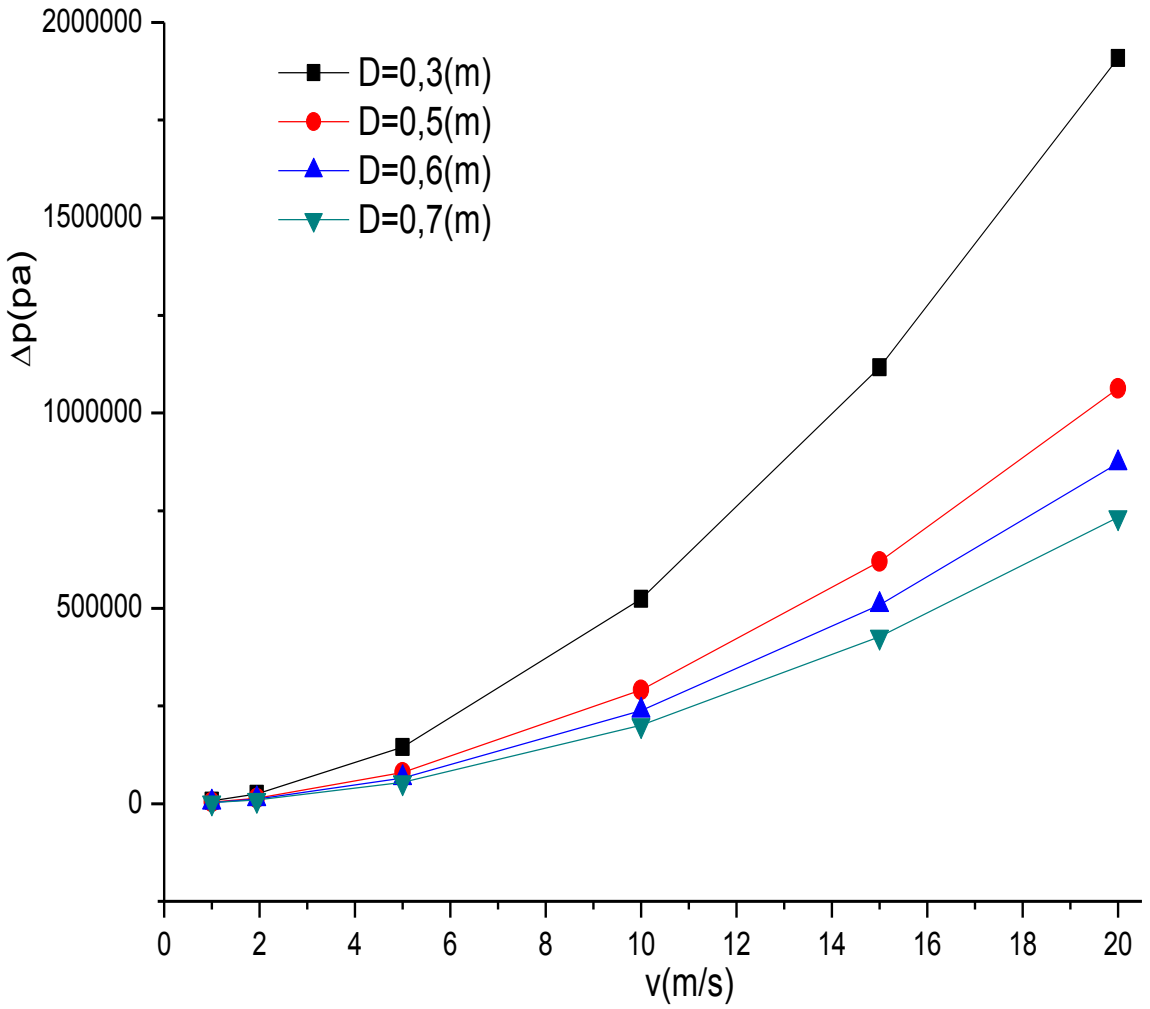


Figure V.21 : la variation des pertes charges en fonction des vitesses pour différent diamètre et L = 500 m

La figure V.22 représente les variations des profils de perte de charge en fonction de la vitesse d'entrée pour déférents longueur. On remarque que la perte de charge augmente avec l'augmentation de la vitesse d'entrée. Et suivent un profile parabolique, d'après la figure 22 on constate que les quatre profils ont la même forme et lorsqu'on on augmentant les longueurs les pertes de charges augmente.

