



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي 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 : Génie Industrielle

Spécialité : Maintenance –Fiabilité–Qualité

Thème

Faisabilité d'isolation d'une section de pipeline

Présenté et soutenu publiquement par :

Nom LAZIZI **Prénom** Hasni

Nom KERKOUB **Prénom** Oussama

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
ABDI Ghezail	MCA	IMSI	Présidente
ADJELOUA Abdelaziz	MAA	IMSI	Encadreur
DERRAR Omar	MCB	USTO	Co-encadrant
ACHACHE Habib	MCB	IMSI	Examineur

Septembre 2021



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي 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 : Génie Industrielle

Spécialité : Maintenance –Fiabilité-Qualité

Thème

Faisabilité d'isolation d'une section de pipeline

Présenté et soutenu publiquement par :

Nom LAZIZI **Prénom** Hasni

Nom KERKOUB **Prénom** Oussama

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
ABDI Ghezail	MCA	IMSI	Présidente
ADJELOUA Abdelaziz	MAA	IMSI	Encadreur
DERRAR Omar	MCB	USTO	Co-encadrant
ACHACHE Habib	MCB	IMSI	Examineur

Septembre 2021

Résumé

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

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 nature ou du degré d'isolation obtenu dans différents cas et la vitesse de fluide ont été étudiées ainsi
Evaluation de distribution de température dans un pipeline.

Mots clés : simulation, numérique, pipeline, Isolation

Abstract

For this part of the production and processing system, more stringent requirements are put forward. In order to study the insulation of pipelines carrying fluids (such as oil ...),

The finite element model COMSOL Multiphysics advanced large-scale numerical simulation software) was used. Under the condition of different flow parameters, the nature or degree of insulation obtained in different cases and the fluid velocity were studied as well as the temperature distribution in a pipeline.

Key words : numerical simulation, pipeline, Isulation

Remercîments

Avant tout nous tenons à remercier Dieu tout puissant de nous avoir donner le courage, la volonté et la force pour réaliser ce travail.

Nous tenons à remercier Mr. Adjeloua Directeur de ce mémoire,

Pour avoir accepté de diriger ce travail,

Pour son accueil et son écoute tout au long de ce travail,

Pour le temps qu'il a accepté de nous consacrer pour nous conseiller dans le choix du sujet de Mémoire

Et aussi Mr. Derrar pour ses recommandations et ses explications inestimables et d'avoir répondu présent a tous moments pour nous, ainsi que son expérience personnelle.

Nous tenons aussi à remercier Messieurs les membres du jury qui ont eu l'amabilité d'accepter d'évaluer ce travail .Qu'ils trouvent ici l'expression de nos 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

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

Ma chère mère (Que Dieu ait pitié d'elle et fasse d'elle sa place au paradis) pour ton amour pour moi, pour les sacrifices que tu consens pour rendre tes enfants heureux.

Tu as enduré beaucoup de peine pour notre bien-être et à ma réussite.

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

A mes frères pour leurs encouragements permanents, et leur soutien moral

Kamel, Toufik, Yasser

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

Imene pour ton aide saches que tu es loin de mes yeux mais près de mon cœur

Hanene pour ta présence quotidienne à mes cotés

A toute ma famille pour leur adossement

A tous mes chers amis

Benzahia, Youcef, Zakaria, Anouar, Mohssine, Mehdi, Nadir, Oussama

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

Sommaire

Remerciements	i	
Dédicace	ii	
sommaire	v	
Liste des figures	ix	
Liste des tableaux	x	
Introduction générale	1	
CHAPITRE 1 : Technologie de Transport des Fluides par Canalisation		
1.1	introduction	3
1.2	Historique du transport par canalisation	4
1.3	Composantes d'un système de transport par pipeline	6
1.3.1	Ligne	7
1.3.2	Centre de Commandement	8
1.3.3	Station d'injection	8
1.3.4	station compression/pompage	8
1.3.5	postes de livraison	9
1.3.6	postes de sectionnement	10
1.3.7	postes de détente	10
1.3.8	stations d'Arrivé	11
1.4	types et nature des fluides transportes	11
1.4.1	gaz naturel ou combustible	12
1.4.2	Hydrocarbures Liquides	12
1.4.3	Eau Douce	12
1.4.4	Eau Salée ou Saumâtre	12
1.4.5	Oxygène	12
1.4.6	Ethylène	12
1.4.7	Hydrogène	13
1.5	Types et matériaux utilisés	13
1.5.1	Pipeline en Acier	13
1.5.2	Pipeline en Fonte	14
1.5.3	pipeline en plastique	15
1.5.4	pipeline en Béton	15
1.5.5	pipeline en composite	16
1.6	Mécanique des Fluides Appliquée au Pipeline	16
1.6.1	Régimes d'écoulement	17
1.6.2	Ecoulement laminaire	17
1.6.3	Nombre de Reynolds	17
1.7	Réglementation du Transport par Pipeline	18
1.7.1	Régimes Juridiques de Transport	18
1.7.2	Réglementation de Sécurité pour le Transporteur	19
1.7.3	Réglementation sur les Travaux de Tiers	19
	Conclusion	20

CHAPITRE 2 : Isolation et Echange de Chaleur dans une		
Canalisation		
2.1	introduction	21
2.2	Définition et Schématisation d'un Système d'Isolation	22
2.3	Rôle des Systèmes d'Isolation	22
2.4	Différents Système d'Isolation	23
2.5	Echange de Chaleur dans une Canalisation	25
2.5.1	Cylindre Creux Long (Tube)	25
2.5.2	Cylindre Creux Multicouches	25
2.6	Travail des Forces de Frottement Internes dans le Fluide	26
2.6.1	Expressions Globales des Forces de Frottement d'un Fluide	27
	Conclusion	28
CHAPITRE 03 : Problématiques et Modèle Analytique		
3.1	Introduction	29
3.2	Problématique Liées à l'Isolation	30
3.2.1	Problèmes des Fuites dans un Pipeline	30
3.3	Systèmes Externes Continus	31
3.1.1	Câble à Fibre Optique	31
3.1.2	Systèmes Acoustiques	32
3.1.3	Pipes de Détection	33
3.4	Systèmes Internes Continus	33
3.2.1	Analyse du Point de Pression	33
3.2.2	Systèmes Statistiques	34
3.2.3	Système Basé sur RTTM	34
3.4	Pression /Dépression	35
3.6	Perte de Température (Transfert de Chaleur)	38
3.6.1	Transfert de Chaleur par Convection	38
3.6.1.1	Calcul du Transfert de Chaleur Convectif	41
3.6.2	Transfert de Chaleur par Conduction « k »	43
3.7	Modèle Réel	44
3.7.1	Prévention Thermique de l'Hydrate	45
3.7.2	Cas d'Etude	47
	Conclusion	49
Chapitre 4 : Modèle de Calcule / Modélisation		
4.1	Introduction	50

4.2	Présentation du code de calcul utiliser	51
4.3	Modèle de Calcul	51
4.3.1	Aspect théorique sur le modèle de calcul	51
4.3.2	Modèle proposé	52
4.3.3	Simplification / Formulation du modèle proposé	52
4.3.3.1	Equations de Transferts de Chaleur	53
4.4	Modélisation	56
4.4.1	Préparation du Model	56
4.4.2	Démarche de la Modélisation	56
4.4.3	Description du Maillage	59
4.4.4	Conditions aux Limites	59
4.5	Résultats et Interprétations	61
4.5.1	Objectif	61
4.6	Analyse des Résultats de la Simulation	61
4.6.1	Evaluation de la vitesse du fluide dans la pipe:	61
4.6.2	Evaluation de la distribution de température dans la pipe	62
4.6.1	Analyse de la nature ou du degré d'isolation obtenu dans différents cas.	63
	Conclusion	65
	Conclusion Générale	66
	Références	67
	ANNEXE	70

La Liste des figures

Figure 1-1	l'oléoduc R-OB1 (entre Msila et Bejaïa)164 km de longueur	3
Figure 1-2	Trans-Mediterranean and future Trans-Saharan gas pipelines	5
Figure 1-3	Périmètre d'application des systèmes de conduites	6
Figure 1-4	L'oléoduc trans-Alaska reliant Prudhoe Bay à Valdez sur près de 1 300 km	7
Figure 1-5	Surveillance de l'exploitation –Trans CANADA septembre 2015	8
Figure 1-6	station de compression de gaz	9
Figure 1-7	Postes de Livraison urbains	9
Figure 1-8	Postes de Sectionnement	10
Figure 1-9	Postes de détente	11
Figure 1-10	Poste de coupure en Suisse	11
Figure 1-11	Pipeline en acier	13
Figure 1-12	Tuyaux en fonte	14
Figure 1-13	pipeline en plastique	15
Figure 1-14	pipeline en Béton	15
Figure 1-15	pipeline en composite	16
Figure 2-1	Système et bilan énergétique	22
Figure 2-2	Système d'isolation thermique	23
Figure 2-3	conduction thermique	23
Figure 2-4	Schéma des transferts dans un cylindre creux	25
Figure 2-5	Schéma des transferts dans un cylindre creux multicouches	26
Figure 3-1	Différents Système de détection et de localisation des fuites	31

Figure 3-2	Système de câbles à fibres optiques	32
Figure 3-3	Système canalisation de détection	33
Figure 3-4	RTTM système	35
Figure 3-5	Variation de pression en fonction de diamètre du pipe	37
Figure 3-6	Modèle de flux de chaleur entre le fluide et la paroi intérieure de pipe	40
Figure 3-7	Variation de coefficient de transfert de chaleur en fonction de différents cas d'écoulement Reynolds	42
Figure 3-8	exemple d'isolation pipeline	44
Figure 3-9	Variation de la température le long de pipeline	47
Figure 3-10	Modèle du pipe	48
Figure 4-1	Une section de pipeline transportant du pétrole brut	52
Figure 4-2	Résistance au transfert de chaleur de la paroi	54
Figure 4-3	Coupe transversale de la canalisation. Une paroi à deux couches (gris foncé et gris clair) et le film résistances du film à l'intérieur et à l'extérieur (bleu clair).	55
Figure 4-4	Organigramme de modélisation	58
Figure 4-5	maillage générer	59
Figure 4-6	Modèle pipeline parfaitement symétrique	60
Figure 4-7	La vitesse du fluide dans la pipe	62
Figure 4-8	Distribution de la température dans une section pipe	63
Figure 4-9	vérification d'isolation de la pipe par le module <i>Pipe Flow Module</i>	64
Figure A-1	Modules complémentaires de <i>COMSOL Multiphysics</i>	70

La Liste des Tableaux

Tableau 1-1	légende de périmètre d'application des systèmes de conduites	7
Tableau 1-2	propriété mécanique des tubes D'acier	14
Tableau 3-1	calcul de facteur de frottement	36
Tableau 4-1	Caractéristiques de Pipe	55

Introduction générale

L'augmentation de la demande d'énergie telle que le gaz et le pétrole nécessite de plus en plus la construction de nouvelles lignes de pipelines. Un 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.

Son expansion est marquée non seulement par un accroissement des longueurs de canalisations, en exploitation, mais aussi par une augmentation de leur diamètre. 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 [1].

Pour continuer à couvrir les besoins en énergies fossiles, les pétroliers forent de plus en plus loin de la surface et des côtes. Le défi majeur auquel doit s'atteler le bon écoulement des fluides sur ces grandes distances.

Avec la baisse subite de la température et l'augmentation de la pression, le méthane en présence d'eau libre peut former des cristaux d'hydrate similaires à de la glace, provoquant l'obstruction des lignes de production. Les paraffines ou les goudrons naturellement présents dans les huiles peuvent également figer et aboutir au même résultat. Pour prévenir la formation de ces « blocs » les conduites de production posées sur le sol sous-marin intègrent plusieurs enveloppes.

Ces conduites, dites « pipe », sont formées d'un ensemble de tubes concentriques séparés par un milieu isolant destiné à réduire les transferts thermiques entre le fluide transporté et le milieu ambiant (extérieure), ces technologies d'isolation dites « passives » [2].

La base de chaque processus technologique est l'efficacité économique, qui est influencée par l'ensemble de nombreux facteurs, d'où l'explosion des innovations sur les systèmes d'isolation active. Un de ces moments, important pour de nombreuses industries (produits chimiques, raffineries, métallurgiques, aliments, services publics et de nombreux autres), est l'isolation thermique des équipements et des pipelines.

Dans une échelle industrielle, il est utilisé sur des dispositifs horizontaux et verticaux, réservoirs de stockage de divers liquides, dans divers échangeurs et pompes. Des exigences très élevées sur les processus d'isolation thermique d'utilisation d'équipements cryogéniques et basse température.

CHAPITRE 1 : Technologie de Transport des Fluides par Canalisation

L'isolation thermique est l'un des types de protection les plus courants qui ont trouvé son utilisation dans presque toutes les industries. Grâce à cela, il est assuré par le fonctionnement sans problème de la majorité des objets qui constituent une menace pour la production. Il existe certaines exigences pour le choix du matériel et de l'installation.

L'isolation des pipelines doit être conforme aux normes [3], car elle dépend du fonctionnement normal de nombreux systèmes. Presque toutes les exigences énumérées dans la documentation sont obligatoires. Dans la plupart des cas, l'isolation thermique des conducteurs thermiques est un facteur clé pour le fonctionnement en douceur et le fonctionnement des installations d'énergie, des logements et des services communaux et de l'industrie.

Une qualité supplémentaire qui possède une isolation thermique des pipelines est de garantir les exigences utilisées dans le domaine de l'économie d'énergie. Compétent, effectué par toutes les normes. L'isolation des pipelines permet de réduire la perte de chaleur au cours de son transfert, ce qui réduit à son tour les coûts d'énergie généraux.

L'isolation thermique est importante dans le dispositif de résistance à la chaleur. Non seulement les pertes thermiques dépendent de la qualité de la structure isolante de pipe thermique, mais qui est tout aussi importante, sa durabilité. Avec des matériaux de qualité appropriés et une technologie de fabrication, l'isolation thermique peut simuler simultanément le rôle de la protection anticorrosion de la surface extérieure du pipeline en acier.

L'isolation thermique est disposée sur des pipelines, des raccords, des connexions de bride, des compensateurs et des supports aux fins de réduire la perte de chaleur lors du transport et de réduire la température sur la surface de la résistance à la chaleur et de l'air dans les lieux de maintenance (chambres, canaux), qui élimine le danger des brûlures et facilite la maintenance des pipelines[4].

Chapitre 1
Technologie
de transport
des fluides
par canalisation

CHAPITRE 1 : Technologie de Transport des Fluides par Canalisation

1.1 Introduction

Un pipeline est un ouvrage destiné à transporter, sous pression et sur de grandes distances, des matières fluides (liquides, gaz, mélanges poly-phasiques). C'est un système industriel constitué de tubes et d'accessoires (robinets, vannes, compresseurs, ...), souvent organisés en réseau.

Les produits véhiculés par pipeline sont généralement: le pétrole et autres hydrocarbures liquides, le gaz naturel et d'autres gaz combustibles, ainsi que certains produits chimiques.

Les tubes fabriqués avec des aciers faiblement alliés de haute résistance, conçus pour le transport et la distribution des hydrocarbures, sont soumis aux efforts élevés dus à la pression interne du fluide, au sol du recouvrement, au trafic extérieur et aux attaques environnementales[6].



Figure 1.1 l'oléoduc R-OB1 (entre Msila et Bejaïa) 164 km de longueur

1.2 Historique du Transport par Canalisation

Des réseaux d'aqueducs pour la collecte et la distribution d'eau potable et d'irrigation existent depuis les temps historiques les plus anciens. C'est en Chine dès 500 avant J.C. qu'apparaissent les premières canalisations, des bambous fendus et liés par de la ficelle, destinés à acheminer l'eau. Durant l'Antiquité, les conduites en bois, en terre cuite et pierre sont utilisés pour le transport de l'eau. Certains de ces réseaux utilisaient déjà sur certains tronçons des canalisations maçonnées ou en bois ou en métal ductile (plomb...). En France, à la fin du XVIII^e siècle, une conduite (saumoduc), constituée de troncs creusés de sapin, a été construite sur 21,5 km entre Salins-les-Bains (Jura) et Arc-et-Senans (Doubs) pour transporter la saumure.

Au début du XIX^e siècle, la civilisation industrielle, qui a vu se développer des installations complexes (haut fourneaux, usines à gaz, centrales de vapeur, etc.), met en place des systèmes locaux de transport de fluides constitués par des canalisations en fonte, bois, acier, ou céramique, mais restant d'ampleur modeste. Le terme de pipeline apparaît dans le milieu anglo-saxon puis entre dans le lexique industriel français vers 1885.

À partir de 1860, les pipelines deviennent indispensables avec la révolution industrielle et le début de l'exploitation du pétrole. À Titusville en Pennsylvanie, l'exploitation des premiers gisements de pétrole provoque une véritable ruée vers l'or noir et très vite il faut trouver un moyen autre que des chalands ou le chemin de fer pour transporter par barils cette production massive. Le premier concept industriel de transport par pipeline (canalisation sous pression) aurait été formulé par le Russe Dimitri Mendeleïev en 1863 suggérant l'utilisation de tubes en acier. Dès 1865 un premier oléoduc, de 8 kilomètres en tubes vissés en fonte et d'un 5.08 cm , est construit et peut transporter 100 [m³] de pétrole par jour. En 1878, un nouveau pipeline, de 170 kilomètres et d'un 15.24 cm , est construit avec la capacité de transport jamais atteinte de 1500 [m³]de pétrole par jour. À la fin de ce siècle 1800 kilomètres de canalisations étaient en exploitation. Le russe Vladimir Choukhov pour la société Branobel (acronyme de Brothers Nobel), a construit l'un des premiers oléoducs en 1878-1880 près de Bakou.

