

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université M'Hamed Bougara-Boumerdes  
Faculté des Hydrocarbures et de la Chimie



Département Transport et Equipements des Hydrocarbures

Mémoire de fin d'études  
En vue de l'obtention du diplôme de

**Master**

**Domaine** : Sciences et Technologies

**Filière** : Hydrocarbure

**Option** : Génie mécanique-Mécanique des unités pétrochimiques

Présenté par :

TERHA Siham

THEME

Détection de fuites d'une conduite dans des équipements pétrochimiques

Soutenu publiquement le 22 / 06 / 2024

Devant le jury :

	Nom et Prénom	Grade	Université/Affiliation
Président de jury	KHELIFI TOUHAMI M.S.	MCA	UMBB
Examinateur	YAHY F	MCB	UMBB
Examinateur	HARKAT Y.	MAA	UMBB
Encadreur	FERROUDJI H.	MCB	UMBB

Boumerdes 2024

# *Remerciement*

*Il est très agréable de réserver cette page comme un témoin de reconnaissance à tous ceux qui m'ont soutenu le long de mon cursus.*

*Louange à Allah tout-puissant pour le compromis et la volonté qu'il m'a donnés pour la réalisation de ce travail.*

*J'exprime mon gratitude à M. Ferroudji H., mon encadrant, pour le temps qu'il m'a consacré et ses précieux conseils.*

*Je suis profondément reconnaissante à tous ceux qui, de près ou de loin, à leur manière, contribuent à mener à bien ce travail.*

*Je tiens également à exprimer l'honneur que me font les membres du jury de me prêter leur attention et d'évaluer mon travail.*

---

# *Dédicace*

*Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde gratitude envers mes chers parents. Vous avez été mon pilier tout au long de ce parcours. Votre présence, votre soutien inébranlable et vos sacrifices ont été les fondements de ma réussite. Je vous en suis infiniment reconnaissante.*

*À mon frères Abdeslem, mes sœurs Nawel, Amira et Imen, qui ont apporté leurs soutien moral nécessaire et qui ont toujours été là pour m'encourager dans les moments difficiles. Votre solidarité et vos encouragements ont été précieux.*

*À tous mes amis, en particulier Tinhinane et Rania, qui ont été une source constante de motivation, de réconfort et de conseils tout au long de mon chemin. Je vous suis profondément reconnaissante pour votre aide, tant directe qu'indirecte.*

*Cette thèse marque une étape importante dans mon parcours académique, et j'adresse mes remerciements sincères à tous ceux qui ont contribué à sa réalisation.*

*Siham*

---

## Résumé

Cette étude approfondie examine les défis liés à la détection des fuites dans les pipelines de transport d'hydrocarbures. À travers cinq chapitres, elle explore l'utilisation de la dynamique des fluides numérique (CFD), notamment via le logiciel ANSYS Fluent, pour modéliser et analyser les scénarios de fuite. Une méthode innovante basée sur l'analyse des variables adimensionnelles est proposée pour la détection et la localisation des fuites. L'étude souligne également l'intégration de l'intelligence artificielle et du machine learning pour améliorer la maintenance prédictive et l'optimisation des opérations. Les résultats montrent que la chute de pression dans le pipeline est influencée par le taux de fuite et sa position. Cette approche multidisciplinaire, combinant ingénierie traditionnelle, simulation numérique et technologies d'IA, vise à améliorer la sécurité, la fiabilité et l'efficacité des réseaux de pipelines.

**Mots clés :** fuites, CFD, détection des fuites, simulation CFD, analyse de pression, ANSYS Fluent, variables adimensionnelles, l'intelligence artificielle, réseaux de neurones artificielles.

## Abstract

This in-depth study examines the challenges associated with leak detection in hydrocarbon transport pipelines. Through five chapters, it explores the use of computational fluid dynamics (CFD), in particular via the ANSYS Fluent software, to model and analyse leak scenarios. An innovative method based on the analysis of adimensional variables is proposed for detecting and locating leaks. The analysis also highlights the integration of artificial intelligence and machine learning to improve predictive maintenance and optimise operations. The results show that the pressure drop in the pipeline is influenced by the leak rate and its position. This multidisciplinary approach, combining traditional engineering, numerical simulation and AI technologies, aims to improve the safety, reliability and efficiency of pipeline networks.

**Keywords :** leaks, CFD, leak detection, CFD simulation, pressure analysis, ANSYS Fluent, dimensionless variables, artificial intelligence, artificial neural networks.

## المخلص

تبحث هذه الدراسة المتعمقة في التحديات المرتبطة باكتشاف التسرب في خطوط أنابيب نقل المواد الهيدروكربونية. ومن خلال خمسة فصول، تستكشف هذه الدراسة استخدام ديناميكيات الموائع الحسابية (CFD)، ولا سيما من خلال برنامج ANSYS Fluent، لنمذجة وتحليل سيناريوهات التسرب. ويقترح طريقة مبتكرة تستند إلى تحليل المتغيرات ذات الأبعاد المتعددة للكشف عن التسريبات وتحديد مواقعها. تسلط الدراسة الضوء أيضًا على دمج الذكاء الاصطناعي والتعلم الآلي لتحسين الصيانة التنبؤية وتحسين العمليات. تُظهر النتائج أن انخفاض الضغط في خط الأنابيب يتأثر بمعدل التسرب وموقعه. يهدف هذا النهج متعدد التخصصات، الذي يجمع بين الهندسة التقليدية والمحاكاة العددية وتقنيات الذكاء الاصطناعي، إلى تحسين سلامة وموثوقية وكفاءة شبكات خطوط الأنابيب.

**الكلمات المفتاحية:** التسريبات، CFD، الكشف عن التسرب، محاكاة CFD، تحليل الضغط، ANSYS Fluent، متغيرات بلا أبعاد، الذكاء الاصطناعي، الشبكات العصبية الاصطناعية.

---

## Sommaire

<b>Introduction générale :</b> .....	<b>1</b>
Introduction :.....	1
Etat de l’art : .....	2
<b>Chapitre I : Généralités sur les pipelines</b>	
<b>I.1. Introduction :</b> .....	<b>5</b>
I.2. Définition de pipeline : .....	5
I.2.1. Caractéristiques des pipelines : .....	5
I.2.2. Type de pipeline : .....	6
I.3. Définition d’une fuite : .....	6
I.3.1. Principales causes des fuites : .....	7
I.3.1.i. Les défaillances mécaniques :.....	7
I.3.1.ii. Les défaillances opérationnelles : .....	7
I.3.1.iii. La corrosion : .....	7
I.4. Inspection et Maintenance : .....	8
I.5. Détection des fuites : .....	9
I.5.1. Principe des méthodes : .....	10
<b>I.6. Conclusion:</b> .....	<b>11</b>
<b>Chapitre II : Simulation avec ANSYS Fluent</b>	
<b>II.1. Introduction :</b> .....	<b>12</b>
II.2. Définition de la simulation : .....	12
II.3. Le logiciel ANSYS : .....	12
II.4. Les Composants d'ANSYS Fluent : .....	13
II.5. Méthodes Numériques Utilisées dans ANSYS Fluent : .....	13

---

---

II.5.1. Solveur basé sur la pression (Pressure-Based Solver) : .....	14
II.5.1.i. Algorithme Séparé Basé sur La Pression : .....	14
II.5.1.ii. Algorithme Couplé Basé sur La Pression : .....	15
II.5.2. solveur basé sur la densité : .....	16
II.6. Méthode des volume finis : .....	18
II.7. Algorithmes ANSYS Fluent : .....	19
II.7.1. Algorithme SIMPLE : .....	19
II.7.2. L'algorithme SIMPLER: .....	20
II.7.3. L'algorithme SIMPLEC : .....	20
II.7.4. L'algorithme PISO : .....	21
II.8. Computational Fluid Dynamics : .....	21
II.8.1. Équations gouvernantes en CFD : .....	21
II.8.1.i. Conservation de la masse : .....	21
II.8.1.ii. Conservation de la quantité de mouvement : .....	21
II.8.1.iii. Conservation de l'énergie : .....	22
II.8.2. Hypothèses du modèle de turbulence : .....	22
II.8.2.i. Conservation pour le modèle de turbulence : .....	22
a. Équation d'énergie turbulente k : .....	23
b. Équation de dissipation $\varepsilon$ : .....	23
<b>II.9. Conclusion : .....</b>	<b>23</b>

## **Chapitre III : Modélisation sur ANSYS**

<b>III.1. Introduction : .....</b>	<b>24</b>
III.2. L'objectif de la simulation : .....	24
III.3. Méthodologie : .....	24
III.4. Le domaine de calcul : .....	24
III.5. Maillage : .....	25
III.6. Paramètres CFD : .....	27

---

---

III.7. Modèle visqueux : .....	28
III.8. Méthode de résolution et conditions aux limites : .....	29
III.9. Les étapes de ANSYS Fluent : .....	29
III.9.1. Démarrage de ANSYS FLUENT : .....	29
<b>III.10. Conclusion : .....</b>	<b>35</b>

## **Chapitre IV : Modèle de L'intelligence artificielle**

<b>IV.1. Introduction : .....</b>	<b>36</b>
IV.2. L'intelligence artificielle : .....	36
IV.3. Apprentissage automatique (Machine Learning) : .....	36
IV.4. Type d'apprentissage automatique : .....	37
IV.4.1. L'apprentissage supervisé : .....	37
IV.4.2. L'apprentissage non supervisé : .....	37
IV.4.3. L'apprentissage par renforcement : .....	38
IV.4.4. L'apprentissage en profondeur : .....	38
IV.5. Réseaux de neurones (Artificial neural network) : .....	39
IV.5.1. Architecture des réseaux de neurones artificiels : .....	39
IV.5.1.i.Éléments importants de l'architecture des RNA : .....	40
<b>IV.6. Conclusion : .....</b>	<b>42</b>

## **Chapitre V : Validation et étude paramétrique**

<b>V.1. Introduction : .....</b>	<b>43</b>
V.2. Validation : .....	43
V.2.1. Distribution de pression dans la conduite sans fuite : .....	43
V.2.2. Distribution de pression dans la conduite avec fuite : .....	44
V.2.3. Résultante et discussion : .....	46
V.3. Eude paramétrique : .....	48
V.3.1. Effets de la caractérisation des fuites sur la chute de pression : .....	48

---

---

V.3.1.i. Effet de la position de la fuite sur la chute de pression :.....	48
V.3.1.ii. Effet du débit d'entrée sur le débit de fuite :.....	51
V.3.1.iii. Effet de variation du diamètre de fuite sur la chute de pression :..	51
V.3.1.iv. Effet de la forme de fuite sur la chute de pression :.....	53
a. La forme elliptique horizontale : .....	53
b. La forme elliptique vertical : .....	56
c. Forme de fuite carrée : .....	58
V.3.1.v. Synthèse des résultats : .....	61
V.4. Analyse adimensionnelle pour la prédiction de fuite : .....	62
V.4.1. Paramètres adimensionnels : .....	62
V.4.1.i. Chute de pression adimensionnelle : .....	62
V.4.1.ii. Localisation adimensionnelle de la fuite : .....	62
V.4.1.iii. Diamètre de la fuite adimensionnel : .....	62
V.4.1.iv. Débit d'entrée adimensionnel : .....	62
V.4.1.v. Modèle de prédiction des fuites basé sur des paramètres adimensionnel : .....	67
V.5. Interprétation du Modèle de l'intelligence artificiel : .....	69
V.5.1. La base des données (Data) : .....	69
V.5.2. Explication de code : .....	69
V.5.3. Résultante et discussion pour le Modèle de l'intelligence artificiel :.....	73
<b>V.6. Conclusion :.....</b>	<b>77</b>
<b>Conclusion générale :.....</b>	<b>79</b>