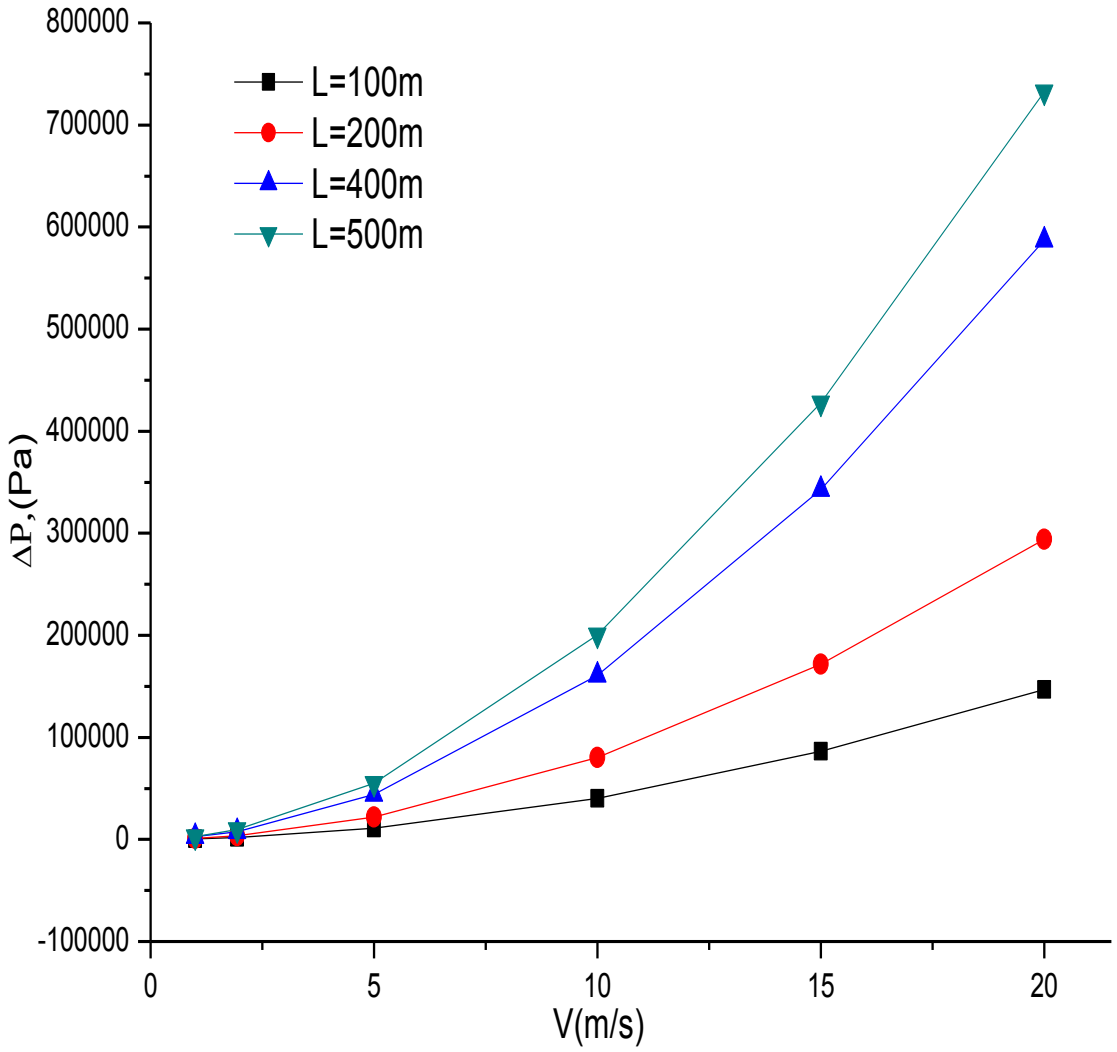


Figure V.22 : la variation des pertes charges en fonction des vitesses pour différent longueur et D = 0.7 m

La figure V.23 représentent l'évolution des profils de perte de charge en fonction du coefficient de rugosité on note que plus la valeur de la rugosité augmente plus la perte de charge augmente, et on remarque aussi que le coefficient de rugosité a un effet remarquable sur les profils des pertes de charges , qui se divise on deux partie pour ε inferieur et supérieur à 2, pour des valeurs < 2 on note une légère augmentation des pertes de charges et au de la de cette valeur 2 on aura une augmentation exponentiel, donc il est préférable d'utiliser des conduites avec un coefficient de rugosité ≤ 2.