Durant la première moitié du XX^e siècle, l'évolution des techniques permet d'étendre notablement les réseaux de pipelines. L'utilisation de l'acier, de moyens de soudure plus performants et de nouvelles machines pour creuser le sol, permettent d'agrandir les lignes et

CHAPITRE 1 : Technologie de Transport des Fluides par Canalisation

de transporter en plus grande quantité. Ainsi, entre 1931 et 1947, les États-Unis voient la longueur de leur réseau d'oléoducs multipliée par six, atteignant 29000 kilomètres.

Durant la seconde Guerre mondiale, l'Europe va elle aussi lancer de nombreux et importants projets de construction de pipelines afin d'assurer son ravitaillement, notamment en 1942, à l'initiative des britanniques avec l'opération PLUTO, un oléoduc est ainsi construit sous la Manche.

En 1956 est inauguré le plus long pipeline du monde, « Djouba », de 4000 kilomètres de longueur, reliant le Sud-est de la Russie à l'Allemagne.

Le début des années 1960, la demande en gaz augmentant et la liquéfaction du gaz naturel étant mis au point, voit l'arrivée des premiers importants gazoducs. L'Italie, L'Angleterre les Pays Scandinaves et les Pays-Bas découvrent sur leur territoire d'immenses champs gaziers et décident de les exploiter tout comme l'URSS. Les contrats internationaux se multiplient, des gazoducs sont bâtis sur des milliers de kilomètres, principalement en Europe qui compte la moitié des gazoducs mondiaux.

En 2020, dans le monde, la longueur des pipelines est estimée à 2000000 kilomètres, pour environ les deux tiers concernent les gazoducs, un tiers les oléoducs et marginalement les autres [7].



Figure 1.2 Trans-Mediterranean and future Trans-Saharan gas pipelines [8].

Le gazoduc part de Hassi R'Mel, principal gisement de gaz d'Algérie. Il parcourt 550 km en territoire algérien, avant d'entrer en Tunisie. Après 370 km dans ce pays, il atteint la côte à El Haouaria, où commence une première section sous-marine de 155 km. Après la

CHAPITRE 1 : Technologie de Transport des Fluides par Canalisation

traversée de la Sicile (340 km), il présente une deuxième section sous-marine de 15 km dans le détroit de Messine, avant de remonter la totalité de la péninsule italienne, pour finalement rejoindre le réseau à Minerbio près de Bologne, dans le plaine du Pô, berceau de l'industrie gazière italienne². En Algérie et en Tunisie, il se compose de deux tubes de 48 pouces (122 cm) de diamètre¹. Trois stations de compression se situent en Algérie et trois autres en Tunisie, la dernière est la plus puissante (120 MW) car elle doit fournir la pression nécessaire à la section sous-marine.

1.3 Composants d'un Système de Transport par Pipeline

Les pipelines sont fabriqués à partir des tubes en acier ou en plastique ou d'autre matériaux avec un diamètre intérieur généralement de 4 à 48 pouces (100 à 1220 mm). La plupart des pipelines sont généralement enfouis à une profondeur d'environ 3 à 6 pieds (0,91 à 1,83 m). Pour protéger les tuyaux contre les chocs, l'abrasion et la corrosion, diverses méthodes sont utilisées.

Pour le gaz naturel, les pipelines sont construits en acier au carbone et leur taille varie de 2 à 60 pouces (51 à 1524 mm) de diamètre, selon le type de pipeline. Le gaz est pressurisé par des stations de compression et est inodore à moins d'être mélangé avec un odorant mercaptan lorsque requis par une autorité de régulation [9].

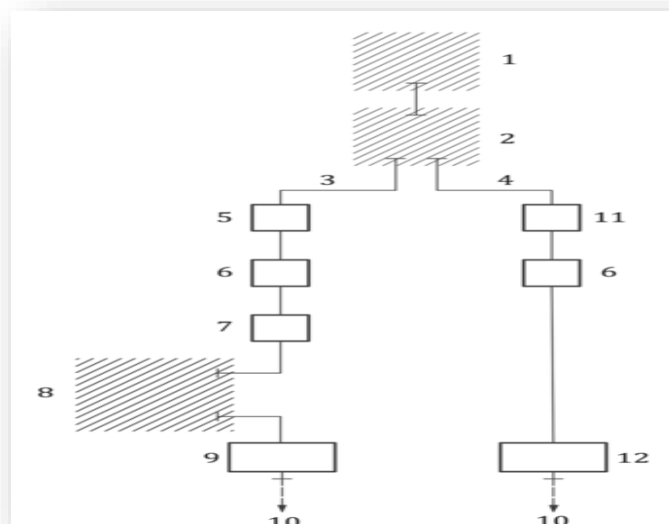


Figure 1.3 Périmètre d'application des systèmes de conduites [10].

CHAPITRE 1 : Technologie de Transport des Fluides par Canalisation

LEGENDE	
1. Emplacement du puits	7. Stockage
2. Station collectrice	8. Raffinerie
3. Liquide	9. Dépôt
4. Gaz	10. Distribution
5. Station de pompage	11. Poste de compression
6. Poste de purge	12. Station de réduction de pression

Tableau 1.1 légende de périmètre d'application des systèmes de conduites [9].

1.3.1 Ligne

Un réseau de canalisations souterraines, sous-marines ou aériennes (Figure 3.1), constitués de tubes en acier. Les premières normes ayant été éditées par l'American Petroleum Institut (API), il est toujours d'usage de dimensionner ces tubes par leur diamètre nominal exprimé en mètre (de 10.16 cm à 142.24 cm).



Figure 1.4 L'oléoduc trans-Alaska reliant Prudhoe Bay à Valdez sur près de 1 300 km [5].

Composants d'un système de conduite raccordés les uns aux autres afin de transporter des fluides entre les stations et/ou usines, comprenant tuyaux, gares de racleurs,

CHAPITRE 1 : Technologie de Transport des Fluides par Canalisation

composants, accessoires, manchettes de raccordement, colonnes montantes, vannes d'isolement, vannes de sectionnement, raccords et composants installés à l'intérieur des stations et des terminaux, mais qui ne font pas partie intégrante de la conduite.

- Conduite en mer installée en eaux maritimes et dans les estuaires au-delà de la laisse ordinaire des hautes eaux.
- Conduite terrestre installée sur ou dans la terre, y compris les lignes sous les cours d'eau intérieurs.

1.3.2 Centre de Commandement

Un centre de surveillance (dispatching) où les pipelines sont pilotés à distance (Figure 1.5).



Figure 1.5 Surveillance de l'exploitation –Trans CANADA septembre 2015.

1.3.3 Stations d'Injection

Des stations de départ constituent les points d'entrée du réseau de transport. Suivant leur configuration et leur position géographique ce peuvent être des terminaux ou des stations d'entrée.

1.3.4 Stations de Compression/ Pompage

Compression (pour les gaz) ou pompage (pour les liquides) sont réparties régulièrement le long des pipelines pour rehausser la pression afin de maintenir la vitesse (donc le débit) du fluide dans les canalisations (figure 1.6).



Figure 1.6 station de compression de gaz

1.3.5 Postes de Livraison

Permettent de mettre la matière transportée à disposition des destinataires intermédiaires ou finaux (figure 1.7).



Figure 1.7 Postes de Livraison urbains

1.3.6 Postes de Sectionnement

Permettent d'isoler un tronçon de canalisation afin d'assurer sa maintenance ou de limiter les conséquences néfastes en cas de fuite. Ces stations et postes sont parfois équipés de dispositif d'introduction et de réception de pistons racleurs (*pig(s) en anglais*), destinés à contrôler les différents paramètres d'intégrité de la canalisation (géométrie, propreté, perte de métal, fissuration, ...etc). La distance entre deux postes de sectionnement consécutifs dépend de la réglementation applicable, selon le fluide transporté et le pays concerné. La distance entre deux postes de coupure(ou de demi-coupure) consécutifs varie d'une dizaine de kilomètres pour de courtes antennes ou points spéciaux, à quelques centaines de kilomètres pour de rendes canalisations de transit (figure 1.8).



Figure 1.8 Postes de Sectionnement

1.3.7 Postes de Détente

Poste de régulation permettent de diminuer la pression de fluide à l'aval (Figure 1.9). Ces postes sont souvent associés à des postes de livraison. Ils peuvent ainsi séparer des portions de réseau exploités à des pressions différentes.



Figure 1.9 Postes de détente

1.3.8 Stations d'Arrivée

Marquent l'extrémité d'un réseau de transport. Ce peut être un ensemble de réservoirs de stockage ou le départ d'un réseau aval de distribution [11].



Figure 1.10 Poste de coupure en Suisse. [11].

1.4 Types et Nature des Fluides Transportés

Selon les fluides transportés, les pipelines portent des noms spécifiques et sont assujettis à une réglementation qui leur est propre, tout comme le sont leurs techniques de construction et d'exploitation.

CHAPITRE 1 : Technologie de Transport des Fluides par Canalisation

Les principaux systèmes de pipeline concernent :

1.4.1 Gaz Naturel ou Combustible

Transporté par gazoduc. Un gazoduc est une canalisation destinée au transport de matières gazeuses sous pression, la plupart du temps des hydrocarbures.

1.4.2 Hydrocarbures Liquides

Dont le pétrole transporté par Oléoduc. Certains produits miniers sont transportés en suspension sous forme de boue (*slurry*). On parle de minéroduct (*Slurry pipeline en anglais*); pour le charbon transporté pulvérulent, mélangé à de l'eau, sous forme d'une boue liquide (*schlamm*), on parle d'hydrocarboduc.

Il existe bien d'autres produits acheminés par pipeline sur des distances parfois importantes, justifiant ainsi le terme de « transport », par différenciation avec des distributions locales.

1.4.3 Eau Douce

Principalement pour l'irrigation, dans des conduites ou émissaires ou aqueducs. Un aqueduc est un ouvrage destiné à l'adduction d'eau pour la consommation d'une ville.

1.4.4 Eau Salée ou Saumâtre

Un saumoduc est une canalisation destinée à transporter de la saumure, c'est-à-dire de l'eau salée. Les saumoducs sont généralement des canalisations industrielles, amenant la saumure depuis des lieux de production (marais salants, cavités salines, mines de sel gemme, ...etc) vers des usines de transformation.

1.4.5 Oxygène

Un oxydud ou oxygénoduc est une canalisation transportant de l'oxygène sous forme liquide ou gazeuse.

Les oxyducs sont généralement associés aux azoducs, aussi appelés nitrogénoducs.

1.4.6 Hydrogène

Dans des hydrogénoducs. L'hydrogène est un gaz très inflammable et très léger; cela rend ses conditions de confinement particulièrement délicates.

CHAPITRE 1 : Technologie de Transport des Fluides par Canalisation

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 n'est donc pas très important.

1.4.7 Ethylène

Dans des éthylénoducs. Le transport de l'éthylène sous forme liquéfiée, sous pression, est délicat ($T_{critique} : 9,6 \text{ °C}$). Selon une étude allemande, l'éthylénoduc prévu devrait faire partie d'un réseau paneuropéen de canalisations pour oléfines. Les éthylénoducs déjà existants ont, à l'heure actuelle, une longueur totale d'environ 2500 à 3000 kilomètres et l'industrie y est reliée à environ 50%, contre près de 100% aux États-Unis.

1.5 Types et Nature des Matériaux Utilisés

La sélection des matériaux pour les pipes est basée sur la conception de la canalisation, les forces internes et externes, les techniques de jonction et de pose, la durabilité, l'imperméabilité et la fréquence d'entretien.

1.5.1 Pipeline en Acier

Des tuyaux en acier sont utilisés pour les conduites d'eau. Les tuyaux de grand diamètre peuvent être fabriqués en acier et peuvent être rallongés sur de grandes distances.

Les tubes utilisés pour l'exploitation pétrolière (pipelines) sont généralement conçus en aciers à résistance élevée, comme les aciers API 5L grades X52, X60 et X80, par exemple. Les pipelines sont soumis à des contraintes cycliques qui peuvent provoquer leur rupture par fatigue.



Figure 1.11 Pipeline en acier

CHAPITRE 1 : Technologie de Transport des Fluides par Canalisation

API 5L Grade	Limite d'élasticité min. (ksi)	Résistance à la traction min. (ksi)	Céder aux taux de résistance à la traction (Max.)	Élongation min. %1
X52	52	66	0.93	21
X60	60	75	0.93	19
X80	80	90	0.93	16

Tableau 1.2 propriété mécanique des tubes D'acier

1.5.2 Pipeline en Fonte

Canalisation en fonte sont principalement fabriqués à partir de fonte grise pour laquelle des revêtements et des revêtements sont appliqués afin d'améliorer la résistance à la corrosion. Ces types de tuyaux ont été largement utilisés dans le passé.

Cependant, aujourd'hui, les tuyaux en fonte ductile qui sont supérieurs aux tuyaux en fonte sont largement utilisés. Un tel type de canalisation convient au transport d'eau, de gaz et d'eaux usées.



Figure 1.12 Tuyaux en fonte

1.5.3 Pipeline en Plastique

Il est généralement utilisé 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 (figure 1.13). 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 1.13 pipeline en plastique.

1.5.4 Pipeline en Béton

Le tuyau en béton est fabriqué à partir de tôle d'acier soudée avec jointure surfaces et béton. Il est particulièrement adapté aux canalisations de grand diamètre s'étendant sur de grandes distances. Les tuyaux en béton sont un choix approprié pour la transmission de l'eau.



Figure 1.14 pipeline en Béton

1.5.5 Pipeline en Composite

Les tuyaux composites sont fabriqués à partir de thermoplastiques non renforcés comme le polyéthylène haute densité (PEHD), le chlorure de polyvinyle (PVC), le polypropylène (PP), les plastiques renforcés de fibres (FRP) et les plastiques renforcés de verre (GRP). Les tuyaux composites sont résistants à la corrosion et ont des propriétés mécaniques plus fortes. Pour une taille et une épaisseur équivalentes, les tuyaux composites sont plus solides et plus robustes que les matériaux de tuyaux non renforcés. Ils sont mieux à même de résister aux forces appliquées pendant le processus d'installation, ce qui leur permet d'être installés plus profondément et tirés avec une plus grande force. Ces tuyaux sont largement favorisés dans la technologie sans tranchée car ils sont plus faciles à installer.

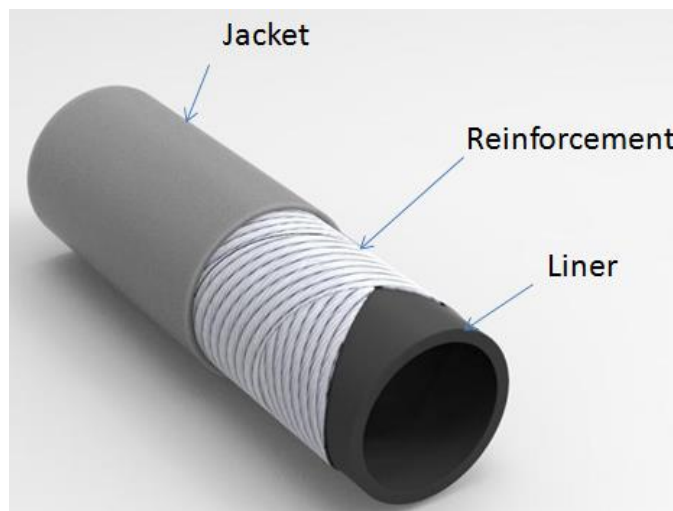


Figure 1.15 pipeline en composite

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 de pression, le mélange et le transfert de chaleur de la paroi. En variante, un écoulement de fluide multiphase 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[12].

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[13].

1.6.2 Ecoulement 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[12].

1.6.3 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 :

$$R_e = \frac{V L}{\nu} \quad (1.1)$$

Avec :

- V Vitesse caractéristique du fluide [m/s] ;
- L Dimension caractéristique (diamètre hydraulique) [m] ;
- ν Viscosité cinématique du fluide [m^2/s].

Avec :

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

ρ Masse volumique du fluide [kg/m^3];

μ Viscosité dynamique du fluide [$PI \cdot s$] ou [$kg/m \cdot s$].

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 les 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)[14].

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 permettrait 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 : $R_e > 100000$.

1.7 Réglementation du Transport par Pipeline

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

1.7.1 Régimes Juridiques de Transport

Des lois, décrets et arrêtés déterminent les conditions générales dans lesquelles une société, nommée "transporteur", 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.

1.7.2 Réglementation de Sécurité pour le Transporteur

La sécurité du transport par pipeline est réglementée par le code de l'environnement et l'arrêté dit "multi fluides, rénové et unifié en date du 5 mars 2014. Ce règlement et les documents normatifs ou interprofessionnels qui le déclinent 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).

1.7.3 Réglementation sur les Travaux de Tiers

Le décret 2011-1241 du 5 octobre 2011 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.