---

## Liste des figures

Figure I.2.1. Pipelines .....	5
Figure I.3.1.Fuite dans un pipeline.....	6
Figure I.3.2.Schéma simple d'une corrosion interne.....	8
Figure I.3.3.Schéma simple d'une corrosion externe.....	8
Figure I.4.1.Racleur de nettoyage (pig) IP.UG1 Ø 12" - 36".....	9
Figure I.5.1.Outil intelligents d'Inspection de type magnétique (MFL) .....	11
Figure II.5.1.1.Algorithme séparé basé sur la pression.....	15
Figure II.5.1.2.Algorithme couplé basé sur la pression.....	16
Figure II.5.2.1.Algorithme couplé basé sur la densité.....	17
Figure II.7.1.1.Processus de calcul de l'algorithme SIMPLE.....	20
Figure III.4.1.Schéma d'un pipeline sans fuite.....	25
Figure III.4.2.Schéma d'un pipeline avec fuite.....	25
Figure III.5.1.Graphe de la pression en fonction des nombres des éléments.....	26
Figure III.5.2. Un Maillage de bonne qualité.....	27
Figure III.9.1.Modeling de la création de la géométrie.....	29
Figure III.9.2.Création de la géométrie.....	30
Figure III.9.3.Maillage.....	30
Figure III.9.4.Setup.....	31
Figure III.9.5.Paramètres généraux.....	31
Figure III.9.6.Modèle visqueux.....	32
Figure III.9.7.La vitesse d'entrée.....	33
Figure III.9.8.Pression de la sortie.....	33
Figure III.9.9.Les résidus.....	34
Figure III.9.10.Exécution des résultats.....	35
Figure III.9.11. Résultats.....	35
Figure IV.5.1.i.1.Processus de l'apprentissage automatique.....	37
Figure IV.5.1.i.2.Réseau multicouche .....	42
Figure V.3.1.i.1.Distribution de pression au long de l'axe central de la conduite sans fuite.....	43
Figure V.3.1.i.2.Distribution de pression au long de l'axe central de la conduite sans fuite.....	43
Figure V.3.1.i.1.Distribution de pression au long de l'axe central de la conduite avec fuite.....	45
Figure V.3.1.i.1.Distribution du gradient de pression au long de l'axe central de la conduite avec fuite.....	46
Figure V.3.1.i.2.Diagramme de comparaison de la chute de pression en fonction de différentes Positions des Fuites.....	47
Figure V.3.1.i.1.La géométrie et le maillage de la fuite circulaire.....	49
Figure V.3.1.i.2.La chute de pression en fonction de la position de la fuite.....	50
Figure V.3.1.iii.1.La chute de pression en fonction du diamètre de la fuite.....	52
Figure V.3.1.iv.1.La géométrie et le maillage de la fuite elliptique horizontale.....	53
Figure V.3.1.iv.2.la chute de pression en fonction de la position de la fuite.....	54

Figure V.3.1.iv.3.La géométrie et le maillage de la fuite elliptique verticale.....56

Figure V.3.1.iv.4.La chute de pression en fonction de la position de la fuite.....57

Figure V.3.1.iv.5.La géométrie et le maillage de la fuite carrée.....59

Figure V.3.1.iv.6.La chute de pression en fonction de la position de la fuite.....60

Figure V.4.1.iv.1.Chute de pression adimensionnelle a travers un pipe Sous Différents Paramètres.....63

Figure V.4.1.iv.2. Chute de pression adimensionnelle a travers une pipe en fonction du débit d'entrée adimensionnelle. ....64

Figure V.4.1.iv.3. Chute de pression adimensionnelle a travers une pipe sous différents paramètres.....65

Figure V.4.1.iv.4.Chute de pression adimensionnelle a travers une pipe en fonction du débit d'entrée adimensionnelle. ....66

Figure V.4.1.v.1. Variables adimensionnel dans différent paramètre et condition.....68

Figure V.4.1.v.1.Graphe "Actual vs hauteur" (Réal vs Prédit pour la hauteur). ....74

Figure V.4.1.v.2.Le graphe des valeurs réelles (Actual) et les valeurs prédites (Predicted) .....75

Figure V.4.1.v.3.Analyse comparative entre les données existantes et les nouvelles données.....76

Figure V.4.1.v.4.Comparaison entre la chute de pression réelles et chute de pression prédites....77

---

## Liste des tableaux

Tableau III.4.1.Les Paramètres de Géométrie (Le Domaine de Calcul).....	25
Tableau III.5.1.La Chute de Pression Selon les Nombres des Eléments .....	26
Tableau V.3.1.i.1.Comparaison de la chute de pression en fonction de différentes positions des fuites .....	47
Tableau V.3.1.i.1.La chute de pression en fonction de la position de la fuite .....	49
Tableau V.3.1.ii.1.Le débit de fuite en fonction de débit d'entrée .....	51
Tableau V.3.1.iii.1.La chute de pression en fonction du diamètre de la fuite.....	52
Tableau V.3.1.iv.1.la chute de pression en fonction de la position de la fuite .....	54
Tableau V.3.1.iv.2.Le débit de fuite en fonction de débit d'entrée.....	55
Tableau V.3.1.iv.3.La Chute de Pression en Fonction de la Position de la Fuite.....	56
Tableau V.3.1.iv.4.Le débit de fuite en fonction de débit d'entrée.....	58
Tableau V.3.1.iv.5.La chute de pression en fonction de la position de la fuite.....	59
Tableau V.3.1.iv.6.Le débit de fuite en fonction de débit d'entrée.....	61

## ***Introduction générale***

---

## Introduction générale

### Introduction :

L'étude des pipelines s'avère importante dans le domaine du transport des fluides, en particulier des hydrocarbures. Les pipelines représentent une méthode efficace et sûre pour acheminer le pétrole et le gaz naturel sur de longues distances, depuis les sites de production jusqu'aux lieux de consommation. Cependant, ces infrastructures sont souvent exposées à divers défis, notamment les fuites, les défaillances mécaniques et la corrosion. Il est impératif de détecter rapidement ces problèmes pour éviter des conséquences désastreuses, tant sur le plan économique qu'environnemental. Ce mémoire examine les différentes méthodes de détection des fuites dans les pipelines, en mettant l'accent sur l'utilisation de la dynamique des fluides numérique (CFD) pour modéliser et analyser les scénarios de fuite. La simulation numérique, en particulier avec le logiciel ANSYS Fluent, permet de reproduire les conditions réelles d'écoulement dans les pipelines et de valider les données expérimentales, offrant ainsi une méthode fiable pour améliorer la gestion et la maintenance des pipelines.

L'analyse de la géométrie des conduites et le repérage des fuites sont indispensables pour le transport sécurisé des fluides. Les techniques de simulation offrent des outils précieux pour améliorer la supervision et l'entretien de ces systèmes essentiels. Cette étude est composée de cinq chapitres, accompagnés de 12 tableaux et 50 figures pour illustrer et soutenir nos analyses.

Dans le premier chapitre, on discute des généralités sur les pipelines : les défauts tels que les fuites, les causes des fuites telles que la corrosion et les défaillances mécaniques, et les solutions à ces fuites.

Le deuxième chapitre détaille la simulation avec ANSYS, son principe de fonctionnement, les méthodes numériques utilisées, ses algorithmes, ainsi qu'une introduction à la CFD.

Le troisième chapitre aborde le concept de modélisation sur ANSYS, où on montre les étapes suivies pour cette modélisation ainsi que les données initiales introduites afin de pouvoir réaliser cette dernière.

Dans le quatrième chapitre, on examine les fondamentaux de l'IA et du machine learning, leur application en mécanique, et présente les types d'apprentissage automatique et les architectures de réseaux neuronaux utilisés dans ce domaine.

Pour le dernier chapitre, on présente des études de cas concrètes et des applications pratiques des modèles et techniques discutés dans les chapitres précédents. Il illustre comment ces approches sont mises en œuvre dans des projets réels pour résoudre des problèmes spécifiques et améliorer les performances opérationnelles.

## Etat de l'art :

Le système de gestion de la sécurité des pipelines repose sur le système de sécurité existant de l'exploitant, qui comprend les processus et procédures de sécurité des pipelines, la gestion de l'intégrité, les interventions d'urgence, la détection des fuites, la construction, etc. La pratique recommandée aide les exploitants de pipelines à mettre en œuvre un système de gestion pour identifier et gérer les risques, promouvoir un environnement d'apprentissage et améliorer en permanence la sécurité et l'intégrité des pipelines [1]

**Johnsen et al. (2011)** ont proposé que l'objectif de la pratique recommandée soit de fournir des conseils sur la conception, la construction et l'exploitation sûres et fiables des pipelines destinés au transport à grande échelle. [2]

**DeWolf (2003)** a montré qu'une mise en œuvre réussie de la gestion de l'intégrité des pipelines exige une compréhension approfondie de l'évaluation et de la gestion des risques dans la mesure où elles s'appliquent aux pipelines. Une bonne gestion de l'intégrité des pipelines, comprenant l'analyse de l'interaction entre le fluide et le pipeline, la compréhension de la thermodynamique des fluides et des propriétés du fluide injecté dans le pipeline, et le maintien d'un bon état de fonctionnement, peut réduire à la fois la probabilité et les conséquences d'une défaillance et augmenter les bénéfices des sociétés de pipelines [[3] [4] [5] [6] [7] [8] [9] [10] [11]]

Le gaz de schiste est une composante majeure de l'approvisionnement en gaz naturel aux États-Unis. [12]

Avec le développement rapide de la production de pétrole et de gaz dans les réservoirs de schiste, les fractures hydrauliques ainsi que leur réseau de fractures complexes stimulées augmentent la surface entre le puits de forage et les roches réservoirs ; elles augmentent considérablement le volume du réservoir drainé et augmentent le taux de production économique. [13] [14]

Ainsi, de plus en plus de pétrole et de gaz de schiste doivent être transportés par les canalisations. Bien que les pipelines soient depuis longtemps reconnus comme le moyen le plus sûr et le plus efficace de transporter le pétrole et ses produits, les fuites dans les pipelines peuvent avoir de graves conséquences, telles que des pertes économiques, des incendies ou des explosions. C'est pourquoi les techniques de détection et de localisation des fuites sont d'une importance cruciale pour l'entretien des pipelines, la sécurité des installations industrielles et l'environnement. [15]

**(Diao et al., 2019). Al-Khomairi (2008)** a étudié une technique informatique en temps réel pour détecter et localiser les fuites dans les pipelines transportant des liquides. La méthode utilise un schéma déterministe d'essai et d'erreur pour minimiser les carrés des écarts entre les quantités mesurées et calculées. [16] [17]

**Zadkarami et al. (2016)** ont diagnostiqué les fuites dans les pipelines en se basant sur les ondelettes et les caractéristiques statistiques en utilisant la technique de fusion des classificateurs

de Dempster-Shafer. Les signaux de pression d'entrée et de débit de sortie dans différentes conditions de fuite sont générés à l'aide du logiciel OLGA. [18]