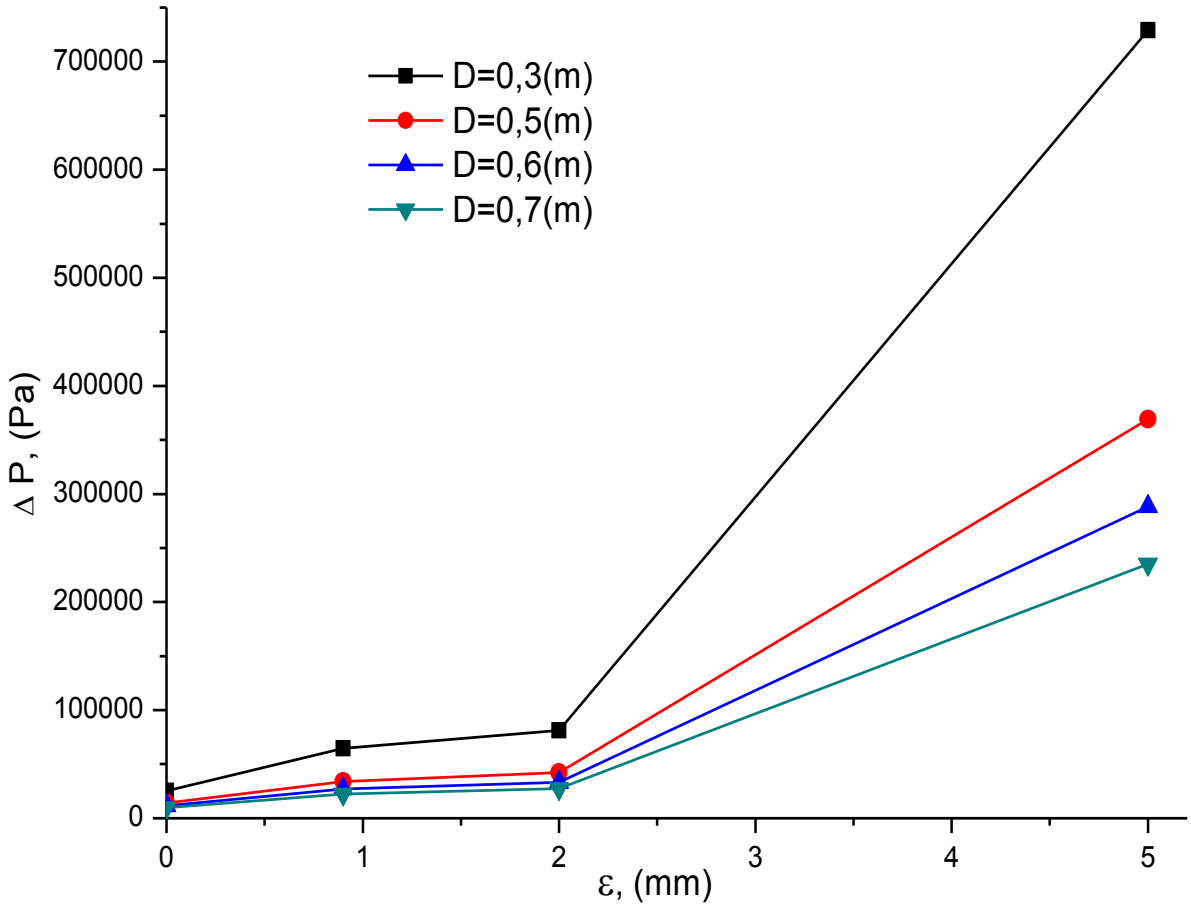


Figure V.23 : la variation des pertes charges en fonction de rugosité pour v = 1.94 m/s et L = 500 m

Les variations des profils des vitesses en fonction de la longueur de la conduite sont représentées sur la figure V.24 et ce pour différents diamètres, une vitesse de 1.94 m/s et à une longueur de 400 m. Les résultats obtenus ont montré que toutes les allures présentent un maximum suivies d'une phase de stabilisation tout au long de la conduite.