Il est instauré un télé service "Réseaux et Canalisations" au moyen duquel les exploitants (maîtres d'ouvrage) de réseau de canalisations ou de tout réseau sensible (distribution de gaz, d'eau, de pétrole et d'hydrocarbures ...) déclarent la présence et l'emprise de leurs ouvrages. Les porteurs de projets et les entreprises de travaux doivent préalablement déclarer leurs chantiers au moyen de formulaires pré remplis: DT/DICT (Déclaration de Travaux et Déclaration d'Intention de Travaux). Ce site dédié leur procure les coordonnées des exploitants auprès desquels ils obtiendront la localisation précise des ouvrages et les règles à respecter [15].

CHAPITRE 1 : Technologie de Transport des Fluides par Canalisation

Conclusion

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

Chapitre 2
Isolation
et échange
de chaleur
dans une canalisation

2.1 Introduction

L'isolation thermique désigne l'ensemble des techniques mises en œuvre pour limiter les transferts de chaleur entre un milieu chaud et un milieu froid. L'isolation thermique est utilisée dans de nombreux domaines incluant notamment : le bâtiment (maintien d'une température de confort à l'intérieur d'un bâtiment en dépensant le minimum d'énergie), l'industrie, l'automobile, la chaîne du froid, la cuisine et le textile (sur terre, dans l'espace, sous la mer...) [16].

2.2 Définition et Schématisation d'un Système d'Isolation

Un échange de chaleur se produit entre deux milieux dès qu'il existe une différence de température entre ces deux milieux et d'autant plus que l'écart de température est important. La chaleur se propage du milieu chaud vers le milieu froid par l'intermédiaire de la conduction, du rayonnement, de la convection ou par l'action simultanée d'un ou plusieurs de ces phénomènes [17].

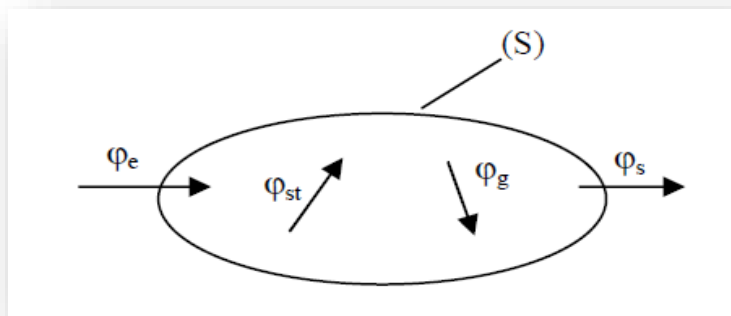


Figure 2.1 Système et bilan énergétique [17]

D'où :

- Φ_{st} Flux de chaleur stocké.
- Φ_g Flux de chaleur généré.
- Φ_e Flux de chaleur entrant.
- Φ_s Flux de chaleur sortant.

2.3 Rôle des Systèmes d'Isolation

Le but de l'isolation thermique est de réduire, voire supprimer, les échanges thermiques entre deux corps de températures différentes. Elle peut avoir pour but de garder la chaleur ou garder le froid. Cela passe par l'interposition d'un matériau isolant entre le milieu chaud et le milieu froid. Les panneaux sandwichs reposent sur ce principe et utilisent la mousse de polyuréthane (PUR), polyisocyanurate (PIR), la laine de roche, ou encore le nid d'abeilles comme matériau interstitiel.

Ce matériau, communément appelé « isolant thermique », peut simplement être constitué d'une petite couche d'air sec, voire par une couche de vide d'air entre les deux milieux à isoler comme dans une bouteille thermos.

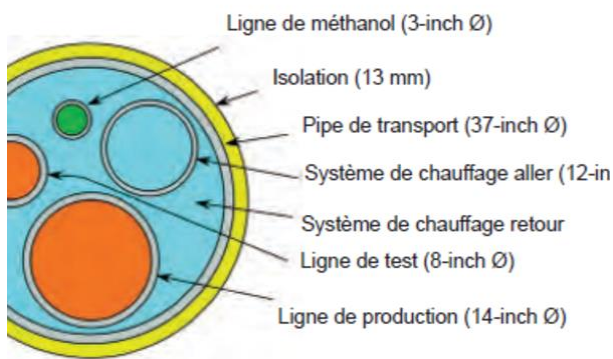


Figure 2.2 Système d'isolation thermique

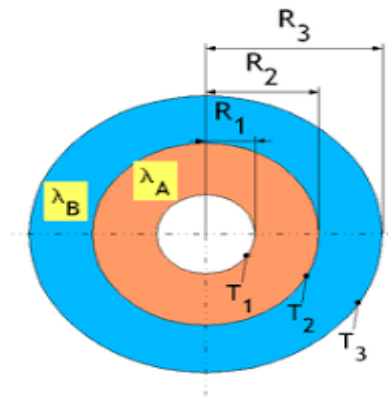


Figure 2.3 conduction thermique

2.4 Différents Système d'Isolation

L'isolation thermique est importante dans le dispositif de résistance à la chaleur. Non seulement les pertes thermiques dépendent de la qualité de la structure isolante du tuyau thermique, mais qui est tout aussi importante, sa durabilité. Avec des matériaux de qualité appropriés et une technologie de fabrication, l'isolation thermique peut simuler simultanément le rôle de la protection anticorrosion de la surface extérieure du pipeline en acier. Ces matériaux, en particulier, comprennent le polyuréthane et les dérivés à base de béton polymère.

L'isolation thermique est disposée sur des pipelines, des raccords, des connexions de bride, des compensateurs et des supports aux fins suivantes:

- Réduire la perte de chaleur lorsque vous le transportez, ce qui réduit la puissance installée de la source de chaleur et de la consommation de carburant;
- Diminution de la température de liquide de refroidissement fournie aux consommateurs, ce qui réduit la consommation de liquide de refroidissement requise et améliore la qualité de l'approvisionnement thermique;
- Réduire la température sur la surface de la résistance à la chaleur et de l'air dans les lieux de maintenance (chambres, canaux), qui élimine le danger des brûlures et facilite la maintenance des pipelines thermiques.

Il n'est pas autorisé à utiliser des matériaux soumis à la combustion, ainsi que de substances contenant des acides de séparation, des alcalis forts, des gaz nocifs et du soufre.

Les conditions les plus graves pour le fonctionnement de lignes de chaleur se produisent pendant le canal souterrain et surtout bandoulière en raison de l'humidité de l'isolation thermique avec des eaux de terre et de surface et la présence de courants errants dans le sol. À cet égard, les exigences les plus

importantes pour les matériaux d'isolation thermique comprennent une faible absorption d'eau, une résistance électrique élevée et un joint non canal, une résistance mécanique élevée.

L'isolation thermique dans les réseaux thermiques est actuellement utilisée principalement avec des matériaux inorganiques (laine minérale et vitrée), la chaux-silice, le volcanique, ainsi que les compositions Artificielle telle que la de l'amiante, béton, l'asphalte, bitume, ciment, sable ou d'autres composants pour le joint.

Selon le type de produits utilisés, l'isolation thermique est divisée en emballage (tapis, rayures, cordons, harnais), pièces (plaques, blocs, briques, cylindres, semi-cylindres, segments, coquilles), remplissage (monolithique et éclairé), serré et fluide.

Les produits de la charge et de la pièce sont utilisés pour tous les éléments de réseaux de chaleur et peuvent être à la fois amovibles pour les équipements nécessitant une maintenance (compensateurs d'huile, connexions à bride) et non amovibles. Fixez-les à l'aide de bandages, de câble, de vis, etc., faites de matériaux galvanisés, cadmiro-bains ou résistant à la corrosion et une couche de revêtement. L'isolation polyuréthane de coulée coulée est généralement (Ce système est idéal pour le remplissage de grandes cavités, telles que des citernes thermiques) utilisée pour des éléments de réseaux thermiques qui ne nécessitent pas de maintenance. L'isolation mastic est autorisée à être utilisée pour la fermeture et le drainage des compensateurs de renforcement et de glande, à condition que les structures amovibles soient effectuées pour les liaisons et les joints d'huile de renforcement.

Les structures d'isolation thermique des pipelines d'acier avec un joint de canal aérien et souterrain, ainsi qu'avec un joint sans chambre dans une coque monolithique, sont généralement constitués de trois couches principales anti-corrosion, isolation thermique et revêtement.

La couche anti-corrosion est superposée sur l'extérieur; La surface du tuyau en acier et est effectuée de matériaux lâches et d'emballage dans plusieurs couches (isola ou brizol sur des émaux et des peintures époxy ou organosilicate, des peintures et une email de verre, etc...). De plus, la principale couche d'isolation thermique d'emballage, de pièces ou de produits monolithiques est empilée. Il s'agit d'une couche de revêtement qui protège la couche isolante thermique des effets de l'humidité et de l'air et des dommages mécaniques. Il est effectué avec une ponte souterraine de deux a trois couches d'isola ou de brizol sur le plâtre de mastic de l'isola, de l'amiante-ciment sur une grille métallique, une barlication avec diverses imprégnations, pholoisol et avec une ponte aérienne de feuilles en tôle d'acier, d'aluminium, ciment en verre, fibre de verre, verre, etc.

L'isolation thermique : L'isolation thermique désigne l'ensemble des techniques mises en œuvre pour limiter les transferts de chaleur entre un milieu chaud et un milieu froid. L'isolation thermique est utilisée dans de nombreux domaines incluant notamment : le bâtiment (maintien d'une température de confort à l'intérieur d'un bâtiment en dépensant le minimum d'énergie), l'industrie, l'automobile, la chaîne du froid, la cuisine et le textile (sur terre, dans l'espace, sous-marins ...)

2.5 Echange de Chaleur dans une Canalisation

2.5.1 Cylindre Creux Long (Tube)

On considère un cylindre creux de conductivité thermique λ , de rayon intérieur r_1 et de rayon extérieur r_2 et d'une longueur L , les températures des faces internes et externes étant respectivement T_1 et T_2 . On suppose que le gradient longitudinal de température est négligeable devant le gradient radial [17].

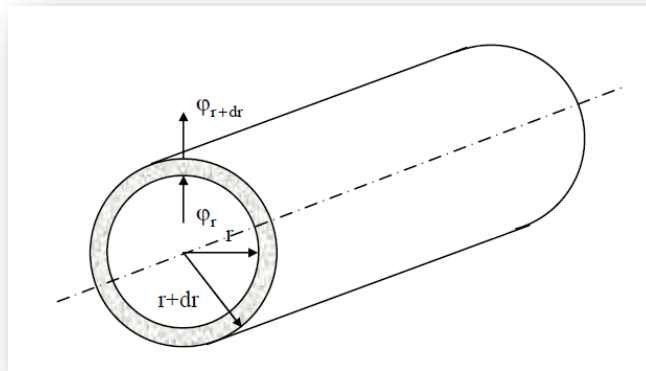


Figure 2.4 Schéma des transferts dans un cylindre creux [17]

2.5.2 Cylindre Creux Multicouches

C'est le cas pratique d'un tube recouvert d'une ou plusieurs couches de matériaux différents et où l'on ne connaît que les températures T_{f1} et T_{f2} des fluides en contact avec les faces interne et externe du cylindre, h_1 et h_2 sont les coefficients de transfert de chaleur par convection entre les fluides et les faces internes et externes.

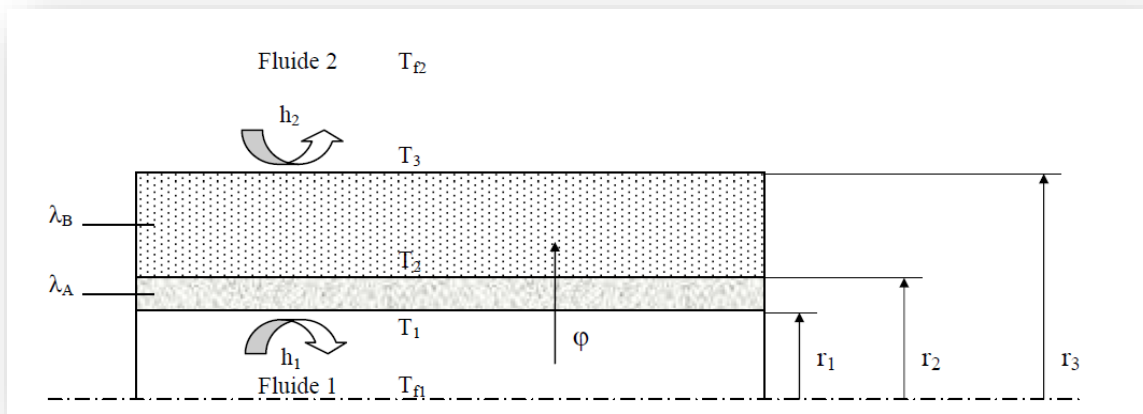


Figure 2.5 Schéma des transferts dans un cylindre creux multicouches [17]

2.6 Travail des Forces de Frottement Internes dans le Fluide

En mécanique des fluides, un frottement fluide est une force de frottement qui s'exerce sur un objet se déplaçant dans un fluide (liquide ou gazeux). Cette force dépend de la vitesse relative de l'objet, de sa forme et des propriétés intrinsèques du fluide.

L'exemple typique est celui d'une bille qui tombe dans un liquide visqueux, plus elle va vite, plus la force de frottement fluide qui s'exerce sur elle est importante (proportionnelle à la vitesse), jusqu'à ce que soit atteint un régime d'équilibre où la force de frottement

Les frottements fluides se produisent dans une multitude de problèmes de la vie courante, perte de charge dans une canalisation, frottement de l'air sur une voiture, frottement de l'eau sur une coque de bateau.

Il peut être déroutant au premier abord d'être confronté à une multitude de formules différentes décrivant la valeur d'une force de frottement appliquée à un objet. Cependant, toutes ces formules découlent de l'application des équations de Navier-Stokes en fonction de la situation étudiée. En effet, le paramètre clé est la vitesse d'écoulement. Les frottements fluides ne se quantifient pas de la même façon en fonction de la vitesse relative du fluide par rapport à l'objet, il existe différents domaines distincts où l'on appliquera une formule plutôt qu'une autre. Ces domaines sont délimités par les différents régimes d'écoulements (laminaire, turbulent, compressible), dépendant notamment du nombre de Reynolds de l'écoulement.

Il existe des formules relativement simples, applicables dans certains cas de base. Cependant, dès lors que la géométrie de l'objet plongée dans le fluide se complexifie, il faut faire appel à des calculs numériques ou à des essais physiques.

2.6.1 Expressions Globales des Forces de Frottement d'un Fluide

Au sein d'un écoulement, il est utile de savoir quelles sont les forces qui prédominent. En effet, à basse vitesse, ce sont les forces de viscosité qui structurent l'écoulement. En revanche, à haute vitesse, ce sont les effets cinétiques qui prédominent. Pour déterminer dans quel cas nous nous situons, il suffit de calculer le nombre de Reynolds(*page 20*).

Conclusion

On a défini dans ce chapitre l'isolation thermique et son rôle pour limiter l'échange thermique indésirable. On a montré plusieurs systèmes d'isolation ainsi que leurs classifications.

On a vu aussi comment c'est fait l'échange thermique et l'effet du frottement de fluide dans une canalisation avec des expressions et des schémas pour mieux comprendre ce phénomène.

Chapitre 3
Problématiques
et modèle
analytique

3.1 Introduction

L'isolation peut être utilisée pour conserver la chaleur et maintenir les températures de fonctionnement en dehors de la région des hydrates. Ceci peut être efficace et mieux contrôlée pour les lignes terrestres ainsi pour les environnements en eaux ultra profondes, le comportement transitoire du système devient de plus en plus important et dictera souvent la conception d'un système de canalisation.

Cette perte de température est due à une perte pour l'environnement, les pertes environnementales contribuent une partie importante de la perte totale de chaleur.

3.2 Problématique Liées à l'Isolation

Le problème identifié est basé sur l'ingénierie de base du pipeline, dans laquelle la sélection de l'isolation appropriée et de sa caractéristique (épaisseur, ...) doit être effectuée pour la plage de température et de pression donnée aux conditions d'utilisation. De plus, il faut tenir compte de l'effet des diverses compositions du fluide pendant le cycle de fonctionnement.

Pendant la période d'arrêt de la production, la pression hydrostatique à l'intérieur de la canalisation terrestre et sous-marine peut atteindre 300 bars en raison de la stagnation de l'écoulement et de la chute de la température à 4°C seulement.

Les fluides chauds produits deviennent stagnants lorsqu'ils sont refroidis par l'eau de mer froide environnante (offshore) ou vent froid (onshore), ce qui entraîne la formation d'hydrates de gaz, a conclu que la continuité de la formation d'hydrates peut provoquer un blocage à l'intérieur du pipeline, ce qui peut avoir un impact important sur la disponibilité du système de production et provoquer un incident grave. La perte d'énergie potentielle vers l'environnement par le refroidissement de Joule Thompson, peut entraîner une diminution de la pression du gaz à enthalpie constante. Pour le pétrole brut, la cire commencera à se former à 15°C autour du périmètre intérieur du pipeline en raison d'un gradient de température élevé.

Par conséquent, la cire peut devenir si épaisse qu'elle obstrue la conduite d'écoulement si l'oléoduc n'est pas remis en service à temps. Ainsi, la période entre l'arrêt et le redémarrage du pipeline est la période la plus critique pour l'assurance de l'écoulement du pipeline. Il est donc suggéré d'appliquer un revêtement protecteur et des matériaux d'isolation autour de sa surface externe afin de ralentir la perte de chaleur et la chute de température [18].

