



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم والعلم والبحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

جامعة وهران 2 محمد بن أحمد  
Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed  
معهد الصيانة و الأمن الصناعي  
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

Département de Maintenance en Électromécanique

## MÉMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master

**Filière :**Électromécanique

**Spécialité :**Électromécanique Industrielle

### Thème

*L'effet des particules polluantes sur l'érosion des tuyaux*

Présenté et soutenu publiquement par :

**Nom :** Merzak

**Prénom :** Djelloul Youssef Zakaria

**Nom :** Mesbah

**Prénom :** Anouar Abderrahim

Devant le jury composé de :

Nom et prénom	Grade	Établissement	
LALAOUI MOHAMED El Amine	MAA	IMSI	<b>Président</b>
ADJELOUA Abdelaziz	MAA	IMSI	<b>Encadrant</b>
DERRAR Omar	MCB	USTO	<b>Co-encadrant</b>
BOUHAFS Mohamed	MCB	IMSI	<b>Examineur</b>

Juillet 2021





الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم والعلم والبحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

جامعة وهران 2 محمد بن أحمد  
Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed  
-----  
معهد الصيانة و الأمن الصناعي  
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

Département de Maintenance en Electromécanique

## MÉMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master

**Filière :**Electromécanique

**Spécialité :**Electromécanique Industrielle

### Thème

*L'effet des particules polluantes sur l'érosion des tuyaux*

Présenté et soutenu publiquement par :

**Nom** Merzak      **Prénom** Djelloul Youssef Zakaria

**Nom** Mesbah      **Prénom** Anouar Abderrahim

Devant le jury composé de :

Nom et prénom	Grade	Etablissement	
LALAOUI MOHAMED El Amine	MAA	IMSI	<b>Président</b>
ADJELOUA Abdelaziz	MAA	IMSI	<b>Encadreur</b>
Derrar Omar	MCB	USTO	<b>Co-encadrant</b>
BOUHAFS Mohamed	MCB	IMSI	<b>Examineur</b>

Juillet 2021

## Résumé

Pour cette partie du système de production et de traitement, des exigences plus strictes sont mises en avant. Afin d'étudier l'érosion des pipelines transportant les fluides (tels que l'eau, le pétrole et le gaz naturel...),

Le modèle d'éléments finis *COMSOL Multiphysics* (un logiciel de simulation numérique avancé à grande échelle) a été utilisé. Sous la condition de différents paramètres d'écoulement, la trajectoire d'érosion des solides dans le pipeline et la vitesse de l'érosion ont été étudiées ainsi que la distribution de pression dans le coude du pipe.

Dans ce mémoire, le taux d'érosion du coude de 90° est étudié.

**Mots clés :** simulation numérique, coude de tuyau

## **Abstract**

For this part of the production and processing system, more strict requirements are put forward. To study the erosion of pipelines carrying fluids (such as water, oil and natural gas), *COMSOL Multiphysics* finite element model, an advanced large-scale numerical simulation software, was used. Under the condition of different flow parameters, the erosion path of solids in the pipeline and the erosion rate were studied as well as the pressure distribution in the pipe bend.

In this thesis, the erosion rate of the 90° bend is studied.

**Key words:** numerical simulation, pipe bend

## **Remerciements**

Avant tout nous tenons à remercier Dieu, le tout puissant, de nous avoir donné le courage, la volonté et l'énergie pour réaliser ce travail.

Nous tenons à remercier Mr. Adjloua, directeur de ce mémoire, pour avoir accepté de diriger ce projet, pour son accueil et son écoute tout au long de ce travail, pour le temps qu'il nous a consacré afin de nous conseiller dans le choix du sujet de mémoire.

Un grand merci à Mr. Derrar pour ses recommandations et ses explications précieuses et pour avoir répondu présent à tous moments pour nous, ainsi que son expérience personnelle.

Nous tenons également à remercier tous les membres du jury qui ont eu l'amabilité d'accepter d'évaluer ce travail. Qu'ils trouvent ici l'expression de notre reconnaissance.

On ne terminera pas sans avoir exprimé des remerciements envers nos familles et amis qui nous ont soutenus tout au long de cet intense périple.

Toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.

## Dédicace

Je dédie ce modeste travail à Ma chère mère, qui est et qui restera toujours mon école exemplaire, qui par sacrifice m'a mis au monde, qui par sacrifice a fait de moi ce que je suis. Celle qui m'a donné le sens de vie, celle qui a toujours été là pour moi, et qui n'a pas cessé de prier pour moi et de m'encourager. Je la remercie pour tous ses efforts, ses souffrances et son sacrifice irréfutable. Que Dieu la garde.

A mon père, qui m'a toujours soutenu et aidé à affronter les difficultés, qui a veillé, tout au long de ma vie, à ce que je n'eusse besoin de rien, qui m'a encouragé à continuer mes études avec tout le soutien nécessaire et inconditionnel, je reste certain que sans lui, je ne serai jamais arrivé à ce point. J'espère que sa fierté ne sera pas que celle de ce titre obtenu, mais surtout d'avoir fait de moi ce que je suis. Que Dieu le protège.

A toute ma famille.

Mes Grands frères Amar Salah et Yacine

Mes chères sœurs Fouzia et Warda.

A mes nièces Malika Chiraz et Louiza.

A mon cher neveu Melik.

A mes beaux-frères Miguel et Fabien.

A ma cousine Madiha.

A mon camarade Anouar et toute sa famille.

A tous mes chers amis : Mehdi, Hasni, Akram, Yacine, Hakim, Kacimo, Youcef, Nadir, Abdelmohssine, Bachir Djamel, Abdelhadi, Amine Aymen Hicham, Imen et Adel,

A tous mes camarades de la promotion sortante 2021 électromécanique Industrielle.

A tous ceux qui me sont chers.

## Dédicace

A mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études,

A ma chère mère pour ton amour pour moi, pour les sacrifices que tu consens pour nous rendre heureux. Tu as enduré beaucoup de peines pour notre bien-être et notre réussite. Que Dieu te garde longtemps afin que tu puisses goûter aux fruits des graines que tu as plantés.

A mon père pour m'avoir montré le chemin de l'effort et de la vérité. Que Dieu t'accorde une longue vie et une santé en fer avant que tu sois récompensé pour tous les sacrifices que tu as toujours consentis pour nous.

A mes chères sœurs pour leurs encouragements permanents, et leur soutien moral.

A Ismahene pour ton aide, saches que tu es loin de mes yeux mais près de mon cœur.

A Nour El Houda, pour ta présence quotidienne réconfortante à mes côtés.

A ma grand-mère et grand père pour toutes les belles journées de vacances que je passais chez eux quand j'étais petit. Merci de m'avoir transmis les valeurs primordiales et nécessaires qui me font évoluer dans le bon sens.

A toute ma grande famille maternelle et paternelle pour leur adossement.

A mon brave ami tout au long de mon parcours universitaire Zakaria et à toute sa famille.

A H.Krim pour son précieux soutien durant cette dernière année.

A tous mes chers amis Hasni, Abdelhadi, Hicham, Adel, Bachir, Nadir et Abdelmohssine. Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit de votre soutien infallible.

Merci d'être toujours là pour moi.

## Table des matières :

Remerciements .....	i
Dédicace.....	ii
Table des matières : .....	iv
Liste des figures .....	viii
Liste des tableaux .....	x
Nomenclature .....	xi
Introduction générale .....	1
1. Chapitre 01 : Technologie de Transport des Fluides Par Canalisation.....	4
Introduction .....	4
1.1. Historique du transport par canalisations .....	5
1.2. Composants d'un Système de Transport par Pipeline .....	7
1.2.1. Ligne.....	7
1.2.1.1. Composant de la Ligne .....	7
1.3. Types et Nature des Fluides Transportés .....	9
1.3.1. Gaz Naturel.....	9
1.3.2. Pétrole.....	9
1.3.3. L'eau.....	10
1.3.4. L'oxygène .....	10
1.3.5. L'hydrogène.....	10
1.4. Types et Nature des Matériaux Utilisés .....	11
1.4.1. Pipeline en Acier .....	11
1.4.2. Pipeline en Fonte.....	11
1.4.3. Pipeline en plastique.....	12
1.4.4. Pipeline en béton.....	12
1.5. Réglementation .....	13
1.5.1. Les régimes juridiques de transport .....	13

1.5.2. Règlementation de sécurité pour le transporteur .....	13
1.5.3. Règlementation sur les travaux de tiers.....	13
1.6. Mécanique des fluides appliquée au pipeline : .....	14
1.6.1. Régimes d'écoulement .....	14
1.6.1.1. Écoulement laminaire .....	14
1.6.1.2. Écoulement turbulent.....	15
1.6.2. Nombre de Reynolds .....	15
Conclusion 1 : .....	21
2. Chapitre 02 : Dégradation des Matériaux et des Structures.....	22
Introduction .....	22
2.1. Structures tuyauteries / pipeline .....	23
2.1.1. Structures de la tuyauterie .....	23
2.1.1.1. Définition .....	23
2.1.1.2. Types de structures tuyauterie : .....	23
2.1.1.3. Rôle.....	24
2.1.2. Structures pipelines .....	24
2.1.2.1. Définition .....	24
2.1.2.2. Types .....	25
2.1.2.3. Rôle.....	27
2.2. Différents types de dégradations .....	27
2.2.1. Fatigue .....	27
2.2.1.1. Raisons qui mènent à la fatigue .....	27
2.2.1.2. Traitement et solution.....	28
2.2.2. Fluage .....	28
2.2.2.1. Raisons qui mènent au fluage .....	28
2.2.2.2. Traitement et solution.....	29
2.2.3. Corrosion .....	29

2.2.3.1. Raisons qui mènent à la corrosion.....	30
2.2.3.2. Traitement et solution.....	30
2.2.4. Érosion.....	31
2.2.4.1. Raisons qui mènent à l'érosion.....	31
2.2.4.2. Traitement et solution.....	32
Conclusion 02.....	33
3. Chapitre 03 : Problématique et Modèle Analytique.....	34
Introduction.....	34
3.1. Problématiques liées à l'érosion.....	35
3.2. Mécanismes de l'érosion par des particules solides.....	36
3.2.1. Coupe (abrasion).....	36
3.2.2. Fatigue de surface :.....	37
3.2.2.1. Déformation plastique.....	38
3.2.3. Rupture fragile.....	38
3.2.4. Fusion :.....	38
3.3. Paramètres du processus d'érosion des surfaces du matériau.....	39
3.3.1. Modèle d'érosion.....	40
3.4. Les Différents Modèles Analytiques d'Érosion.....	41
3.4.1. Modèle de Finnie.....	41
3.4.2. Modèle DNV.....	42
3.4.3. Modèle E/CRC.....	42
3.4.4. Modèle Oka.....	43
3.5. Comparaison entre le modèle Oka et E/CRC.....	44
3.6. Modèle réel :.....	46
Conclusion 03.....	47
4. Chapitre 04 : Modèle de Calcul / Modélisation.....	49
Introduction.....	49

4.1. Méthodologie.....	50
4.1.1. Choix du Modèle.....	50
4.1.2. Utilisation de <i>COMSOL Multiphysics</i> .....	52
4.1.3. Simulations .....	52
4.1.3.1. Préparation du Model .....	52
4.1.3.2. Démarche de la Modélisation .....	53
4.1.3.3. Description du Maillage .....	54
4.1.3.4. Conditions aux Limites.....	55
Conclusion 04.....	57
5. Chapitre 05 Résultats et Interprétations .....	59
Introduction.....	59
5.1. Objectif.....	60
5.2. Analyse des Résultats de la Simulation .....	60
5.2.1. Évaluation de la vitesse du fluide et des particules solidesRésultats .....	60
5.2.2. Évaluation de la distribution de pression dans le coude du pipe .....	61
5.2.3. Trajectoires des particules .....	62
5.2.4. Taux d'usure érosive des parois des canalisations .....	62
Conclusion 05 :.....	65
Conclusion Générale .....	66
Perspective .....	67
Bibliographie.....	68
ANNEXE .....	71

## Liste des figures

Figure 1- 2 Vanne à soupape.....	8
Figure 1- 1 Vanne papillon .....	8
Figure 1- 3 Vanne d'équilibrage .....	8
Figure 1- 4 Les raccords les plus utilisés dans un pipeline.....	8
Figure 1- 5 : Transport par oléoducs .....	9
Figure 1- 6 : Pipeline en acier .....	11
Figure 1- 7 : Pipeline en fonte.....	11
Figure 1- 8 : Pipeline en plastique.....	12
Figure 1- 9 : Pipeline en béton.....	12
Figure 1- 10 : Ligne de courant d'un écoulement laminaire ( <i>Benhammouda, 2008</i> ) .....	15
Figure 1- 11 : Ligne de courant d'un écoulement turbulent ( <i>Benhammouda, 2008</i> ).....	15
Figure 1- 12 : Diagramme de Moody pour le facteur de friction ( <i>Menon, 2015</i> ).....	19
Figure 1- 13 : Perte de pression en fonction de la vitesse .....	20
Figure 2- 1 : Types de pipeline ( <i>Thangavel.S, 2020</i> ) .....	25
Figure 2- 2 : Rupture de tuyaux due à la fissuration par fatigue.....	27
Figure 2- 3 : La corrosion du pipeline. ....	30
Figure 2- 4 : Un coude de tuyau défaillant dans une installation ( <i>Kusmono.k, 2017</i> ) .....	31
Figure 3- 1 : Attaque d'un coude 90° dans une ligne de transport par des particules érosives	35
Figure 3- 2 : Fissures générées par impact de particules .....	35
Figure 3- 3 : Les principaux mécanismes de l'érosion.....	36
Figure 3- 4 : L'abrasion à des angles d'impact faible .....	37
Figure 3- 5 : La fatigue de la surface lors d'un impact à faible vitesse et à angle d'impact élevé.....	37
Figure 3- 7 : Erosion par rupture fragile ( <i>Batchelor, 1993</i> ).....	38
Figure 3- 6 : Impact à vitesse moyenne et à grand angle ( <i>Batchelor, 1993</i> ) .....	38
Figure 3- 8 : Fusion de la surface à haute vitesses et angle d'impact élevée ( <i>Batchelor, 1993</i> ) .....	38
Figure 3- 9 : Catégories Types d'Erosion.....	39
Figure 3- 10 : Variation du taux d'érosion maximal en fonction de la vitesse pour un mélange gaz-sable sur le coude entier ( <i>Abdulla, 2011</i> ).....	45

Figure 3- 11 : Variation du taux d'érosion maximum en fonction de la vitesse pour le mélange gaz-sable sur le coude entier. ( <i>Abdulla, 2011</i> ).....	45
Figure 3- 12 : Modèle d'impacte dans un coude 90° .....	46
Figure 4- 1 : Modèle de coude .....	50
Figure 4- 2 : Démarches de modélisation .....	54
Figure 4- 3 : maillage générer .....	55
Figure 4- 4 : Modèle pipeline parfaitement symétrique .....	55
Figure 5- 1 : La vitesse du fluide et des particules .....	61
Figure 5- 2 : Distribution de la pression dans le coude du pipe .....	61
Figure 5- 3 : Trajectoire des particules .....	62
Figure 5- 4 : Surface érodée.....	63
Figure 5- 5 : Tendence de changement du taux d'érosion à différentes vitesses d'entrée.....	64
Figure A- 1 : Modules complémentaires de <i>COMSOL Multiphysics</i> .....	72

## Liste des tableaux

Tableau 3 1 :Exposant pour les équations du modèle d'Oka ( <i>Ruben Cuamatzi-Meleández, 2017</i> ).	44
Tableau 3 2 : La CFD a prédit le taux d'érosion maximal pour le mélange gaz-sable en utilisant les modèles d'Oka et al. et E/CRC sur un coude entier de 90 degrés. ( <i>Abdulla, 2011</i> )	44
Tableau 5- 1 : Comparaison des modèles	63
TableauA- 1 : Nature des Fluides	71
Tableau A- 2 : Rugosité des Matériaux Utilisés dans un Pipelines ( <i>Menon, 2015</i> ).	71
Tableau A- 3 : Caractéristiques particule de sable	71

## Nomenclature

$C$	Constante du matériau
$D$	Diamètre de la conduite
$D_h$	Diamètre hydraulique [ $m$ ]
$E_C$	Energie cinétique de la particule,
$f_d$	Coefficient de perte de charge de Darcy (coefficient de frottement)
$F(\alpha)$	Une relation fonctionnelle pour la dépendance de la vitesse d'érosion par rapport à l'angle d'impact
$F_s$	Coefficient de forme des particules, $n$ est l'indice de vitesse
$g$	Accélération de la pesanteur (en $N/kg$ ou $m/s^2$ ) ;
$HB$	Dureté Brinell du matériau
$L$	Longueur de la conduite [ $m$ ]
$Re$	Nombre de Reynolds
$R$ :	Rugosité de la canalisation
$p$	Pression en un point (en $Pa$ ou $N/m^2$ ) ;
$V$ :	Vitesse caractéristique du fluide [ $m/s$ ]
$V_p$	Vitesse de la particule à l'impact,
$\alpha$	Angle d'impact de la particule,
$K$ et $n$	Constantes supposées dépendre des caractéristiques des matériaux érodés
$ER$	Taux d'érosion.
$k_1, k_2, k_3$	Coefficients du modèle d'érosion d'Oka
$K$	Constante du modèle d'érosion moyenne DNV qui dépend des propriétés du matériau
$m$	Exposant d'énergie
$M_p$	Masse de sable qui frappe la surface
$n_1, n_2$	Coefficients du modèle d'érosion d'Oka
$q_1, q_2, S_1$ et $S_2$	sont les constantes du modèle. tab 3.1
$Z$	Altitude du point considéré (en $m$ ).
$\Delta H$	Perte de charge [ $m$ ]
$\Delta P$	Perte de pression [ $Pa$ ]
$\rho$	Masse volumique du fluide [ $kg\ m^{-3}$ ]
$\mu$ :	viscosité dynamique du fluide [ $Pa\cdot s$ ou $kg/m\cdot s$ ]
$\nu$ :	viscosité cinématique du fluide [ $m^2/s$ ]

# Introduction générale

---

## Introduction générale

L'augmentation de la demande d'énergie telle que le gaz et le pétrole nécessite de plus en plus la construction des lignes de pipelines. Le pipeline est un système de canalisations à haute pression qui peut supporter jusqu'à 100 bars, il est utilisé pour le transport à moyenne et grande distance des hydrocarbures liquides et gazeux. Le transport des hydrocarbures par pipeline reste le moyen le plus sécurisant pour acheminer de grandes quantités de pétroles et de gaz sur de longues distances.

La production de sable est un sous-produit inévitable dans l'industrie pétrolière et gazière, car 70% des réserves mondiales de pétrole et de gaz sont constituées de formations sableuses. Le transport des particules causera des dommages aux équipements et aux installations. L'un des dommages causés par une production importante de sable est l'érosion des pipelines. Plusieurs facteurs influent sur la gravité du taux d'érosion. Les paramètres affectant l'érosion sont classés en trois qui sont le fluide porteur, les particules de sable et le matériau cible (William.P, 2016).