La meilleure stabilisation de vitesse a été observée pour un diamètre de 0.3m correspondant au diamètre le plus faible et à une perte de charge la plus élevée.

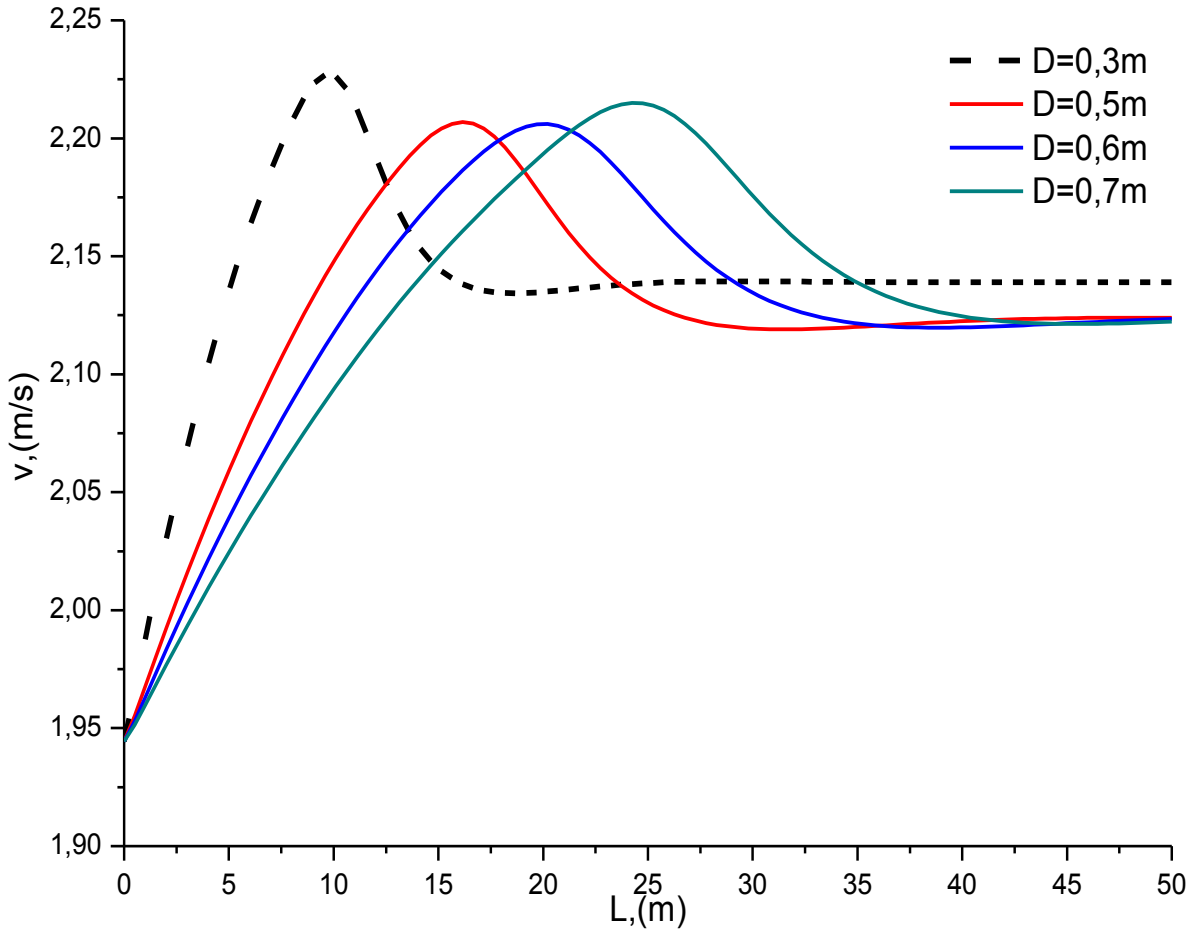


Figure V.24 : la variation de la vitesse en fonction de louangeur pour v = 1.94 m/s et L = 400 m

La figure IV.25 représente les variations des profils des vitesses en fonction de longueur pour différent diamètre et vitesse de 1.94 m/s. on remarque que la vitesse est stabilité avec le même point pour différent longueur donc la longueur de conduite ne a pas effet à la vitesse