3.2.1 Problèmes des Fuites dans un Pipeline

Le pipeline est exposé aux fuites internes et externe due aux phénomènes physiques qui les endurent (fluage, fatigue, corrosion, érosion...etc.) pour cela il existe des méthodes de détections de fuites internes et externes.

Les méthodes de détection des fuites se répartissent en deux groupes :

- Les méthodes non-continues (patrouilles en ligne), représenté dans l'inspection par hélicoptère, le raclage intelligent et les chiens dressés.
- Les méthodes continues, sont également subdivisées en deux groupes :
 - Les méthodes internes ;
 - Les méthodes externes [19].

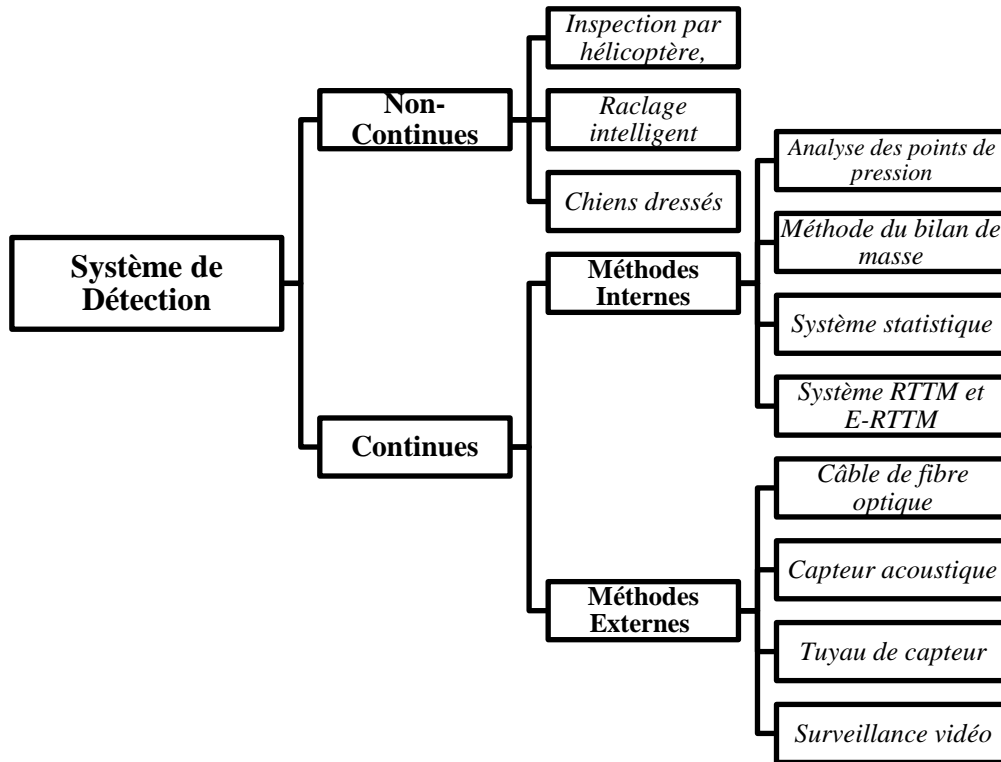


Figure 3.1 Différents Système de détection et de localisation des fuites [19]

3.3 Systèmes Externes Continus

3.3.1 Câble à Fiber Optique

Les substances à mesurer entrent en contact avec le câble lorsqu'une fuite se produit, ce qui a pour effet de modifier la température du câble. Les fuites du pipeline introduisent des anomalies de température locales à proximité du pipeline. Selon le type de substance transportée par le pipeline, il peut s'agir d'un réchauffement local (systèmes de chauffage) ou d'un refroidissement (gazoduc). Pour un transport optimisé du pétrole dans les pipelines, le pétrole est réchauffé et en cas de fuite, la température du sol environnant augmente en conséquence.

D'autre part, les fuites des gazoducs sous pression entraînent un refroidissement de la température en raison de l'expansion du gaz et de la chute de température associée, appelée effet Joule Thomson[20]. La technique de détection de température par fibre optique distribuée offre la possibilité de mesurer la température le long du pipeline[19].

La figure (2.3) décrit un câble à fibre optique installé le long du pipeline pour mesurer la température sur toute la longueur du pipeline.

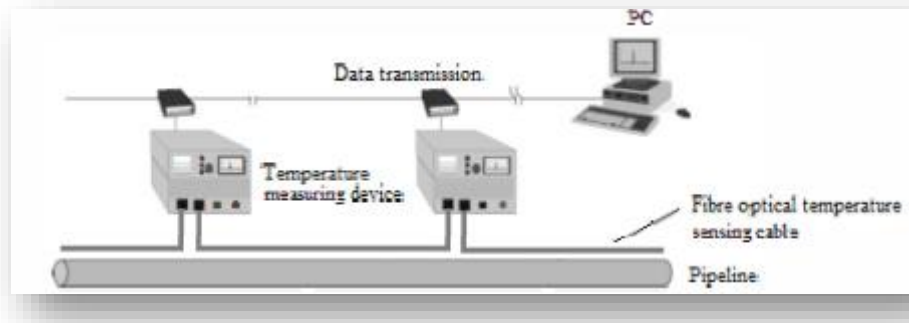


Figure 3.2 Système de câbles à fibres optiques [19]

Cette méthode permet une détection et une localisation précises des fuites. La principale limite est la longueur limitée du câble et le système ne peut plus fonctionner si le câble est terminé.

3.3.2 Systèmes Acoustiques

La détection des fuites dans les pipelines à l'aide de la technologie des émissions acoustiques repose sur le principe selon lequel le liquide qui s'échappe crée un signal acoustique (son) lorsqu'il traverse une perforation dans le pipe. Lorsqu'une fuite se produit, le signal acoustique de fréquence résultante est détecté et analysé par les processeurs du système.

Le signal reçu est plus fort à proximité de la fuite, ce qui permet de localiser les points de fuite. Le son produit par le gaz qui s'échappe se situe dans la gamme des ultrasons de 25 [kHz] à 70 [kHz] dans la plupart des modèles de détecteurs industriels. La détection acoustique peut être appliquée à l'extérieur des pipelines enterrés en utilisant des tiges d'acier enfoncées dans le sol pour conduire le son vers un capteur monté sur la tige. Les tiges sont insérées à intervalles réguliers le long du pipeline.

Les amplitudes de pression des ondes sonores sont généralement mesurées sur une échelle logarithmique (dB), appelée niveau de pression acoustique (Sound Pressure Level), donnée par l'équation (3.1)

$$SPL = 20 \log \left(\frac{P}{P_0} \right) \tag{3.1}$$

Où :

P_0 Amplitude de pression d'un son de référence.

3.3.3 Pipes de Détection

La figure (3.3) représente un système de pipes capteurs un dispositif de détection d'un milieu comprend un tuyau capteur à poser sur un milieu à détecter. Un matériau est disposé au moins à proximité du tuyau de détection. Le matériau réagit lorsqu'il est en contact avec le milieu à détecter pour produire une substance capable de diffuser et d'être détectée.

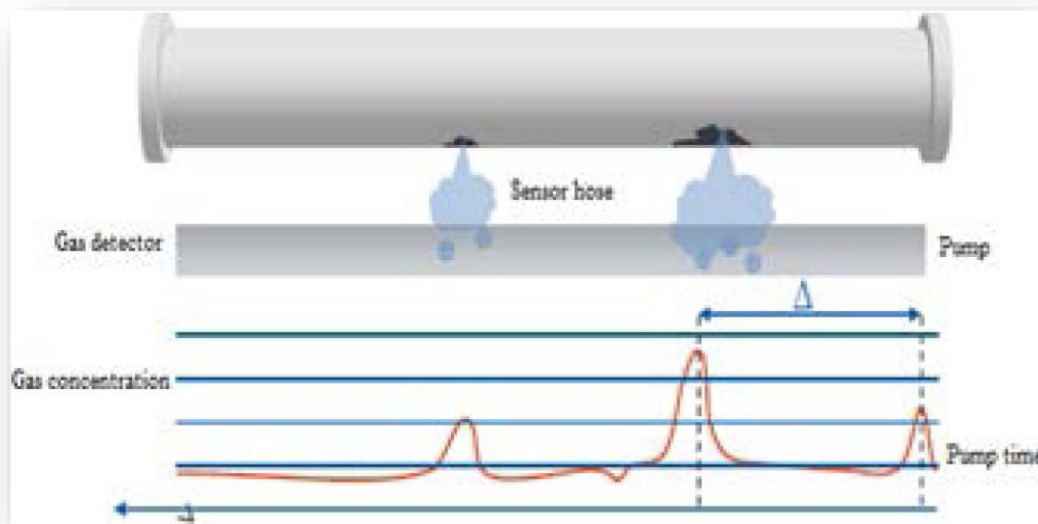


Figure 2.3 Système canalisation de détection [19]

Le système est capable de détecter de petites fuites, mais il est utile pour les canalisations courtes. La position du câble doit être choisie en fonction du milieu.

3.4 Systèmes Internes Continus

3.4.1 Analyse du Point de Pression

La méthode de détection des fuites par analyse du point de pression est basée sur les propriétés statistiques d'une série de mesures de la pression ou de la vitesse d'un pipeline en un point, qui sont différentes avant et après l'apparition d'une fuite. Une fuite modifie l'hydraulique de la canalisation, et donc les mesures de pression ou de débit. La méthode détecte les fuites en surveillant la pression du pipeline en un seul point de la ligne et en le comparant à une tendance statistique courante construite à partir des mesures de pression précédentes.

La source de l'onde de pression s'étend du point de fuite aux extrémités amont et aval de la fuite. En prenant la pression avant la fuite comme critère de référence, l'onde générée par une telle fuite est

appelée onde de pression négative. Lorsque l'onde de pression négative atteint l'extrémité du pipeline, elle provoque une chute de la pression d'entrée de la station, puis de la pression de sortie de la station.

En se basant sur la différence de pression détectée par les capteurs de pression des deux côtés, la longueur du pipeline et la vitesse de l'onde de pression négative, le point de fuite peut être déterminé. L'analyse du point de pression peut détecter de petites fuites qui ne peuvent pas être détectées par d'autres méthodes. Cependant, il est difficile pour cette méthode de localiser les points de fuite.

3.4.2 Systèmes Statistiques

Les systèmes statistiques de détection des fuites utilisent des méthodes et des processus issus de la théorie de la décision. Cela permet d'optimiser la décision relative aux fuites si certaines hypothèses statistiques sont vérifiées. Le test d'hypothèse pour la détection des fuites basé sur le bilan massique non compensé, utilise soit une seule mesure, soit plusieurs mesures effectuées à des moments différents. Pour attribuer une mesure unique Δ aux hypothèses H_0 et H_1 , une limite d'alarme γ est définie [17]. Le test est défini par l'équation (3.2) :

$$\Delta \begin{cases} \leq \gamma \rightarrow H_0 \\ > \gamma \rightarrow H_1 \end{cases} \tag{3.2}$$

3.4.3 Système Basé sur RTTM

RTTM est l'acronyme de Real-Time Transient Model (modèle transitoire en temps réel). Il détecte les fuites dans le pipeline à l'aide de modèles mathématiques basés sur des lois physiques telles que la conservation de la masse, la conservation de la quantité de mouvement et la conservation de l'énergie. Les méthodes RTTM peuvent être considérées comme une amélioration des méthodes d'équilibrage car elles utilisent en plus le principe de conservation de la quantité de mouvement et de l'énergie. La méthode calcule le débit massique, la pression, la densité et la température à chaque point du pipeline en temps réel à l'aide d'algorithmes mathématiques. La méthode RTTM LDS peut facilement modéliser l'écoulement en régime permanent et transitoire dans un pipeline.

En utilisant la technologie RTTM, les fuites peuvent être détectées dans des conditions stables et transitoires (principalement dans les gazoducs).

Les systèmes modernes basés sur le RTTM calculent le débit dans le pipeline à partir de la pression et de la température à l'entrée et à la sortie, comme le montre la figure (4.3). Ce débit calculé est

ensuite comparé au débit mesuré (par un débitmètre à l'entrée et à la sortie). La différence entre les valeurs calculées et mesurées à l'entrée (ou à la sortie) est proche de zéro. Par exemple, le débit change, tout comme la pression, mais la différence entre le débit calculé et le débit mesuré ne change pas. Des transitoires sont présents le long de la canalisation, mais le système n'en est pas affecté. La différence entre le débit calculé et le débit mesuré n'apparaît que lorsqu'il y a une fuite. Dans ce cas, la pression (et donc le débit calculé) se déplace à cause de la fuite, alors que le débit mesuré reste constant. Une telle différence est beaucoup plus facile à identifier et constitue un indicateur plus fiable. La RTTM implique la simulation informatique de l'état du pipeline à l'aide d'une mécanique des fluides et d'une modélisation hydraulique avancées [19].

Les principaux inconvénients de cette méthode sont les coûts associés à la mise en œuvre du RTTM et la complexité du système, car elle nécessite de nombreux instruments et une formation poussée des contrôleurs ainsi que la maintenance du système.

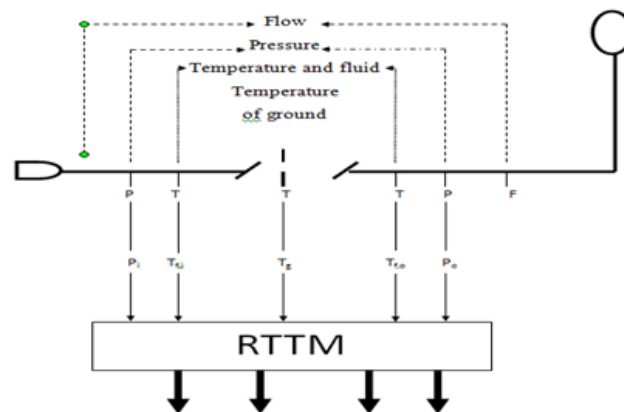


Figure 3.4 RTTM système [19]

3.5 Pression /Dépression

Au fur et à mesure que l'on se déplace sur la longueur du pipeline, une plus grande quantité de cire est déposée sous pression en raison de la diminution de la température. L'équation de Darcy Weisbach [21] est utilisée dans cette étude pour calculer la chute de pression sur la longueur du pipeline.

$$\Delta P = \frac{f \times \rho \times L}{D} \times \frac{V^2}{2} \tag{3.3}$$

Où :

f Donné comme le facteur de friction de la canalisation.

- L* Longueur de la canalisation en mètres[m].
- V* Vitesse de l'écoulement en [m/s].
- P* Densité de l'huile en [kg/m³].
- D* Diamètre du tuyau en mètres[m].

Régime d'écoulement	Nombre de Reynolds : R_e	Facteur de frottement : f
Laminaire	< 2000	$f = \frac{64}{R_e}$
Transitoire		$f = \frac{1}{\left[2 \log\left(\frac{\epsilon}{3.7 D} + \frac{2.51}{R_e f^{1/2}}\right)\right]^2}$
Turbulent	> 10 ⁶	$f = \frac{1}{\left[2 \log\left(\frac{\epsilon}{3.7 D}\right)\right]^2}$

Tableau 3.1 calcule de facteur de frottement

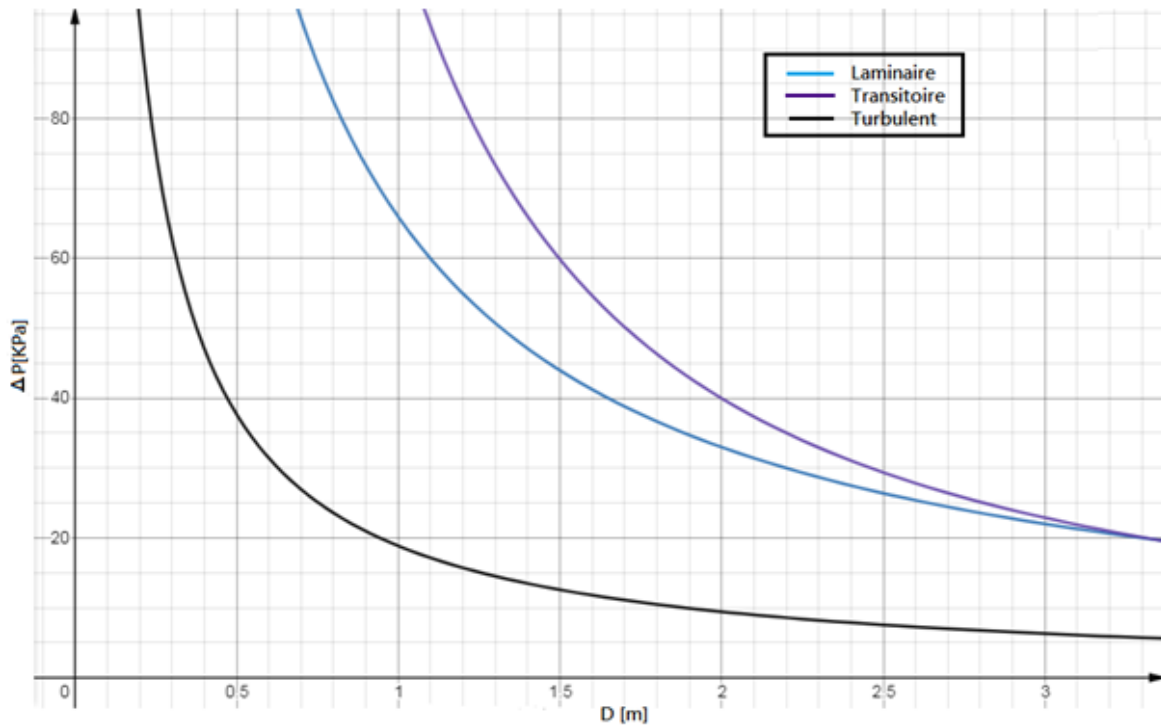


Figure 3.5 Variation de pression en fonction de diamètre du pipe

Pour faire une comparaison de la différence de pression dans le pipe dans différents cas d'écoulement d'un fluide (laminaire, transitoire, turbulent) par rapport la variation du diamètre de pipe, le fluide dans notre étude est le pétrole brut avec $\rho = 785.3 [Kg/m^3]$.