**Kim et Lee (2009)** ont proposé une technique temps-fréquence pour localiser les fuites dans les conduites de distribution de gaz enterrées impliquant l'utilisation de la corrélation croisée sur deux signaux acoustiques mesurés de part et d'autre d'une fuite. [19]

**Liu et al. (2015)** ont utilisé un modèle de propagation pour détecter l'emplacement de la fuite sur la base des ondes acoustiques de fuite pour les oléoducs et les gazoducs. [20]

**Cui et al. (2018)** ont proposé un modèle d'automate cellulaire pour localiser la fuite du principal pipeline de drainage de gaz. Cette méthode suppose un changement continu du fluide du pipeline dans le temps et l'espace, ce qui améliore la précision de la localisation. [21]

**Diao et al. (2019)** ont proposé un modèle de localisation des fuites basé sur le temps de propagation d'une onde de pression depuis la vanne jusqu'à l'emplacement de la fuite et inversement. Dans le modèle de détection des fuites, le modèle de frottement instable unidimensionnel est introduit dans la méthode des caractéristiques. [16]

**Liu et al. (2018)** ont appliqué une méthode de détection et de localisation des fuites basée sur des ondes de pression dynamiques. Une méthode améliorée de transformée en ondelettes a été conçue et un modèle théorique de propagation des ondes de pression dynamiques dans le gaz a été établi. [22]

**Chen et al. (2017)** ont présenté une méthode améliorée d'échantillonnage sol-gaz pour la détection des fuites dans les pipelines, grâce à une analyse du modèle d'écoulement et à des essais en laboratoire. [23]

**Lu et al. (2018)** ont étudié le schéma de fuite et de ventilation du gazoduc dans le tunnel sur la base de la théorie de la dynamique des fluides numérique (CFD). [24]

**Xu et al. (2019)** ont présenté une approche de détection des petites fuites pour les oléoducs à l'aide d'un détecteur sphérique interne. Tout en se déplaçant le long de l'oléoduc, le détecteur peut enregistrer des signaux de fuite à une distance très proche, ce qui indique sa capacité à détecter les petites fuites. [25]

**Yan et al. (2015)** ont mis au point un système expérimental grandeur nature pour simuler des fuites de gaz à basse pression à partir de petits trous dans quatre directions différentes à partir d'un tuyau enterré dans le sol. [26]

**Qiu et al. (2018)** ont utilisé le modèle de réseau bayésien dynamique (DBN) de la théorie des catastrophes pour localiser et prédire l'emplacement d'une fuite lors d'un accident de pipeline. [27]

**Doshmanziari et al. (2020)** ont évalué la détection des fuites de gazoducs basée sur la fusion de capteurs dans un cadre de détection de défauts basé sur un modèle. [28]

**Carnahan et al. (1991)** ont montré qu'une fuite dans la conduite peut être détectée par un test de pression de la conduite dans un système directement enterré. [29]

**Sun (2012)** a proposé que le modèle mathématique de l'écoulement dans un pipeline présentant une fuite puisse être utilisé pour évaluer la perte causée par une fuite et fournir un guide pour l'exploitation du pipeline ainsi qu'une aide à la détection des fuites. [30]

**Quy et Kim (2020)** ont décrit une approche fiable pour détecter les fuites et reconnaître leurs différentes tailles dans un gazoduc en se basant sur le portrait spectral des signaux d'émission acoustique. [31]

**Kranenburg et Vegt (1985)** ont développé un modèle mathématique simple et réalisé des expériences en laboratoire pour déterminer le volume de pétrole qui fuit en fonction du temps. [32]

**Wu et al. (2015)** ont appliqué l'inversion numérique à l'équation différentielle partielle pour étudier la fonction de la position de la fuite et de la décharge, ainsi que l'ensemble du processus de simulation numérique. [33]

**Schwaller et Van Zyl (2014)** ont utilisé un modèle pour la distribution des fuites individuelles dans une zone de comptage de district typique, ainsi que la plage que chaque paramètre est susceptible d'afficher, pour déterminer si la distribution des fuites ci-dessus est en mesure de produire la réponse pression-fuite du système observée dans les études sur le terrain. Les modèles de turbulence basés sur la méthode de calcul de la moyenne de Reynolds sont les modèles les plus largement utilisés dans les applications techniques. [34] [35]

L'analyse de la littérature indique que des chercheurs officiels ont proposé différentes nouvelles méthodes, notamment des signaux acoustiques, des ondes de pression dynamiques, etc. Cependant, peu de chercheurs utilisent la méthode d'analyse des variables sans dimension pour construire le modèle mathématique utilisé pour détecter les fuites dans la canalisation. L'idée d'utiliser les paramètres d'écoulement, tels que la chute de pression, le débit de fuite et l'emplacement de la fuite pour construire un modèle permettant de prédire la fuite n'est pas très répandue dans les publications antérieures. Notre travail peut être considéré comme une extension de l'étude de **(Yang et al., 2019)** de la détection du blocage à la fuite. Cependant, nous avons appliqué l'analyse des variables sans dimension à la détection des fuites. Parce que la non-dimensionnalisation des paramètres pendant le flux peut nous aider à comprendre les relations entre chaque terme relatif et à simplifier l'équation mathématique. Dans cette étude, les études en laboratoire sont utilisées pour comparer les résultats de la simulation numérique, et les données expérimentales sont appliquées à la construction de l'équation sans dimension pour prédire les fuites dans les gazoducs et les oléoducs. La fonction de la simulation numérique est de simuler le fluide circulant dans le pipeline qui a un point de fuite. Des expériences sont menées pour vérifier la validité du processus de simulation. Notre recherche vise principalement à construire un modèle de détection basé sur la simulation et les données expérimentales pour les fuites dans les oléoducs. Une fois confirmée par des essais sur le terrain, la nouvelle technologie d'inspection peut être adoptée par les sociétés de pipelines pour surveiller le fonctionnement des gazoducs et des oléoducs en temps réel. [36]

## ***Chapitre I : Généralités sur les pipelines***

---

## **I.1. Introduction :**

Dans ce chapitre, on présente le secteur des pipelines, qui sont des éléments essentiels de l'industrie du transport des fluides. En premier lieu, on examinera les aspects généraux sur les pipelines, leurs caractéristiques distinctives et leur rôle vital dans le transport de divers fluides, allant du pétrole et du gaz naturel à l'eau et aux produits chimiques. Ensuite, on expose les défis majeurs auxquels sont confrontés ces systèmes, en particulier les problèmes fréquents tels que les fuites, les obstructions, la corrosion et les défaillances mécaniques. Enfin, nous aborderons les méthodes de détection et de localisation des fuites, afin de faciliter la gestion et la maintenance efficaces de ces infrastructures essentielles.

## **I.2. Définition de pipeline :**

Un pipeline est une infrastructure de transport essentielle, composée de conduites interconnectées, généralement en acier, destinées à transporter des produits pétroliers tels que le pétrole brut, le gaz naturel ou les produits raffinés sur des longues et courtes distances entre les sites de production, les raffineries, les terminaux de stockage et les centres de distribution. Ces conduites peuvent être enterrées ou aériennes et sont souvent revêtues intérieurement et extérieurement pour assurer leur intégrité et les protéger contre la corrosion. Malgré le coût et la complexité de leur installation, les pipelines constituent une option fiable, efficace et économique pour le transport d'importantes quantités d'hydrocarbures et de leurs dérivés. [37]



*Figure I.2.1. Pipelines*

### **I.2.1. Caractéristiques des pipelines :**

Les pipelines sont perçus comme le mode de transport le plus abordable pour les longues distances de manière continue et régulière à travers le monde, en raison de leurs particularités :

- Un grand diamètre qui arrive jusqu'à 56" et peut atteindre 64",
- La capacité maximale de transport,
- La pression de service élevée (jusqu'à 100 bars),
- Une grande longueur, ] L'épaisseur (variant de 6.35 mm à 23 mm),
- Le mode de pose (aérien ou souterrain). [37]

### **I.2.2. Type de pipeline :**

Le type et le nom d'un pipeline dépendent des caractéristiques physiques et des conditions du transport du produit. On distingue trois types :

- Gazoduc pour le gaz naturel.
- L'oléoduc pour le pétrole
- Les aqueducs pour le transport de l'eau.

### **I.3. Définition d'une fuite :**

Une fuite se produit lorsque des produits pétroliers s'échappent de manière incontrôlable à la suite d'une rupture ou d'une fissure dans les conduites. Outre les impacts environnementaux, sécuritaires et économiques néfastes, les fuites entraînent également une diminution de la pression dans le système, compromettant ainsi l'efficacité du réseau de transport et nécessitant des mesures immédiates pour prévenir tout dommage supplémentaire.



*Figure I.3.1. Fuite dans un pipeline*

### **I.3.1. Principales causes des fuites :**

#### *I.3.1.i. Les défaillances mécaniques :*

Les défaillances mécaniques sont des ruptures et des fissures qui surviennent lorsque les contraintes dans le système dépassent la contrainte admissible. Elles peuvent être causées par une qualité de matériau médiocre ou une construction défectueuse. Des défauts de fabrication peuvent survenir dans le tuyau ou les raccords, par exemple dans la paroi du tuyau ou dans la soudure longitudinale.

Des techniques de construction médiocres peuvent générer des niveaux de contrainte résiduelle élevés dans le pipeline avant sa mise en service. Par exemple, la formation de coudes de tuyaux, les techniques de soudage et la manipulation des matériaux peuvent tous conduire à des pratiques de construction inacceptables si elles ne sont pas réalisées selon les spécifications du travail.

Les défaillances mécaniques représentent environ 25 % du nombre d'incidents de déversement et environ 30 % du volume net déversé sur l'ensemble de la période de vingt-cinq ans. [38]

#### *I.3.1.ii. Les défaillances opérationnelles :*

Les défaillances opérationnelles peuvent être dues à une surpression ou au dysfonctionnement de systèmes tels que les dispositifs de sécurité ou de contrôle de pression. Elles sont également causées par des erreurs humaines telles que le non-respect des instructions de fonctionnement correctes. Cependant, l'industrie a acquis une grande expérience dans l'exploitation des pipelines et l'incidence des déversements causés par une erreur opérationnelle est très faible, à 7% des incidents dans les données sur vingt-cinq ans. [38]

#### *I.3.1.iii. La corrosion :*

Dans le passé, la corrosion a été la cause la plus courante des déversements, bien que les quantités impliquées soient généralement faibles. Les pipelines sont soumis à deux types de corrosion - interne et externe.