L'érosion est un problème industriel important car le coût recouvre l'ensemble des moyens de lutte contre l'érosion, le remplacement des pièces ou ouvrages érodés et les conséquences directes et indirectes des accidents dus à l'érosion.

C'est dans ce contexte qu'apparaît la très grande importance de l'étude de l'érosion des pipelines. Sur le plan économique, elle concerne la réduction des pertes de matériels qui résultent de la détérioration ou de la rupture des tubulures, de réservoirs...etc.

Afin de faire face à cette situation. Plusieurs études ont été réalisées pour le traitement et la protection contre l'érosion.

L'objectif de notre étude, est le calcul de la vitesse de l'écoulement du fluide et la vitesse d'impact des particules ainsi que la vitesse d'érosion d'un corps solide. Pour ce faire, une approche de type élément finis explicite, a été développée pour l'étude de ce phénomène.

Le présent mémoire est un travail structuré en cinq chapitres précédés d'une introduction et suivi d'une conclusion et des recommandations souhaitées ; il se présente comme suit :

Le premier chapitre décrit le transport des fluides par canalisation où nous parlons des différents composants du système, les types des fluides transportés, les matériaux utilisés pour la construction des pipes.

# Introduction générale

---

Le deuxième chapitre contient des rappels théoriques sur la dégradation des matériaux et des structures où nous faisons allusion aux structures tuyauteries autrement dit pipelines, les différents types de dégradation ainsi que les raisons qui mènent au phénomène et les traitements propices.

Le troisième chapitre représente la ligne qui relie la théorie à la simulation. Dans celui-ci, nous parlons en détails du problème d'érosion et ses différents modèles, puis nous définissons le modèle à étudier

Le quatrième chapitre est celui de la modélisation dans lequel nous choisissons le modèle coude 90°. Ce dernier est consacré à la partie expérimentale qui regroupe le site étudié et les mesures des différents paramètres utilisés dans le cadre de ce travail. Dans ce chapitre, nous abordant également le sujet *COMSOL Multiphysics* qui représente le logiciel de simulations numériques utilisé pour réaliser notre simulation.

Dans le cinquième chapitre, il est question des résultats d'une étude de l'effet de l'érosion sur les canalisations coude 90°.

Enfin, nous terminons notre travail par une conclusion générale portant sur ce qui a été élaboré.

## **Chapitre 01**

---

Technologie de Transport des Fluides par Canalisations

**1. Chapitre 01 : Technologie de Transport des Fluides Par Canalisation****Introduction**

Le transport par canalisation est généralement le moyen le plus économique permettant de transporter du pétrole ou du gaz naturel sur de grandes distances. Puisque notre problématique est liée au pipeline, l'élément le plus essentiel du transport par canalisations, Nous allons donc mettre en évidence la technologie, les composants, les types de fluides transportés et le type du pipe dans ce chapitre.

## 1.1. Historique du transport par canalisations

Les premiers pipelines ont transporté l'eau vers les villages et les habitations il y a des siècles. L'histoire des oléoducs et gazoducs tels qu'ils sont utilisés aujourd'hui commence après que ce qui était considéré comme le premier puits de pétrole commercial soit foré en Pennsylvanie en 1859. Le premier oléoduc transfrontalier a été posé en Pennsylvanie en 1879, une ligne de 175[*km*] de long et de 15*cm* de diamètre reliant Bradford à Allentown. En 1886, une conduite de gaz naturel de 140[*km*]de long et de 20[*cm*] de diamètre a été construite de Kane, en Pennsylvanie, à Buffalo, dans l'État de New York.

Au début des années 1900, la construction de pipelines commence à prendre de l'ampleur. En 1906, un pipeline de 760[*km*] marins et de 20[*cm*] de diamètre, allant d'un nouveau champ dans le territoire indien (Oklahoma) à Port Arthur (Texas), défie la technologie de l'époque. Les premiers pipelines étaient construits à l'aide de tuyaux filetés que les ouvriers vissaient ensemble avec de grandes pinces. Ce n'est que vers 1920 que le soudage des différentes longueurs de tuyaux est devenu une pratique de construction acceptée.

Le soudage à l'oxacétylène a été introduit en 1920, mais il a été remplacé à la fin des années 1920 par le soudage électrique. Depuis cette époque, pratiquement tous les oléoducs et gazoducs de diamètre et de longueur significatifs sont soudés.

La technologie du soudage a suivi le rythme des exigences des nouveaux aciers à haute teneur en carbone, de l'augmentation du diamètre des tuyaux et de la longueur des pipelines, ainsi que des défis posés par les environnements off-shore et arctiques.

Les réseaux de pipelines se sont développés dans d'autres régions dans les années 1950. Dès le début du 20e siècle, l'exploitation pétrolière en Russie a joué un rôle majeur sur les marchés mondiaux. Au milieu du siècle, alors que les énormes découvertes en Sibérie étaient exploitées, les pipelines de l'Union soviétique ont été construits sur de grandes distances et dans des environnements hostiles. Dans les années 1960, l'Union soviétique a commencé à construire un système de gazoducs qui, au début des années 1990, comprenait 203 000[*km*] de conduites principales d'un diamètre allant de 101.6 [ *cm*] à 355 [ *cm*]. Le système comptait 367 stations de compression, couvrait plus de 500 champs et comprenait 46 installations de stockage souterrain et six usines de traitement du gaz.

Au début des années 1950, d'importants pipelines ont été construits au Canada, et le pipeline trans-arabe a été construit du golfe Persique à la mer Méditerranée.

Le réseau mondial de pipelines s'est rapidement développé lorsqu'il est devenu évident que les pipelines étaient un moyen efficace et économique d'acheminer le pétrole, le gaz et les produits vers les consommateurs. Ce besoin d'expansion est dû à de nouvelles découvertes importantes de pétrole et de gaz, souvent dans des régions éloignées où la demande locale est faible. Des pipelines étaient nécessaires pour acheminer ces ressources vers les marchés. Dans la mer du Nord, par exemple, un vaste complexe offshore de gisements de pétrole et de gaz s'est développé dans les années 1960, 1970 et 1980. La région a servi de terrain d'essai pour une grande partie de la technologie actuelle de construction de pipelines offshore.

Des découvertes de pétrole et de gaz continuent d'être faites dans des zones reculées et dans des environnements hostiles. Sur le continent et sur les plateaux continentaux du monde entier, la méthode privilégiée pour acheminer ces ressources vers le marché sera le pipeline. Les pétroliers sont nécessaires pour le transport maritime sur de longues distances, mais ils ne sont qu'un maillon de la chaîne de collecte et de distribution. Les pipelines doivent collecter le pétrole et le gaz jusqu'au port de chargement du pétrolier et distribuer la cargaison une fois que le pétrolier a atteint sa destination.

L'industrie devra relever encore plus de défis dans les années 1990 et au-delà. Les coûts de construction et d'exploitation doivent être maintenus à un niveau raisonnable tout en assurant l'approvisionnement en pétrole et en gaz de nouveaux marchés. Ce défi nécessitera l'utilisation de nouvelles technologies. Les environnements politiques et réglementaires ont également été révolutionnés au début des années 90, en particulier aux États-Unis et en Europe. La transition d'une réglementation basée sur les services publics à une commercialisation concurrentielle des services a causé des problèmes aux gazoducs américains à la fin des années 1980. Mais lorsque la transition sera terminée, une approche de marché libre devrait améliorer l'approvisionnement en gaz et maintenir le gaz naturel à un prix abordable pour un nombre croissant de consommateurs. La hausse constante du coût des combustibles, des matériaux et de la main-d'œuvre incitera les constructeurs et les exploitants des futurs gazoducs à améliorer leur efficacité. La hausse des coûts, amplifiée par une activité accrue dans des environnements hostiles, pourrait faire de la réduction des coûts le plus grand défi de l'avenir de l'industrie pipelinière (*Kennedy, 1993*).

## 1.2. Composants d'un Système de Transport par Pipeline

Les pipelines sont composés de tronçons de conduites remplissant des fonctions précises :

### 1.2.1. Ligne

La ligne ou un réseau de canalisations souterraines, sous-marines ou aériennes, constitués de tuyaux. Le tuyau est un produit tubulaire de section transversale circulaire qui a des tailles et une épaisseur spécifiques régi par une norme dimensionnelle particulière.

Les tuyaux peuvent être classés en fonction de la méthode de fabrication ou de leurs applications.

#### 1.2.1.1. Composant de la Ligne

Pour assurer le bon transport du fluide la ligne doit avoir :

- **Les Supports**

Les supports doivent être conçus pour supporter le tuyau sans causer de contraintes locales excessives dans le tuyau et sans imposer de forces de friction axiales ou latérales qui pourraient empêcher la liberté du mouvement désirée.

- **Les contreventements**

Des contreforts et des dispositifs d'amortissement peuvent occasionnellement être nécessaires pour empêcher la vibration de la tuyauterie.

- **Les attaches**

Toutes les fixations de la tuyauterie doivent être conçues de manière à réduire au minimum les contraintes supplémentaires qui s'exercent sur la paroi de la canalisation. Les attaches non intégrales non intégrées, comme les colliers de serrage et les poutres annulaires, sont préférables lorsqu'ils remplissent les fonctions de support ou d'ancrage.

Les fixations externes et internes à la tuyauterie doivent être conçues de manière à ne pas provoquer d'aplatissement de la tuyauterie et de la conduite.

- **Les Vannes**

Les vannes industrielles sont des dispositifs mécaniques qui ouvrent, ferment ou obstruent partiellement les passages pour réguler le débit de liquide ou de gaz dans un système (vanne d'équilibrage, vanne papillon, vanne a soupape .... etc.).



Figure 1- 3 Vanne d'équilibrage



Figure 1- 1 Vanne à soupape



Figure 1- 2 Vanne papillon

- Raccords

Un raccord de tuyau est défini comme une pièce utilisée dans un système de tuyauterie, pour changer la direction de branchement ou pour changer diamètre du tuyau, et qui est mécaniquement joint au système. Il existe de nombreux types de raccords sont divisés en trois groupes :

Raccords à souder bout à bout (BW) dont les dimensions, les tolérances dimensionnelles, etc. sont définies dans la norme ASME B16.9 normes.

Prise Soudure (SW) les raccords de classe 3000, 6000 et 9000 sont définis dans les normes ASME B16.11.

Les raccords filetés (THD) des classes 2000, 3000 et 6000 sont définis dans les normes ASME B16.11.



Figure 1- 4 Les raccords les plus utilisés dans un pipeline

## 1.3. Types et Nature des Fluides Transportés

### 1.3.1. Gaz Naturel

Le gaz naturel est une énergie primaire bien répartie dans le monde, propre et de plus en plus utilisée. Elle dispose de nombreuses qualités abondance relative, souplesse d'utilisation, qualités écologiques, prix compétitifs. La mise en œuvre de cette énergie repose sur la maîtrise technique de l'ensemble de la chaîne gazière, qui va de l'extraction aux utilisateurs, en passant par le stockage, le transport, et la distribution. Il est transporté par les gazoducs qui sont des canalisations qui transportent des gaz sous pression sur de longues distances, sur terre -- à l'air libre, mais le plus souvent, en sous-sol -- ou sous l'eau. Ils transportent principalement du gaz naturel.

### 1.3.2. Pétrole

Le pétrole est un mélange d'hydrocarbures (molécules formées d'atomes de carbone et d'hydrogène) et de molécules contenant également d'autres atomes, principalement du soufre, de l'azote et de l'oxygène. Certains de ses constituants sont, à température et à pression ambiantes, gazeux (méthane, propane, etc.), liquides (hexane, heptane, octane, benzène, etc.) et parfois solides (paraffines, asphaltes, etc.). Le pétrole contient des milliers de molécules différentes qu'il va falloir fractionner et transformer chimiquement pour obtenir des produits utilisables.

Le pétrole satisfait plus de 30 % des besoins énergétiques de la planète. Les produits dérivés du pétrole : PVC, Polyéthylène basse densité, Polyéthylène haute densité Poly tétrafluoroéthylène (PTFE), Polypropylène, Polystyrène et copolymères associés (ABS) ; il est transporté par les oléoducs.

Oléoducs : Conduite servant au transport à distance de certains hydrocarbures liquides (pétrole brut, essence, gas-oil, etc.).



Figure 1- 5 : Transport par oléoducs

### 1.3.3. L'eau

L'eau normale est transportée par l'aqueduc qui a pu désigner toutes canalisations destinées à conduire des eaux, est un ouvrage destiné à l'adduction d'eau pour la consommation d'une ville.

Et l'eau salée est transportée par des saumoducs qui sont des canalisations industrielles amenant la saumure depuis des lieux de production vers des usines de transformation.

### 1.3.4. L'oxygène

L'oxygène est l'élément chimique ayant un numéro atomique égal à 8, et son symbole est O. C'est la tête de file du groupe des calogènes, souvent appelé groupe de l'oxygène. Découvert indépendamment en 1772 par le suédois Carl Wilhelm Scheele à Uppsala ; il est transporté par un oxy-duc.

Un oxy-duc ou oxygéo-duc est une canalisation transportant de l'oxygène sous forme liquide ou gazeuse. Les oxy-ducs sont généralement associés aux azo-ducs, aussi appelés nitrogéo-ducs. Ces deux types de canalisations spécialisées représentent un réseau dont la longueur mondiale totalise environ 8 500 [km].

### 1.3.5. L'hydrogène

Transporté par l'hydrogénoduc : l'hydrogène représente un gros potentiel de diminution de gaz à effet de serre (GES) ainsi qu'une manne économique significative. Les pays européens investissent aujourd'hui de manière conséquente dans ce marché en pleine expansion, à commencer par la France (Tout savoir sur l'Hydrogène).

Un hydrogénoduc est une canalisation industrielle qui achemine de l'hydrogène (plus précisément du dihydrogène), sous forme liquide ou gazeuse. La plupart de l'hydrogène consommé est autoproduit sur les lieux de consommation. Le nombre et la longueur des hydrogénoducs ne sont donc pas très importants.

## 1.4. Types et Nature des Matériaux Utilisés

Les pipelines peuvent être classés suivant leurs matériaux de fabrication :

### 1.4.1. Pipeline en Acier

Les pipelines en acier sont devenus le principal réseau de transport de pétrole et de gaz au cours des 50 dernières années. Rien qu'en Europe, la longueur totale du réseau de transport de gaz est passée d'environ 30000 km à plus de 120000 km entre 1975 et 2004

Les pipes en acier sont fabriqués par la fusion des matières premières au moulage ou au soudage.



Figure 1- 6 : Pipeline en acier

### 1.4.2. Pipeline en Fonte

Le pipeline en fonte désigne un pipeline utilisé comme tuyau sous pression pour le transport d'eau, de gaz ou d'eaux usées ou comme tuyau de drainage de l'eau. Il comprend principalement un tube en fonte grise utilisé historiquement sans revêtement, avec des types plus récents ayant divers revêtements c'est pour réduire la corrosion et améliorer l'hydraulique .



Figure 1- 7 : Pipeline en fonte

### 1.4.3. Pipeline en plastique

Les pipelines en plastique sont des pipelines solides, durables et légers, ils sont généralement utilisés pour la transmission de l'eau sur de longues distances. Les tuyaux en plastique ont une grande résistance à l'abrasion, à l'influence chimique et sont faciles à manipuler. De plus, leur poids léger facilite la pose et l'alignement des travailleurs selon les besoins. Cependant, ils ont une faible résistance à la traction et présentent de mauvaises performances lors des fluctuations de température.



Figure 1- 8 : Pipeline en plastique

### 1.4.4. Pipeline en béton

Les tuyaux en béton sont un choix approprié à la transmission de l'eau. La résistance des tuyaux en béton les rend moins sensibles aux effets d'une mauvaise pose et d'une mauvaise installation. Cependant, les utilisateurs ne recherchent pas seulement une résistance intrinsèque, mais également d'autres avantages tels que des avantages en termes de coûts d'installation et de maintenance. Les tuyaux en béton ne se déforment pas et ne perdent pas leur forme au cours de leur durée de vie, contrairement à d'autres systèmes de tuyaux vulnérables.



Figure 1- 9 : Pipeline en béton

## **1.5. Réglementation**

Les pipelines appartiennent à des sociétés privées ; ils sont construits et exploités conformément aux règlements établis par des organismes de réglementation provinciaux et fédéraux.

Ces autorités de réglementation ont pour tâche d'assurer que les entreprises respectent tous les règlements relatifs à la sécurité du personnel, du grand public et de l'environnement lors de la conception, de la construction, de l'exploitation, de l'entretien et de l'abandon potentiel d'un pipeline.

Il existe plusieurs niveaux de réglementation pour le transport par canalisation :

### **1.5.1. Les régimes juridiques de transport**

Des lois, décrets et arrêtés déterminent les conditions générales dans lesquelles une société est autorisée à construire et exploiter un ou plusieurs ouvrages de transport par pipeline. Ils sont différents selon le type de fluides et selon la nature des risques à maîtriser.

### **1.5.2. Réglementation de sécurité pour le transporteur**

La sécurité du transport par pipeline est réglementée par le code de l'environnement . Ce règlement et les documents normatifs ou interprofessionnels qui le déclinent (guides GESIP, normes NF EN...) définissent les conditions techniques que doivent respecter les transporteurs de gaz naturel, d'hydrocarbures liquides ou liquéfiés, de produits chimiques, lors de la construction et durant l'exploitation de leurs ouvrages, avec un niveau de sécurité acceptable et dans le respect de l'environnement.

Dans ce contexte, les matières dangereuses transportées par pipeline ne sont pas soumises à la réglementation sur le transport de matières dangereuses (TMD).(*Wikipedia*)

### **1.5.3. Réglementation sur les travaux de tiers**

Le décret détermine les précautions que doivent prendre les entreprises et riverains avant de réaliser des travaux au voisinage d'ouvrages de transport, afin de préserver l'intégrité de ces ouvrages et la sécurité des biens et des personnes.

## **1.6. Mécanique des fluides appliquée au pipeline :**

La dynamique de l'écoulement des fluides à travers un tuyau est un problème de base de la mécanique des fluides, qui se produit dans de nombreuses applications industrielles. Cette géométrie de base se trouve dans le transport de matériaux.

Pour les cas d'écoulement interne dans les tuyaux, une courbure peut provoquer un écoulement pur et / ou avec une perturbation / frottement interne l'écoulement peut subir une transition laminaire à turbulente. Cela modifie considérablement la perte de charge et de pression, le mélange et le transfert de chaleur de la paroi. En variante, un écoulement de fluide multi phase ou agressif à l'intérieur d'un tuyau peut provoquer des vibrations et / ou de la corrosion induites par le fluide, une défaillance du tuyau et par conséquent un danger pour l'environnement.

L'écoulement autour des canalisations peut également provoquer des vibrations induites par vortex et affecter d'autres canalisations et infrastructures à proximité.

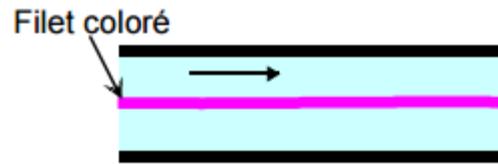
### **1.6.1. Régimes d'écoulement**

En écoulement de fluide réel, on distingue trois grands types de comportement. Chacun de ces comportements caractérise un régime d'écoulement particulier : le régime laminaire, transitoire et le régime turbulent (*LALLEMAND, 2000*).