Les pertes de pression en fonction du diamètre illustré dans la (figure 3.5) et d'après l'équation Darcy Weisbach [21] montre que la variation ΔP diminue avec la croissance du diamètre du pipe, ainsi que dans le cas d'écoulement turbulent la variation ΔP diminue avec le diamètre de la pipe.

L'écoulement du fluide dans un pipeline est soit un écoulement laminaire dans toute la conduite, soit seulement dans la fine sous-couche laminaire près de la paroi de la conduite. Pendant le processus de refroidissement du pipeline, il existe un gradient de température à travers la sous-couche laminaire.

La solubilité des cires (hydrates) dépend fortement de la température. Lorsque la température de l'huile est supérieure à la température d'apparition de la cire, l'huile n'est pas saturée en cire dissoute et par conséquent gradient de concentration de la cire dissoute est effectivement nul.

Les premiers cristaux de cire commencent à se former à la température d'apparition de la cire. N'oubliez pas que le dépôt de cire ne se produit que lorsque la température de la surface de dépôt dans un tuyau, et non la température moyenne de l'huile, est inférieure à la température d'apparition de la cire.

Dans le cas d'un écoulement turbulent, le mouvement latéral des tourbillons du fluide entraîne un transport rapide des cristaux de cire précipités ou dissous. Le long du pipeline, il y aura une concentration latérale essentiellement uniforme de matériaux précipités et dissous dans le noyau turbulent et la couche tampon. Le transport à travers la sous-couche laminaire est plus lent. Dans cette zone, le taux net de transport est contrôlé. Les mécanismes de dépôt de cire contribuent au transport latéral de la matière. Certains mécanismes de dépôt de cire favorisent la croissance du dépôt, d'autres mécanismes font le contraire.

Au fur et à mesure que le refroidissement se poursuit, le gradient augmente jusqu'à atteindre une valeur stable. La diminution de la température dans la canalisation entraîne une diminution du coefficient de température radial et du coefficient de diffusion. Juste en dessous du WAT, le taux de dépôt de cire augmente jusqu'à une valeur maximale. La quantité de cire dissoute diminue au fur et à mesure que la température diminue et lorsque la température dans la canalisation se rapproche de la température ambiante, le taux de dépôt de cire diminue progressivement. Le dépôt de cire disparaît lorsqu'il n'y a pas de différence de température entre l'huile et la paroi, même si la température de l'huile est très inférieure à la température ambiante.

Il convient de mentionner que le taux de dépôt de cire dépend de la composition de l'huile, de la température de l'huile, de la température ambiante autour du tuyau, des conditions d'écoulement, de la taille du pipeline, de l'isolation et de la pression du système [22].

3.6 Perte de Température (Transfert de Chaleur)

La perte/le gain de chaleur a lieu à partir d'un pipe transportant un fluide plus chaud/plus froid que la température ambiante (extérieure). L'isolation réduit les pertes de chaleur vers l'environnement (le milieu extérieur). La perte de chaleur dépend d'un certain nombre de facteurs tels que l'épaisseur de l'isolation, la température ambiante (extérieure), la vitesse du vent, la vitesse d'écoulement du fluide transporté, etc [23].

3.6.1 Transfert de Chaleur par Convection

Le transfert de chaleur entre la paroi du tube ou du tuyau et le fluide en circulation est supposé se faire par convection uniquement et est calculé simplement en utilisant l'équation de la loi de Newton.

$$q = hA(T_f - T_s) \tag{3.4}$$

Où :

h Coefficient de transfert de chaleur par convection [W/m^2K],

A Surface [m^2]

T_f et ***T_s*** Températures du fluide et de la surface solide, respectivement. [K]

Le *h* dépend des propriétés physiques du fluide (i.e. densité du fluide, viscosité, température, conductivité et rugosité de la paroi du pipe) et de la nature de l'écoulement (laminaire ou turbulent) [23].

En supposant une chaleur spécifique constante, *C_p* sur une longueur du pipe, l'énergie totale ajoutée dans le pipe peut être exprimé en termes de différence de température globale par l'équation suivante :

$$q = \dot{m}c_p(T_{in} - T_{out}) \tag{3.5}$$

Où :

T_{in} et ***T_{out}*** Températures globales à l'entrée et à la sortie, respectivement,

ṁ Débit massique du fluide (doit être égal à la chaleur totale transfert entre la paroi du pipe et le fluide).

$$q = h(2\pi rL)(T_{in} - T_{out}) \tag{3.6}$$

Où :

A et ***L*** Respectivement l'aire interne et la longueur,

q et ***T*** Valeurs moyennes de la paroi du pipe et les températures du fluide (en réalité les températures du fluide et des parois peuvent varier le long du tube).

Le calcul domaine est donc divisé en nombre de petits volumes de contrôle (concentriques anneaux). Les valeurs de températures sont évaluées dans chaque nœud et sont mises à jour par e temps. Le domaine fluide à l'intérieur de pipe n'est pas subdivisé en radial directions, tous les nœuds dans le fluide sont situés au centre du tube à différentes coordonnées de longueur, voir figure (5.3). Ainsi, seules les températures globales sont prises en compte.

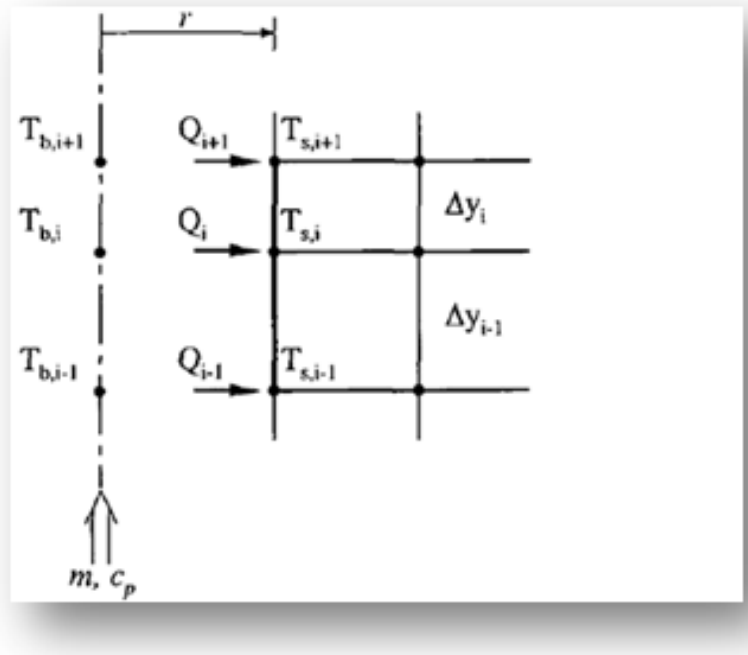


Figure 3.6 Modèle de flux de chaleur entre le fluide et la paroi intérieure de pipe [23]

Le transfert de chaleur Q , à travers l'interface entre la paroi du tube et le fluide pour chaque volume de contrôle i pendant un pas de temps donné, s'exprime par :

$$Q_i = h(2\pi r) \left(\frac{1}{2} (\Delta y_{i-1} + \Delta y_i) \right) (T_{b,i} - T_{s,i}) \tag{3.7}$$

Où :

r Rayon du pipe.

Δ_y Longueur du volume de contrôle en axial direction.

Le bilan du flux d'énergie pour le même volume de contrôle peut être exprimé sous la forme de l'équation suivante :

$$\frac{1}{2}(Q_{i+1} + Q_i = mc_p(T_{b,j} - T_{b,j+1})) \tag{3.8}$$

L'équation (3.9) peut être utilisée pour calculer séquentiellement la température globale le long du pipe pour un nouveau pas de temps à $(f + dr)$ commençant au nœud d'entrée où la température est donnée par :

$$T_{b,i+1}^{t+\Delta t} = T_{b,i}^{t+\Delta t} - \frac{1}{2}(Q_{i+1}^t + Q_i^t)/mc_p \tag{3.9}$$

Le transfert de chaleur Q , est approximé par sa valeur à l'instant t . Ces nouveaux ensembles de nœuds des températures d'écoulement en vrac sont ensuite utilisées pour calculer les valeurs de Q , à l'instant $(t + \Delta t)$, qui est utilisé pour calculer la nouvelle température de surface par les analyses par éléments finis de la structure analysée [23].

3.6.1.1 Calcul du Transfert de Chaleur Convectif

A l'intérieur de le pipe, le coefficient de transfert de chaleur, h est calculé par le suivant expression empirique (11.3) à un écoulement turbulent pleinement développé selon Sieder et Tate [24]:

$$h = \frac{0.027k(Re)^{0.8}Pr^{\frac{1}{3}}}{d} (\mu/\mu_x)^{0.14} \tag{3.10}$$

Où :

d Diamètre interne du tube.

k et μ Conductivité et viscosité cinématique du fluide à la température globale, respectivement.

μ_x Viscosité dynamique à la température de la paroi

u Vitesse du fluide dans le tube.

Re Nombre de Reynolds.

Pr Nombre de Prandtl.

Dans la zone d'entrée lorsque l'écoulement n'est pas développé, l'équation suivante est recommandée:

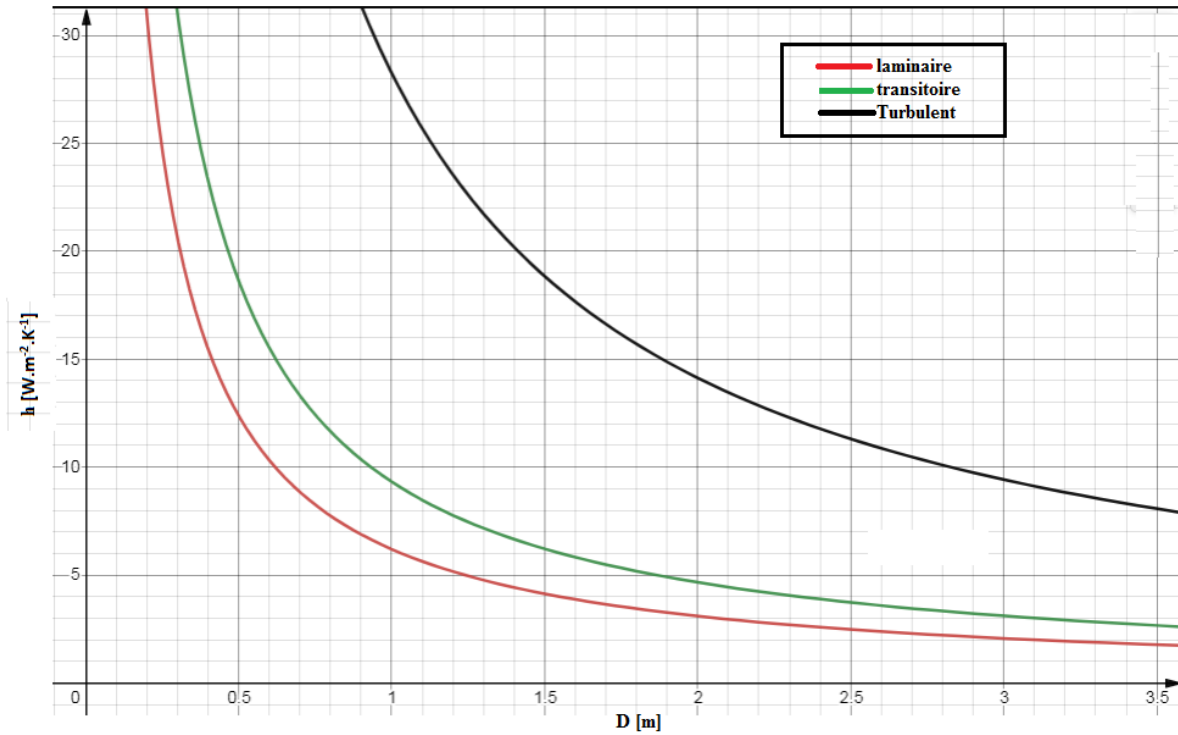


Figure 3.7 Variation de coefficient de transfert de chaleur en fonction de différents cas d'écoulement Reynolds

Pour la l'analyse de coefficient transfert de chaleur dans différents cas d'écoulement (laminaire, transitoire, turbulent) du pétrole brut, on remarque que la transmission thermique (h) augmente avec la diminution de diamètre du pipe, dans ce-là on a les relations décroissantes entre les deux paramètres (h /: d) et voir la variation de h (coefficient de transferts de chaleur par convection) qui varie par rapport au type d'écoulement et il devient important dans le cas d'un écoulement laminaire.

la viscosité cinématique est de $u = 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$

et la viscosité dynamique et de $u_x = 7.58 \cdot 10^{-4} \text{ kg/ms}$

$$h = \frac{0.036k(Re)^{0.8}Pr^{\frac{1}{3}}}{d} (d/L)^{0.055} \tag{3.11}$$

Où :

L Longueur du pipe.

Pour le flux laminaire ($Re < 2300$), l'expression du coefficient de transfert thermique peut-être calculé comme (Sieder et Tate) [24].

$$h = \frac{1.86k(RePr)^{1/3}}{d} (\mu/\mu_x)^{0.14} \left(\frac{d}{L}\right)^{1/3} \tag{3.12}$$

L'équation (3.12) est le coefficient de transfert de chaleur moyen est basé sur l'arithmétique moyenne des différences d'entrée et de sortie. Dans l'équation (3.12) la température est évalué au niveau de la paroi du tube, toutes les autres propriétés sont évaluées aux températures moyennes en vrac[17].

3.6.2 Transfert de Chaleur par Conduction « k »

C'est le transfert de chaleur au sein du pipe, sans déplacement de matière, sous l'influence d'une différence de température. La propagation de la chaleur par conduction à l'intérieur d'une canalisation s'effectue selon deux mécanismes distincts :

- Une transmission par les vibrations des atomes ou molécules
- Une transmission par les électrons libres [25].

La théorie de la conduction repose sur l'hypothèse de Fourier [26], la densité de flux est proportionnelle au gradient de température :

$$\vec{\varphi} = -\lambda S \overrightarrow{grad}(T) \tag{3.13}$$

Ou sous forme algébrique :

$$\varphi = -\lambda S \frac{\partial T}{\partial x} \tag{3.14}$$

Avec :

- Φ Flux de chaleur transmis par conduction [W]
- λ Conductivité thermique du milieu [$W m^{-1} \text{ } ^\circ C^{-1}$]
- x Variable d'espace dans la direction du flux [m]
- S Aire de la section de passage du flux de chaleur [m^2]

3.7 Modèle Réel

L'environnement des pipelines, peut impliquer des températures basses ainsi que des pressions élevées, des coupures d'eau importantes et des temps de transfert plus longs, offre des conditions idéales pour la formation d'hydrates et de cire, et d'autres dépôts solides [27]. Il s'agit là d'obstacles fondamentaux à la production de pétrole et de gaz par des pipelines de longue distance, en particulier dans les situations d'arrêt et de redémarrage. Bien que les installations de traitement et de transport existantes permettent cette exploitation, une garantie de débit adéquate est nécessaire. L'assurance du débit est un phénomène qui garantit l'écoulement réussi et économique du flux d'hydrocarbures du réservoir au point de vente [28].

Des problèmes de transport liés à la température peuvent survenir car si les pipelines ne sont pas isolés, la température chute rapidement. Cela peut conduire à la précipitation

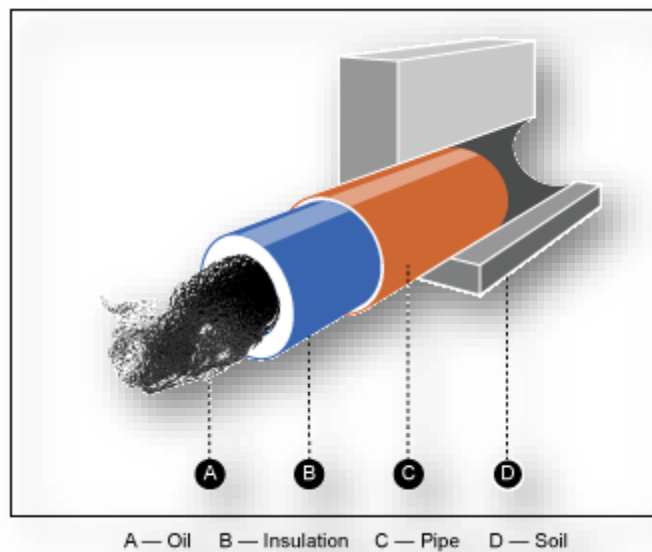


Figure 3.8 exemple d'isolation pipeline

d'asphaltées et/ou de paraffine et à la formation d'hydrates [29]. Ces problèmes d'assurance de l'écoulement peuvent entraîner une perte de production et le blocage des pipelines. Ainsi, lors de l'ingénierie détaillée d'un pipeline, il devient obligatoire de choisir le type et l'épaisseur d'isolation appropriés (Figure 6.3) dès les premières étapes du projet, afin d'assurer l'écoulement correct des fluides dans le pipeline, dans les conditions d'exploitation souhaitées[30].