- Corrosion interne :

Pertes de métal provoquées le plus souvent par des attaques chimiques de la surface interne de la conduite. Ce type de corrosion est favorisé par la présence de sulfure d'hydrogène et de dioxyde de carbone dans le gaz et la présence de bactéries sulfato-réductrices (BSR) dans le cas des oléoducs. [39]

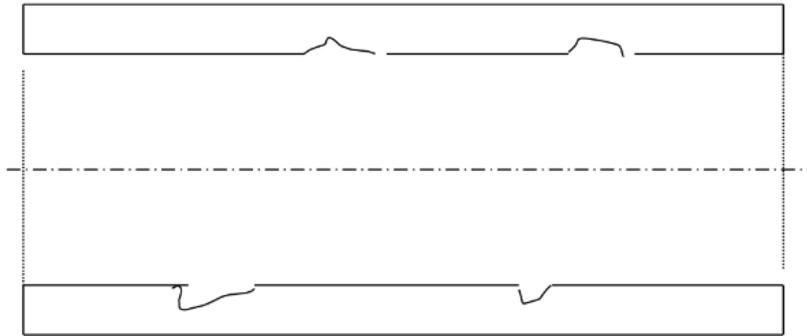


Figure I.3.2. Schéma simple d'une corrosion interne

- Corrosion externe :

Pertes de métal provoquées le plus souvent par des phénomènes de type électrochimiques chimique. Les principaux facteurs favorisant ce type de corrosion sont :

- Les défauts dans le revêtement (l'enrobage) de la conduite,
- Les insuffisances du système de protection cathodique,
- L'agressivité du sol (sol de faible résistivité électrique). [39]



Figure I.3.3. Schéma simple d'une corrosion externe

#### **I.4. Inspection et Maintenance :**

L'inspection et la maintenance régulières sont essentielles pour garantir que les pipelines restent en bon état mécanique et fonctionnent de manière optimale. Ces procédures incluent plusieurs étapes essentielles :

- **Contrôles réguliers** : des inspections périodiques sont menées pour détecter tout signe de corrosion, de détérioration ou de dommages mécaniques. Cela permet de prendre des mesures correctives avant que des problèmes majeurs n'apparaissent.
- **Vérification des systèmes de protection** : tous les équipements et les systèmes de protection cathodique sont inspectés pour s'assurer qu'ils fonctionnent correctement. La protection cathodique est une méthode clé pour prévenir la corrosion interne et externe des pipelines.
- **Nettoyage interne** : les dépôts accumulés à l'intérieur des pipelines peuvent entraîner des pertes de pression et réduire l'efficacité du transport des fluides. L'utilisation de racleurs, ou « pigs », permet de nettoyer la paroi interne des conduites, éliminant ainsi les dépôts et assurant un flux optimal.



Figure I.4.1. Racleur de nettoyage (pig) IP.UG1 Ø 12" - 36"

Ces mesures d'inspection et de maintenance sont essentielles pour prolonger la durée de vie des pipelines, minimiser les risques d'incidents et garantir un fonctionnement sûr et efficace des infrastructures de transport des fluides.

## I.5. Détection des fuites :

Des systèmes de détection des fuites sont mis en place afin de détecter et localiser les déversements avec la plus grande rapidité et précision possible. Ces systèmes jouent un rôle important dans la prévention des catastrophes environnementales et économiques en permettant une réponse immédiate et efficace aux incidents potentiels. Ces systèmes permettent à l'opérateur de prendre les mesures appropriées pour contrôler et réduire le déversement.

Les techniques de détection sont basées sur des mesures continues ou intermittentes de paramètres spécifiques. Les méthodes de détection de fuites intermittentes sont souvent capables de détecter des taux de déversement plus faibles que les techniques de détection de fuites en continu. Certaines techniques continues ne peuvent détecter que les conditions transitoires du pipeline pendant l'apparition d'une fuite et ne peuvent pas identifier la présence d'une fuite à un moment ultérieur.

Pour certaines techniques intermittentes, il est nécessaire d'interrompre le transport du fluide dans la canalisation. Avec ces techniques, le temps de détection d'une fuite dépend entièrement de la fréquence des inspections. L'équilibre délicat entre la sensibilité aux fuites et la prévention des fausses alarmes détermine la performance du système de détection des fuites.

Les fuites importantes peuvent généralement être détectées plus rapidement que les petites. Cependant, il est important de minimiser les fausses alarmes tout en essayant de réduire le temps de détection des fuites et le taux de fuite minimum détectable. Cela permet de maintenir la crédibilité du système de détection des fuites auprès des utilisateurs.

La performance des techniques de détection des fuites dans les pipelines dépend du type de fluide, de la pression de fonctionnement (y compris les fluctuations), du mode de fonctionnement (discontinu ou continu), de la longueur et de la taille de la canalisation, de la précision du comptage, etc.

La décision quant à la technique à adopter dépend d'une évaluation détaillée au cas par cas. D'une évaluation détaillée au cas par cas. Lorsque les conséquences d'un déversement sont considérées comme importantes, les techniques plus sophistiquées de détection des fuites sont nécessaires. Il peut être nécessaire de déployer plus d'une technique de détection des fuites afin d'atteindre la performance de la décision quant à la technique à adopter dépend d'une évaluation détaillée au cas par cas.

### I.5.1. Principe des méthodes :

Bien qu'il existe de nombreuses méthodes pour détecter les fuites, les principes fondamentaux de détection sont limités et peuvent être résumés comme suit :

- **Observation visuelle et autres méthodes de détection de fuites hors ligne** : Ces méthodes impliquent des inspections manuelles ou l'utilisation de technologies telles que les drones et les caméras pour repérer visuellement les signes de fuites. [38]
- **Comparaison du volume d'entrée avec le volume de sortie** : cette technique consiste à mesurer et comparer les volumes de fluide entrant et sortant de la canalisation pour détecter les écarts qui pourraient indiquer une fuite. [38]
- **Analyse de la mesure de la pression et/ou du débit** : les variations anormales de la pression ou du débit à différents points de la canalisation peuvent signaler la présence d'une fuite. [38]
- **Surveillance des signaux caractéristiques générés par une fuite** : Les fuites produisent souvent des signaux acoustiques ou des vibrations spécifiques qui peuvent être détectés et analysés pour localiser la fuite. [38]

- **Outils intelligents de détection de fuites :** ces dispositifs, insérés dans la canalisation, sont conçus pour détecter et signaler les anomalies structurelles ou les fuites tout en se déplaçant à l'intérieur de la canalisation. [38]

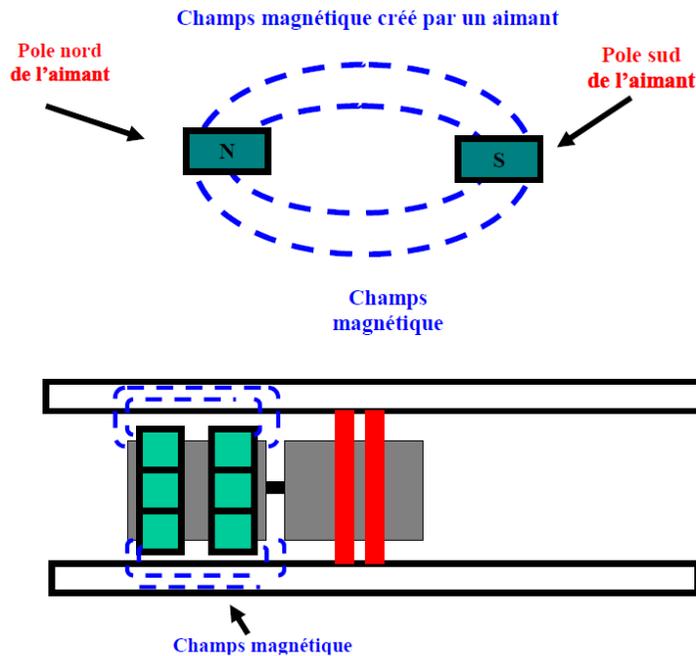


Figure I.5.1. Outil intelligent d'Inspection de type magnétique (MFL)

En combinant ces différentes méthodes, il est possible de créer un système de détection de fuites robuste et fiable, capable de minimiser les risques et d'assurer une intervention rapide en cas de problème. [38]

## I.6. Conclusion:

En conclusion, les pipelines sont des entités de transport des hydrocarbures très sensibles, exposées à divers problèmes d'exploitation tels que les fuites, la corrosion, les obstructions et les défaillances mécaniques, comme mentionné dans ce chapitre. Pour faire face à ces défis, de nombreuses études et méthodes de détection des fuites ont été développées afin d'optimiser leur durée de vie et d'assurer un fonctionnement sûr et efficace. Ces efforts sont essentiels pour maintenir la fiabilité et la sécurité des pipelines, tout en minimisant les risques environnementaux et économiques associés à leur exploitation.

## ***Chapitre II : Simulation avec ANSYS Fluent***

---

## II.1. Introduction :

La simulation numérique est une représentation de phénomènes physiques complexes rendue possible grâce à une série de calculs et un modèle mathématique comportant des équations aux dérivés partiels. C'est le moyen de simuler de manière virtuelle un produit dans son environnement final et ainsi de répondre à de multiples enjeux industriels tels qu'anticiper les écueils de conception, réduire les prototypes ou encore favoriser l'innovation. [40]

## II.2. Définition de la simulation :

Une simulation imite le fonctionnement de processus ou de systèmes réels à l'aide de modèles. Le modèle représente les comportements et les caractéristiques clés du processus ou du système sélectionné, tandis que la simulation représente la manière dont le modèle évolue dans différentes conditions au fil du temps. [41]

Les simulations sont généralement informatisées et utilisent un modèle généré par un logiciel pour soutenir les décisions des gestionnaires et des ingénieurs. Plusieurs sont utilisés pour réaliser une simulation, tels que : Ansys, Aspen Plus, ChemCAD, Hysim, Hysys, Pro-II, très populaires comme soft de simulation, pour faciliter la compréhension et l'expérimentation et créer une maquette visuelle. [41]

Les systèmes de simulation comprennent : [41]

- **La simulation d'événements discrets** : modélisation d'un système au fur et à mesure de son évolution dans le temps.
- **La simulation de processus** : modélisation d'un système au cours de sa progression dans l'espace.
- **La simulation dynamique** : modélisation des interactions physiques entre deux ou plusieurs systèmes.

Le choix du bon logiciel de simulation dépend étroitement des besoins spécifiques du projet de simulation en question. Dans le cadre de mon travail, j'ai opté pour le simulateur Ansys 18.

## II.3. Le logiciel ANSYS :

Le simulateur ANSYS est un logiciel de simulation numérique de premier plan sur le marché, largement utilisé dans le développement de produits industriels. Il offre une gamme complète de fonctionnalités couvrant toutes les étapes essentielles du processus de simulation : le traitement géométrique, le maillage, la résolution, le traitement de résultats et l'optimisation. ANSYS inclut des modules comme ANSYS Fluent pour la simulation CFD (Computational Fluid Dynamics) et ANSYS Workbench pour une plateforme intégrée couvrant toutes les étapes essentielles du processus de simulation. [42]

ANSYS Fluent est un logiciel de simulation CFD (Computational Fluid Dynamics) qui permet de modéliser l'écoulement du fluide, le transfert de chaleur et les réactions chimiques dans des

géométries complexes. Ce programme est écrit dans le langage C de programmation et permet d'utiliser pleinement la flexibilité et la puissance offertes par cette langue. [42]

**ANSYS Fluent** utilise une architecture client-serveur, ce qui lui permet d'exécuter des processus simultanés distincts sur plusieurs postes de travail client et serveurs de calcul puissants. Cette architecture est essentielle pour une exécution efficace, un contrôle interactif, et une flexibilité totale entre les différents types de machines ou de systèmes d'exploitation. [42]

### II.4. Les Composants d'ANSYS Fluent :

Comme tout logiciel de CFD (Computational fluid Dynamics), **Ansys** est composé de trois éléments : le préprocesseur, le solveur et le post-processeur.