Les expériences réalisées par Reynolds en 1883 lors de l'écoulement d'un liquide dans une conduite cylindrique dans laquelle arrive également un filet de liquide coloré, ont montré l'existence de trois régimes d'écoulement : régime laminaire, transitoire et régime turbulent (*Benhammouda, 2008*).

#### **1.6.1.1. Écoulement laminaire**

L'écoulement d'un fluide est dit laminaire lorsqu'il est strictement permanent ou lorsque le champ de vitesse évolue de façon continue et ordonnée en fonction du temps et de l'espace. Pour un tel écoulement d'un fluide réel, la vitesse peut avoir une intensité variable dans une section droite à cause de la viscosité. La vitesse est nulle pour les particules voisines de toute surface matérielle immobile et maximale pour les points les plus éloignés. Dans ce type d'écoulement, en régime permanent, les trajectoires, qui sont alors confondues avec les lignes de courant, ne se coupent jamais au cours de l'écoulement (*LALLEMAND, 2000*).

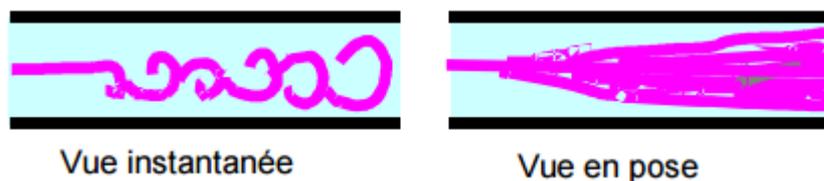


**Figure 1- 10 :** Ligne de courant d'un écoulement laminaire (*Benhammouda, 2008*).

### 1.6.1.2. Écoulement turbulent

La turbulence, dans un écoulement, revêt un caractère essentiellement aléatoire toujours tridimensionnel. Elle se développe aux nombres de Reynolds relativement élevés et est une propriété de l'écoulement et non pas du fluide comme l'est la viscosité par exemple. On constate que la turbulence augmente la capacité de transport à l'intérieur du fluide par augmentation des termes de diffusion (diffusion de quantité de mouvement, diffusion de chaleur, etc.) et augmente également la dissipation d'énergie mécanique en énergie thermique (*LALLEMAND, 2000*).

Les filets fluides s'enchevêtrent, s'enroulent sur eux-mêmes.



**Figure 1- 11 :** Ligne de courant d'un écoulement turbulent (*Benhammouda, 2008*)

### 1.6.2. Nombre de Reynolds

Le nombre de Reynolds représente le rapport entre les forces d'inertie et les forces visqueuses. On le définit de la manière suivante :

$$Re = \frac{VL}{\nu} \quad (1.1)$$

Avec :

V : vitesse caractéristique du fluide [m/s]

L : dimension caractéristique (diamètre hydraulique) [m]

$\nu$  : viscosité cinématique du fluide [m<sup>2</sup> /s]

Avec :

$$v = \frac{\mu}{\rho} \quad (1.2)$$

$\rho$ : masse volumique du fluide [kg/m<sup>3</sup>]

$\mu$ : viscosité dynamique du fluide [Pa·s ou kg/m·s]

Le nombre de Reynolds représente également le rapport qualitatif du transfert par convection au transfert par diffusion de la quantité de mouvement. Il est important de noter que le nombre de Reynolds ne donne qu'un ordre de grandeur. Les tailles et vitesses caractéristiques qui interviennent dans la formule sont également des ordres de grandeur. Ainsi, pour un fluide circulant dans un tuyau cylindrique de rayon R, on pourra prendre  $L = 2R$  (diamètre).

En utilisant divers fluides à viscosités différentes, en faisant varier le débit et le diamètre de la canalisation, Reynolds a montré que le nombre  $R_e$  sans dimension est le paramètre qui permettait de déterminer si l'écoulement est laminaire ou turbulent.

Si  $R_e < 2000$  l'écoulement est laminaire.

Si  $2000 < R_e < 3000$  l'écoulement est transitoire.

Si  $R_e > 3000$  l'écoulement est turbulent.

Lisse si  $2000 < R_e < 100000$ .

Rugueux si  $R_e > 100000$ .

Lorsqu'un fluide s'écoule dans un pipeline, l'énergie totale du gaz en divers points est constituée de l'énergie de la pression, de l'énergie de la vitesse et de l'énergie de la position ou de l'élévation au-dessus d'un point de référence établi. L'équation de Bernoulli relie simplement ces composantes de l'énergie du fluide en écoulement pour former une équation de conservation de l'énergie. L'équation de Bernoulli est l'équation de l'énergie totale, elle s'énonce comme suit en considérant deux points, a et b (*Menon, 2015*)

$$\left( \frac{V_a^2}{2} + \frac{P_a}{\rho} + gZ_a \right) = \left( \frac{V_b^2}{2} + \frac{P_b}{\rho} + gZ_b \right) = Constante \quad (1.3)$$

$p$ : pression en un point (en Pa ou N/m<sup>2</sup>);

$\rho$ : masse volumique en un point (en kg/m<sup>3</sup>);

$V$ : vitesse du fluide en un point (en m/s);

$g$ : accélération de la pesanteur (en N/kg ou m/s<sup>2</sup>);

$Z$ : altitude du point considéré (en m).

Lors du transport dans la canalisation, il se produit une dissipation d'énergie mécanique, c'est-à-dire une perte de charge  $\Delta H$  équation (1.4), entraînant une chute de pression dans le cas du liquide ou une dilatation dans le cas du gaz.

La perte de charge s'exprime par :

$$\Delta H = f_d \frac{L}{D_h} \rho \frac{V^2}{2g} \quad (1.4)$$

$\Delta H$  - perte de charge [m]

$f_d$  - coefficient de perte de charge de Darcy (coefficient de frottement)

$L$  - longueur de la conduite [m]

$\rho$  - masse volumique du fluide [kg m<sup>-3</sup>]

$D_h$  - diamètre hydraulique [m]

$V$  - vitesse moyenne du fluide [m .s<sup>-1</sup>]

$g$  - accélération de la pesanteur [m.s<sup>-2</sup>]

Pour les hydrocarbures, ce coefficient peut être calculé selon l'équation de Colebrook-White, où il peut être fixé selon les abaques de Paul Lefèvre puis il est calculé selon l'équation de Darcy-Weisback en fonction du nombre de Reynolds, car on sait que régime hydraulique peut être turbulent, laminaire ou transitoire.

Pour un écoulement laminaire, avec un nombre de Reynolds  $R_e < 2000$ , le facteur de friction Darcy  $f$  est calculé à partir de la relation simple (Menon, 2015) :

$$f_d = \frac{64}{R_e} \quad (1.5)$$

L'équation (1.5) montre que pour un écoulement laminaire, le facteur de friction ne dépend que du nombre de Reynolds et est indépendant de l'état interne du tuyau. Ainsi, que le tuyau soit lisse ou rugueux, le facteur de friction pour un écoulement laminaire est un nombre qui varie en sens inverse du nombre de Reynolds.

Pour un écoulement turbulent, lorsque le nombre de Reynolds  $R_e > 4000$ , le facteur de friction  $f$  dépend non seulement de  $R_e$ , mais aussi de la rugosité interne de la conduite. Plus la rugosité du tuyau augmente, plus le facteur de friction augmente. Par conséquent, les tuyaux lisses ont un facteur de friction inférieur à celui des tuyaux rugueux. Plus correctement, le facteur de friction dépend de la rugosité relative ( $e/D$ ) plutôt que de la rugosité absolue du tuyau (Menon, 2015).

Il existe plusieurs corrélations pour calculer le facteur de friction  $f$ . Elles sont basées sur des expériences menées par des scientifiques et des ingénieurs au cours des 60 dernières années ou plus. Une bonne équation universelle pour le facteur de friction  $f$  dans la région turbulente est appelée l'équation de Colebrook-White, comme suit (Menon, 2015).

$$\frac{1}{\sqrt{f_d}} = -2 \log \left( \frac{2.51}{Re \sqrt{f_d}} + \frac{R}{3.7D} \right) \quad (1.6)$$

$R_e$ : Nombre de Reynolds

D : Diamètre de la conduite

R : La rugosité de la canalisation

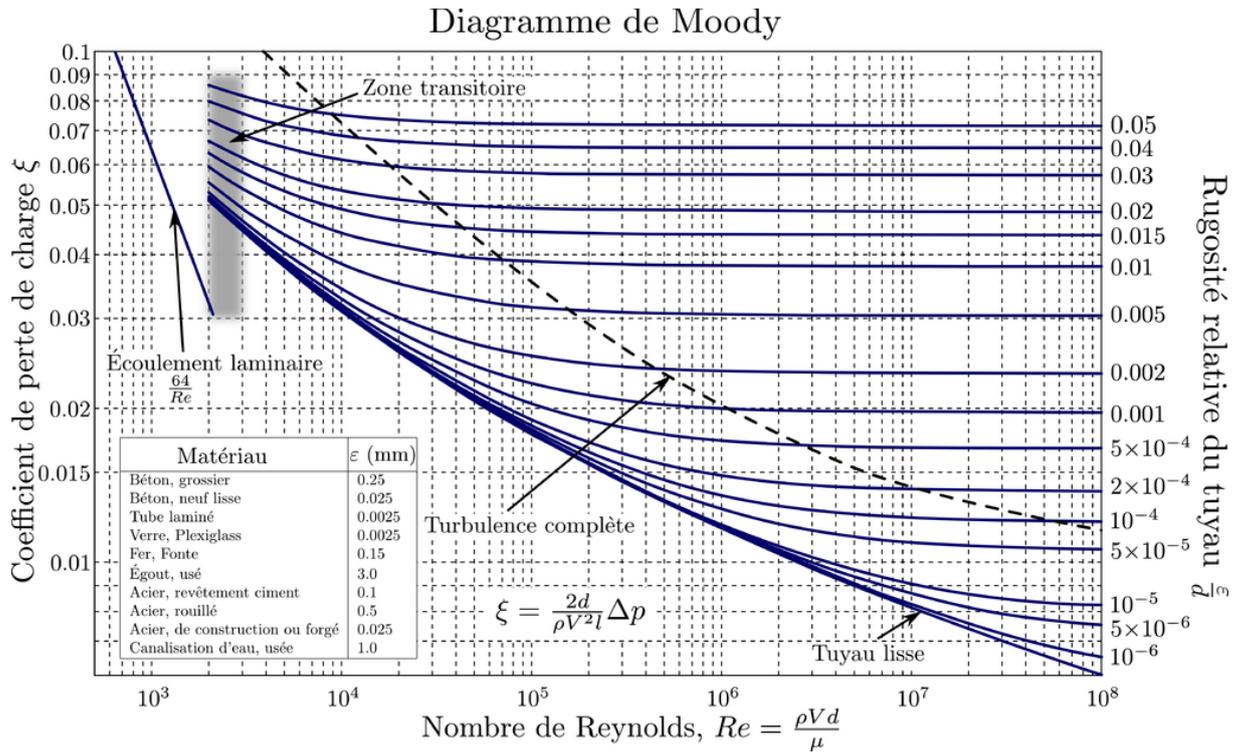
Les équations du facteur de friction discutées précédemment sont également tracées sur le diagramme de Moody, comme le montre la figure 1.12. La rugosité relative est définie comme  $e/D$ . Il s'agit simplement du résultat de la division de la rugosité absolue du tuyau par le diamètre intérieur du tuyau. Le terme de rugosité relative est un paramètre sans dimension (*Menon, 2015*).

Le diagramme de Moody représente la carte complète des facteurs de friction pour les régions laminaires et turbulentes de l'écoulement d'un tuyau. Il est couramment utilisé pour estimer le facteur de friction dans un écoulement de tuyau. Si le diagramme de Moody n'est pas disponible, nous devons utiliser la solution par essais et erreurs de l'équation (1.6) pour calculer le facteur de friction (*Menon, 2015*).

Pour utiliser le diagramme de Moody afin de déterminer le facteur de friction  $f$ , nous devons d'abord calculer le nombre de Reynolds  $R_e$  de l'écoulement. Ensuite, nous trouvons l'emplacement sur l'axe horizontal du nombre de Reynolds pour la valeur de R et nous traçons une ligne verticale qui coupe la courbe  $e/D$  appropriée (*Menon, 2015*).

A partir de ce point d'intersection sur la courbe  $e/D$ , nous nous déplaçons horizontalement vers la gauche et lisons la valeur du facteur de friction  $f$  sur l'axe vertical à gauche (*Menon, 2015*).

Avant de quitter la discussion sur le facteur de friction, nous devons mentionner un terme supplémentaire appelé le facteur de friction Fanning. Certaines publications utilisent ce facteur de friction au lieu du facteur de friction de Darcy (*Menon, 2015*).



**Figure 1- 12 :** Diagramme de Moody pour le facteur de friction (Menon, 2015)

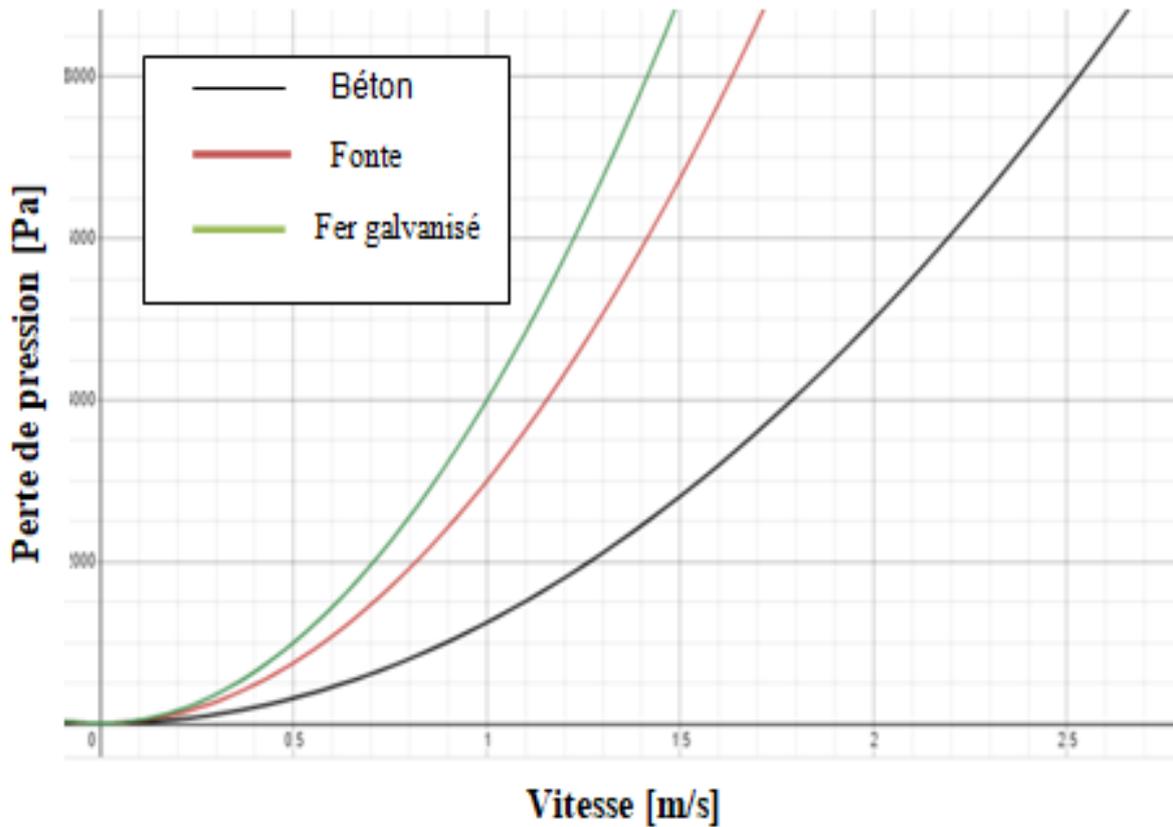
Suivant cette formule, on voit que le coefficient dépend à la fois de la rugosité de la conduite et de la viscosité du fluide (Wikipedia).

La perte de pression s'exprime par :

$$\Delta P = f_d \frac{L}{D_h} \rho \frac{V^2}{2} \tag{1.7}$$

Où ;

- $\Delta P$  : Perte de pression [Pa]
- L : Longueur de la conduite [m]
- $\rho$  : Masse volumique du fluide [kg m<sup>-3</sup>]
- $D_h$  : Diamètre hydraulique [m]
- V : Vitesse moyenne du fluide [m/s]



**Figure 1- 13 :** Perte de pression en fonction de la vitesse

$$\Delta p = f(v)$$

Pour faire une comparaison d'un écoulement turbulent d'un fluide  $\rho=1000$  qui correspond à l'eau et voir les pertes de pression en fonction de la vitesse avec l'équation de Darcy Weisbach ( éq 1.6) de 3 pipelines différents 'fonte ,béton et fer galvanisé' de longueur  $L=1\text{m}$  et de diamètre  $D_h =0.2\text{m}$

D'après les 3 graphes :

- Nous constatons que les pertes de pression augmentent en augmentant la vitesse d'écoulement du fluide (les pertes de pression sont proportionnelles à la vitesse du fluide).
- En observant la figure, il est clair qu'on a moins de pertes de pression dans les pipelines en béton par rapport au pipeline en fonte et en fer galvanisé.

**Conclusion 1 :**

Dans ce chapitre on a exposé les différentes généralités et définitions sur le système de transport par canalisations qui est en évolution. Ainsi que des généralités sur la mécanique des fluides dans les pipes.



**2. Chapitre 02 : Dégradation des Matériaux et des Structures****Introduction**

La dégradation des matériaux est un processus qui entraîne la modification de leurs propriétés, elle est due aux effets de leur environnement. Confrontés à une problématique liée à la dégradation des pipelines, plus précisément l'érosion des tuyaux, nous présenterons dans ce chapitre la terminologie nécessaire avant de décrire la problématique et ses facettes.

## **2.1. Structures tuyauteries / pipeline**

### **2.1.1. Structures de la tuyauterie**

#### **2.1.1.1. Définition**

Le terme tuyauterie désigne l'ensemble du réseau de tuyaux, de raccords, de brides, de vannes et d'autres composants qui constituent un système de conduites utilisé pour transporter des fluides. Que ce soit qu'un système de tuyauterie, soit utilisé pour simplement transporter des fluides d'un point à un autre ou pour traiter et conditionner le fluide, les éléments de la tuyauterie jouent un rôle important dans la composition et le fonctionnement du système. Un système utilisé uniquement pour transporter des fluides peut comporter relativement peu de composants, tels que des vannes et des raccords, alors qu'un système de traitement chimique complexe peut comporter un grand nombre de composants pour mesurer, contrôler, conditionner et transporter les fluides (*Nayyar, 2000*).

#### **2.1.1.2. Types de structures tuyauterie :**

##### **- Tuyauterie enterrée :**

La conception se réalise suivant les mêmes principes que ceux des tuyauteries aériennes, en tenant compte des particularités liées au milieu où s'effectuera la pose.