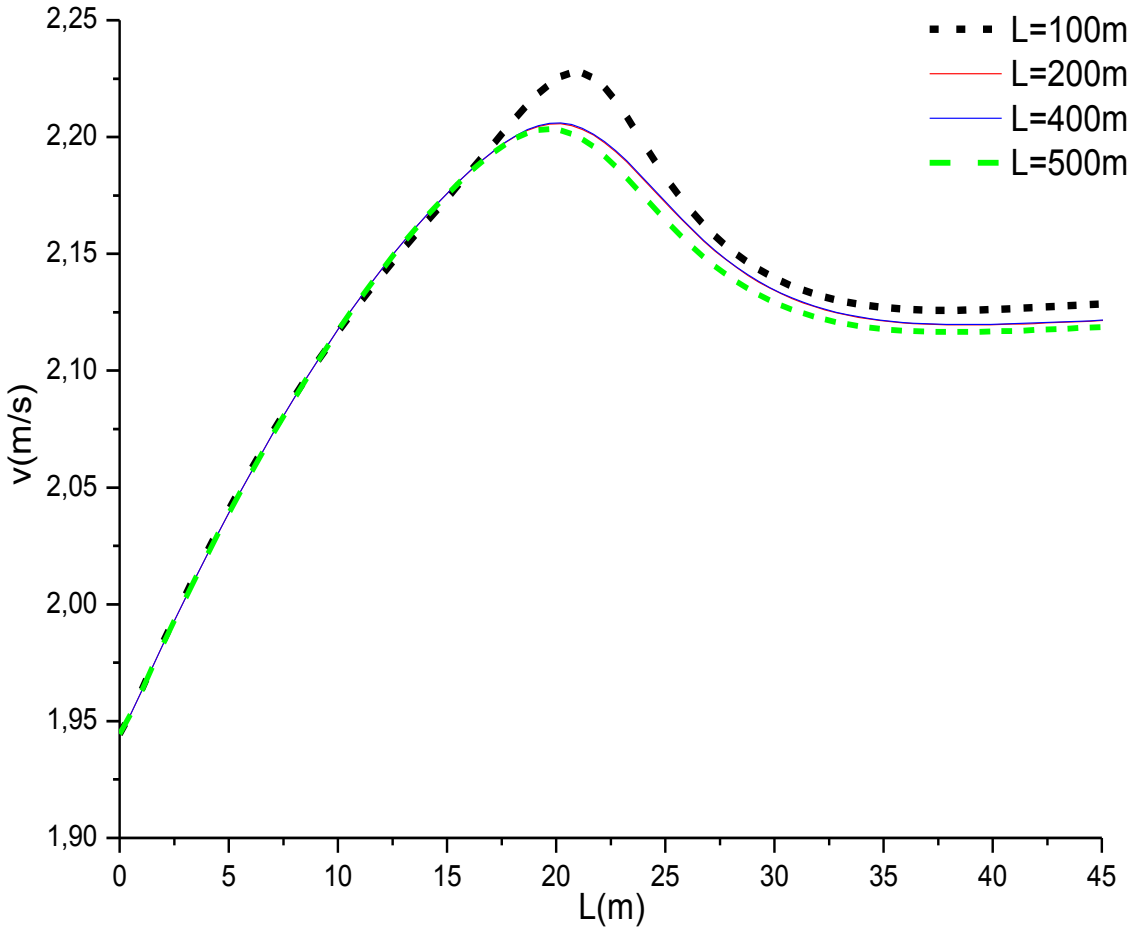


Figure V.25 : la variation de la vitesse en fonction de louangeur pour v = 1.94 (m/s) et D = 0.6 m

CONCLUSION GÉNERALE

CONCLUSION GENERALE

L’objectif de ce travail est d'étudier l'écoulement du pétrole brut dans les pipelines qui est nécessaire pour assurer une meilleure optimisation du réseau du transport, en choisissant la technique la plus convenable pour résoudre les différents problèmes survenus au long de la canalisation tel que les problèmes de perte de charge. Les simulations sont effectuées en utilisant le logiciel ANSYS CFX. Il se déroule d'une simulation numérique avec de pétrole brute comme fluide. Les turbulences étaient modélisées avec la modèle K-Epsilon. On a simulé différentes géométries afin d'étudier l'influence de la perte de charge en fonction de la vitesse à l'entrée, la rugosité, les diamètres.