- La définition de problème à résoudre s'effectue à l'aide du **préprocesseur** ANSYS Design Modeler et Meshing. Il permet de représenter la géométrie, discrétiser le domaine en utilisant différents algorithmes de maillage et nommer les différents composants et/ou matériaux (fluide ou solide). [43]
- **Le solveur** permet de définir numériquement les conditions opératoires (gravité, pression) dans lesquelles est effectués la simulation, ainsi que la spécification des conditions aux limites. Enfin, il permet de choisir le processus itératif, en proposant notamment plusieurs schémas numériques pour la discrétisation spatiale et temporelle, et pour le couplage de la vitesse et de la pression. Il offre également une interface permettant de contrôler à tout moment l'état d'avancement des calculs. [43]
- **Le post-processeur** est l'élément qui permet de visualiser la géométrie et le maillage du domaine, mais surtout d'afficher les résultats obtenus. Il est ainsi possible de visualiser les champs du vecteur vitesse, les champs de pression, de turbulence ainsi que toutes les autres grandeurs calculées sur un segment, une section du domaine ou sur tout le volume. Il offre aussi la possibilité de tracer des courbes et de visualiser les lignes de courant ou la trajectoire de particules. [43]

### II.5. Méthodes Numériques Utilisées dans ANSYS Fluent :

ANSYS FLUENT nous offre le choix entre deux méthodes numériques principales pour la résolution des écoulements :

- **Solveur basé sur la pression** : Ce solveur résout les équations en utilisant la pression comme variable principale. Il est souvent utilisé dans les simulations d'écoulements incompressibles, où les variations de densité sont négligeables.

- **Solveur basé sur la masse volumique** : Ce solveur reformule les équations en utilisant la densité comme variable principale. Il convient particulièrement aux cas d'écoulements compressibles, où les variations de densité sont significatives et doivent être prises en compte de manière explicite.

### **II.5.1. Solveur basé sur la pression (Pressure-Based Solver) :**

La méthode basée sur la pression est une technique de résolution des équations de la mécanique des fluides qui utilise la pression pour assurer la conservation de la masse et la continuité du champ de vitesse. Le solveur basé sur la pression utilise un algorithme appartenant à une classe générale de méthodes appelée la méthode de projection.

Dans la méthode de projection, la contrainte de conservation de la masse (continuité) du champ de vitesse est réalisée en résolvant une équation de pression (ou de correction de pression). L'équation de pression est dérivée des équations de continuité et de quantité de mouvement de telle manière que le champ de vitesse, corrigé par la pression, satisfasse la continuité. Étant donné que les équations régissant sont non linéaires et couplées entre elles, le processus de solution implique des itérations dans lesquelles l'ensemble des équations régissant est résolu de manière répétée jusqu'à ce que la solution converge. [44]

Deux algorithmes de solveur basés sur la pression sont disponibles dans ANSYS FLUENT: un **algorithme séparé** et un **algorithme couplé**.

#### *II.5.1.i. Algorithme Séparé Basé sur La Pression :*

Le solveur basé sur la pression utilise un algorithme de solution où les équations gouvernantes sont résolues séquentiellement (c'est-à-dire séparées les unes des autres). Comme les équations gouvernantes sont non linéaires et couplées, la boucle de solution doit être réalisée de manière itérative afin d'obtenir une solution numérique convergée. [44]

Dans l'algorithme séparé, les équations gouvernantes individuelles pour les variables de solution (e.g.  $u$ ,  $v$ ,  $w$ ,  $p$ ,  $T$ ,  $k$ ,  $\epsilon$ , etc.) sont résolues l'une après l'autre. Chaque équation gouvernante, lorsqu'elle est résolue, est "découplée" ou "séparée" des autres équations, d'où son nom. L'algorithme séparé est économe en mémoire, car les équations discrétisées doivent seulement être stockées en mémoire une à la fois. Cependant, la convergence de la solution est relativement lente, dans la mesure où les équations sont résolues de manière découplée. [44]

Avec l'algorithme séparé, chaque itération consiste en les étapes illustrées dans **la Figure II.5.1.i.1** décrites ci-dessous.

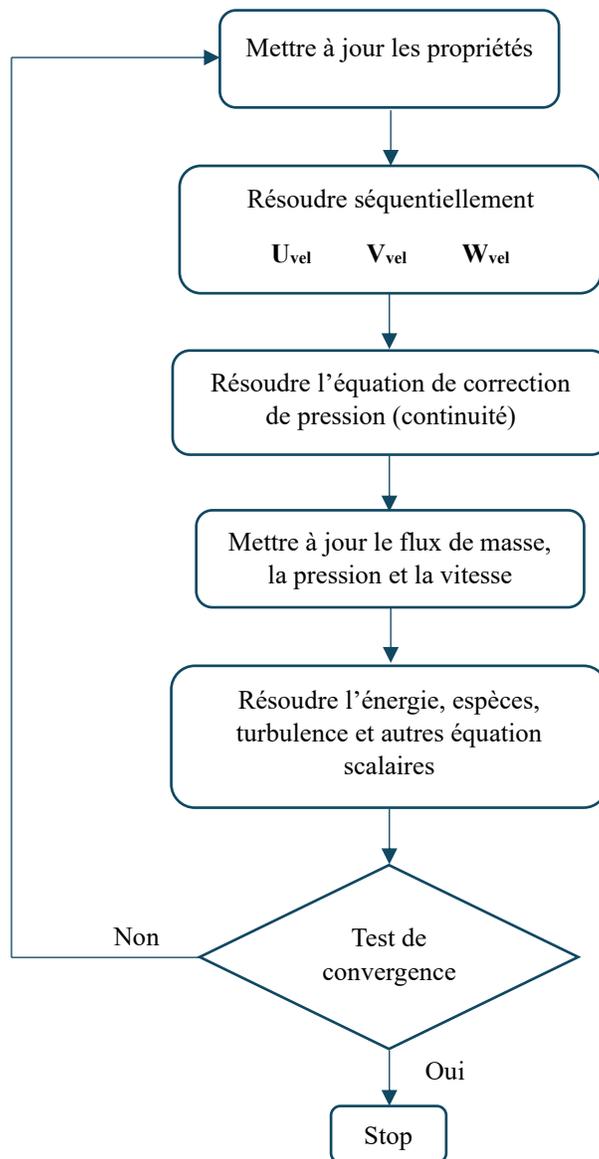


Figure II.5.1.1. Algorithme séparé basé sur la pression

*II.5.1.ii. Algorithme Couplé Basé sur La Pression :*

Contrairement à l'algorithme séparé décrit précédemment, l'algorithme couplé basé sur la pression résout un système couplé d'équations comprenant les équations de la quantité de mouvement et l'équation de continuité basée sur la pression. Ainsi, dans l'algorithme couplé, les étapes 2 et 3 de l'algorithme de solution séparée sont remplacées par une seule étape dans laquelle le système couplé d'équations est résolu. Les autres équations sont résolues de manière découplée comme dans l'algorithme séparé.

Étant donné que les équations de la quantité de mouvement et de continuité sont résolues de manière étroitement couplée, le taux de convergence de la solution s'améliore considérablement

par rapport à l'algorithme séparé. Cependant, les besoins en mémoire augmentent de 1,5 à 2 fois ceux de l'algorithme séparé, car le système discret de toutes les équations de quantité de mouvement et de continuité basées sur la pression doit être stocké en mémoire lors de la résolution des champs de vitesse et de pression (plutôt que d'une seule équation, comme c'est le cas avec l'algorithme séparé). [44]

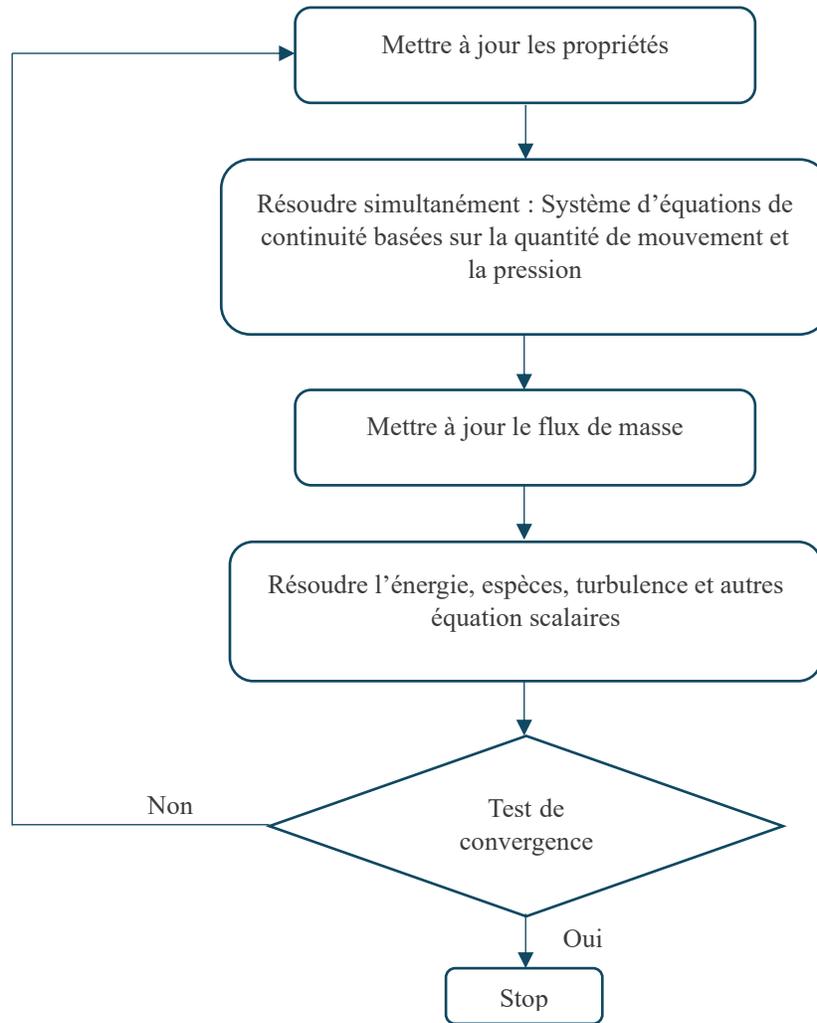


Figure II.5.1.2. Algorithme couplé basé sur la pression

### II.5.2. solveur basé sur la densité :

Le solveur basé sur la densité résout les équations de continuité, de quantité de mouvement et (le cas échéant) de transport d'énergie et d'espèces simultanément (c'est-à-dire couplées ensemble).

Les équations régissant des scalaires supplémentaires seront résolues ensuite et de manière séquentielle (c'est-à-dire séparées les unes des autres et du groupe couplé) en utilisant une

technique basée sur le volume de contrôle pour convertir une équation générale de transport scalaire en une équation algébrique qui peut être résolue numériquement.

Cette technique de volume de contrôle consiste à intégrer l'équation de transport pour chaque volume de contrôle, produisant ainsi une équation discrète qui exprime la loi de conservation sur une base de volume de contrôle. Étant donné que les équations régissant sont non linéaires (et couplées), plusieurs itérations de la boucle de solution doivent être effectuées avant d'obtenir une solution convergée. [45]

1. Mettre à jour les propriétés du fluide en fonction de la solution actuelle. (Si le calcul vient de commencer, les propriétés du fluide seront mises à jour en fonction de la solution initialisée.)
2. Résoudre simultanément les équations de continuité, de quantité de mouvement et, le cas échéant, d'énergie et de transport des espèces.
3. Le cas échéant, résoudre les équations pour les scalaires tels que la turbulence et le rayonnement en utilisant les valeurs précédemment mises à jour des autres variables.
4. Lorsque le couplage interphase doit être inclus, mettre à jour les termes sources dans les équations de la phase continue appropriée avec un calcul de trajectoire de phase discrète.
5. Vérifier la convergence de l'ensemble des équations.