Le calcul de l'épaisseur des parois se fait en distinguant le cas standard des cas non standards.

Le cas standard est celui de la pose en tranchée remblayée, pour lequel le calcul de l'épaisseur se fait en tenant compte de la pression intérieure et la pression extérieure due à la poussée des terres.

Les cas non standards correspondent à ce qu'il est convenu d'appeler des points particuliers :

-Les zones de passage d'engins si le tube n'est pas protégé par une gaine ou une dalle.

-Les zones d'affaissement.

-Les zones de glissement de terrain.

-Les zones de séisme, etc.

-La détermination des épaisseurs de parois pour ces zones particulières doit inclure une analyse des charges et /ou déplacement ainsi qu'une analyse des contraintes et des

déformations susceptibles de se produire. Pour les tuyauteries enterrées, l'état d'absence de pression intérieure est souvent critique.

En règle générale, les canalisations sont enterrées pour garantir leur assise et leur protection. Elles sont conçues sur le principe de la limitation de la contrainte circonférentielle de pression intérieure. Des analyses particulières de contraintes peuvent s'avérer nécessaires pour les cintres ou les raccords en Té si ces canalisations sont soumises à des variations de température significatives.

#### **-Tuyauterie aérienne :**

Une tuyauterie est dite aérienne quand elle est installée au-dessus du sol. Dans ce cas elle est installée sur des supports.

La tuyauterie aérienne consiste à résoudre :

- Absorption des dilatations thermiques
- L'ancrage des éléments soumis aux poussées hydrauliques.

### **2.1.1.3. Rôle**

Conduire un fluide (gaz ou liquide) d'un appareil (ex : échangeur de température) à un autre, ou d'un appareil vers un stockage (réservoir ou ballon); ou encore d'un réservoir à un appareil au cours d'opérations de fabrication, de transformation ou de stockage d'un produit. Une tuyauterie doit :

- Résister aux conditions de service (pression, température et poids).
- Conduire le fluide avec un minimum de pertes thermiques, c'est ce qu'on appelle l'isolation, ou de pertes hydrodynamiques (pertes de charges).
- Absorber sa propre dilatation ou rétraction et résister aux sollicitations résultantes.
- Être étanche
- Résister au mieux à l'oxydation interne et le milieu ambiant (*Rocdacier, 2017*).

## **2.1.2. Structures pipelines**

### **2.1.2.1. Définition**

Structures ou réseaux de pipelines sont des systèmes de canalisations et l'ensemble de l'infrastructure de pipelines avec des points de départ et d'arrêt définissables.

Le pipeline est un ouvrage destiné à transporter, sous pression et sur de grandes distances, des matières fluides (liquides, gaz...etc.).

C'est un système industriel constitué de plusieurs parties d'installations physiques par lesquelles le fluide se déplace dans le canal, y compris les tuyaux, les vannes, les raccords, les brides (boulons, joints), les régulateurs, les appareils à réservoirs sous pression, amortisseurs de pulsations, soupapes de sûreté, accessoires fixés aux tuyaux, les compresseurs, les installations de mesure, stations de régulation de la pression, stations de limitation de la pression, stations de décharge de la pression, et les assemblages fabriqués.

Cette définition englobe la transmission et le collecte du fluide transporté vers les sites de production ou vers les sites terrestres, et les équipements de stockage (ASME, 2010).

### 2.1.2.2. Types

La plupart des oléoducs et gazoducs appartiennent à l'un des trois groupes suivants : **collecte, transport ou distribution** (Voir la figure (2.1)).

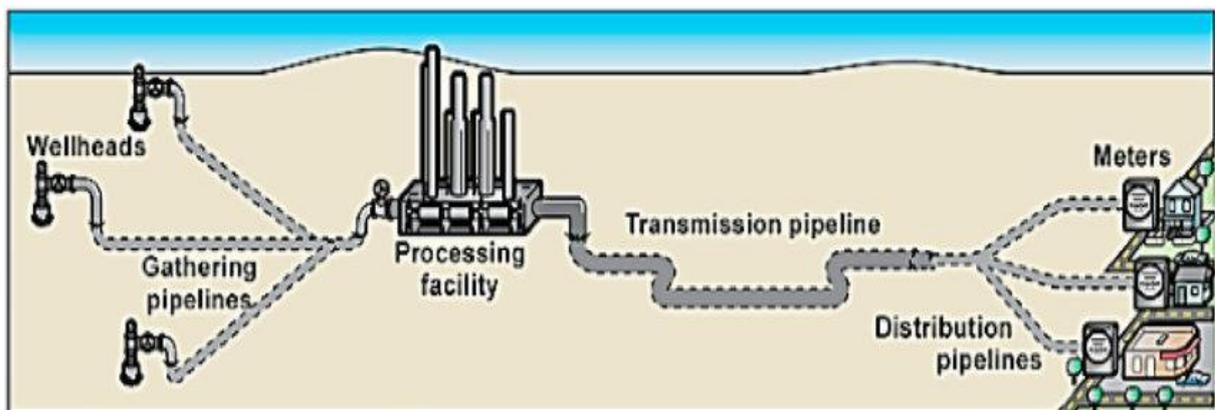


Figure 2- 1 : Types de pipeline (Thangavel.S, 2020)

#### - Pipelines de collecte : « Gathering pipeline »

Acheminement des produits pétroliers ou gaziers depuis des puits forés dans la terre jusqu'à des batteries de réservoirs de stockage ou des installations de traitement de gaz naturel.

Ils transportent : gaz naturel, pétrole brut et diverses combinaisons de ces produits, parfois mélangés à de l'eau, gaz naturel liquide (GNL) tels que l'éthane, butane et propane ; leur diamètre varie de 101[mm] à 304[mm] la taille du réseau peut aller jusqu'à 250000[km]. (CEPA)

- **Pipelines de transport : « Transmission pipeline »**

Transport du pétrole et du gaz : Les lignes de transport de gaz fonctionnent à des pressions relativement élevées ; les gazoducs de transport sont faits de tuyaux en acier et sont enterrés sous la surface du sol. Les sections individuelles de la conduite sont reliées par soudage et la conduite est recouverte d'un revêtement extérieur pour la protéger de la corrosion. Leur taille varie de celle 101[mm] à environ 1212 [mm].

La taille du réseau arrive jusqu'à 1 117 000 [km]. (CEPA)

- **Pipelines de distribution : « Distribution pipeline »**

Grâce à des réseaux de distribution constitués de petits pipelines et d'installations de mesure, les services publics et, les sociétés locales distribuent le gaz naturel aux utilisateurs commerciaux, résidentiels et industriels. Leur diamètre varie entre 50 [mm] et 140 [cm] pour les plus importants et sa taille peut aller jusqu'à 450 000[km]. (CEPA)

- **Autres pipelines**

D'autres pipelines acheminent les produits depuis les installations de traitement et les réservoirs de stockage vers les transporteurs longue distance du réseau (les pipelines de transport). Ils transportent : pétrole brut , gaz naturel et GNL ; et leur diamètre est de 152[mm] jusqu'à 304[mm]; la taille du réseau peut aller jusqu'à 25 000km ils sont appelés pipelines d'alimentations.

D'autres pipelines sont nécessaires dans les champs de production pour injecter du gaz, de l'eau ou d'autres fluides dans la formation afin d'améliorer la récupération du pétrole et du gaz et pour éliminer l'eau salée souvent produite avec le pétrole.

Les pipelines de petit diamètre à l'intérieur d'un champ de pétrole ou de gaz, appelés conduites d'écoulement (flowlines), sont généralement la propriété du producteur. Ils relient les puits de pétrole ou de gaz individuels aux installations centrales de traitement, de stockage ou de distribution à l'intérieur du champ.

Un autre réseau de collecte composé de lignes de plus grand diamètre, appartenant généralement à une société pipelinière plutôt qu'au producteur de pétrole ou de gaz, relie les puits de pétrole ou de gaz aux installations centrales de traitement, de stockage ou de traitement du champ. (ASME, 2010)

### 2.1.2.3. Rôle

Une structure de pipelines sophistiqués transporte le pétrole, le gaz naturel et les produits pétroliers depuis les champs de production et les raffineries du monde entier jusqu'aux consommateurs de tous les pays. Ce réseau recueille le pétrole et le gaz de centaines de milliers de puits individuels, y compris ceux situés dans certaines des régions les plus éloignées et les plus hostiles du monde. Il distribue une gamme de produits aux particuliers, aux résidences, aux entreprises et aux usines.

Les systèmes d'oléoducs et de gazoducs sont remarquables pour leur efficacité et leur faible coût de transport. Tout aussi remarquable est la technologie qui permet d'installer de grands pipelines en eau profonde sans endommager l'environnement et avec un haut degré de sécurité (*Kennedy, 1993*).

## 2.2. Différents types de dégradations

### 2.2.1. Fatigue

La fatigue est l'endommagement local d'une pièce sous l'effet d'efforts variables : forces appliquées, vibrations. Alors que la pièce est conçue pour résister à des efforts donnés, la variation de l'effort, même à des niveaux bien plus faibles que ceux pouvant provoquer sa rupture comme on voit sur la figure (2-2) :



**Figure 2- 2 :** Rupture de tuyaux due à la fissuration par fatigue

#### 2.2.1.1. Raisons qui mènent à la fatigue

La fatigue de la tuyauterie se produira dans les systèmes de tuyauterie lorsque les combinaisons de contraintes statiques et dynamiques dans les composants de tuyauterie dépassent les valeurs admissibles. La contrainte statique dans le tuyau est le plus souvent causée par une combinaison de pression et de croissance thermique. Les contraintes thermiques peuvent être très importantes, en particulier si les supports ne sont pas installés

ou entretenus correctement. Les contraintes dynamiques peuvent résulter de vibrations transmises par des machines connectées, de forces générées à l'intérieur du tuyau par des coups de bélier ou des pulsations de pression, ou par des charges induites par le fluide ou d'autres charges externes. (*Piping fatigue analysis, 1999*)

### 2.2.1.2. Traitement et solution

La défaillance par fatigue est l'une des principales raisons de la défaillance mécanique des matériaux d'ingénierie.

L'analyse prédictive de la fatigue peut réduire considérablement les défaillances prématurées

Pour éviter une défaillance due à la fatigue, il faut prêter une attention particulière aux détails lors de la conception afin de s'assurer que les contraintes cycliques sont suffisamment faibles pour atteindre l'endurance requise. Les concentrations de contraintes doivent être évitées dans la mesure du possible.

Il faut améliorer la résistance à la fatigue par :

#### - **Bonne pratique de conception**

- Minimiser les charges de fatigue en évitant les vibrations.
- Utiliser des connexions avec un faible facteur de concentration des contraintes.
- Placer les soudures dans des zones de faible contrainte.
- Protéger contre la corrosion. (*Kenneth.A, 2011*)

#### - **Haute qualité de fabrication**

- Matériaux commutables pour le soudage.
- Procédé de soudage permettant d'obtenir des soudures saines.
- Optimiser la géométrie des rainures et des soudures.
- Soudeurs qualifiés (*Kenneth.A, 2011*)

## 2.2.2. Fluage

Le fluage est défini comme la déformation et la déflexion en fonction du temps d'un matériau soumis à une contrainte persistante même inférieure à la limite d'élasticité du matériau.

### 2.2.2.1. Raisons qui mènent au fluage

Au cours du fluage, la déformation du matériau progresse sous une charge constante jusqu'à l'équilibre ou la rupture. La contrainte appliquée dans les canalisations enterrées

peut donner lieu à un fluage, sous la forme du poids du sol au-dessus de la canalisation ou de la pression hydrostatique interne. (*Trenchlesspedia, 31 janvier 2018* )

Les propriétés du matériau, la charge appliquée (contrainte), température d'exposition, temps d'exposition sont des facteurs accélérateurs de ce phénomène.

#### **2.2.2.2. Traitement et solution**

Les méthodes courantes pour réduire le fluage comprennent :

Renforcement de la solution solide : l'ajout d'autres éléments dans une solution solide peut ralentir la diffusion, ainsi que ralentir le mouvement de dislocation via le mécanisme de traînée de soluté.

Renforcement de la dispersion des particules : l'ajout de particules, souvent des particules d'oxyde ou de carbure incohérentes, bloque le mouvement de dislocation.

Durcissement par précipitation : la précipitation d'une deuxième phase hors du réseau primaire bloque le mouvement de dislocation.

Taille des grains : l'augmentation de la taille des grains diminue la quantité de joints de grains, ce qui entraîne un fluage plus lent en raison de la vitesse de diffusion élevée le long des joints de grains. Ceci est opposé aux applications à basse température, où l'augmentation de la taille des grains diminue la résistance en bloquant le mouvement de dislocation. Dans les applications à très haute température telles que les turbines de moteurs à réaction, des monocristaux sont souvent utilisés.

#### **2.2.3. Corrosion**

La corrosion est une réaction chimique ou électrochimique entre un matériau, généralement un métal, et son environnement qui entraîne une dégradation du matériau et de ses propriétés.

Il existe trois types de corrosion : la corrosion chimique, la corrosion électrochimique et la corrosion bactérienne.

La corrosion des pipelines est l'oxydation et la dégradation électrochimique de la structure des tuyaux utilisés. La corrosion des pipelines se produit à la fois à l'intérieur et à l'extérieur de tous les tuyaux et structures connexes, exposés à des éléments corrosifs (voir Figure2-3) (*DDCoatings, 9 septembre 2019*)

Le pipeline est exposé à la corrosion de l'intérieur comme de l'extérieur.



Figure 2- 3 : La corrosion du pipeline.

### 2.2.3.1. Raisons qui mènent à la corrosion

Les causes qui mènent à la corrosion sont les bactéries mangeuses de métal qui existent partout, dans le sol, ainsi que dans l'oxygène et les produits transportés dans le pipeline, ces micro-organismes peuvent causer la corrosion, occasionnant ainsi des dommages dans le métal.

Certains types de bactéries produisent différents sous-produits (par exemple, de l'acide sulfurique) dans leur processus, et ces activités peuvent aboutir à la formation de corrosion, ce qui endommage les pipelines.

Si la corrosion du pipeline n'est pas contrôlée, ça pourrait entraîner des conditions préjudiciables à la sécurité du public ou des employés, des mesures correctives appropriées doivent être prises pour atténuer la corrosion additionnelle sur le système ou le segment de tuyauterie.

### 2.2.3.2. Traitement et solution

Lorsqu'un fluide corrosif est transporté, des dispositions doivent être prises pour protéger le système de tuyauterie contre la corrosion nuisible.

- Lorsqu'il est déterminé que la corrosion interne en cours pourrait nuire à la sécurité du public ou des employés, une ou plusieurs des mesures de protection ou de correction suivantes doivent être utilisées pour contrôler la corrosion interne nuisible:
  - Un inhibiteur de corrosion efficace doit être appliqué d'une manière et en quantités suffisantes pour protéger toutes les parties concernées des systèmes de tuyauterie.
  - Les agents corrosifs doivent être éliminés par des méthodes reconnues, telles que les installations de traitement des gaz acides ou de déshydratation.

- Des raccords doivent être ajoutés pour évacuer l'eau des points bas, ou la tuyauterie doit être positionnée de manière à réduire la capacité des puisards.
- Dans certaines circonstances, l'application d'un revêtement interne approprié peut être efficace.
- Lorsque l'expérience ou les essais indiquent que les méthodes d'atténuation ci-dessus ne permettent pas de contrôler la corrosion continue à un niveau acceptable, le segment doit être remis en état ou remplacé et protégé de façon appropriée. (ASME, 2010)

## 2.2.4. Érosion

L'érosion est un phénomène physique caractérisé par la dégradation continue d'un solide par abrasion. Dans les canalisations l'érosion se produit lorsque la paroi s'amincit par la charge de pression continue de l'effet d'impact. La profondeur d'érosion s'est avérée augmenter linéairement avec le volume d'écoulement local (Fujisawa, 15 avril 2018). Comme montre figure (1-4) .

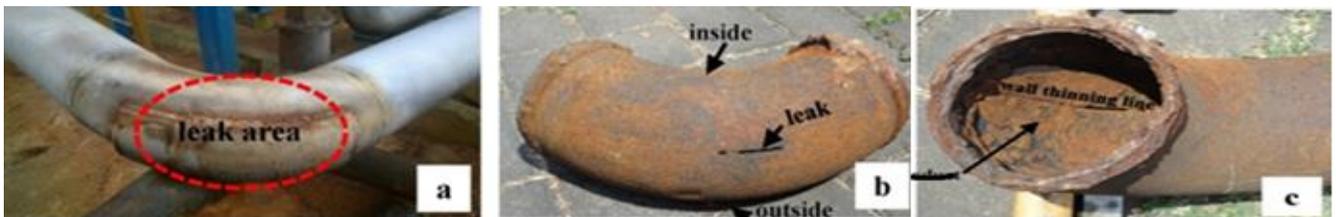


Figure 2- 4 : Un coude de tuyau défaillant dans une installation (Kusmono.k, 2017)

### 2.2.4.1. Raisons qui mènent à l'érosion

Dans l'industrie du pétrole et du gaz, le pétrole et le gaz extraits du puits sont inévitablement pollués par des particules solides telles que le sable. Les particules solides et le sable en particulier sont une source de plusieurs problèmes d'assurance de l'écoulement. L'un d'eux est l'érosion qui endommage les pipelines, les raccords (par exemple, les coudes et, les cales) et plusieurs autres équipements de contrôle. Fondamentalement, l'érosion est causée par l'impact de particules solides (sable) qui sont en suspension dans un flux (liquide, gaz ou flux multiphasique) sur une paroi ou une limite solide.

En d'autres termes, elle peut être décrite comme un enlèvement progressif de matériau par déformation répétée et action de coupe.

### 2.2.4.2. Traitement et solution

La compréhension de l'usure du matériau des conduites et des équipements de contrôle causée par l'impact du sable est nécessaire pour protéger les conduites et les équipements contre les risques potentiels et/ou pour concevoir les conduites et les équipements.

L'estimation de l'érosion par le sable est un phénomène très compliqué, il existe une variété de facteurs qui ont un effet sur les dégâts de l'érosion (par exemple, la vitesse d'impact, l'angle d'impact, et la taille de la particule, la forme de la particule, les propriétés de la particule, et les propriétés du matériau cible).

Afin d'obtenir des prévisions d'érosion causée par des particules de sable, de nombreuses recherches ont été menées pour développer des modèles d'érosion empiriques et numériques.

Le contrôle continu des pipelines est nécessaire comme la surveillance du sable (*Abdulla, 2011*)

Si l'érosion n'est pas correctement surveillée, prédite et contrôlée, des processus de production entiers peuvent être entravés, voire arrêtés pendant de longues périodes.

**Conclusion 02**

Les pipelines sont exposés à des sollicitations mécaniques chimiques aboutissant à des défaillances de différents types comme la corrosion, fluage, fatigue, érosion.

L'environnement défavorable et les dommages dans les conduites a conduit à explorer différentes options de réparation pour chaque type de dégradation pour garder les pipelines fonctionnels.