3.7.1 Prévention Thermique de l'Hydrate

Comme les arrêts de gazoducs pendant l'hiver étaient à une époque communément supposés être causés par le gel de l'eau, l'une des méthodes les plus efficaces utilisées pour éliminer ces arrêts était d'appliquer de la chaleur à la ligne. Bien qu'efficace dans certains cas, le feu ouvert à proximité d'un gazoduc transportant du gaz naturel constitue un risque d'incendie qu'il convient d'éviter. Cette méthode exige que le gazoduc soit enflammé en brûlant des matériaux combustibles en contact étroit avec la canalisation. Mais si l'on ne fait pas attention, le tuyau peut être surchauffé et enlevé, une telle rupture du pipeline peut entraîner un grave incendie [31]. Cette méthode ne peut être efficace que si la position du blocage dû à l'hydrate peut être déterminée exactement.

Le profil de température en régime permanent du fluide produit peut être utilisé pour identifier les débits et la préférence d'isolation qui peuvent maintenir le système au-dessus de la température minimale critique pendant la production.

L'analyse thermique d'un système de production typique, qui prédit le profil de température le long de la conduite d'écoulement, est l'une des étapes les plus importantes de la conception du pipe. Le pipeline est exposé au courant marin ou au vent terrestre de refroidissement, ainsi le gaz à l'intérieur du pipeline est refroidi à des températures qui favorisent la formation d'hydrates [27]. Cependant, l'analyse du transfert de chaleur des systèmes de pipelines est d'une grande importance pour la prédiction et la prévention des formations d'hydrates [29].

En supposant que la température subit par le pipe de l'extérieure est constante, les équations gouvernantes résultantes du problème de transfert de chaleur dans les pipelines dans des conditions d'écoulement de fluide en régime permanent de Boyun, et. al. [29] sont résumées dans la présent partie[30].

$$T = \frac{1}{\alpha^2} [\beta - BL - C - e^{-\alpha(L+C)}] \tag{3.15}$$

De même, le taux de transfert de chaleur sur toute la longueur de la canalisation à travers la couche d'isolation est exprimé comme suit;

$$q = -\frac{2\pi Rk}{s} \times (T_0 L - \frac{G \cos \theta}{2} L^2 - \frac{1}{\alpha^2} \{ \beta - \alpha \gamma \} L - \frac{\alpha \beta}{2} L^2 + \frac{1}{\alpha} \{ e^{-\alpha(L+C)} - e^{-\alpha C} \}) \tag{3.16}$$

Où :

q Taux de transfert de chaleur (perte de chaleur)

Et les constantes sont :

$$B = \alpha\beta \tag{3.17}$$

$$C = \alpha\gamma \tag{3.18}$$

$$\alpha = \frac{2\pi Rk}{v\rho C_p s A} \tag{3.19}$$

$$\beta = \alpha G \cos\theta \tag{3.20}$$

$$\gamma = -\alpha T_0 \tag{3.21}$$

$$C = -\frac{1}{\alpha} \ln(\beta - \alpha^2 T_s - \alpha\gamma) \tag{3.22}$$

Et :

- T Température à l'intérieur du tuyau, [$^{\circ}C$]
- L Distance longitudinale du point d'entrée du fluide, [m]
- R Rayon intérieur de la couche d'isolation, [m]
- k Conductivité thermique du matériau isolant, [$W m^{\circ}C$]
- v Vitesse moyenne d'écoulement du fluide dans le tuyau, [ms]
- ρ Densité du fluide, [kg/m^3]
- C_p Capacité thermique du fluide à pression constante, [$J/kg^{\circ}C$]
- s Epaisseur de la couche d'isolation, [mm]
- A Surface de la section intérieure du tuyau, [m]
- G Gradient thermique principal à l'extérieur de l'isolation [$W/m^{\circ}C$]
- θ Angle entre le gradient thermique principal et l'orientation du tuyau, l'orientation du tuyau [θ°]
- T_0 Température du fluide extérieur à l'entrée du fluide [$^{\circ}C$]
- T_s Température du fluide à l'endroit de l'entrée du fluide [$^{\circ}C$]

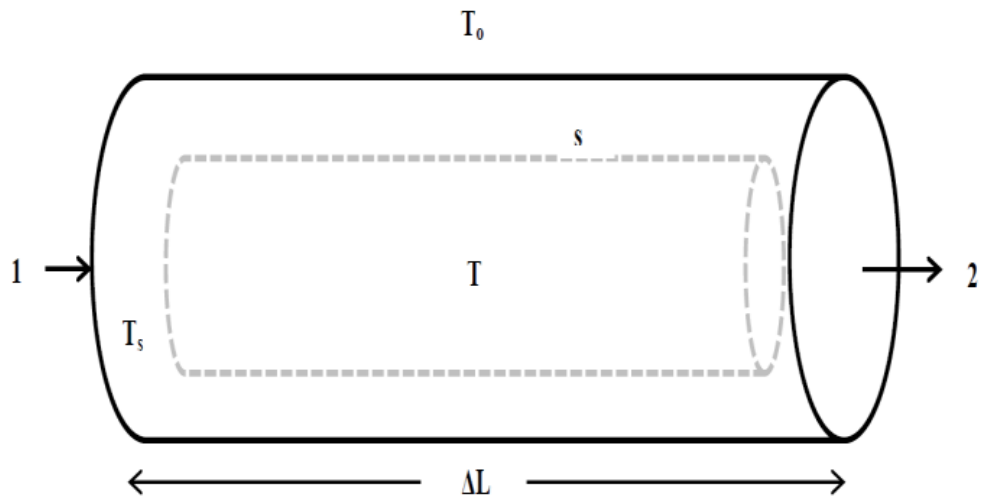


Figure 3.9 Variation de la température le long de pipeline

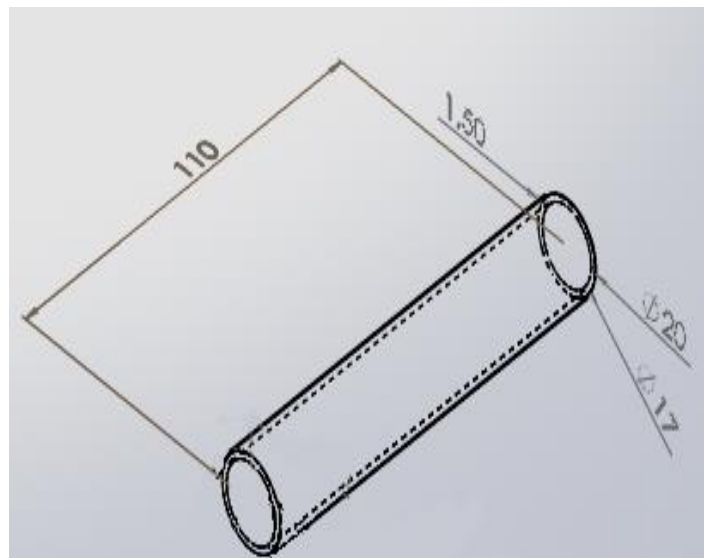
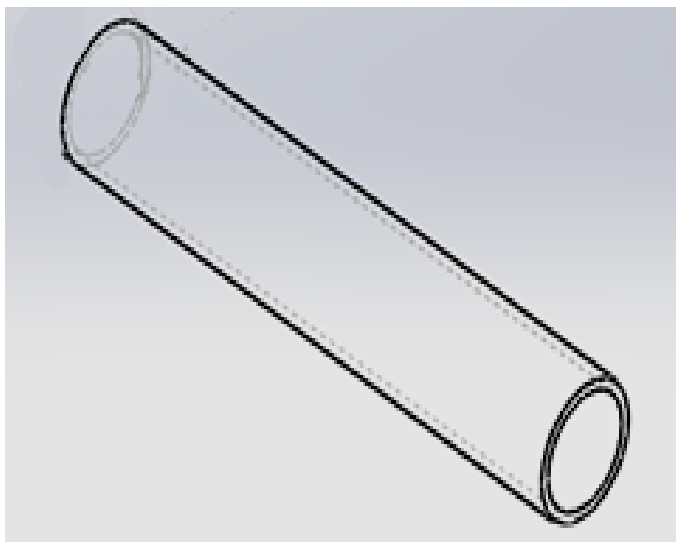
La figure 3.9 représente un pipeline transportant un fluide du point 1 au point 2. La canalisation a été divisées par segments égaux et en analysant un court segment de longueur, la variation de la température du fluide de production le long du pipeline a été déterminée en appliquant le principe de transfert de chaleur.

3.7.2 Cas d’Etude

Dans un champ de pétrole et de gaz le pipeline est conçu pour transporter le gaz naturel (exemple : d'une plate-forme satellite vers une autre de traitement). L'analyse d'assurance d'écoulement est nécessaire pour déterminer l'isolation minimale requise.

Ces analyses comprennent les suivantes :

- 1) L'analyse flash du fluide de production qui détermine la température de formation des hydrates dans la plage de pression d'exploitation.
- 2) L'analyse du transfert de chaleur, qui permet de déterminer le type et l'épaisseur de l'isolation requise pour le pipeline.
- 3) L'étude de notre par un modèle numérique utilisant un code de calcul .



3.10 Modèle de pipe

Conclusion

Dans ce chapitre on a traité l'isolation d'une manière plus détaillée afin de mieux appréhender les problématiques liées à la fabrication, l'exploitation et la maintenance des canalisations.

Après on a précisé les différents types de transfert de chaleur et leurs méthodes de calculs avec un exemple d'un modèle réelle.

Ensuite, on a ajouté un modèle analytique dans un oléoduc pour amplifier la compréhension de notre étude.

Chapitre 4

Modèle de Calcul

Modélisation

4.1 Introduction

La simulation numérique est un moyen performant d'analyse et de compréhension des phénomènes physiques. Cette méthode est, de plus, amenée à prendre une part de plus en plus importante en recherche. En effet, pour décrire correctement le comportement de composants dont la taille ne cesse de décroître, il est de plus en plus nécessaire de faire appel à des modèles microscopiques. Ces modèles ne présentant, en général, pas de solution analytique, la méthode numérique doit être employée. Celle-ci permet, soit d'orienter le choix des approximations dans les approches analytiques, soit d'obtenir des résultats directement comparables à ceux de l'expérience. Il s'agit ici d'un apport de la simulation à la compréhension des effets physiques mis en jeu. Une fois cette compréhension établie, la simulation complète de composant apporte une aide déterminante à la conception de nouveaux dispositifs.

L'objectif de cette étude influence du diamètre du pipeline sur quelques caractéristiques du transfert thermique telles que la température le gradient et le flux thermique, Cette analyse contient l'application du code COMSOL à l'étude du transfert thermique en condition Tridimensionnel pour le cas d'un pipeline peu profond. Les premiers calculs sont réalisés en considérant le régime permanent du transfert thermique.

4.2 Présentation du code de calcule utiliser

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.



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.

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 algébro-différentiels (EAD) sont également possibles.

4.3 Modèle de Calcule

4.3.1 Aspect théorique sur le modèle de calcule

Lorsqu'un fluide circule dans un pipeline, la chaleur est dissipée en raison des contraintes internes du fluide. Avec une bonne isolation du pipeline, une préparation préalable est effectuée pour maintenir la température du fluide selon les besoins, bien qu'il doive être transporté sur de longues distances dans un environnement caractérisé par un changement de température qui peut être supérieur et/ou inférieur à celle du fluide. Ce modèle utilise l'interface *'Nonisothermal Pipe Flow'* pour configurer et résoudre les équations d'écoulement et d'énergie décrivant le transport du fluide dans une section de pipeline. Avec l'ajout d'une interface d'optimisation, l'épaisseur de l'isolation du pipeline peut être trouvée de sorte que la température soit constante le long de la section du pipeline.

4.3.2 Modèle proposé

Dans cette étude on a du pétrole qui s'écoulant à un débit de $2500 [m^3/h]$ entre dans une section d'oléoduc de $150 [km]$ avec une température de $25 [^{\circ}C]$. La température moyenne à l'extérieur de l'oléoduc la température est de $-10 [^{\circ}C]$.



Figure 4.1 : Une section de pipeline transportant du pétrole brut.

4.3.3 Simplification / Formulation du modèle proposé

Pendant l'isolation d'une Section du Pipeline, les équations de continuité et de quantité de mouvement ci-dessous décrivent l'écoulement de l'huile à l'intérieur d'un tuyau horizontal.

$$\nabla \cdot (A\rho u) = 0 \quad (4.1)$$

$$0 = -\nabla p - f_{D\frac{\rho}{2d_h}} u|u| \quad (4.2)$$

Avec :

A Section transversale du tuyau, $[m^2]$

ρ Densité, $[kg/m^3]$

u Vitesse du fluide, $[m/s]$

p Pression, $[N/m^2]$

Le deuxième terme du côté droit de l'équation au dessous (4.3) décrit la chute de pression due aux contraintes internes du fluide. Le terme contient le facteur de friction de Darcy, f_D , qui est une fonction du nombre de Reynolds et de la rugosité de la surface divisée par le diamètre hydraulique de la conduite.

Dans cet exemple, f_D est calculé à partir de l'équation de Haaland. Elle peut récupérer à la fois petites et grandes limites de rugosité relative pour une large gamme de nombres de Reynolds ($4.10^3 < Re < 1.10^8$)

$$\sqrt{\frac{1}{f_D}} = -1.8 \log\left(\left(\frac{e}{3.7}\right)^{1.11} + \left(\frac{6.9}{Re}\right)\right) \quad (4.3)$$

Les interfaces d'écoulement des tuyaux ont l'équation de Haaland [32] et plusieurs autres modèles de friction prédéfinis et calculent automatiquement le facteur de friction en fonction des propriétés locales de la conduite, des propriétés physiques du fluide et de la vitesse du fluide.

4.3.3.1 Equations de Transferts de Chaleur

L'équation énergétique du flux dans le pipeline est :

$$\rho A C_p u \cdot \nabla T = \nabla A k \nabla T + f_D \frac{\rho}{2d_h} |u|^3 + Q_{wall} \quad (4.5)$$

Où :

C_p Capacité thermique à pression constante, $[J/kgK]$

T Température, $[°K]$

k Conductivité thermique, $[W/mK]$

Le deuxième terme de l'équation (4.3) correspond à la chaleur libérée par le travail des forces de friction internes (forces de frottement internes).

Q_{wall} Terme de source/paroi dû à l'échange de chaleur avec l'environnement à travers la paroi de pipe, $[W/m]$.

$$Q_{wall} = hZ(T_{ext} - T) \quad (4.6)$$

Où :

Z Périmètre du tuyau, $[m]$.

h Coefficient global de transfert de chaleur et T_{ext} (K) la température extérieure au tuyau, $[W/m^2K]$.

Le coefficient global de transfert de chaleur comprend la contribution de la résistance de la couche interne, de la résistance de la paroi et de la résistance de la couche externe.

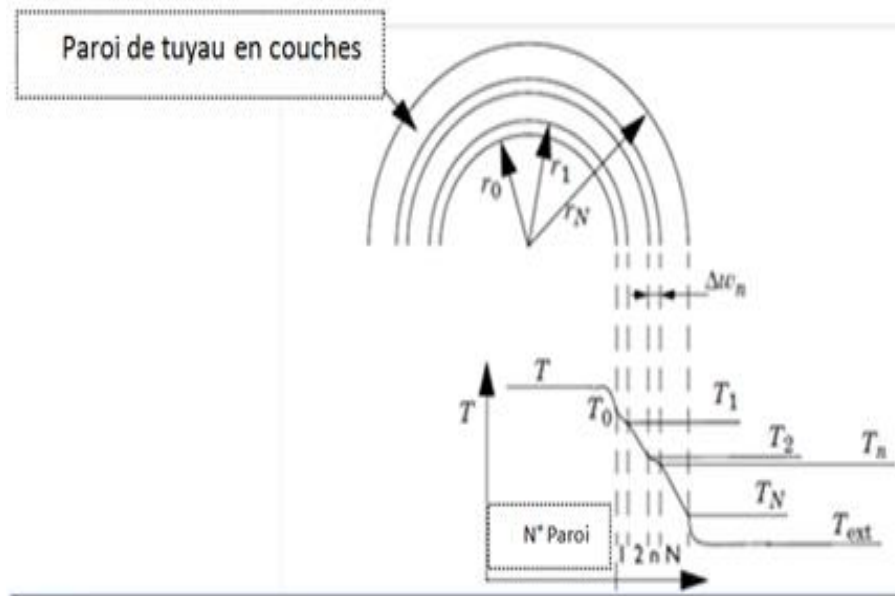


Figure 4.2 : Résistance au transfert de chaleur de la paroi.