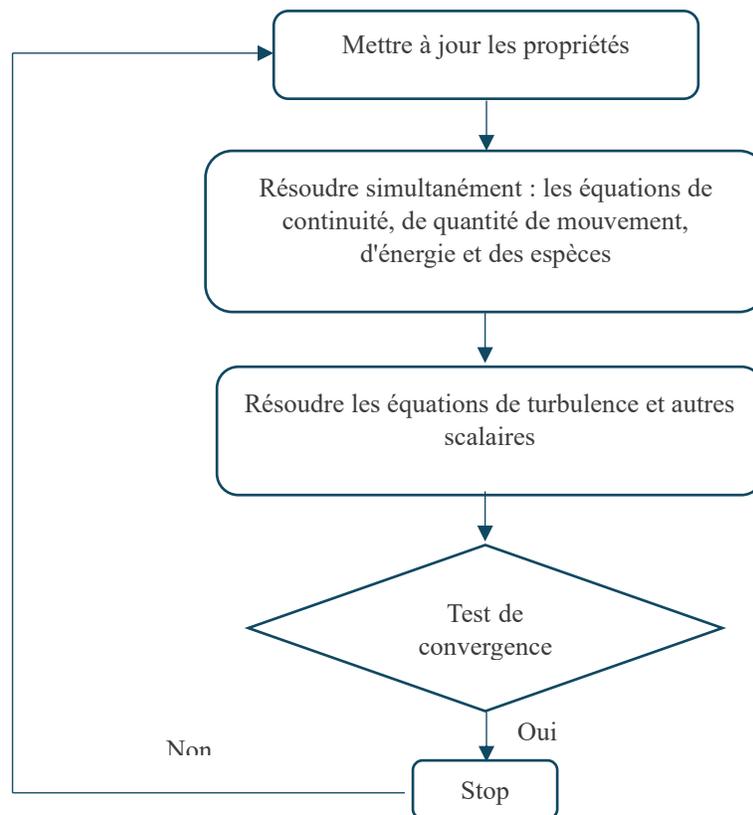


Figure II.5.2.1. Algorithme couplé basé sur la densité

Historiquement, l'approche fondée sur la pression a été développée pour les écoulements incompressibles à basse vitesse, tandis que l'approche basée sur la densité était principalement utilisée pour les écoulements compressibles à haute vitesse. Cependant, récemment, les deux méthodes ont été étendues et reformulées pour résoudre et fonctionner dans une large gamme de conditions d'écoulement au-delà de leur intention traditionnelle ou originelle.

Dans les deux méthodes, le champ de vitesse est obtenu à partir des équations de quantité de mouvement. Dans l'approche basée sur la densité, l'équation de continuité est utilisée pour obtenir le champ de densité tandis que le champ de pression est déterminé à partir de l'équation d'état.

D'autre part, dans l'approche basée sur la pression, le champ de pression est obtenu en résolvant une équation de pression ou de correction de pression qui est obtenue en manipulant les équations de continuité et de quantité de mouvement.

En utilisant l'une ou l'autre méthode, ANSYS FLUENT résoudra les équations intégrales gouvernantes pour la conservation de la masse et de la quantité de mouvement, et (le cas échéant) pour l'énergie et d'autres scalaires tels que la turbulence et les espèces chimiques. Dans les deux cas, une technique basée sur le volume de contrôle est utilisée qui consiste à :

1. Diviser le domaine en volumes de contrôle discrets à l'aide d'une grille de calcul.
2. Intégrer les équations gouvernantes sur les volumes de contrôle individuels pour construire des équations algébriques pour les variables dépendantes discrètes (les « inconnues ») telles que les vitesses, la pression, la température et les scalaires conservés.
3. Linéariser les équations discrétisées et résoudre le système d'équations linéaires résultant pour obtenir des valeurs mises à jour des variables dépendantes.

Les deux méthodes numériques utilisent un processus de discrétisation similaire (volume fini), mais l'approche utilisée pour linéariser et résoudre les équations discrétisées est différente.

### II.6. Méthode des volumes finis :

La méthode des volumes finis (FVM) est une approche de discrétisation largement utilisée pour résoudre efficacement les équations aux dérivées partielles, en particulier celles qui découlent des lois de conservation physique, telles que celles rencontrées en dynamique des fluides computationnels. Elle se distingue par sa capacité à découper le domaine de résolution en un ensemble fini d'éléments, tels que des parallélépipèdes ou des parallélogrammes, et à approximer les équations sur chacun de ces éléments de manière précise et efficace.

Ils existent plusieurs algorithmes basés sur la méthode des volumes finis tels que :

- L'algorithme **SIMPLE** (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) développé par Patankar and Spalding en 1972.
- L'algorithme **SIMPLER** (SIMPLE Revised) développé par Patankar en 1980.

- L'algorithme **SIMPLEC** (SIMPLE Consistant) développé par Van Doormal and Raithby en 1984.
- L'algorithme **PISO** (Pressure Implicit with Spliting of Operators) développé par Issa en 1986.

### II.7. Algorithmes ANSYS Fluent :

#### II.7.1. Algorithme SIMPLE :

**SIMPLE** signifie « semi-implicit method for pressure-linked equations » (méthode semi-implicite pour les équations liées à la pression). L'algorithme a été initialement proposé par Patankar et Spalding (1972) et est essentiellement une procédure de devinette et de correction pour le calcul de la pression sur la grille décalée présentée ci-dessus. Développé à l'Imperial College de Londres, il est largement utilisé pour résoudre les équations de Navier-Stokes en dynamique des fluides numériques (CFD). [46]

L'algorithme SIMPLE fournit une méthode de calcul de la pression et des vitesses. La méthode est itérative, et lorsque d'autres scalaires sont couplés aux équations de moment, le calcul doit être effectué de manière séquentielle. La séquence des opérations dans une procédure CFD qui utilise l'algorithme SIMPLE est donnée par les étapes de base suivantes :

- Définir les conditions aux limites,
- Calculer les gradients de vitesse et de pression,
- Résoudre l'équation de moment discrétisée pour obtenir le champ de vitesse intermédiaire.
- Calculer les flux de masse non corrigés sur les faces, puis résoudre l'équation de correction de pression pour produire les valeurs de correction de pression. [46]

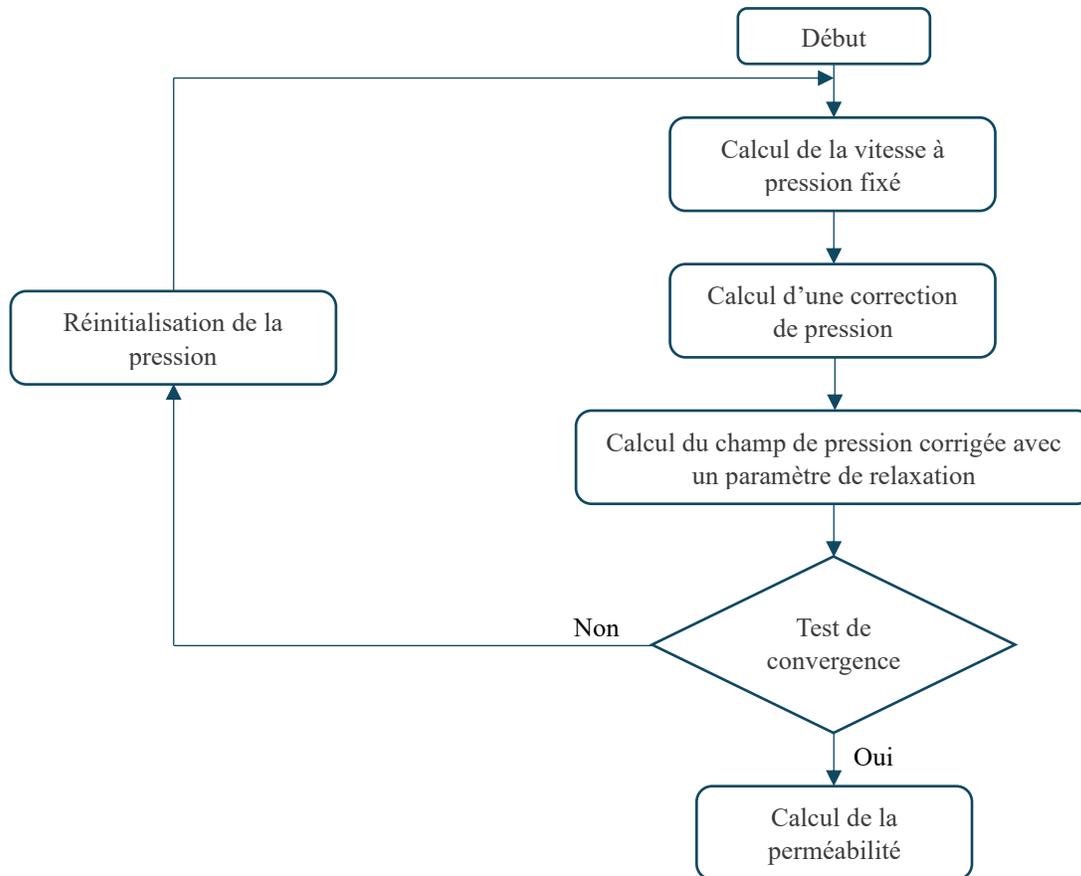


Figure II.7.1.1. Processus de calcul de l'algorithme SIMPLE

### II.7.2. L'algorithme SIMPLER:

Le SIMPLER (SIMPLE Révisé) algorithme de Patankar (1980) est une version améliorée de SIMPLE. Dans cet algorithme, l'équation de continuité discrétisée est utilisée pour dériver une équation discrétisée pour la pression, au lieu d'une équation de correction de pression comme dans SIMPLE. Ainsi, le champ de pression intermédiaire est obtenu directement sans l'utilisation d'une correction. Les vitesses sont cependant obtenues à travers les corrections de vitesse de SIMPLE. Il peut être utile de présenter cette information après avoir expliqué l'algorithme SIMPLE, car cela permet de comprendre l'évolution vers une méthode plus avancée dans la résolution des équations de fluide.

### II.7.3. L'algorithme SIMPLEC :

L'algorithme SIMPLEC (SIMPLE-Consistent) de Van Doormal et Raithby (1984) suit les mêmes étapes que l'algorithme SIMPLE, à la différence que les équations de moment sont manipulées de telle sorte que les équations de correction de vitesse SIMPLEC omettent les termes moins significatifs que ceux de SIMPLE.

### II.7.4. L'algorithme PISO :

L'algorithme PISO, qui signifie Pression Implicite avec Séparation des Opérateurs, d'Issa (1986), est une procédure de calcul pression-vitesse développée à l'origine pour le calcul non itératif des écoulements compressibles instationnaires. Il a été adapté avec succès pour la solution itérative des problèmes à l'état stable. PISO comprend une étape de prédiction et deux étapes de correction et peut être considéré comme une extension de SIMPLE, avec une étape de correction supplémentaire pour l'améliorer.