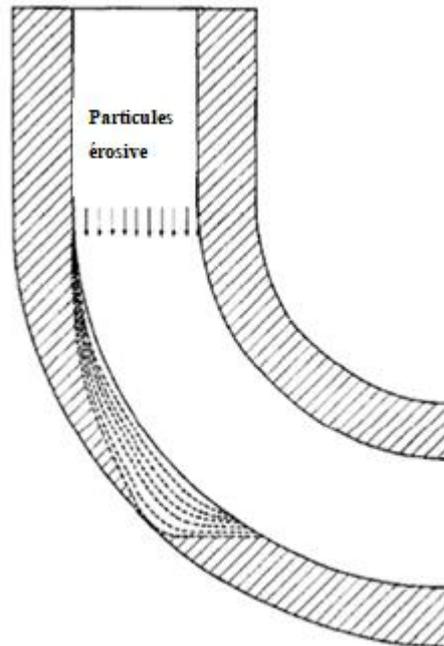
### 3. Chapitre 03 : Problématique et Modèle Analytique

#### Introduction

L'un des principaux objectifs de cette partie est d'acquérir plus de connaissances sur l'estimation du taux d'érosion dans un système de tuyauterie (canalisation). La portée de cette partie est de se concentrer sur la façon dont la vitesse d'impact des particules a une grande influence sur le taux d'érosion maximum et moyen dans un profile coude de 90 degrés (figure 2-10) lorsque les particules de sable s'écoulent dans un flux continu différent.

### 3.1. Problématiques liées à l'érosion

Le phénomène d'érosion des matériaux par des particules solides (3.2) est un processus assez complexe. Les chocs entre les particules solides et la surface d'un matériau entraînent l'enlèvement de matière.

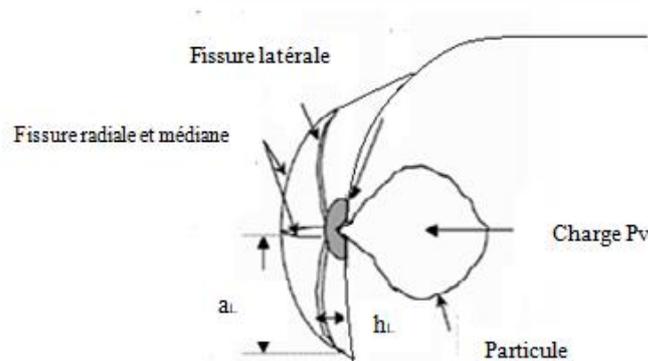


**Figure 3- 1 :** Attaque d'un coude 90° dans une ligne de transport par des particules érosives

Au moment de la collision, l'énergie cinétique d'une particule en mouvement est convertie en travail de déformation du matériau (3.2). Lors des déformations résiduelles, une certaine partie volumétrique de la couche superficielle se détache de la masse globale du composant, laissant une trace qui est caractérisée par une rugosité significative causée par le schéma d'action (3.2).

Les innombrables collisions de ces particules véhiculées par le flux avec la surface du composant, aboutissent finalement à la défaillance du matériau.

L'usure érosive implique plusieurs mécanismes d'usure qui sont largement contrôlés par le matériau de la particule, l'angle d'impact, la vitesse d'impact et la taille de la particule.



**Figure 3- 2 :** Fissures générées par impact de particules

Où :

$P_V$  La charge normale de la particule abrasive qui agit sur le matériau cible durant l'érosion.

$a_L$  La longueur de la fissure.

$h_L$  La profondeur de la fissure latérale.

### 3.2. Mécanismes de l'érosion par des particules solides

Les actions mécaniques, chimiques et thermiques sont l'origine des séparations de la matière tel un débris d'érosion, mais les moyens pour atteindre ces actions sont différents. En général, on distingue quatre mécanismes principaux d'érosion par impact des particules solides (Figure 3.3, 3.9).

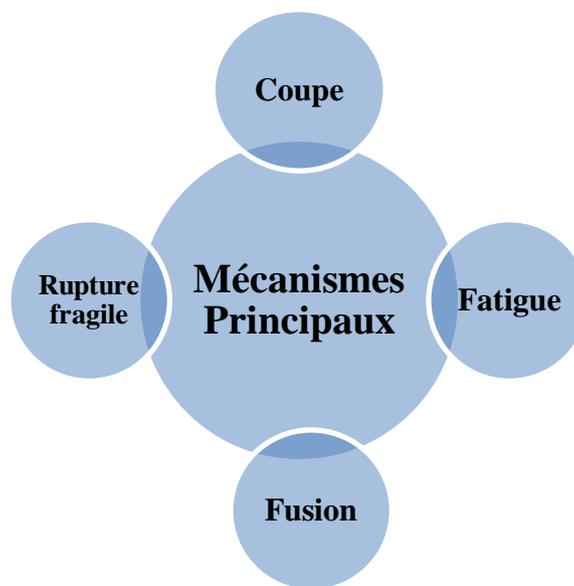


Figure 3- 3 : Les principaux mécanismes de l'érosion

#### 3.2.1. Coupe (abrasion)

Un faible angle d'impact favorise des processus d'usure similaires à l'abrasion.

Les mécanismes impliqués sont le résultat des contraintes répétitives au choc (les particules ont tendance à se déplacer sur la surface usée après l'impact).

La matière est enlevée par griffures ou par démolition des bords aigus des particules, en formant de petites cicatrices, figure (3.4).

La rupture de la surface sous l'action du fluide, à l'exclusion des phénomènes de cavitation, peut résulter du frottement entre le courant continu du fluide et la surface des éléments immergés, ainsi que par l'effet d'impact exercé par le flux agissant sur la surface.

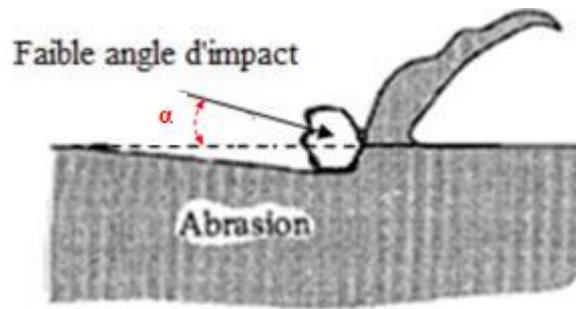


Figure 3- 4 : L'abrasion à des angles d'impact faible

### 3.2.2. Fatigue de surface :

La vitesse de la particule érosive a un effet très important sur le processus d'usure. Si la vitesse d'impact est très faible, avec un grand angle d'impact (**figure3.5**), le taux d'érosion augmente en fonction du temps d'exposition, jusqu'à une valeur constante qui mène à la fissure, les contraintes à l'impact sont insuffisantes pour qu'une déformation plastique se produise et l'usure se produit par fatigue de surface. Des fissures apparaissent après des impacts répétés. Les particules se détachent de la surface après plusieurs impacts.

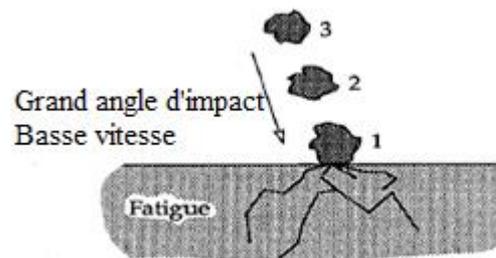


Figure 3- 5 : La fatigue de la surface lors d'un impact à faible vitesse et à angle d'impact élevé.

L'impact du sable sur les surfaces des pipelines et des réservoirs crée des discontinuités structurales (entailles, fissures) conduisant à des zones de fortes concentrations de contraintes au voisinage des entailles. Les chargements répétés dans le temps donnent lieu à un grand nombre de cycles de contraintes d'amplitudes variables. La combinaison de ces cycles de chargement et des zones de fortes concentrations de contraintes conduit inévitablement à un endommagement par fatigue de ces structures. Cet endommagement commence par une déformation plastique localisée, sans plastification de toute la structure. Tout d'abord autour de défauts, au fond d'entaille, puis à l'extrémité de la fissure une fois celle-ci créée. En effet, le danger en fatigue est que la rupture peut apparaître pour des contraintes nominales relativement faibles, souvent bien inférieures à la limite d'élasticité du matériau, lorsque leur application est répétée un grand nombre de fois. La capacité de résistance à la fatigue des structures définit la limite d'endurance.

### 3.2.2.1. Déformation plastique

La déformation plastique de la surface a lieu en raison de la formation des écailles autour du point d'impact, lorsque les particules frappent la surface élastique avec une vitesse moyenne et un grand angle d'impact (figure 3.6). En répétant l'impact sur les écailles, le matériau se détache tels des débris.

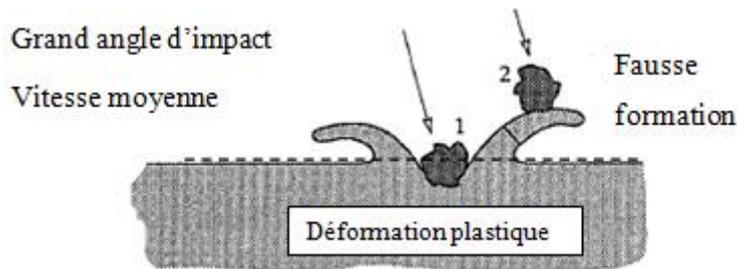


Figure 3- 6 : Impact à vitesse moyenne et à grand angle (Batchelor, 1993)

### 3.2.3. Rupture fragile

Lorsque les particules impactent une surface fragile avec un grand angle d'impact et une vitesse moyenne, l'érosion se fait par rupture fragile (Figure 3.7). Si les particules sont aiguës, la fragmentation fragile s'effectue par détachement des particules de la matière (Figure 3.7)

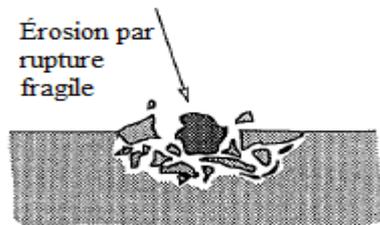


Figure 3- 7 : Érosion par rupture fragile (Batchelor, 1993)

### 3.2.4. Fusion :

La fusion se fait quand les deux paramètres s'associent haute vitesse et angle d'impact élevé

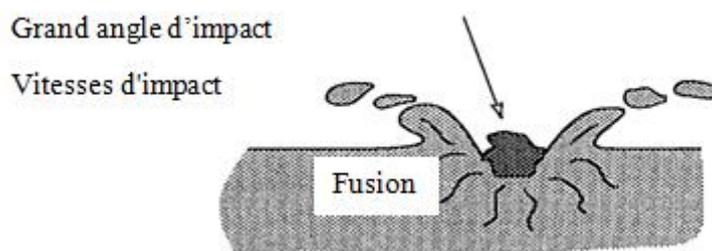


Figure 3- 8 : Fusion de la surface à haute vitesses et angle d'impact élevée (Batchelor, 1993)

### 3.3. Paramètres du processus d'érosion des surfaces du matériau

Plusieurs facteurs différencient les types de mécanisme d'érosion et contrôlent le moyen d'érosion. Ils peuvent être regroupés en trois catégories distincts et associés aux :

- Conditions d'exploitation : Le temps d'exposition, la vitesse des particules, l'accélération, l'angle d'impact, le moyen du débit ou la concentration, le flux et la température.

- Particules érodantes (sable ou gouttelettes de liquides) : La taille, la forme, la dureté et la matière.

- Matériaux utilisés : Composition chimique, propriétés mécaniques, dureté et surface morphologique.

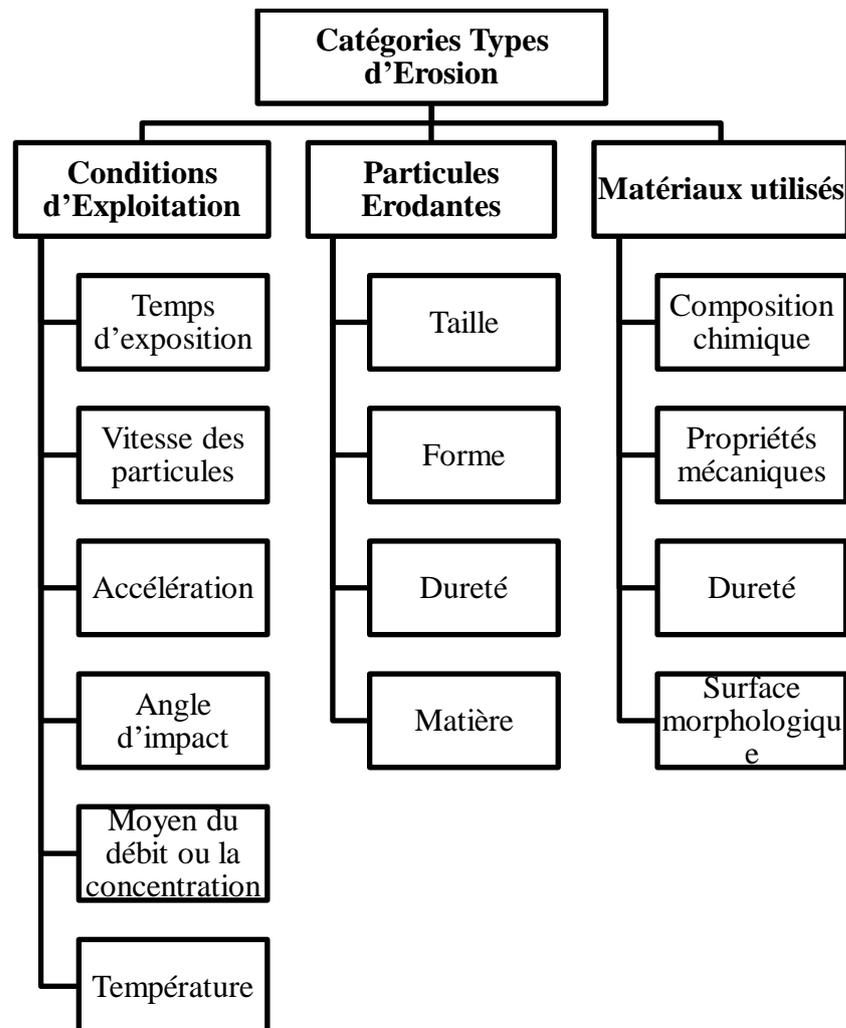


Figure 3- 9 : Catégories Types d'Erosion

### 3.3.1. Modèle d'érosion

De nombreux facteurs influencent le taux d'usure érosive dans les pipelines, ces facteurs sont les suivantes (*R.I.K. Wood a., 1998*) :

- Caractéristiques de la phase fluide y compris le régime d'écoulement ;
- Caractéristiques de la phase solide (propriétés du matériau) telles que la dureté, la résistance à la rupture, le coefficient de restitution et l'élasticité, ainsi que la rugosité de la surface.
- Propriétés des phases solides/liquides (l'interaction).

Ces facteurs influencent la nature et la dynamique d'impact des interactions entre les particules de sable et la paroi de la conduite. L'expression générale de la vitesse d'érosion,  $W$ , a été établie empiriquement et prend la forme :

$$W = M_p K F(\alpha) V_p^N \quad (3.1)$$

Où

$M_p$  La masse de sable qui frappe la surface,

$V_p$  La vitesse de la particule à l'impact,

$\alpha$  L'angle d'impact de la particule,

$K$  et  $n$  Des constantes supposées dépendre des caractéristiques des matériaux cibles érodés impliqués (généralement entre 3.2 et 3.3).

$F(\alpha)$  Une relation fonctionnelle pour la dépendance de la vitesse d'érosion par rapport à l'angle d'impact.

Cela peut être réécrit :

$$W = E_c^m F(\alpha) C \quad (3.2)$$

Où

$E_c$  L'énergie cinétique de la particule,

$m$  L'exposant d'énergie avec  $m = 0.5n$

$C$  une constante

$F(\alpha)$  Comme précédemment.

$$E_c = \frac{1}{2} M_p V_p^2 \quad (3.3)$$

Comme nous l'avons vu précédemment, les constantes  $K$  et  $C$  des équations (3.1) et (3.2) dépendent des propriétés mécaniques de la surface.

Les travaux rapportés dans la littérature actuelle examinée (*K. Haugen, 1995*) visent à développer des modèles pour prédire les valeurs de C et K en utilisant diverses propriétés de masse telles que la ténacité à la rupture, la dureté, la résistance à la traction, le coefficient de restitution et la déformation plastique critique. Cependant, ces modèles ne peuvent être utilisés que pour prédire l'érosion dans des conditions d'érosion très spécifiques car ils sont ajustés de manière empirique et ne peuvent donc pas être utilisés comme modèle général. La possibilité que les propriétés de la surface érodée diffèrent des propriétés de la masse complique également la question. Ces facteurs entraînent des difficultés dans la sélection des surfaces résistantes à l'érosion, car il existe peu d'indications sur la ou les propriétés à optimiser, ce qui nécessite un tri expérimental des matériaux.

### 3.4. Les Différents Modèles Analytique d'Érosion

#### 3.4.1. Modèle de Finnie

En 1958, Finnie a présenté la théorie de l'usure par érosion des matériaux ductiles par micro coupage (*Finnie, 1960*). L'usure de la surface des parois due à l'effet d'érosion des particules est une fonction complexe de l'impact des particules, des propriétés des particules et des parois. Pour la plupart des métaux, l'érosion peut être considérée comme une fonction de l'angle et de la vitesse d'impact des particules (*Xin Lu*), (*Feilong Liao, 2016*).

$$E = kV_p^n f(\alpha) \quad (3.4)$$

Où

E Est la masse sans dimension

$V_p$  Est la vitesse d'impact de la particule

$f(\alpha)$  Est la fonction sans dimension de l'angle d'impact.

L'angle d'impact est l'angle entre la trajectoire de la particule et la surface de la paroi, et l'exposant n'est généralement 2,3-2,5 (*Fei Yu, 2015*), (*Xiaoqin Song, 2008*).

### 3.4.2. Modèle DNV

Le modèle DNV (modèle d'érosion) ((DNV), 1996) estime que les résultats de l'érosion des composants du pipeline sont déterminés en dernier ressort par l'angle de collision moyen et l'indice de vitesse des particules à grande échelle. L'angle de collision moyen des particules est obtenu en suivant la trajectoire du mouvement des particules à grande échelle.

Les autres paramètres sont étudiés sur la base des données expérimentales, ce qui constitue également un modèle semi-empirique (Kuang Ding, 2013)(Caihong Du, 2007).

$$e_r = Kf(\alpha) \left( \frac{U_{rel}}{U_{ref}} \right)^n \quad (3.5)$$

Où,  $K=2.0e-9$ ,  $f(\alpha)$  est la fonction d'angle d'impact des particules.