Pour un tuyau circulaire, en supposant une température égale à celle de la circonférence du tuyau, et que le transfert de chaleur à travers la paroi est quasi statique, un hZ effectif dans l'équation (26.3) est donné par :

$$hZ_{eff} = \frac{2 \pi}{\frac{1}{r_0 h_{int}} + \frac{1}{r_N h_{ext}} + \sum_{n=1}^N \left(\frac{\ln \left(\frac{r_n}{r_{n-1}} \right)}{k_n} \right)} \tag{4.7}$$

Où :

r_n Rayon extérieur de la paroi n ,

h_{int} et h_{ext} coefficients de transfert de chaleur par film à l'intérieur et à l'extérieur du tube, respectivement.

k_n Conductivité thermique de la paroi n .

Pour ce cas particulier, avec une paroi de tube et une couche d'isolation, cela se simplifie comme indiqué dans la figure (4.3)

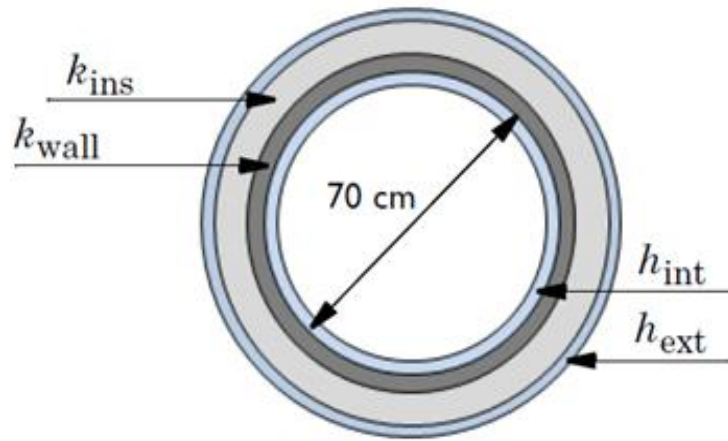


Figure 4.3 : Coupe transversale de la canalisation. Une paroi à deux couches (gris foncé et gris clair) et le film résistances du film à l'intérieur et à l'extérieur (bleu clair).

Les propriétés du tuyau et du matériau d'isolation sont indiquées dans le tableau ci-dessous.

Nom	Valeur[Unité]	Description
d_{wall}	2 [cm]	<i>Épaisseur de la paroi du tuyau</i>
K_{wall}	45 [W / m. k]	<i>Conductivité thermique de la paroi du tuyau</i>
d_{ins}	À déterminer	<i>Épaisseur d'isolation</i>
k_{ins}	0.025 [W / m. k]	<i>Conductivité thermique de l'isolation</i>

Table 4.1 : Caractéristiques de Pipe.

La résistance du film à l'intérieur du tuyau est donnée par :

$$h_{int} = Nu_{int} \frac{k_{oil}}{d} \tag{4.8}$$

Avec une corrélation de Nusselt [33]:

$$Nu_{int} = \frac{\frac{f_D}{8}(Re - 1000)Pr}{1 + \sqrt{12.7} (Pr^{\frac{2}{3}} - 1)} \tag{4.9}$$

La résistance du film due au flux d'air externe autour de la canalisation est donnée par :

$$h_{ext} = Nu_{ext} \frac{k_{air}}{d} \tag{4.10}$$

Où :

Nu_{ext} Calculé avec une relation de convection forcée, en supposant une vitesse moyenne d'air de 5 [m/s]

$$Nu_{ext} = 0.3 + \frac{0.62\sqrt{Re} Re^{1/3}}{\left[1 + \left(\frac{0.4}{Pr}\right)^{2/3}\right]^{1/4}} + \left[1 + Re(285)^{5/8}\right]^{4/5} \quad (4.11)$$

4.4 Modélisation

4.4.1 Préparation du Model

Aujourd'hui, grâce au développement important, des moyens informatiques de calculs et des simulateurs numérique, l'aspect théorique de l'isolation d'une section de pipeline on générale ou l'étude d'une fuite d'un gaz ou liquide dans une conduite on particulier, c'est peut-être moins complexe et réaliste, 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 le cas de notre étude qui représente une isolation d'une conduite qui pouvant inclure une étude des dégâts de fuite plus 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 phase différente, le couplage entre le fluide et la surface solide passant par des différentes couches de matériaux d'isolation ainsi que la surface de contact et la température d'échange (intérieur / extérieur). De ce fait, il a été nécessaire de procéder par étapes.

L'objet de cette étude, qui s'attache à la faisabilité d'isolation d'une section de pipeline et une prévision du comportement des deux milieux (fluide / structure) dans un événement d'échange de température l'attacher à la vitesse de l'écoulement du fluide a l'intérieur de la conduite. La méthode numérique choisie doit donc privilégier la modélisation de couplage entre deux domaines différents, car seule l'analyse d'échange de la température est essentielle. Pour cette raison, une approche de type élément finis explicite, développée pour l'étude de ce phénomène d'interaction fluide structure, est adoptée pour cette étude 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 01*.

4.4.2 Démarche de la Modélisation

La présente phase dans cette étude décrit l'organigramme de modélisation vue les résultats souhaité et illustre par différentes applications et conditionnement (figure 4.2) la nature ou le degré

d'isolation. Nous utilisons dans l'interface multiphysique 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.

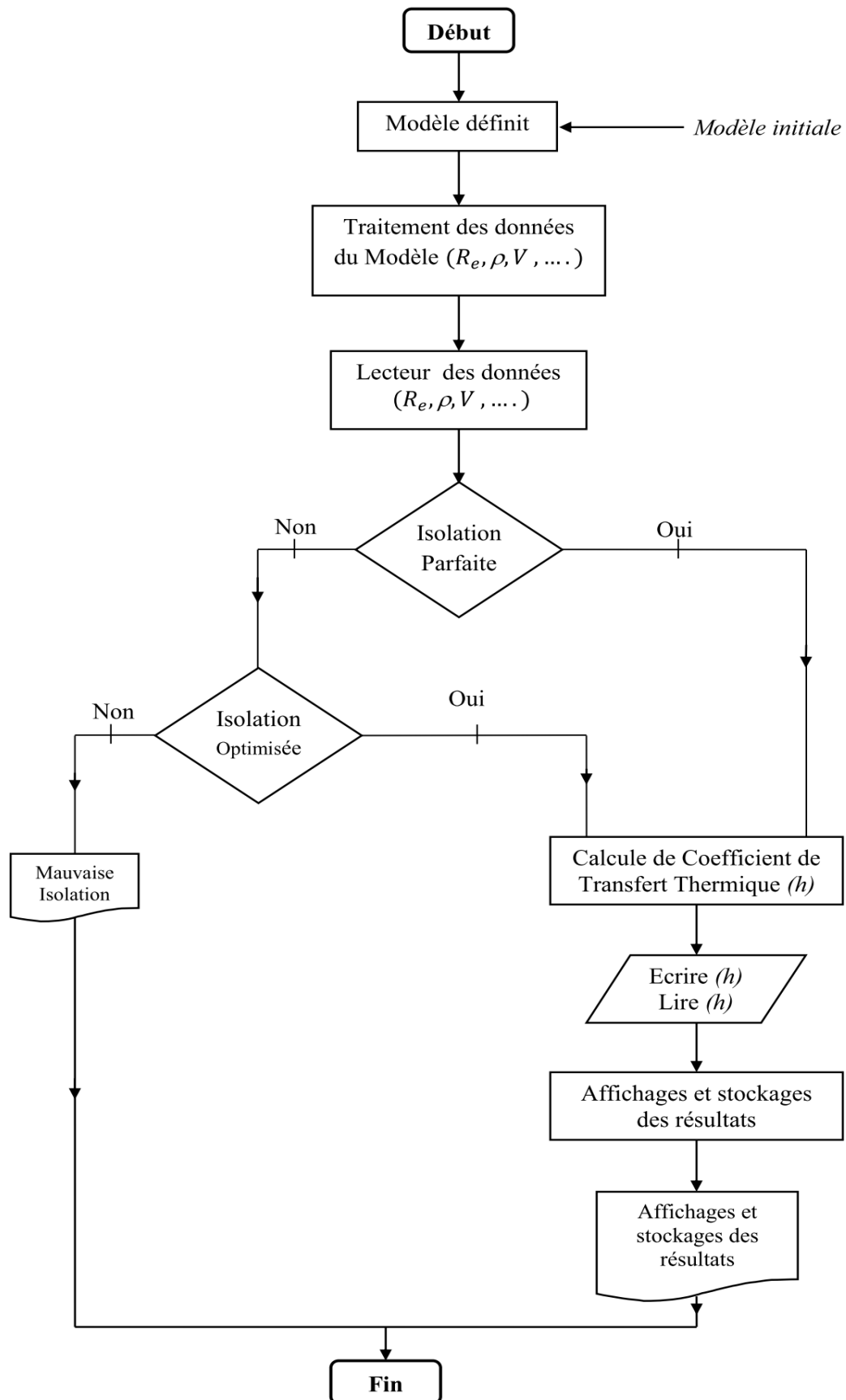


Figure 4- 4 : Organigramme de modélisation

4.4.3 Description du Maillage

Pour la division de la grille (Figure 4.5), la grille structurale est adoptée pour réduire le coût de calcul du modèle (environ 13 minutes). La grille de couche limite est utilisée pour assurer la résolution complète des écoulements près de la paroi, où est-il probable qu'il y ait une augmentation ou une diminution de la pression et/ou de la température du fluide, ce qui indique la présence d'une fuite (mauvaise isolation). Le maillage de surface de la pipe adopte un maillage non structuré sous forme de subdivision automatique (choix de la physique), sous la forme d'une subdivision automatique. Deux types de grilles bidimensionnelles, triangulaires et quadrilatérales, sont principalement utilisés pour le traitement correspondant. La grille contient 25966 unités de domaine, 8974 unités de frontière, comme le montre la figure 4.5. L'objectif de la fixation de la tolérance relative à $1e-2$ est de réduire le temps de calcul.

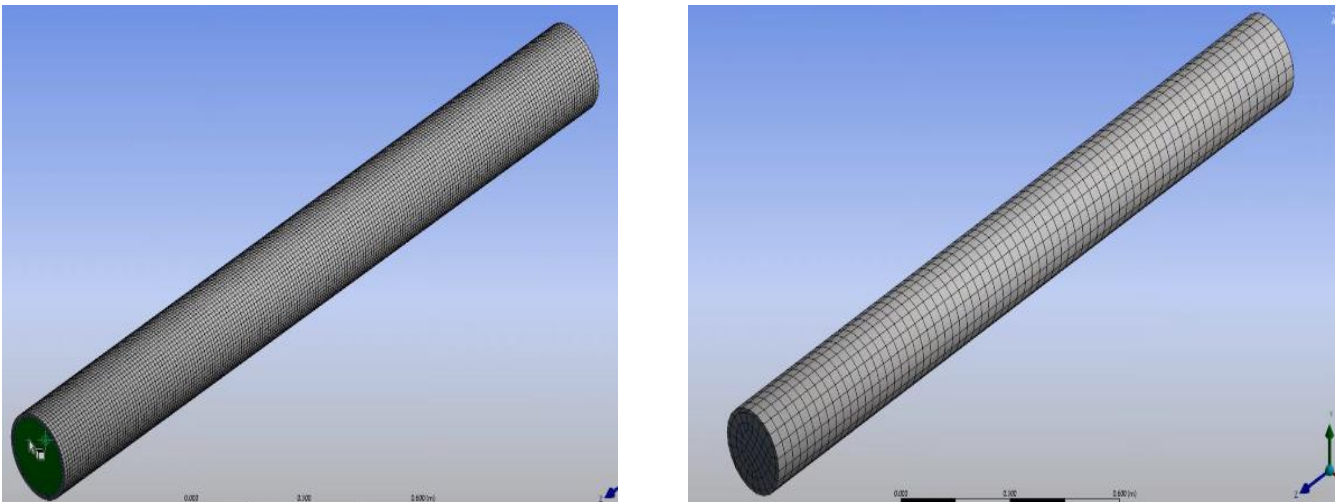


Figure 4- 5 : maillage générer

4.4.4 Conditions aux Limites

Puisque l'écoulement du fluide prend une seule trajectoire et à une vitesse relative 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'une demi-pipe. Par conséquent l'axe $Y = 0$ sera considéré comme un axe de symétrie (Figure 4.5, 4.6 ,4.7, 4.8et4.9).

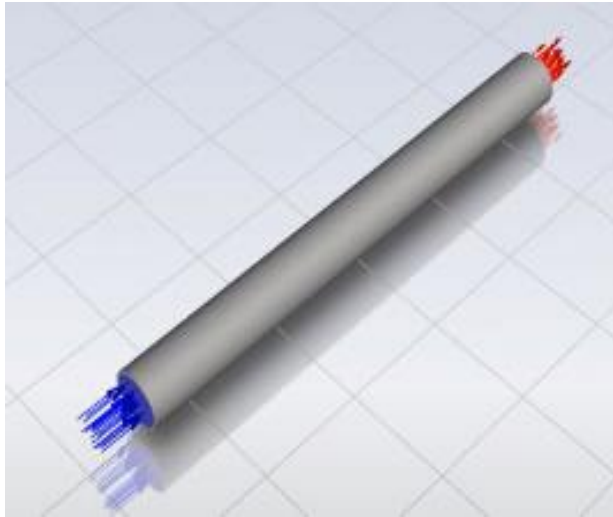


Figure 4- 6 : Modèle pipeline parfaitement symétrique

Pour les différentes caractéristiques du modèle, on utilise le choix d'une géométrie cylindrique (pipe) indéformable dont les parois correspondent à une loi élastique, alors que pour le fluide (le pétrole) et incompressible ou faiblement compressible. Les caractéristiques de tous les domaines d'étude sont illustrés dans l'ANNEXE 02. 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 4.5, 4.6, 4.7, 4.8 et 4.9).

L'écoulement dans le pipe est soumis à des conditions de mouvement libre tel que la condition *Free Deformation*, qui prend en compte l'effet d'une profondeur bien définie du fluide à l'intérieur de la pipe, comme on utilise le module *Pipe Flow* (Roger, 2011) dans le cas où l'écoulement du fluide est turbulent, pendant la rencontre entre les deux milieux de la simulation, le fluide passe par les étapes suivantes :

- A l'entrée, l'écoulement du fluide est laminaire, $R_e = 1800$
- Après l'entrée, l'écoulement est transitoire, $R_e = 2500$
- Après une distance x à partir de l'entrée de la pipe, définie par rapport à la vitesse du fluide, l'écoulement devient turbulent, $R_e = 3800$

Dans ce modèle d'étude le mouvement du fluide est décrit par les équations incompressibles de Navier-Stokes (Annexe02) 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 calcul de cette manière sont au niveau de la phase fluide.

4.5 Résultats et Interprétations

4.5.1 Objectif

Comme introduit plus tôt, l'isolation d'une section de pipeline est un problème majeur dans le domaine de transport des fluides par pipeline on générale et les canalisations on particulier, qui ont une importance majeure dans les transports des fluides. La réaction d'une structure isolée à un chargement dynamique du fluide a un température précise varie d'une situation à l'autre.

Notre choix du modèle sera effectué sur les différents principes des paragraphes précédents ce la veut dire que la structure qui représente le domaine de simulation est celle qui est introduite dans le chapitre (03) aux paragraphes (3.7.1. et3.7.2).

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

- 1er-Evaluation de la vitesse du fluide dans la pipe ;
- 2e- Evaluation de la distribution de température dans la pipe ;
- 3e- Analyse de la nature ou du degré d'isolation obtenu dans différents cas.

4.6 Analyse des Résultats de la Simulation

4.6.1 Evaluation de la vitesse du fluide dans la pipe:

Notre investigation par l'étude des effets de la vitesse d'entrée d'écoulement avec un nombre de Reynolds qui varie de 1500 à 3800, en couvrant les 3 régimes (laminaires, transitoires et turbulent).

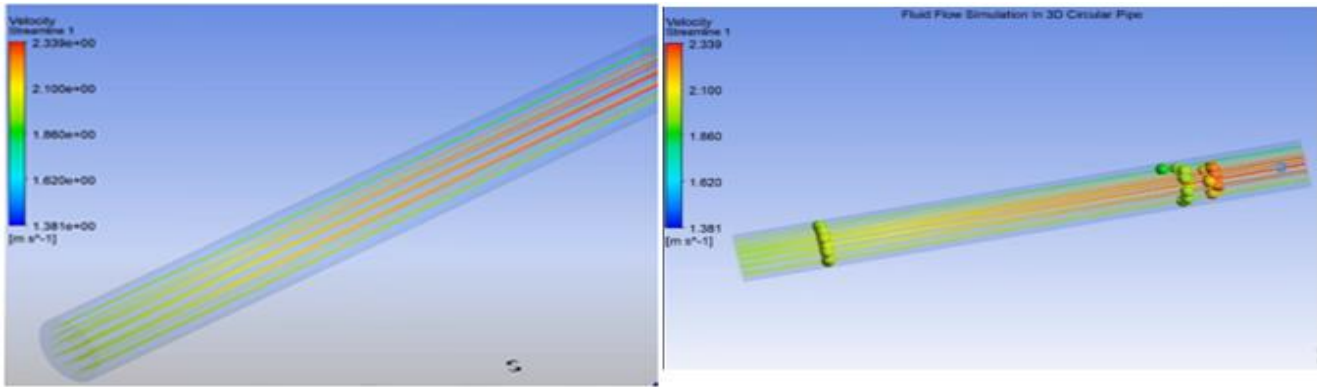


Figure 4- 7 : La vitesse du fluide dans la pipe

Sur un plan horizontal, la figure (4.7) montre la distribution de la vitesse pour différentes valeurs du nombre de Reynolds. La vitesse est maximale au niveau du centre du pipeline et elle commence à diminuer dès qu'on s'approche des parois de l'enveloppe (ceci est dû à cause des forces de frottement).