## II.8. Computational Fluid Dynamics :

La dynamique des fluides numérique (CFD) est une branche de la mécanique des fluides qui offre une méthode rentable pour simuler des écoulements réels en appliquant un ensemble de méthodes numériques afin d'obtenir des solutions approximatives à divers problèmes complexes. Cette approche est extrêmement puissante et largement utilisée dans de nombreux domaines industriels et non industriels, tels que les turbomachines (écoulements au sein de passages rotatifs, diffuseurs, etc.) et l'ingénierie des procédés chimiques (mélange et séparation, moulage de polymères, etc.). De plus, la CFD est considérée comme un élément essentiel de la conception et de l'optimisation des produits et processus industriels.

### II.8.1. Équations gouvernantes en CFD :

#### II.8.1.i. Conservation de la masse :

La loi de conservation de la masse stipule que pour tout système fermé à tout transfert de matière et d'énergie, la masse du système doit rester constante dans le temps. Comme la masse du système ne peut pas changer, la quantité ne peut être ni ajoutée ni retirée. Par conséquent, la quantité de masse est conservée au fil du temps. L'équation de conservation de la masse pour l'écoulement des fluides peut s'écrire comme :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad \text{II.8.1}$$

où  $\rho$  est la densité,  $t$  le temps, et  $\vec{u}$  le vecteur vitesse.

#### II.8.1.ii. Conservation de la quantité de mouvement :

Un système qui n'est pas soumis à des forces extérieures ou dont la somme des forces extérieures est nulle, la quantité de mouvement totale du système reste inchangée. Cette conclusion est appelée la loi de conservation de la quantité de mouvement.

L'équation de conservation de la quantité de mouvement pour l'écoulement des fluides peut s'écrire comme :

$$\rho \frac{d\vec{u}}{dt} = \rho \vec{g} - \nabla p + \mu \Delta \vec{u} \quad II.8.2$$

où  $t$  est le temps,  $\rho$  la densité du fluide,  $\vec{u}$  le vecteur vitesse,  $\rho \vec{g}$  la force de gravité,  $p$  la pression,  $\mu$  la viscosité dynamique.

### II.8.1.iii. Conservation de l'énergie :

La loi de conservation de l'énergie stipule que l'énergie totale d'un système isolé reste constante. Cette loi signifie que l'énergie ne peut être ni créée ni détruite ; elle ne peut être que transformée ou transférée d'une forme à une autre. L'équation de conservation de l'énergie est décrite comme :

$$\rho \frac{dh}{dt} = \frac{dp}{dt} + \nabla \cdot (k \nabla T) + \phi \quad II.8.3$$

où  $\rho$  est la densité,  $t$  le temps,  $h$  l'enthalpie,  $p$  la pression,  $k$  la conductivité thermique du fluide,  $T$  la température,  $\phi$  la fonction de dissipation visqueuse.

## II.8.2. Hypothèses du modèle de turbulence :

En dynamique des fluides, la turbulence ou l'écoulement turbulent est le mouvement du fluide caractérisé par des changements chaotiques de la pression et de la vitesse d'écoulement. La modélisation de la turbulence consiste à construire un modèle mathématique pour prédire les effets de la turbulence. Nous avons fait quelques hypothèses sur le modèle de turbulence pour l'écoulement du fluide dans la boucle d'écoulement, qui sont présentées ci-dessous :

- Le champ d'écoulement a un nombre de Reynolds élevé, supérieur à 4000. Ainsi, le modèle turbulent est utilisé.
- L'influence de l'environnement extérieur sur la température est négligeable.
- Le fluide dans le tuyau est de l'eau incompressible.
- L'écoulement est en régime turbulent stationnaire.
- Ignorer le rayonnement thermique entre les parois solides.
- La viscosité turbulente du fluide a la même identité.

### II.8.2.i. Conservation pour le modèle de turbulence :

Le modèle de turbulence k-epsilon (k- $\epsilon$ ) est un modèle courant pour prédire l'influence de la turbulence. C'est un modèle qui comporte deux équations de transport pour simuler les propriétés de la turbulence. Les deux équations pour l'énergie cinétique turbulente et le taux de dissipation  $\epsilon$  sont introduites ici.

a. Équation d'énergie turbulente  $k$

La première variable transportée est l'énergie cinétique turbulente :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_m + S_k \quad II.8.4$$

où  $\rho$  est la densité,  $t$  le temps,  $k$  l'énergie cinétique turbulente,  $x_i$  et  $x_j$  les emplacements correspondants,  $u_i$  la vitesse dans la direction  $x_i$ ,  $\mu$  la viscosité,  $\mu_t$  la viscosité tourbillonnaire,  $\sigma_k$  la constante égale à 1,  $G_k$  l'énergie du flux turbulent produite par le gradient de vitesse laminaire,  $G_b$  l'énergie du flux turbulent générée par la poussée d'Archimède,  $Y_m$  les fluctuations causées par la diffusion excessive dans la turbulence,  $\varepsilon$  le taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente, et  $S_k$  le terme source pour l'énergie cinétique turbulente.

b. Équation de dissipation  $\varepsilon$  :

La seconde variable transportée est le taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad II.8.5$$

où  $C_{1\varepsilon}$ ,  $C_{2\varepsilon}$ ,  $C_{3\varepsilon}$  sont les paramètres constants,  $S_\varepsilon$  le terme source pour le taux de dissipation,  $\sigma_\varepsilon$  une constante.

La viscosité tourbillonnaire de l'écoulement turbulent peut être déterminée par l'équation :

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{K^2}{\varepsilon} \quad II.8.6$$

## II.9. Conclusion :

La compréhension approfondie des aspects de ce simulateur, de ses algorithmes et des méthodes utilisées permet de mieux maîtriser son interface, ce qui conduit à des résultats de simulation plus précis et fiables. Cette maîtrise facilite également la validation des résultats obtenus, assurant ainsi la pertinence et la qualité des analyses réalisées.

## ***Chapitre III : Modélisation sur ANSYS***

---

### III.1. Introduction :

Dans ce chapitre, nous plongerons dans le monde de la simulation avec Ansys, en examinant de près les différentes étapes nécessaires pour mener à bien une simulation pour obtenir des résultats fiables. Nous aborderons en détail chaque étape du processus, depuis la préparation de géométrie jusqu'à l'obtention des résultats. En comprenant pleinement les étapes à suivre et les considérations à prendre en compte tout au long du processus, nous serons en mesure d'effectuer des simulations précises et de valider nos résultats de manière efficace.

### III.2. L'objectif de la simulation :

L'objectif de cette simulation avec ANSYS est d'identifier les différentes formes de fuites et d'analyser leur impact sur l'écoulement dans le pipeline. Cette démarche vise à étudier divers problèmes rencontrés dans les pipelines tels que la chute de pression, la diminution du débit lors du transport, la réduction de diamètre, etc. L'objectif final est de définir des méthodes de détection efficaces en se concentrant sur des paramètres clés tels que la localisation, le diamètre et le débit des fuites, afin de valider les résultats.

### III.3. Méthodologie :

La recherche a été scindée en deux groupes, chacun ayant un objectif distinct.

- **Développement d'une méthodologie CFD :** Le premier groupe de recherche se concentre sur le développement d'une méthodologie CFD pour simuler l'écoulement des fluides dans une conduite comportant des obstructions. Les techniques sont mises en place en utilisant ANSYS Fluent et les logiciels de pré- et post-traitement associés d'ANSYS. Les étapes incluent la création de la géométrie, le maillage de cette géométrie et la modélisation des fluides. Pour valider le modèle comme un outil fiable de simulation CFD, les résultats sont comparés à des données expérimentales. En outre, des techniques de post-traitement pour analyser les données collectées sont détaillées.
- **Validation et analyse des paramètres :** Pour cette étude, les mêmes logiciels et méthodes sont utilisés pour valider le modèle. Chaque paramètre clé, tel que le diamètre, la localisation et le débit, est isolé et modifié afin d'examiner son impact sur la chute de pression dans le pipeline.

### III.4. Le domaine de calcul :

Sous l'effet du fluide, les calculs sont effectués pour simuler l'écoulement turbulent à l'intérieur de la conduite. Ainsi, une simulation en trois dimensions de l'écoulement est employée pour saisir les caractéristiques dynamiques du fluide. Les figures illustrent les géométries du domaine de calcul du pipeline, avec et sans fuite, étudiées dans ce mémoire. La simulation complète est réalisée

sur un pipeline en 3D, mesurant 2,032 m de longueur et 18 mm de diamètre intérieur. La localisation de fuite est à 203 mm de l'entrée du conduit et a un diamètre de 10 mm Les détails des paramètres de calcul sont présentés dans le tableau suivant.

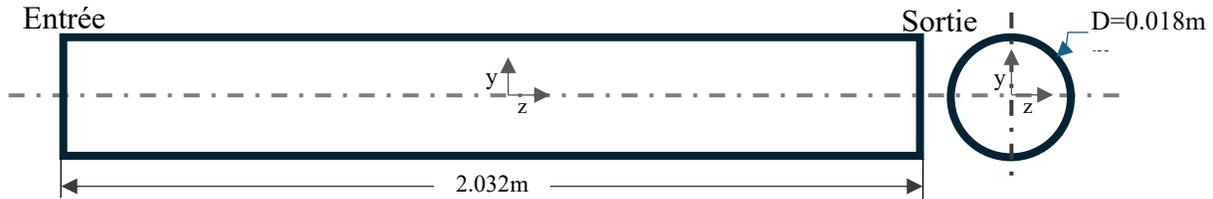


Figure III.4.1.Schéma d'un pipeline sans fuite

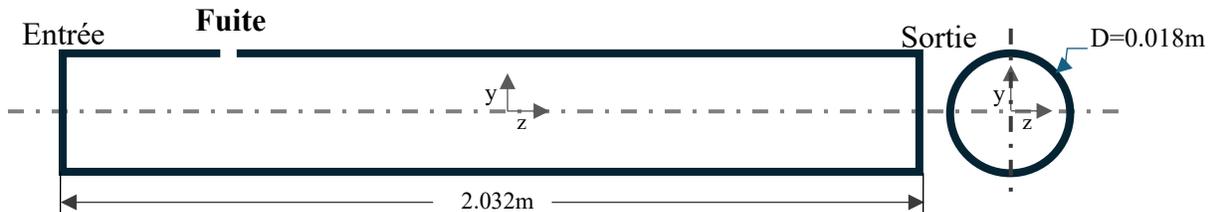


Figure III.4.2.Schéma d'un pipeline avec fuite

Tableau III.4.1.Les paramètres de géométrie (le domaine de calcul)

Les paramètres (m)	Pipeline sans fuite	Pipeline avec fuite
Diamètre de conduite	0.018	0.018
Langueur de conduite	2.032	2.032
Diamètre de fuite	/	0.010
Localisation de la fuite à partir de l'entrée du conduit.	/	0.203

### III.5. Maillage :

Les modules Design Modeler et Meshing d'ANSYS Workbench sont utilisés pour générer séparément la géométrie et le maillage. La zone occupée par le fluide est discrétisée avec des éléments tétraédriques, et un maillage progressif est appliqué pour capturer les propriétés de l'écoulement dans la région de fuite. Une densité de maillage appropriée est atteinte en répétant les calculs jusqu'à obtenir un maillage optimal indépendant.