### 3.4.3. Modèle E/CRC

L'institution de recherche représentée par l'université de Tulsa E/CRC (un modèle d'érosion) a divisé le problème de l'érosion par le sable des pipelines en trois étapes : la simulation du champ d'écoulement, le suivi des particules et le calcul des dommages causés par l'impact (Weiguo Yi, 2012) , (Xingjian He, 2012). Une méthode de prédiction efficace est obtenue pour le problème de l'érosion par le sable dans le cas d'un transport de gaz monophasé avec du sable et d'un transport mixte gaz-liquide multiphasique, en particulier dans des conditions de rapport de transport gaz-liquide élevé (Homicz, 2004).

$$ER = C(HB)^{-0.59} F_s v_p^n F(\alpha) \quad (3.6)$$

Où

ER Est le taux d'érosion

C Est la constante du matériau

HB Est la dureté Brinell du matériau

$F_s$  Est le coefficient de forme des particules,  $n$  est l'indice de vitesse

$V_p$  Est la vitesse de collision des particules solides

$F(\alpha)$  Est une fonction de l'angle de collision des particules solides (Yaxin Shen) , (Agrawal M, 2015)

### 3.4.4. Modèle Oka

En 1997, Oka et Yoshida (*Yoshida, 2005*) et Oka et Ocamura (*Ocamura, 2005*) ont proposé un modèle semi-empirique pour l'évaluation de l'érosion en considérant les propriétés de dureté des matériaux analysés. Les auteurs ont déclaré que leur modèle, donné par l'ensemble des équations (3.7) à (3.9), pouvait être appliqué à n'importe quel matériau (*Ruben Cuamatzi-Mele ´ndez, 2017*).

$$E(\alpha) = g(\alpha)E_{90} \quad (3.7)$$

Où

$$g(\alpha) = (\sin \alpha)^{n_1} (1 + Hv(1 - \sin \alpha))^{n_2} \quad (3.8)$$

$$E_{90} = k(Hv)^{k_1}(v)^{k_2}(D)^{k_3} \quad (3.9)$$

Où  $D$  est le diamètre interne de la canalisation,  $Hv$  est la propriété de dureté de l'acier.  $n_1$ ,  $n_2$ ,  $K$ ,  $k_1$ ,  $k_2$  et  $k_3$  sont les constantes du modèle. Oka et Yoshida (*Yoshida, 2005*) et Oka et Ocamura (*Ocamura, 2005*) ont mesuré le taux d'érosion causé par des particules de sable de différentes duretés. Le modèle d'érosion a été normalisé à un angle d'impact des particules égal à 90, et il a été constaté que la dureté des tuyaux et l'angle d'impact influençaient le taux d'érosion (*Ruben Cuamatzi-Mele ´ndez, 2017*)

Les coefficients donnés par les équations (3.10) à (3.12) complètent le modèle d'Oka

$$n_1 = S_1(Hv)q_1 \quad (3.10)$$

$$n_2 = S_2(Hv)q_2 \quad (3.11)$$

$$k_2 = 2.3(Hv)^{0.038} \quad (3.12)$$

Où

$q_1$ ,  $q_2$ ,  $S_1$  et  $S_2$  sont les constantes du modèle. (tableau 3.1)

Pour les aciers au carbone, Oka et Yoshida (*Yoshida, 2005*) et Oka et Ocamura (*Ocamura, 2005*) ont proposé les valeurs indiquées dans le tableau 3.1

Ces paramètres ont été ajustés aux données expérimentales données, mais pour des diamètres de canalisation plus petits. (*Ruben Cuamatzi-Mele ´ndez, 2017*)

**Tableau 3 1 :** Exposant pour les équations du modèle d'Oka (*Ruben Cuamatzi-Meleández, 2017*).

$k$	$k_1$	$k_2$	K	$S_1$	$q_1$	$S_2$	$q_2$	$n_1$	$n_2$
-0.12	2.31599	0.19	65	0.717	0.145	2.57	-0.931	0.72835	2.02199

### 3.5. Comparaison entre le modèle Oka et E/CRC

Le tableau 3.2 montre le taux d'érosion maximal dans un coude lorsque les particules de sable s'écoulent dans un gaz mixte en utilisant les deux modèles avec différentes vitesses. Ces résultats ont été reportés sur des graphiques linéaires et à barres pour montrer la variation du taux d'érosion maximal en fonction des vitesses. Cela peut être vu dans les figures 3.10 et 3.11 (*Abdulla, 2011*).

**Tableau 3 2 :** La CFD a prédit le taux d'érosion maximal pour le mélange gaz-sable en utilisant les modèles d'Oka et al. et E/CRC sur un coude entier de 90 degrés. (*Abdulla, 2011*)

	Fluide	Vitesse (m/s)	Fraction du volume de sable (%)	Taux d'érosion maximal prédit en utilisant la CFD (STAR-CCM+)(kg/m <sup>2</sup> —s)	
				Oka	E/CRC
1	Gaz mixte	12	0.00026	$7.70118 \cdot 10^{-8}$	$5.22432 \cdot 10^{-7}$
2	Gaz mixte	19	0.00051	$1.98286 \cdot 10^{-6}$	$4.40885 \cdot 10^{-6}$
3	Gaz mixte	28	0.00061	$2.37042 \cdot 10^{-5}$	$1.85034 \cdot 10^{-5}$

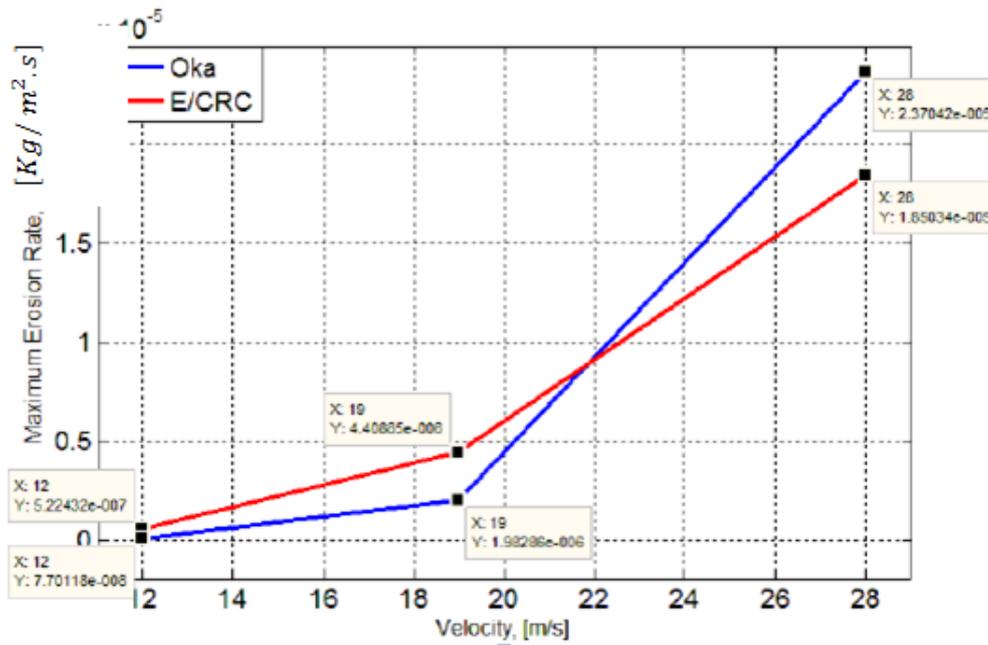


Figure 3- 10 : Variation du taux d'érosion maximal en fonction de la vitesse pour un mélange gaz-sable sur le coude entier (Abdulla, 2011)

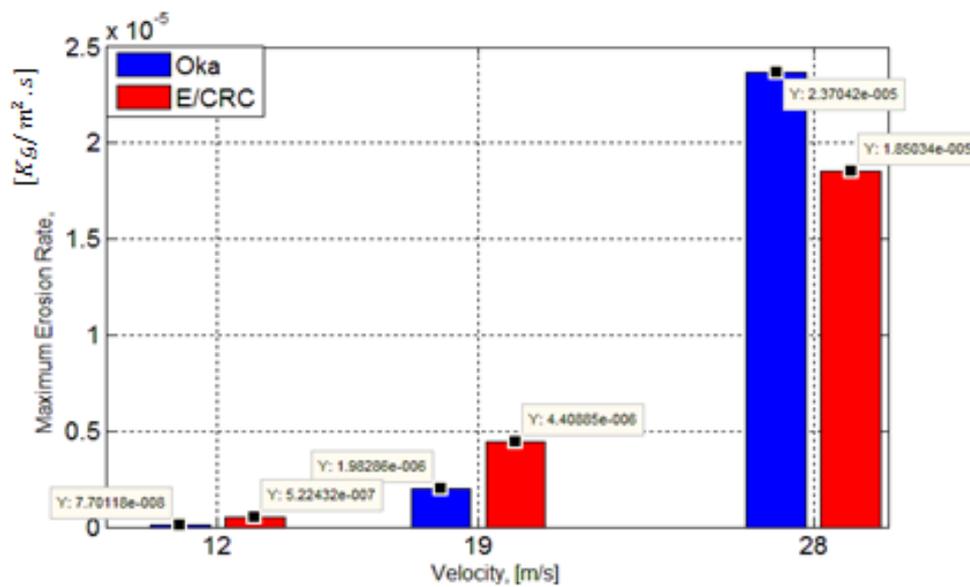
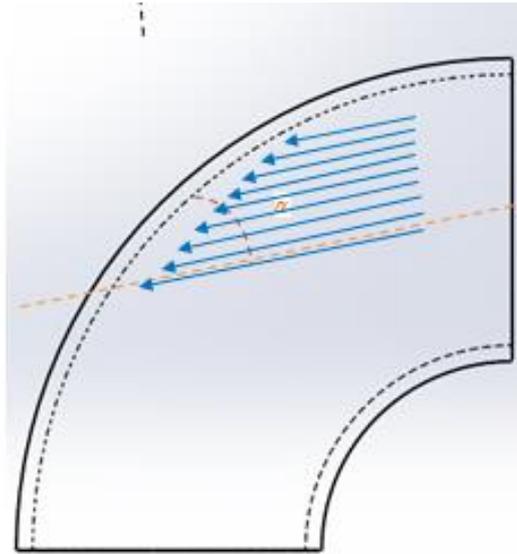


Figure 3- 11 : Variation du taux d'érosion maximum en fonction de la vitesse pour le mélange gaz-sable sur le coude entier. (Abdulla, 2011)

### 3.6. Modèle réel :

La dynamique des particules individuelles avec et/ou dans un fluide est utilisée pour développer des modèles d'érosion. Des relations empiriques et statistiques sont souvent élaborées à partir des estimations et des essais expérimentaux, ces modèles sont étudiés pour une validation bien ciblée dans le but d'obtenir des résultats significatifs.

Le modèle d'érosion de notre étude est présenté par la suite (Figure 3-12 ;Figure 4-1).



**Figure 3- 12 :** Modèle d'impacte dans un coude 90°

**Conclusion 03**

Après avoir discuté toutes les généralités dans les chapitres précédents, On a:

- Etudié des modèles analytiques de l'érosion 'Finnie, DNV.....'
- Fait allusion au modèle sur lequel on va travailler dans la simulation



## 4. Chapitre 04 : Modèle de Calcul / Modélisation

### Introduction

Le rapport d'érosion est défini comme la perte de masse de la paroi interne du tuyau causée par l'érosion par rapport à la masse de la particule impactant la paroi. La plupart des équations de prédiction de l'érosion sont empiriques et sont basées sur des données expérimentales pour des particules solides dans un écoulement continu (gaz ou liquide). Il est bien connu que la vitesse d'impact de la particule et l'angle d'impact de la particule sont les principales variables affectant le mécanisme d'érosion (Comme mentionné précédemment dans ...).

## 4.1. Méthodologie

### 4.1.1. Choix du Modèle

Le présent modèle de prédiction a été établi dans le logiciel *COMSOL Multiphysics* 5.4. Pour le modèle géométrique, cette géométrie compose de deux sections de pipe cylindriques droites, d'une longueur de  $0,5[m]$  et d'un diamètre de  $3 \times 10^{-1}[m]$ , et un coude à  $90^\circ$  avec un rayon de courbure de  $3 \times 10^{-1}[m]$ , comme le montre la figure 1. Le coude relie deux sections droites. L'eau est le fluide transporté à l'intérieur de la conduite comme fluide de transport, et le pipe transporte également des particules solides à un débit de  $0,6 [Kg/h]$  les particules ont une taille de  $1,5 \times 10^{-4}[m]$ . Dans la canalisation, considérons que l'eau remplit toute la canalisation en tant que phase continue, et les particules polluantes sont considérés uniformément réparties dans ce fluide (l'eau) en phase liquide en tant que phase dispersée. Ici, l'eau transportée est traitée comme un fluide incompressible et les particules polluantes comme des particules solides uniformes et indéformables.

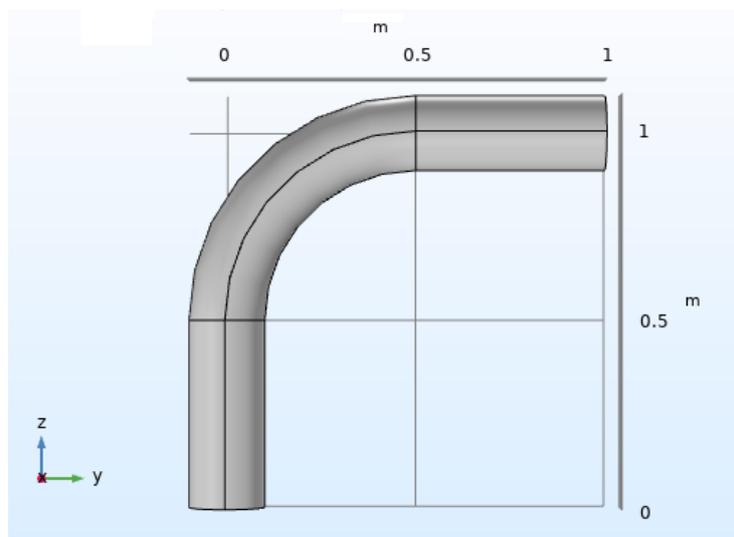


Figure 4- 1 : Modèle de coude

Dans le processus d'établissement du modèle, le coude établi est un modèle symétrique sur le plan de travail ( $xy$ ). Le calcul est simplifié en modélisant la moitié du tuyau. Selon les paramètres sélectionnés par le modèle et par rapport à des études et expériences préalables, sachant que le tuyau est utilisé pour transporter l'eau à température ambiante avec une vitesse maximale (précisément au niveau du coude) de  $20[m/s]$  dans le but de traiter le phénomène d'une manière qui se rapproche à la réalité, donc dans ce cas le nombre de Reynolds est  $R_e = 5.7 * 10^6$ . Dans ce travail le régime d'écoulement traité est turbulent (au niveau du coude) car le nombre de Reynolds élevé  $R_e = 5.7 * 10^6$  ainsi que le diamètre et le rayon de courbure de la conduite exigeait le modèle de turbulence au niveau de la paroi (la zone étudiée).

Où :

Le modèle de turbulence *TURBULENT FLOW,  $K-\omega$  (SPF)* dans le code de calcul *COMSOL Multiphysics* est un type de modèle à deux équations permettant de prédire le comportement de l'écoulement turbulent. C'est l'un des modèles les plus populaires sa raison de simplification des écoulements turbulents.

### 4.1.2. Utilisation de COMSOL Multiphysics

COMSOL Multiphysics est un logiciel de simulation numérique basé sur la méthode des éléments finis. Ce logiciel permet de simuler de nombreuses physiques et applications en ingénierie, et tout particulièrement les phénomènes couplés ou simulation multi-physiques (Roger, 2011).

L'utilisateur définit ses couplages ou sélectionne les interfaces prédéfinies. Les différentes étapes du processus de modélisation - définir la géométrie, les propriétés matériaux, le maillage, choisir la ou les physiques, résoudre et afficher les résultats - sont intégrées dans une seule interface. Des modules d'applications optionnels offrent des interfaces spécialisées notamment en mécanique linéaire et non linéaire, acoustique, écoulement, transfert de chaleur, génie chimique, géophysique, électromagnétisme basse et haute fréquence, corrosion, plasma, suivi de particules, optimisation, MEMS, ainsi qu'avec les logiciels de CAO et Matlab (Roger, 2011).

Ce logiciel est multiplateforme (Windows, Mac, Linux). En plus des physiques précitées, COMSOL Multiphysics autorise l'utilisateur à définir ses propres systèmes d'équations aux dérivées partielles (EDP), soit sous forme différentielle, soit sous formulation faible. Les couplages avec des équations aux dérivées ordinaires (EDO) et des équations algèbro-différentiels (EAD) sont également possibles (Roger, 2011).

### 4.1.3. Simulations

#### 4.1.3.1. Préparation du Model

Aujourd'hui, grâce au développement important, des moyens informatiques de calculs et des simulateurs numérique, l'étude de l'érosion devient envisageable, dont le niveau de complexité est lié à la réalité du phénomène et la nature des résultats souhaités. Leur principale difficulté réside dans la modélisation des interactions entre un fluide et une structure, dans le cas d'un régime dynamique rapide et transitoire. La connaissance du comportement structural du corps n'apparaît plus comme un obstacle. Actuellement les codes de calculs permettent des simulations très précises comme la dégradation des matériaux pouvant inclure des ruptures complexes. De même, la modélisation des écoulements de fluide atteint des niveaux de précision élevés. Il reste à modéliser l'influence d'un milieu sur l'autre.

Les phénomènes physiques à prendre en compte sont complexes par leur aspect transitoire (même turbulent) non linéaire, la présence de deux phases différentes, le couplage

entre le fluide et la surface solide passant par des particules solides ainsi que la forme de la structure. De ce fait, il a été nécessaire de procéder par étapes.

L'objet de cette étude, qui s'attache à la prévision du comportement des trois milieux (fluide- solide-solide) dans un évènement d'impact et le calcul de la vitesse de l'écoulement du fluide et la vitesse d'impact des particules ainsi que la vitesse d'érosion d'un corps solide. La méthode numérique choisie doit donc privilégier la modélisation de couplage entre deux jusqu'à trois domaines différents, car seule la sollicitation de la paroi de la canalisation est essentielle. Pour cette raison, une approche de type élément finis explicite, développée pour l'étude de ce phénomène d'interaction fluide structure, et à travers le code de calcul *COMSOL Multiphysics*, et à travers le module de modélisation dynamique du fluide (CFD) inclut dans le même code et illustré dans l'*ANNEXE 02*.

#### **4.1.3.2. Démarche de la Modélisation**

La présente phase dans cette étude décrit les démarches de modélisation dans ses grandes lignes, et l'illustre par différentes applications dans la figure (4.2) de l'impact des particules sur une surface solide par l'intermédiaire de l'eau. Nous utilisons dans l'interface multi physique le module *Fluid-Structure Interaction* du logiciel de calcul par éléments finis, *COMSOL Multiphysics*(Version 5.4.0.388) qui permet de simuler des écoulements des fluides, cela rapproche les deux milieux réels de la simulation fluide / solide dans un modèle de calcul. L'interaction entre un fluide et un solide peut se produire dans certaines conditions, telles que l'instant de rencontre des deux milieux, comme il est nécessaire de déterminer la surface de la frontière des deux domaines d'étude.