4.6.2 Evaluation de la distribution du température dans le pipe

Les résultats présentés dans la figure 4.8 montrent l'évolution de la différence de température à l'entrée du fluide obtenue en fonction des différents cas d'écoulement à l'intérieur de la pipe (différents nombres de Reynolds), ces résultats indiquent que l'augmentation du nombre de Reynolds s'accompagne d'une augmentation considérable de la température au centre de la pipe ainsi que sur ces périmètre et cela c'est au passage du fluide. On peut remarquer aussi que l'augmentation du nombre de Reynolds influence négativement sur l'échange thermique.

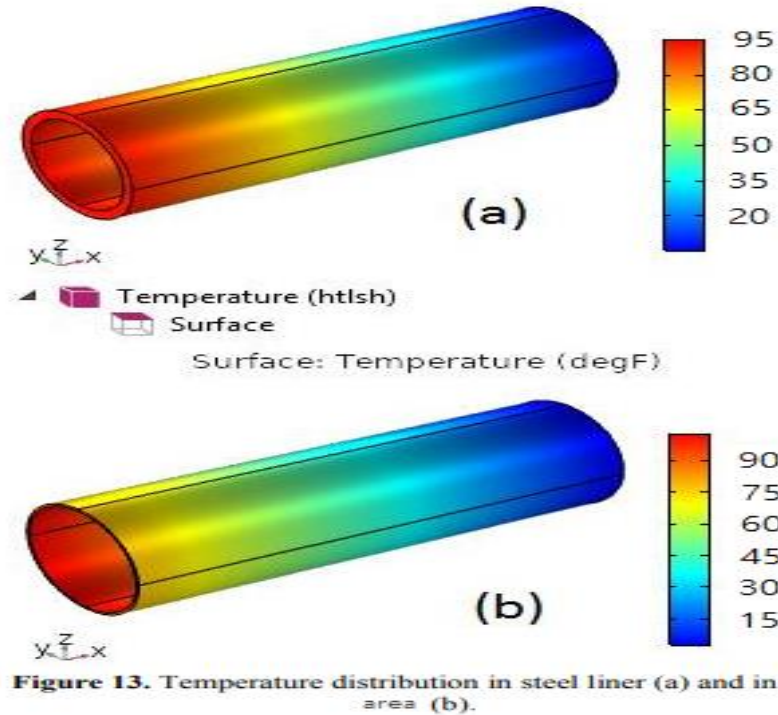


Figure 4- 8 : Distribution de la température dans une section pipe

4.6.1 Analyse de la nature ou du degré d'isolation obtenu dans différents cas

Comme indiqué précédemment, dans une situation de fuite d'un fluide dans une conduite quelconque, que cela provoque un changement au niveau de la pression intérieure de la pipe (pression / dépression) et/ou un changement de température du fluide qui s'écoule dans la pipe (chute de température) et cela affecte négativement sur la faisabilité d'isolation d'une section de pipeline. Pour un contrôle optimisé de niveau d'isolation de la pipe via notre code de calcul *COMSOL Multiphysics*, on injecte des bulbe d'aire qui accompagne l'écoulement du fluide à travers le module *Pipe Flow Module* dans *COMSOL Multiphysics* (figure, qui joue un rôle de contrôle de changement au niveau de la température et/ou la pression

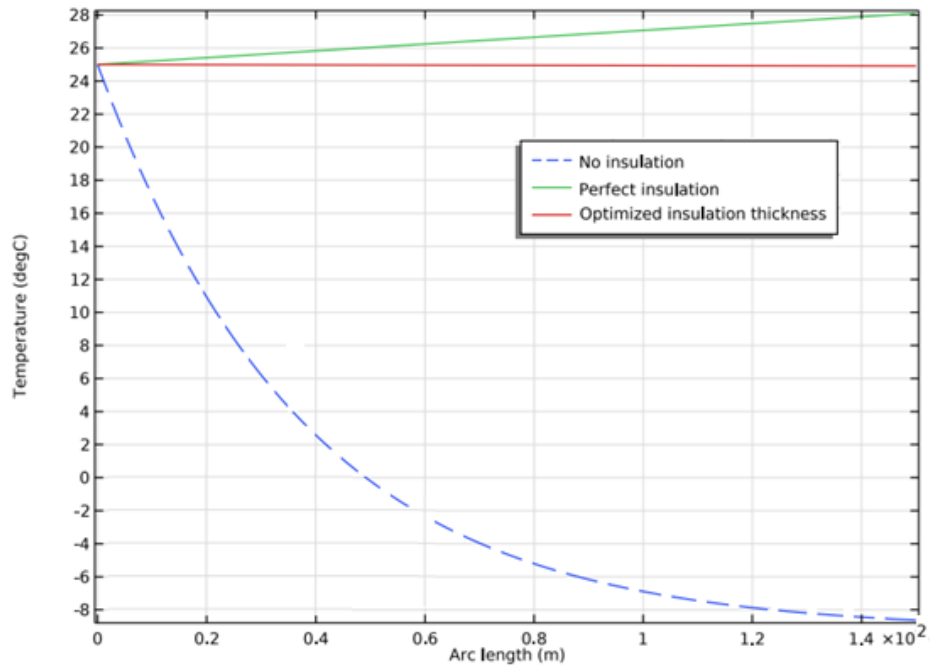


Figure 4.9 vérification d'isolation de la pipe par le module *Pipe Flow Module*

Les résultats présentés sur la figure 4.9 montrent l'évolution de la température de la section pipe dans les trois cas d'isolation (isolation parfait, isolation optimisé et mauvaise isolation), obtenue en différents régime d'écoulement. Cette évolution permet de repérer la différence flagrante de l'écart de température (intérieur / extérieur) dans différents cas d'isolation de la section pipe. La meilleure performance est enregistrée au niveau d'isolation parfait (Perfect Isulation), comme on peut considérer le cas d'une isolation optimisé comme fiable dans des cas limite et cela par rapport la région ou la zone d'utilisation de transport des fluides par canalisation (comme discuté dans le chapitre 1 et 2).

Conclusion

Dans ce chapitre on a proposé un exemple d'un pipeline dans des conditions prédéfini et à l'aide des plusieurs équations déjà qu'on a vu précédemment, nous avons réussi à construire un modèle d'étude complet en considérant toutes les aspects physiques.

Au moyen de logiciel de simulation numérique basé sur la méthode des éléments finis COMSOL Multiphysics on a pu a traiter d'une façon plus clair et de bien interpréter les résultats qu'on eu pour étudier les trois cas d'isolation de notre modèle.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

L'isolation thermique est l'une des solutions essentielles et premières à considérer dans l'efficacité énergétique du transport des fluides par pipelines. Ce secteur étant très énergivore dans le dernier siècle.

La principale solution passive est de traiter l'enveloppe, en réduisant ses échanges thermiques avec le milieu extérieur en terrestre (onshore) comme en sous marin (offshore), puisque l'extérieur dépend du climat, un paramètre variable aléatoire et parfois extrême.

On a détaillé les composants d'un système de transport par pipeline et leurs matériaux de fabrication qui base principalement à la nature des fluides transportés dont le gaz et le pétrole reçoivent le plus grand intérêt dans ce domaine qui a des réglementations très strictes pour ne laisser aucune chance aux erreurs.

Lors d'un transport par pipeline il y a dissipation d'énergie mécanique, autrement dit perte de charge qui a une relation directe aux mécaniques et au travail des forces de frottements des fluides transportés, c'est pour cela les systèmes d'isolation varient par rapport aux conditions de leur utilisation.

La problématique de bien choisir le système d'isolation qui convient dépend de plusieurs critères tels que le fluide transporté, l'épaisseur de la paroi, température, pression ...

Le pipeline est toujours en contact avec le milieu extérieur, il est exposé aux fuites internes et externes due aux phénomènes physiques qui les endurent fluage, fatigue, corrosion, érosion..., alors il faut un système de détection avant qu'on mette l'isolation comme l'inspection par hélicoptère, le raclage intelligent, les chiens dressés et les méthodes continues (Câble à Fibre Optique, Pipes de Détection, RTTM...)

Le transfert de chaleur est un phénomène présent dans la thermodynamique soit au bien ou au mal, le but d'une isolation thermique est de limiter les pertes dues à ce phénomène pour éviter la formation des hydrates qui peuvent provoquer un blocage à l'intérieur du pipeline et impacter la disponibilité du pipe.

Des problèmes de transport liés à des pertes de chaleur peuvent arriver c'est le pipe n'est bien isolé. Alors, lors de l'ingénierie du projet, il devient nécessaire de bien choisir le type et l'épaisseur d'isolation pour assurer l'écoulement correct des fluides dans le pipeline dans les conditions d'exploitation souhaitées.

Notre étude est concernée à l'isolation thermique d'une section d'oléoduc dans des conditions réelles, et en utilisant la MEF sous l'environnement COMSOL nous avons pu modéliser les cas d'isolation qui conviennent à notre modèle d'étude.

Références

- [1] IHADDADENE .L, étude de la corrosion et la protection des pipelines de réseau de collecte d'huile de la région tft (secteur nord).
- [2] PHILIPPE .P, pipelines les innovations dans les tuyaux (industrie & technologie).
- [3] Isolation thermique des équipements et des pipelines: snip, caractéristiques, types d'isolation thermique et exigences pour eux - heatylab.com
- [4] GAZEBO. M, Sélection d'une isolation thermique pour les pipelines (Niturehome).
- [5] MOURAD. N, étude mécano-fiabiliste des pipelines destinés aux hydrocarbures.
- [6] "Hot North Slope oil flowing", washington associated press. june 20, 1977. p. 1.
- [7] « Les pipelines, une longue histoire », sur gereports.fr (consulté le 12 novembre 2018)
- [8] Mark H. (May 2004). "Algerian Gas to Europe: The Transmed Pipeline and Early Spanish Gas Import Projects.
- [9] BERREKIA .H, modélisation et comportement d'endommagement des tubes d'aciers utilisés pour l'exploitation pétrolier.
- [10] ISO 13623:2017 (fr) Industries du pétrole et du gaz naturel — systèmes de transport par conduites.
- [11] Faune, À propos des pipelines, consulté le 11 novembre 2018.
- [12] LALLEMAND, André. 2000. Écoulement des fluides - Dynamique des fluides réels. 2000.
- [13] Benhammouda, Riadh. 2008. NOTIONS DE MECANIQUE DES FLUIDES. 2008.
- [14] Menon, E.Shashi. 2015. Transmission Pipeline Calculations and Simulations Manual. 2015.
- [15] Télé service "réseaux-et-canalisation" INERIS Ministère de la Transition écologique française.
- [16] Bouchonneau N (2007). Étude du comportement des systèmes d'isolation thermique pour les grandes profondeurs d'eau (Doctoral dissertation, IFP Paris)
- [17] Yves JANNOT Cours Transferts thermiques 2ème année Ecole 2 des Mines Nancy.
- [18] NAHAL .M étude mécano-fiabiliste des pipelines destinés aux hydrocarbures.

- [19] Lawrence .B, Shubi .K and Ramadhani .S, An overview of pipeline leak detection and location systems.
- [20] Fnena, K., Kh Mejri, and A. Bellagi. "Inversion de l'effet de Joule-Thomson dans les gaz a faible facteur acentrique." *JOURNAL-SOCIETE CHIMIQUE DE TUNISIE* 5.1 (2003): 95-106.
- [21] Brown, Glenn O. "The history of the Darcy-Weisbach equation for pipe flow resistance." *Environmental and water resources history*. 2003. 34-43.
- [22] Gupta, Anand, and Anirbid Sircar. "Flow Assurance and Comparison of Modelling & SCADA Results for Onshore Crude Oil Trunk Line-A Case Study."
- [23] Zulkefli, N. H., and William Pao. *Optimum Thermal Insulation Design for Subsea Pipeline Flow Assurance*. Technical Report, Universiti Teknologi PETRONAS, Malaysia, 8pp, 2016.
- [24] Sieder, E. Nn, and Go E. Tate. "Heat transfer and pressure drop of liquids in tubes." *Industrial & Engineering Chemistry* 28.12 (1936): 1429-1435.
- [24] Bianchi, Ana-Maria, Yves Fautrelle, and Jacqueline Etay. *Transferts thermiques*. PPUR presses polytechniques, 2004.
- [25] S.BENSAADA, T.BOUZIANE, *Transfert de chaleur*
- [26] Bouty, E. "W.-E. AYRTON et JOHN PERRY.—Experiments on the heat conduction in stone, based on Fourier's «Théorie de la chaleur»(Expériences sur la conductibilité de la pierre, fondées sur la théorie de la chaleur de Fourier); Mémoire présenté à la Société asiatique japonaise. Yokohama, 1878." *J. Phys. Theor. Appl.* 8.1 (1879): 101-105.
- [27] Akpabio, Moses Gideon. *Cold flow in long-distance subsea pipelines*. MS thesis. Institutt for petroleumsteknologi og anvendt geofysikk, 2013.
- [28] Wilfred, Okologume, and Dulu Appah. "Analyzing thermal insulation for effective hydrate prevention in conceptual subsea pipeline design." *International Journal of Current Engineering and Technology* 5.4 (2015): 2492-2499.
- [29] Guo, Boyun. *Petroleum production engineering, a computer-assisted approach*. Elsevier, 2011.
- [30] Kumar, S., S. Pande, and P. Verma. "International Journal of Current Engineering and Technology Factor Effecting Electro-Deposition Process." *Int. J. Curr. Eng. Technol* 5.2 (2015).

[31] Zarinabadi, Soroush, and Amir Samimi. "Problems of hydrate formation in oil and gas pipes deal." Australian journal of basic and applied science 5 (2011): 741-745.

[32] 1. S.E. Haaland, "Simple and Explicit Formulas for the Friction Factor in Turbulent Flow," J. Fluids Engineering (ASME), vol. 103, no. 5, pp. 89–90, 1983.

[33] 2. F.P. Incropera and D.P. DeWitt, Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 4th ed., John Wiley & Sons, 1996. Eq 8.62 and Eq 7.55, respectively.

Annexe

Annexe 01 :

Modules Complémentaires pour *COMSOL Multiphysics*



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

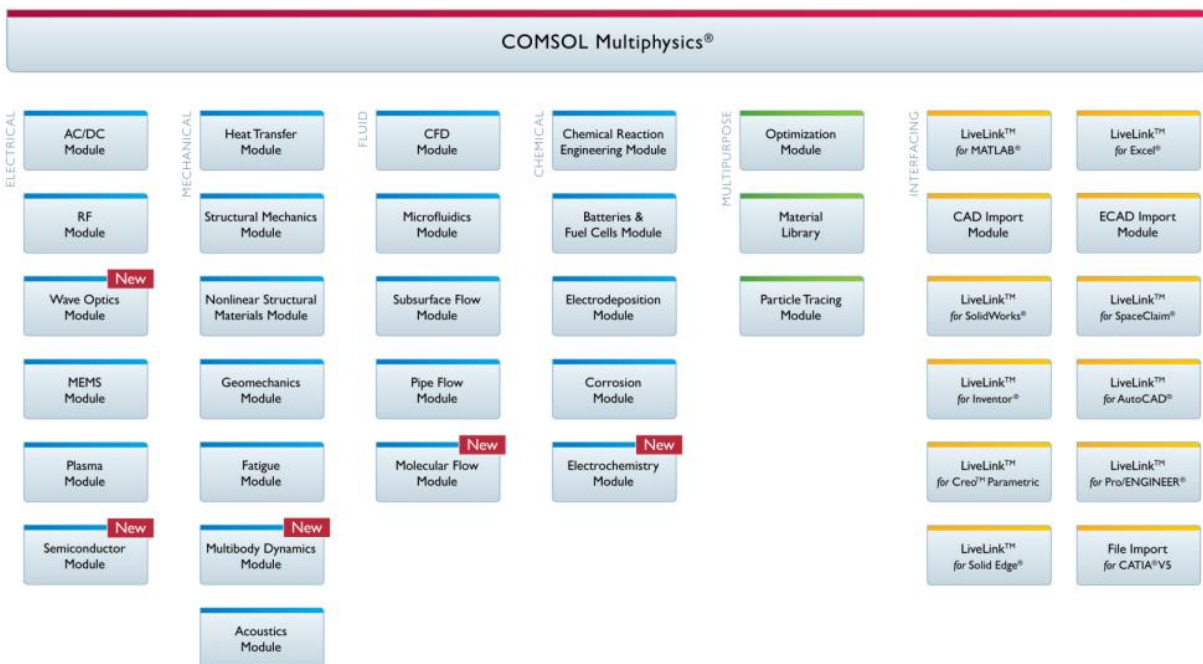


Figure A- 1 : Modules complémentaires de *COMSOL Multiphysics*

Annexe 02 :

Equation 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).

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

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.