- Les pertes de charge augmentent avec l’augmentation de la vitesse d’entrée.
- La conduite qui a un petit diamètre donne des pertes de charges très élevées.
- il est préférable d’utiliser des conduites lisses ou des conduites avec un coefficient de rugosité faible afin de diminuer le cout énergétique.

Il faut souligner que ce modeste travail est loin d’être achevé. Les perspectives de recherche qui se dégagent de cette étude sont résumées dans ce qui suit :

1. etudier l’effet desecendant ou ascendant de l’ecoulement.
2. etudier l’effet thermique sur les parametres etudier.

Références Bibliographiques

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références Bibliographiques.

[1] Johnny Gasperi, introduction et transfert des hydrocarbures a différentes échelles spatiales dans le réseau d'assainissement parisien, thèse de doctorat présenté pour école nationale des ponts et chaussées, Spécialité : Sciences et Techniques de l'Environnement, p 264, 4/12/2006.

[2] Rahal Sofiane Titre, thèse de doctorat en science génie des procédés université de Médéa P120, 20

[3] wauquier, J.P, Le raffinage du pétrole, Produit Pétroliers, schémas de fabrication, Paris : Edition Technicq, Publication de l'institut français de pétrole, Tome 1, 1994.

[4] Pierre Wuithier, Raffinage et Génie Chimique, Tome II, 2eme édition 1972- Paris.

[5] Cours de Raffinage I : Faculté des Hydrocarbures et de la Chimie (FHC), Université Boumerdes, 2003-2004, Groupes : IGCR99 et IGCP99.

[6] Abed Sawsen, Aggoun. Sara, Etude de valorisation des bruts provenant des champs pétroliers Algériens, mémoire de master faculté des sciences, Domain : Chimie et environnement, université de boumerdes, p 69, 2017.

[7] Cécil Adam, L'inspection des pipelines par racleurs instrumentés – Société du Pipeline Méditerranée-Rhône.

[8] Hulkak. High strength large diameter pipe plate from standard production to X80/X100. Niobuim information 13/1997, CBMM/NPC, Düsseldorf (Germany). 1997.

[9] http:// magazineconsta.com/2016/09/24/historique-des pipelines.

[10] Guellal Z'hor, Gaci Yacine, Optimisation du transport de gaz naturel Par Le Gazoduc GZ1 Hassi R'mel-Arzew TRC-SONATRACH, Option : Recherche Opérationnelle et Mathématique de gestion (ROMAG), Université de Boumerdes, p 97, 2016.

[11] Abdellaoui. W, Berrichi. A, optimisation du transport des carburants dans le pipeline multi produit ASR/ NAFTAL par l'approche MILP, mémoire de master, Option : Ingénierie de Production, Université de Tlemcen, p 75, 2016.

[12] Mechernene .A, étude du comportement en fatigue des aciers pour pipelines, mémoire de master, option: ingénierie des systèmes mécanique productiques, université de Tlemcen, p 89, octobre 2013

[13] hebal .m, touahri .a, al charabi, A, Calculs des pertes de charges dans les conduites de transport des gaz : élaboration d'un logiciel, Mémoire de Master, Option : Energétique. Université d'El-Oued, page 60, 2019.

[14] Manuel, pour le transport et la distribution du gaz, Matériaux utilisés pour les Canalisations de transport et de distribution, Association technique de l'industrie du gaz de France, 1985.

[15] Nekkaa Bahria, Réparation d'un gazoduc corrodé par un système composite stratifié, thèse doctorat, Option : Construction, université d'Oran, p 158, 2019.

[16] Belkhamgani Mohamed Amine Bendehnoun Khalil, Evaluation de la réparation Par composite d'une pipe soumise à un chargement de pression, Mémoire de master en Génie Mécanique, option : Energétique, Universitaire d'Ain-Temouchent, p53, 2018

[17] Carvil.J. l, Mechanical Engineer's Data Handbook, Butterworth-Heineman, 2003.

[18] Shashi Menon. E, "Gas Pipeline Hydraulics", Taylor & Francis Group, (005).