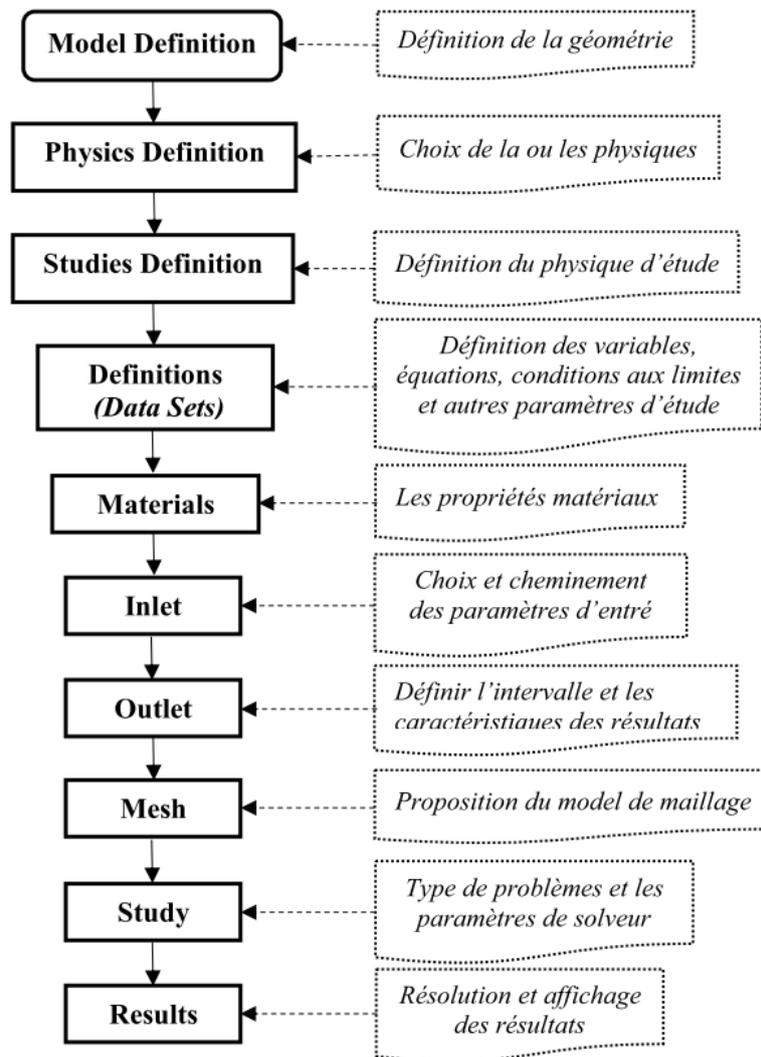
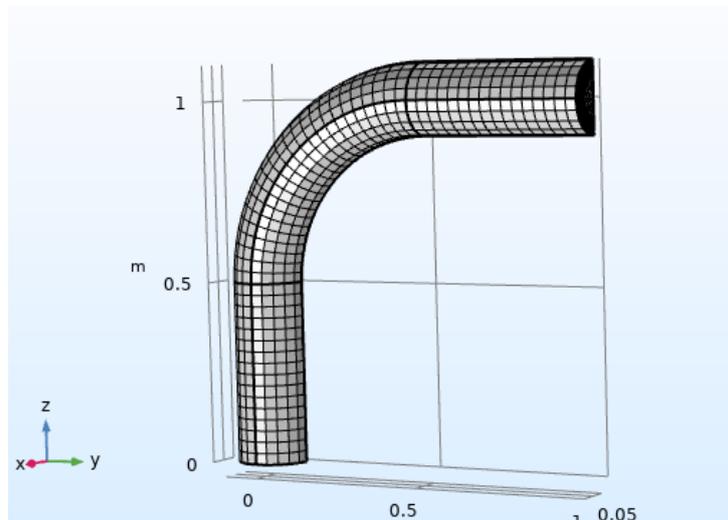


Figure 4- 2 : Démarches de modélisation

#### 4.1.3.3. Description du Maillage

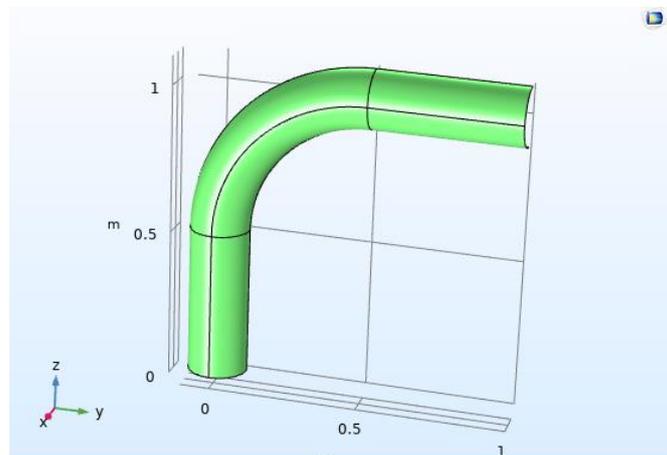
Pour la division de la grille (Figure4.3), la grille structurée est adoptée pour réduire le coût de calcul du modèle (environ 17m34s). La grille de couche limite est utilisée pour assurer la résolution complète des écoulements près de la paroi supérieure du coude. Le maillage de surface de la pipe coudée adopte un maillage non structuré sous forme de subdivision automatique (choix de la physique). Deux types de grilles bidimensionnelles, triangulaires et quadrilatérales, sont principalement utilisés pour le traitement correspondant. La grille contient 24027 unités de domaine, 6647 unités de frontière, comme le montre la figure 4.3. L'objectif de la fixation de la tolérance relative à  $1e-3$  est de réduire le temps de calcul.



**Figure 4- 3 :**maillage générer

#### 4.1.3.4. Conditions aux Limites

Puisque l'écoulement du fluide et les particules solides ont la même trajectoire et à une vitesse identique recommandée par la physique du phénomène (discuté précédemment) à l'intérieur du pipeline qui est proposé comme élément fixe de notre simulation et à partir du moment où tout le domaine est parfaitement symétrique, on peut ne considérer qu'un demi-pipe. Par conséquent l'axe  $Y = 0$  sera considéré comme un axe de symétrie (Figure 4.3, 4.4, 5.1, 5.2, 5.3 et 5.4).



**Figure 4- 4 :** Modèle pipeline parfaitement symétrique

Pour les différentes caractéristiques du modèle, on utilise le choix d'une géométrie (pipe et particules) indéformable dont les parois correspondent à une loi élastique, alors que pour le fluide (l'eau) et incompressible ou faiblement compressible. Les caractéristiques de tous les domaines d'étude sont illustrées dans l'ANNEXE 01. On utilise une condition d'interaction entre les domaines qui sont intégrés dans l'interface *Fluid-Structure Interaction*. Pour l'axe  $X$

et  $Z$  et à l'axe  $Y$  constant, une condition de symétrie peut être utilisée (Figure 4.3 , 4.4 , 5.1 , 5.2 , 5.3 et 5.4).

. L'écoulement dans le pipe est soumise à des conditions de mouvement libre turbulent, tel que la condition *Free Deformation*, qui prend en compte l'effet d'une profondeur bien définie et la condition *TURBULENTFLOW, K- $\omega$  (SPF)* (Roger, 2011) au niveau du coude pendant la rencontre entre la structure et le fluide.

Dans ce modèle d'étude le mouvement du fluide est décrit par les équations incompressibles de Navier-Stokes (Annexe 03) pour le champ de vitesse,  $u = (u, v)$ , et la pression,  $p$ , dans le système de coordonnées 2D/3D en mouvement.

La partie mécanique de la structure du modèle ne nécessite pas la méthode ALE. *COMSOL Multiphysics* le résout dans un système de coordonnées fixe. Cependant, les mouvements que le modèle calcule de cette manière sont au niveau de la phase fluide et les particules solides.

**Conclusion 04**

Dans ce chapitre nous avons essayé de s'approcher du phénomène avec un exemple d'application.

La modélisation comporte 3 parties :

- Choix du modèle.
- Utilisations COMSOL Multiphysics.
- Étude de simulation en suivant les démarches.

Les résultats seront discutés dans le chapitre suivant.



## 5. Chapitre 05 Résultats et Interprétations

### Introduction

Différentes études ont été réalisées pour améliorer le calcul du taux d'érosion en fonction de la vitesse du fluide.

La réaction d'une structure à un chargement dynamique répétitif provoqué par les particules solides varie d'une situation à l'autre.

Dans cette partie nous présenterons des résultats numériques, obtenus par la simulation sur *COMSOL* du modèle choisit dans la partie précédente.

## 5.1. Objectif

Comme introduit plus tôt, l'érosion est un problème majeur auquel sont soumis des structures en général et les canalisations en particulier, tels que les tuyauteries et les pipelines, qui ont une importance majeure dans les transports des fluides. La réaction d'une structure à un chargement dynamique répétitif provoqué par les particules solides varie d'une situation à l'autre.

Notre choix du modèle sera effectué sur les différents principes des paragraphes précédents. Cela veut dire que la structure qui représente le domaine de simulation est celle qui est introduite dans le chapitre (04) aux paragraphes (4.1.1. et 4.1.3.1.).

Dans ce travail l'objectif de notre simulation est basé sur différentes validations, comme suit :

- 1er-Évaluation de la vitesse du fluide et des particules solides dans le coude du pipe ;
- 2e- Évaluation de la distribution de pression dans le coude du pipe ;
- 3e- Trajectoires des particules.
- 4e- Taux d'usure érosive des parois des canalisations,

## 5.2. Analyse des Résultats de la Simulation

### 5.2.1. Évaluation de la vitesse du fluide et des particules solides

#### Résultats

Lorsque le fluide entre dans la section droite, sa vitesse en position centrale est maximale. Lorsque le fluide traverse la position du coude de la conduite, la direction de l'écoulement du fluide change, et le diagramme d'écoulement des vitesses du coude est illustré à la figure 5.1. Combiné avec le profil de vitesse, on peut voir que la distribution de la vitesse change en conséquence, comme le montre la figure 5.1. Lorsque la première section droite du tuyau entre dans la position du coude, la vitesse à l'intérieur du tuyau est plus importante. Avec la poursuite de l'écoulement du fluide, le fluide à l'intérieur du tuyau présente un certain phénomène de séparation. La direction de l'écoulement change lorsque la position du coude entre dans la deuxième section de tuyau droit. Dans le même temps, la distribution de la vitesse d'écoulement est modifiée par la force centrifuge et la gravité. À

ce stade, la vitesse à l'extérieur du tuyau est plus importante, tandis que la vitesse à l'intérieur est plus faible.

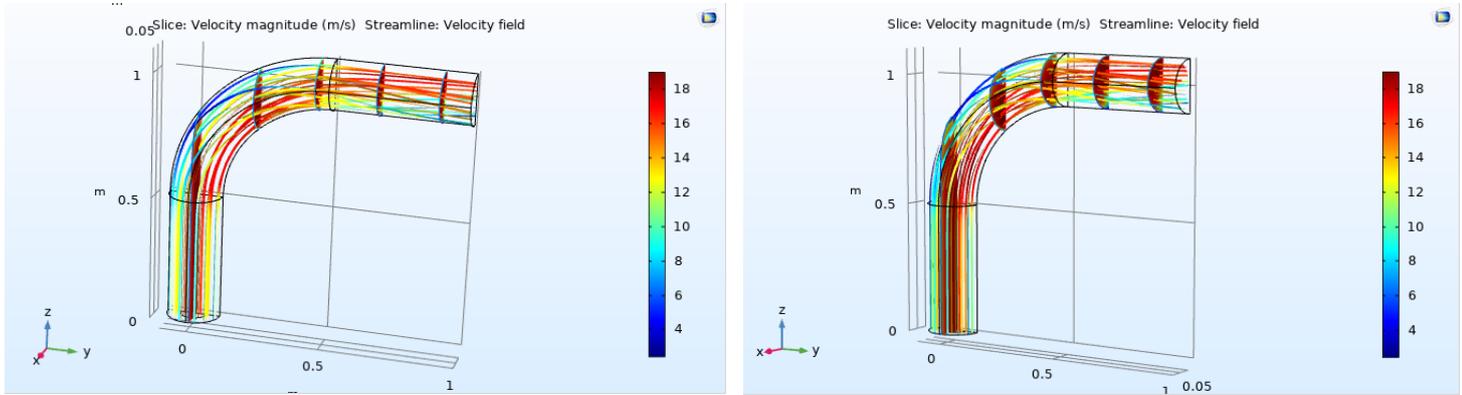


Figure 5- 1 : La vitesse du fluide et des particules

### 5.2.2. Évaluation de la distribution de pression dans le coude du pipe

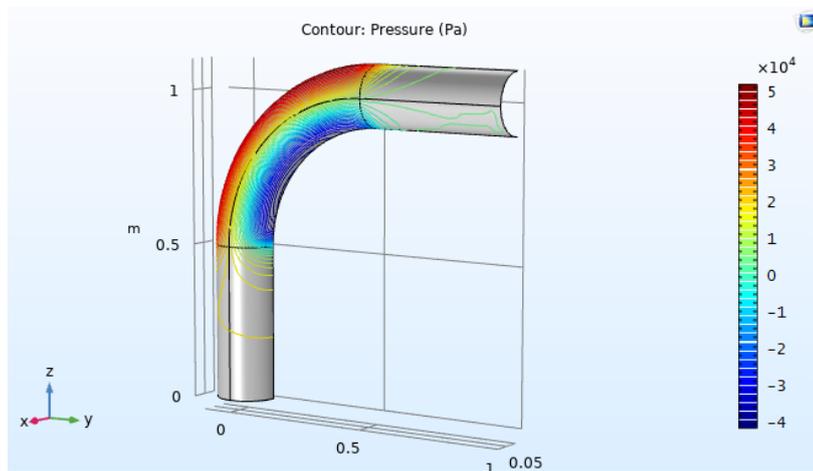


Figure 5- 2 : Distribution de la pression dans le coude du pipe

D'après la distribution de la pression, on constate qu'au niveau du coude, la pression à l'extérieur du tuyau est supérieure à celle de l'intérieur. Ceci est dû au fait que la plupart des fluides changent de direction sous l'effet de la force centrifuge. La pression sur la paroi extérieure est plus grande que celle sur la paroi intérieure en raison de l'érosion provoquée par les particules solides qui sont entraînées par le fluide. On peut voir sur l'image que la

pression intérieure est négative et que la pression de la position du coude augmente de l'intérieur vers l'extérieur, comme le montre la figure 5.2.

### 5.2.3. Trajectoires des particules

L'expression de la couleur est l'angle d'incidence aigu, mesuré à partir de la normale à la surface.

Les trajectoires des particules polluantes dans le fluide ont été suivies et analysées, et l'étendue de l'érosion sur le coude du tuyau a été comparée sous différentes vitesses d'entrée. Dans cet article, 2m/s, 4m/s, 6m/s, 8m/s, 10m/s, 12m/s, 15m/s, 18m/s et 20m/s sont respectivement la vitesse d'entrée du coude comme variable indépendante pour la simulation de l'érosion, comme le montre la figure 5.3.

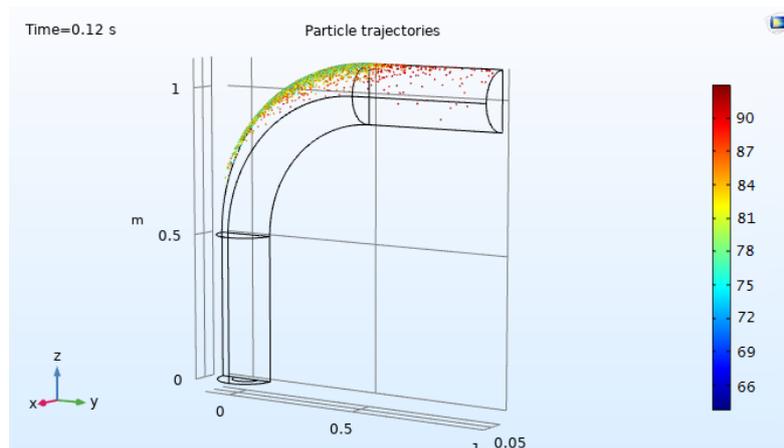
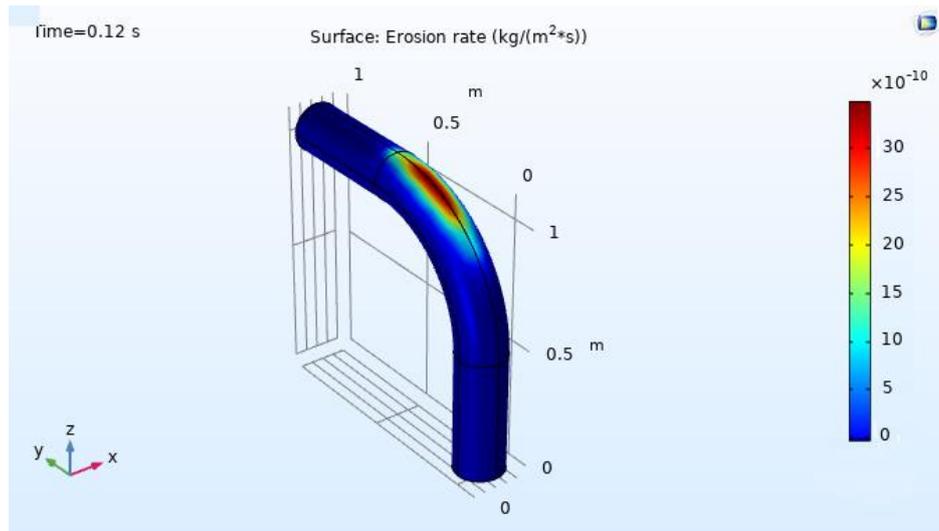


Figure 5- 3 : Trajectoire des particules

### 5.2.4. Taux d'usure érosive des parois des canalisations

Le modèle d'érosion présenté dans cette étude, a été utilisé pour simuler le taux d'usure par érosion sur la paroi du tuyau incurvé. La vitesse d'entrée a été fixée à 20 [m/s] et les résultats de la simulation sont présentés dans la figure 5. 4.



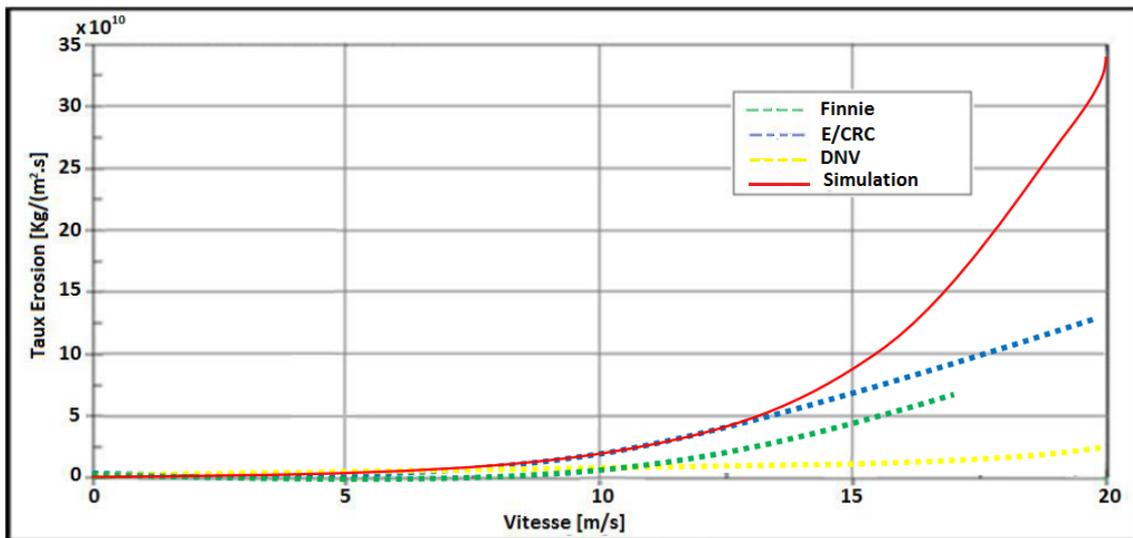
**Figure 5- 4 :** Surface érodée

D'après l'analyse comparative entre le modèle proposé de la simulation dans ce travail et d'autre analytique présenté dans le chapitre 03, paragraphe 3.4, les taux d'usure par érosion maximums des modèles d'érosion sont comme suite :

**Tableau 5- 1 :** Comparaison des modèles

Modèle	Taux d'usure par érosion [kg/(m <sup>2</sup> .s)]	
<b>Finnie</b>	$6,13 \times 10^{-10}$	
<b>DNV</b>	$1,91 \times 10^{-10}$	
<b>E/CRC</b>	$9,03 \times 10^{-11}$	
<b>Simulation</b>	$34,48 \times 10^{-10}$	

La comparaison montre que le modèle E/CRC présente le taux d'érosion maximal le plus faible par rapport aux autres, par contre le taux d'érosion maximal le plus fort est apparue dans le model proposé à la simulation.



**Figure 5- 5 :** Tendence de changement du taux d'érosion à différentes vitesses d'entrée.

Le taux d'érosion à la position du coude est analysé en fonction du graphique de la tendance de changement du taux d'érosion.

Plus la vitesse d'entrée est élevée, plus le taux d'érosion est élevé. Lorsque la vitesse d'entrée est comprise entre 2m/s et 10m/s, le taux d'érosion au niveau du coude du pipeline augmente lentement. Cependant, lorsque la vitesse d'entrée est comprise entre 10m/s et 20m/s, le taux d'érosion augmente de manière significative.

Les particules polluantes sont transportées dans la canalisation par le fluide. Dans la section droite du tuyau, les particules peuvent être considérées comme uniformément réparties dans la phase continue comme la phase dispersée (discuté précédemment). À ce moment, la stabilité du fluide est bonne et l'angle d'incidence des particules polluantes est plus important. Au niveau du coude du tuyau, l'extérieur du tuyau crée une résistance à la direction de l'écoulement du fluide, ce qui entraîne un changement de direction de l'écoulement. L'incidence des particules polluantes dans la position du coude de l'angle aigu est plus faible, ce qui entraîne une érosion par coupure de la canalisation.

En comparant le processus de mouvement des particules polluantes dans le coude avec différentes vitesses d'entrée, le changement de l'angle aigu incident est obtenu. Avec l'augmentation de la vitesse d'entrée, l'angle aigu incident des particules augmente, mais l'amplitude du changement est faible et toujours inférieure à l'angle aigu incident du segment de tuyau droit.

**Conclusion 05 :**

Les structures des pipelines de transport sont sollicitées par l'érosion. Pour voir les résultats de ce phénomène nous avons évalué :

- La vitesse du fluide et des particules solides.
- La pression dans le coude du pipe.
- Trajectoires des particules.
- Taux d'usure érosive sur les parois.

### Conclusion Générale

Notre projet de fin d'étude nous a permis de nous confronter pour la première fois à un problème du monde réel avec le bagage académique dont nous disposons.

La thématique de mon thème est ' l'effet des particules polluantes sur l'érosion des tuyaux notre travail consiste en la conception d'un modèle réel du problème recherché de conditions optimal du fonctionnement.

Pour mener bien ce projet, il a fallu maîtriser et comprendre de nouvelles notions. Au-delà de la connaissance de ces données, on a essayé de faire une simulation sur un modèle choisis par nous-mêmes afin d'obtenir un résultat qui traduit la réalité.

Le logiciel *COMSOL Multiphysics* est un logiciel de simulation numérique basé sur la méthode des éléments finis. Il nous a ouvert la porte pour faire notre simulation sur le modèle 'coude de 90°' traversée par l'eau.

Nous avons abouti à faire une comparaison du modèle réel avec des modèles analytiques 'Finnie ,DNV,E/CRC'.

En comparant le processus de mouvement des particules polluantes dans le coude avec différentes vitesses d'entrée, le changement de l'angle aigu incident est obtenu. Avec l'augmentation de la vitesse d'entrée, l'angle aigu incident des particules augmente, mais l'amplitude du changement est faible et toujours inférieure à l'angle aigu incident du segment de tuyau droit.

## Perspective :

---

### Perspective

- 1- Élargir le champ d'utilisation des modèles proposés dans cette études vers des modèles de géométrie complexes, pour une validation plus précise.
- 2- Augmenter la fraction volumique du sable (%), pour voir l'effet d'une concentration élevée de particules sur le taux d'érosion.
- 3- Varier tous les autres paramètres tels que le diamètre de la particule, la forme de la particule, le matériau du pipe et les propriétés du matériau pour évaluer le comportement de l'érosion.

## **Bibliographie**

**(DNV), Det Norske Veritas. 1996.** Erosive wear in piping systems. Recommended Practice RP-O501, Norway. 1996.

**Abdulla, Akar. 2011.** Estimating Erosion in Oil and Gas Pipeline Due to Sand Presence. Karlskrona sweden : s.n., 2011.

**Agrawal M, Srinivasan V, et al. 2015.** CFD simulation of sand particle erosion in gas dominant multiphase flow[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 27: 706-718. 2015.

**ASME. 2010.** ASME for pressure piping ,Gas transmission and distribution piping systems. 2010. B31.8.

**Batchelor, G.W.Stachowiak and A.W. 1993.** Engineering Tribology. Amesterdam : s.n., 1993.

**Benhammouda, Riadh. 2008.** NOTIONS DE MECANIQUE DES FLUIDES. 2008.

**Caihong Du, Jianfei Song, Yaodong Wei, Mingxian Shi. 2007.** Experimental Measurement and Numerical Simulation of Flow Field in 180 ° Rectangular Pipe Bend [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, (12): 3033-3035. 2007.

**CEPA.** canadian energy association pipeline.

Creep Définition - what does creep mean ? **Trenchlesspedia. 31/01/2018.**  
31/01/2018.

**DDCoatings. 9 septembre 2019.** Corrosion des pipelines . 9 septembre 2019.

**Dezhi.Z. 2018.** Powder Technology. s.l. : L.-S. Fan, 2018.

**Engineering, KELN. 1999.** Traitement et solution. houston : s.n., 1999.

**Fei Yu, Ming Liu, Ting Wang, Xuelian Yang, Junjie Yan. 2015.** Study on Gas-Solid Two-Phase Flow and Wear Characteristics of Pipe Wall in Elbow [J]. Journal of Engineering Thermo Physics, 2015,36 (04): 796-800. 2015.

**Feilong Liao, Jiong Liu, Yonglin Zhou, Xiao Zhao, Fu Wan, Zhaoming Zhou. 2016.** Numerical Simulation Of Pipeline Elbow and optimization of Elbow Thickness Distribution Based On CFD Software . 2016.

**Finnie, I. 1960.** Erosion of surfaces by solid particles. 1960.

**Fujisawa, Kei Fujisawa Takayuki Yamagata Nobuyuki. 15 avril 2018.** Érosion par impact de gouttelettes de liquide sur la rugosité de la rainure. 15 avril 2018.

**Gulf, Brannan. 2005.** Règles de base pour ingenieurs chimistes . 2005.

## Bibliographie :

---

**Homicz, G.F. 2004.** Computational Fluid Dynamic Simulations of Pipe Elbow Flow, SAND REPORT, SAND2004-3467, Sandia National Laboratories. 2004.

How Kelm Conducts Piping Fatigue Analysis. **Engineering, KELN. 1999.** houston : s.n., 1999, Engineering, KELN.

Industrial pipe repair. **ELMAZI, SHUKRI. 29/04/2020.** 29/04/2020, WWD.

**K. Haugen, O. Kvernfold, A. Ronald. R\_ Sandberg. 1995.** Sand erosion of wear-resistant materials: erosion in choke valves. 1995.

**Kennedy, John L. 1993.** (fossil energy) oil and gas pipeline fundamentals. s.l. : PennWell Books , 1993.

**Kenneth.A. 2011.** Fatigue strength improvement methods. Fracture and Fatigue of Welded Joints and Structures. 2011.

**Kuang Ding, Hongwu Zhu, Jianhua Zhang, Junyao Zhu, Xuan Luo. 2013.** Erosion and Wear Analysis of Liquid-solid Two-phase Flow Solid Particles in Right-angle Curved Pipe [J]. Oil and Gas Storage and Transportation,32 (03): 241-246. 2013.

**Kusmono.k. 2017.** Analysis of a failed pipe elbow in geothermal production facility. Case Studies in Engineering Failure Analysis. 2017.

**LALLEMAND, André. 2000.** Écoulement des fluides - Dynamique des fluides réels. 2000.

**Menon, E.Shashi. 2015.** Transmission Pipeline Calculations and Simulations Manual. 2015.

**Midoux. 1993.** Mécanique et Rhéologies des fluides en Génie Chimique textes et docs. 1993.

**Nayyar, Mohinder. 2000.** piping. s.l. : McGraw-hill, 2000.

**Ocamura, K Oka YI and. 2005.** Practical estimation of erosion damage caused by solid particle impact. Part 1: Effects of impact parameters on a predictive equation. Wear 259: 95–101. 2005.

Piping fatigue analysis. **KELN Engineering. 1999.** houston : s.n., 1999, KELM Engineering.

**R.1.K. Wood a., Y. Puget b, K.R. Tretheweyb, K. Stokes. 1998.** The Performance of Marine coatings and pipe materials under fluid-borne sand erosion. 1998.

**Rocdacier. 2017.** Role et fonctions de la tuyauterie. 2017.

**Roger, W. P. 2011.** "Multiphysics Modeling (using) Comsol. A first principles approach". Copyright 2011 by Jones and Bartlett Publishers, LLC. 2011.

## Bibliographie :

---

**Ruben Cuamatzi-Mele´ndez, MA Hernandez Rojo, AO Va´zquez-Herna´ndez and Francisco L Silva-Gonza´lez. 2017.** Predicting erosion in wet gas pipelines/elbows by mathematical formulations and computational fluid dynamics modeling. 2017.

**Thangavel.S. 2020.** Review analysis on cloud computing based smart grid technology in the oil pipeline sensor network system. 2020.

The Importance of Piping Engineering and Piping Engineers. **RSNECC, La société. 2015.** 2015, media-center.

Tout savoir sur l'Hydrogène. **ifp Energies nouvelles.**

**Trenchlesspedia. 31 janvier 2018 .** creep. 31 janvier 2018 .

**Weiguo Yi, Qian Yang, Qunsong Li. 2012.** Numerical Simulation of Thin Particle Fluid Erosion on Curved Pipe [J]. Journal of Natural Science of Hunan Normal University, 35 (05): 56-59. 2012.

**Wikipidia.**

**William.P. 2016.** Numerical Analysis of Sand Particles Erosion in Pipeline. [auteur du livre] William Pao. 2016.

**Xiaoqin Song, Ling Liu, Songyang Luo, Peng Luo, Yanran Wang. 2008.** Study on Erosion and Wear Law of 90 ° Elbow of Natural Gas Gathering and Transportation Pipeline [J]. Lubrication and Sealing, 43 (08): 62-68. 2008.

**Xin Lu, Zongyu Chang, Lin Zhao, Zhongqiang Zheng, Xinglong Feng.** Analysis of Solid Particle Erosion Effect at elbow of Large Diameter Marine Gas Pipeline .

**Xingjian He, Xiang Li, Jun Li. 2012.** Numerical Simulation Study on Erosion Wear of T-bend Under Different Working Conditions [J]. Chemical Equipment & Pipelines, 52 (03): 69-72. 2012.

**Yaxin Shen, Huijun Zhao, Haoping Peng, Zhi Ci, Yawen Cheng, Jiayuan Zhang.** Erosion corrosion simulation of liquid-solid two-phase flow in 90° vertical pipe bend [J]. Corrosion and protection, 20, 41 (01) : 50-57.

**Yoshida, Oka T YI and. 2005.** Practical estimation of erosion damage caused by solid particle impact. Part 2: Mechanical properties of materials directly associated with erosion damage. Wear 264: 322–330. 2005.

**Zhor, Guelal. 20/06/2016.** Gaz naturel. Boumerdes : s.n., 20/06/2016.

Annexe :

ANNEXE

Annexe 01 caractéristique des différents domaines

Nature des Fluides

Tableau A- 1 : Nature des Fluides

Fluides	$\rho$ Masse volumique	$\mu$ Viscosité cinématique	Effets de la température		
			Solidification	Liquéfacti on	Vaporisati on
Eau	1000	$10.5 \cdot 10^{-7}$	0 C	-	10 0 C
Pétrole	900	$7.2 \cdot 10^{-7}$	-	-	-
G.N.L	464.8	$2.34 \cdot 10^{-7}$	-	-	- 160C

Tableau A- 2 : Rugosité des Matériaux Utilisés dans un Pipelines (Menon, 2015)

Nature matériaux	R Rugosité en (mm)
Cuivre plomb laiton	0.001-0.002
pvc	0.0015
Acier inox	0.015
Acier étiré	0.015
Acier soudé	0.045
Acier galvanisé	0.15
Fonte	0.26
béton	0.3-3

Tableau A- 3 : Caractéristiques particule de sable

NOM	DIAMÈTRE DES GRAINS
Sable grossier	> 2,00 mm à < 4,75 mm
Sable moyen	> 0,465 mm à < 2,00 mm
Sable fin	> 0,0625 mm à < 0,465 mm

Annexe 02 :

Modules Complémentaires pour *COMSOL Multiphysics*



- AC/DC Module
- Acoustics Module
- Batteries & Fuel Cells Module
- CAD Import Module
- CFD Module
- Chemical Reaction Engineering Module
- Corrosion Module
- ECAD Import Module
- Electrochemistry Module
- Electrodeposition Module
- Fatigue Module
- File Import for CATIA V5
- Geomechanics Module
- Heat Transfer Module
- LiveLink for AutoCAD
- LiveLink for Creo Parametric
- LiveLink for Excel
- LiveLink for Inventor
- LiveLink for MATLAB
- LiveLink for Pro/ENGINEER
- LiveLink for Solid Edge
- LiveLink for SolidWorks
- LiveLink for SpaceClaim
- Material Library
- MEMS Module
- Microfluidics Module
- Molecular Flow Module
- Multibody Dynamics Module
- Nonlinear Structural Materials Module
- Optimization Module
- Particle Tracing Module
- Pipe Flow Module
- Plasma Module
- RF Module
- Semiconductor Module
- Structural Mechanics Module
- Subsurface Flow Module
- Wave Optics Module

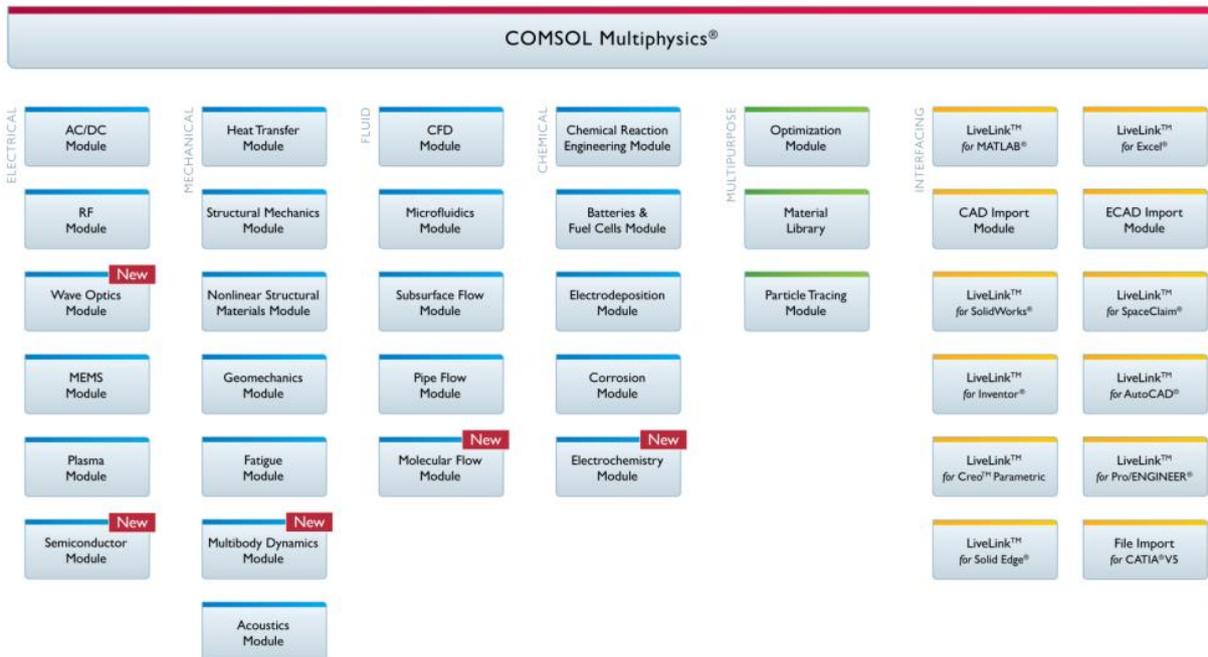


Figure A- 1 :Modules complémentaires de *COMSOL Multiphysics*

**Annexe 03 :**

**Équation de quantité de mouvement**

Le domaine D est une grandeur vectorielle.

D'après la loi fondamentale de la mécanique, les sources de quantité de mouvement sont les forces appliquées au système ; elles se divisent en deux catégories :

Les forces de surfaces, force sur S : champs de contour de surface, forces de pression.

Les forces de volume, représentés par un champ continu F (x,y,z,t).

$$\rho \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \rho \vec{V} \overrightarrow{\text{grad}} \vec{V} = \rho \vec{F} - \overrightarrow{\text{grad}} P + \mu (\Delta \vec{V} + \overrightarrow{\text{grad}}(\text{div} \vec{V})) \quad (1)$$

Pour un régime permanent et un fluide incompressible, les équations de **Navier-Stocks** sont données par :

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p^*}{\partial x} + \nu \Delta u \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p^*}{\partial y} + \nu \Delta v \quad (3)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p^*}{\partial z} + \nu \Delta w \quad (4)$$

u,v,w : composante de la vitesse  $\vec{V}$

$$p^* = p + \rho g z = \text{pression motrice} \quad (5)$$

Les équations (2), (3) et (4) sont appelées équation de Navier-Stokes, elles expriment la relation entre les différentes forces s'exerçant sur la particule fluide de masse unitaire. Ces forces sont : forces extérieures, pression normale et forces de viscosité.