[19] Benchadli Ismaïl, Détermination des différents critères de qualité des joints soudés sur les pipelines en service, Mémoire de master, Spécialité : Maintenance Industrielle, Université Tlemcen, p 79, 2017

[20] Dr AKE, cours de stockage, distribution et transport des hydrocarbures (STDH). Disponible à l'adresse : http://fr.slideshare.net> leroiani>cours-de-stockage-distribution-et-transport-des-hydrocarbures, p 42, 2017.

[21] Aggoun Fateh ; Évaluation de l'endommagement des tubes dans leurs conditions d'exploitation ; Thèse de Magister en Génie Mécanique, option : Mécanique Appliquée en Engineering, université de Constantine, p 93, 2010.

[22] Sonatrach, le code de réseau du transport par canalisation, direction générale Hydra-Alger.

[23] Berrekia Habib, Modélisation et Comportement d'Endommagement des Tubes d'Aciers Utilisés pour l'Exploitation Pétrolier, thèse de doctorat, productique, Université de Oran, p 124, 07-oct-2019.

[24] https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/navires-petroliers

[25] Ferhat Mohammed Fouad, cours de stockage et transport des hydrocarbures, Département Génie de procèdes et pétrochimie, Université El-oued, 17/10/2019.

[26] Anick Leclerc, le transport maritime du pétrole brut, Mémoire présenté en vue de l'obtention du grade de maitresses sciences, Sciences de gestion, Université de Montréal, p89, 2002.

[27]. Émilien Pelletier, Risques et avantages du transport pétrolier par voie maritime, ISMER/UQAR, canada, 28/08/2014.

[28] Megan Longo, le transport maritime de produits pétroliers, mémoire de master, en sciences politiques, Droit Maritime et des Transports (C.D.M.T.), université de Aix Marseille 3, p 178, 2011.

[29] Pierre E. Edorh, La qualité du transport pétrolier maritime et l'interventionnisme, géo économique, p113-142, avr. 2008 n° 47

[30] Michel Marchand Ifremer, Centre de Nantes, Département « Bio géochimie et Eco toxicologie » Rue de l'Ile d'Yeu, 44311 – Nantes Cedex

[31] Yachba. Khadîdja, vers une contribution dans le transport maritime de marchandises : optimisation de placement des conteneurs dans un port maritime, thèse de doctorat, spécialité informatique, université d'Oran, p 135, 2017.

[32] Belghit. M.Y. Cours Stockage et transport des produits pétroliers, Pétrochimie Raffinage, Université El-oued, 2020

[33] Atsi Nadjet, Aoucheni Sylia, Fonctionnement des activités de réception et de traitement des commandes chez un prestataire de transport Cas de Bejaïa Logistique, mémoire de master en sciences commerciales, Option : Logistique et distribution, Université de Bejaia, p 68, 2018

[34] Batout Soumia, Chibani Khadîdja, Simulation numérique des champs de vitesse dans les effluents des réseaux d'assainissement, Mémoire de Master, en Hydraulique, option : hydraulique urbaine, Université Oum el Bouaghi, p 92, 2018

[35] Toualbia S, Kadri A, Zorki A, Étude numérique des écoulements de pétrole brut dans les pipelines (technique de transport), mémoire de master, Département de Production des Hydrocarbures, Université Ouargla, p 58, 2020.

[36] Saidi Hossem, Simulation numérique d'écoulements bi et tridimensionnels stationnaires de fluide non newtonien en relation avec le procédé d'extrusion, Mémoire de Master, génie mécanique, option : énergétique, Université de M'silla, p 64, 2016.

[37] Wertel J, Modélisation Tridimensionnelle Des Ecoulements Turbulents En Conduite D'assainissement A Surface Libre, Thèse de doctorat, Sciences de l'Information et de l'Ingénieur, École Doctorale Mathématiques, Université de Strasbourg. 2009,

[38] Launder, B., Spalding, D., The numerical computation of turbulent flow, 1974.

[39] Abbad Habiba, Allouche Hafidha, Mesure et modélisation de la pollution par les NO2 émises par une source mobile dans une rue canyon, mémoire de master, option : génie de procédés de l'environnement Université de Médéa, p 70, 2018.

[40] Moumen Fatima, étude des effets turbulents de l'écoulement sanguin dans la crosse aortique théorie et simulation mémoire de magister en science, physique, Université d'Oran, p 90, 30juin 2010