Tableau III.5.1.La chute de pression selon les nombres des éléments

Nombre des éléments (élément)	La pression d'entrée pour la simulation (Pa)
295774	23399.3
398049	23443.2
455606	23420.2
583564	23504.2
586619	23525.7
590270	23519.1
593640	23511.6
609571	23516.9

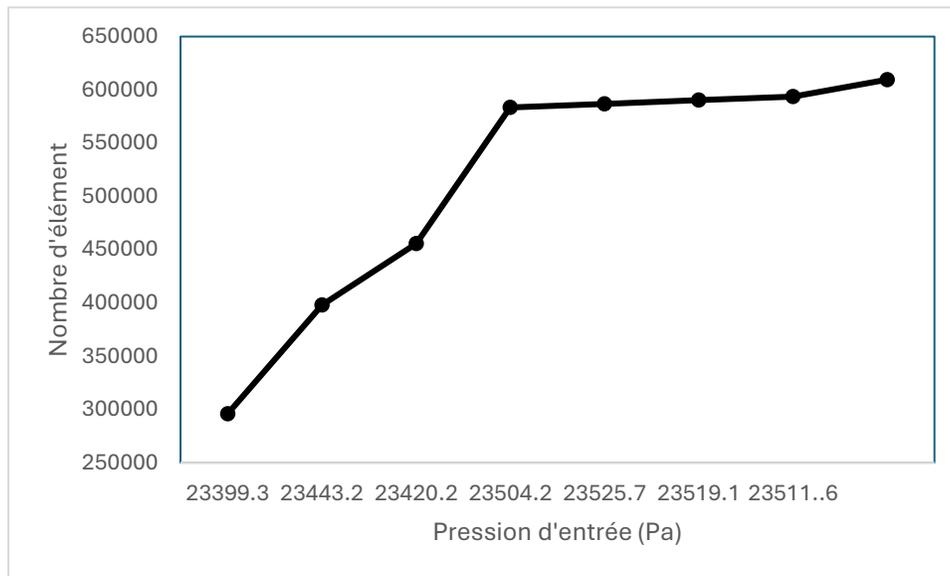


Figure III.5.1. Graphe de la pression en fonction des nombres des éléments

Enfin, le nombre d'éléments de maillage utilisés dans la simulation varie entre 580 000 et 590 000. Pour évaluer la qualité du maillage, il est recommandé d'utiliser des paramètres tels que la qualité orthogonale ou la valeur de non-orthogonalité (skewness). Un maillage est considéré de bonne qualité lorsque la qualité orthogonale est supérieure à 0,2 ou lorsque la non-orthogonalité (skewness) est inférieure à 0,8, comme illustré par la **Figure III.9.1.2**.

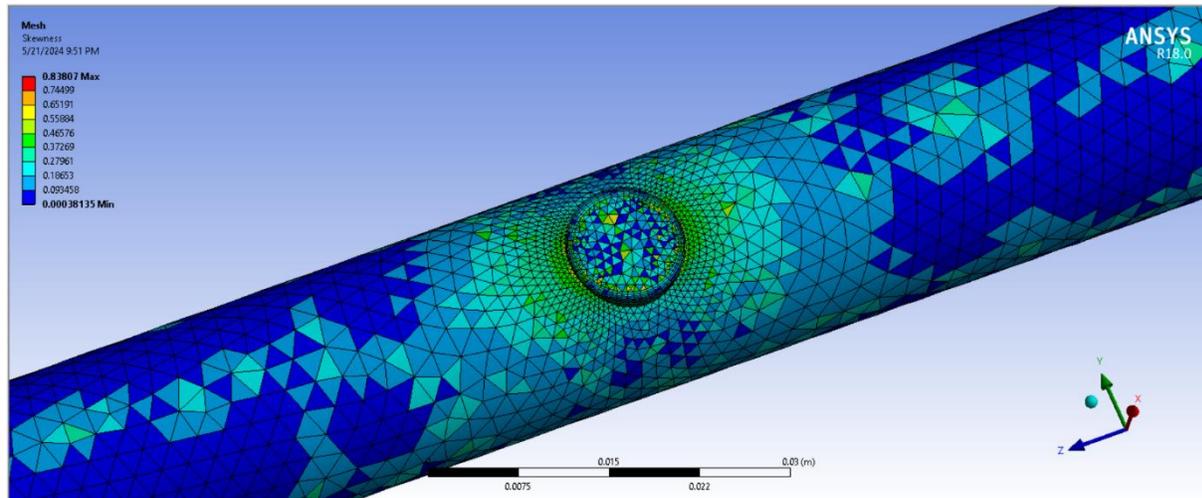


Figure III.5.2. Un Maillage de bonne qualité

### III.6. Paramètres CFD :

Avant de déterminer quels modèles CFD utiliser, plusieurs paramètres du solveur doivent être pris en considération.

Pour commencer, il existe deux types de solveurs : basés sur la **pression** et basés sur la **densité**. La principale différence réside dans la manière dont le champ de densité ou le champ de pression est calculé à partir des équations de continuité et de quantité de mouvement.

Le solveur basé sur la pression est généralement plus approprié pour les écoulements incompressibles à basse vitesse, tandis que le solveur basé sur la densité est généralement préférable pour les écoulements compressibles à haute vitesse.

Ainsi, le solveur basé sur la pression est choisi pour modéliser le mouvement et est utilisé dans toutes les simulations. La formulation de la vitesse est un autre paramètre important du solveur. Le choix du type de formulation de vitesse vise à réduire la diffusion numérique et à obtenir des résultats plus rapides et plus précis. Lorsque la majeure partie du domaine est occupée par un fluide en mouvement, la formulation relative est privilégiée, mais la formulation absolue est suffisante lorsque le fluide est immobile. Dans cette étude, une formulation absolue a été utilisée pour adapter différents profils d'écoulement aux divers paramètres de la recherche de validation.

### III.7. Modèle visqueux :

Dans la simulation de validation, un modèle supplémentaire est pris en compte : le modèle visqueux, qui permet de considérer l'effet de la turbulence.

Ce modèle est pour la simulation de turbulence. La simulation à son nombre de Reynold calculé pour voir si l'écoulement était laminaire ou turbulent.

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} \quad III.7.1$$

**D**: diamètre.

**ρ** : densité d'eau.

**V**: vitesse du fluide.

**μ** : Viscosité dynamique d'eau.

Donc :

$$D = 0.018 \text{ m}$$

$$\rho = 998.2 \text{ kg/m}^3$$

La vitesse caractéristique V peut être calculée à partir du débit volumique **Q** et de la section **A**:

$$V = \frac{Q}{A} \quad III.7.2$$

Le débit volumique d'entrée est constant de  $2.48 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ .

$$\text{Avec : } A = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi(0,018)^2/4}{4} = 2,54 \times 10^{-4} \text{ m}^2, \text{ on peut calculer :}$$

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{2.48 \times 10^{-4}}{2.54 \times 10^{-4}} = 0.976 \text{ m/s}$$

$$\mu = 10^{-3} \text{ Pa.s}$$

$$Re = \frac{998.2 \times 0.976 \times 0.018}{10^{-3}} = 17536.37 > 4000$$

L'écoulement turbulent est exactement le même que l'équation d'écoulement utilisée dans la simulation. Par conséquent, dans Fluent, le modèle turbulent doit être utilisé, "k-ε" dans ce cas.

### III.8. Méthode de résolution et conditions aux limites :

Les calculs actuels ont été effectués avec ANSYS 18.0 en utilisant le modèle standard K- $\epsilon$ . Pour comparer les résultats de simulation avec les données expérimentales, toutes les simulations ont été menées avec de l'eau au lieu du pétrole brut. Un algorithme couplé a été utilisé pour résoudre le couplage pression-vitesse, garantissant ainsi le respect des lois de conservation de la masse et de la quantité de mouvement. Afin d'obtenir des résultats de simulation précis pour les fuites, un schéma spatial du second ordre a été appliqué pour minimiser les erreurs numériques et garantir une solution précise. La vitesse d'entrée dans la conduite a été fixée à une vitesse d'entrée de  $0.976 \text{ m/s}$  à  $z = 0$ , tandis que la pression de sortie à l'extrémité de la conduite a été maintenue à  $21\,700 \text{ Pa}$ . Une convergence des résidus pour chaque équation dans le volume de simulation est inférieure à  $10^{-5}$ .

### III.9. Les étapes de ANSYS Fluent :

Les éléments ci-dessous décrivent toutes les phases d'utilisation d'ANSYS Fluent, débutant par les paramètres initiaux et se terminant par les conclusions de la simulation.

#### III.9.1. Démarrage de ANSYS FLUENT :

1. **Création de la géométrie :** Plusieurs étapes ont été réalisées pour effectuer la géométrie dont on a besoin pour le travail. Ce qui est illustré dans les figures suivantes.

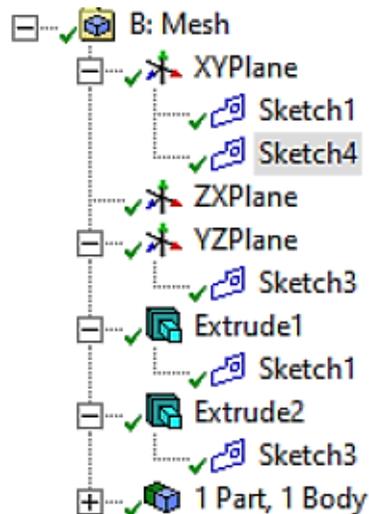


Figure III.9.1. Modeling de la création de la géométrie

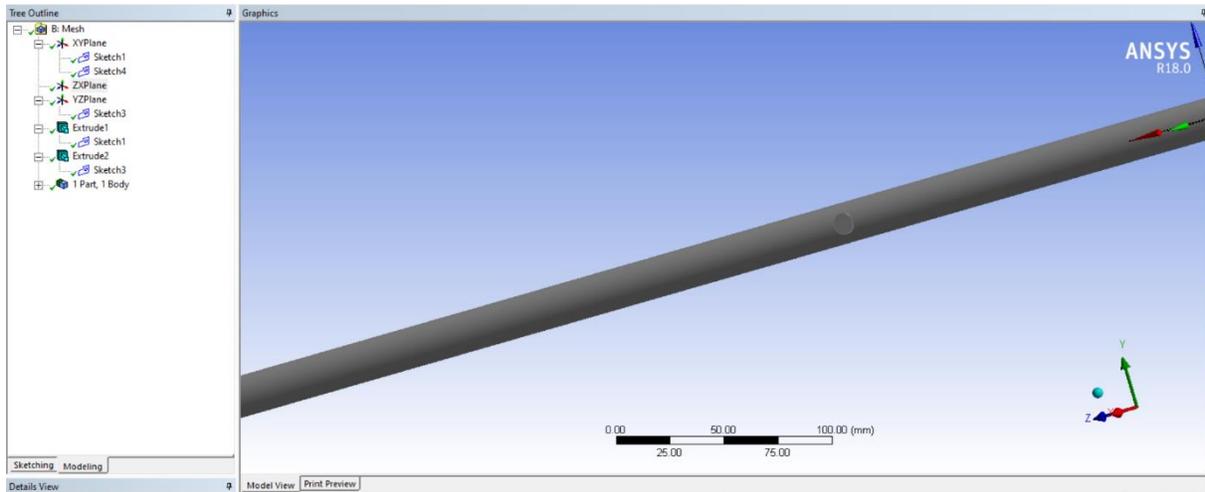


Figure III.9.2.Création de la géométrie

2. **Maillage** : L'une des étapes très importantes qui a déjà été expliquée précédemment dans le chapitre.

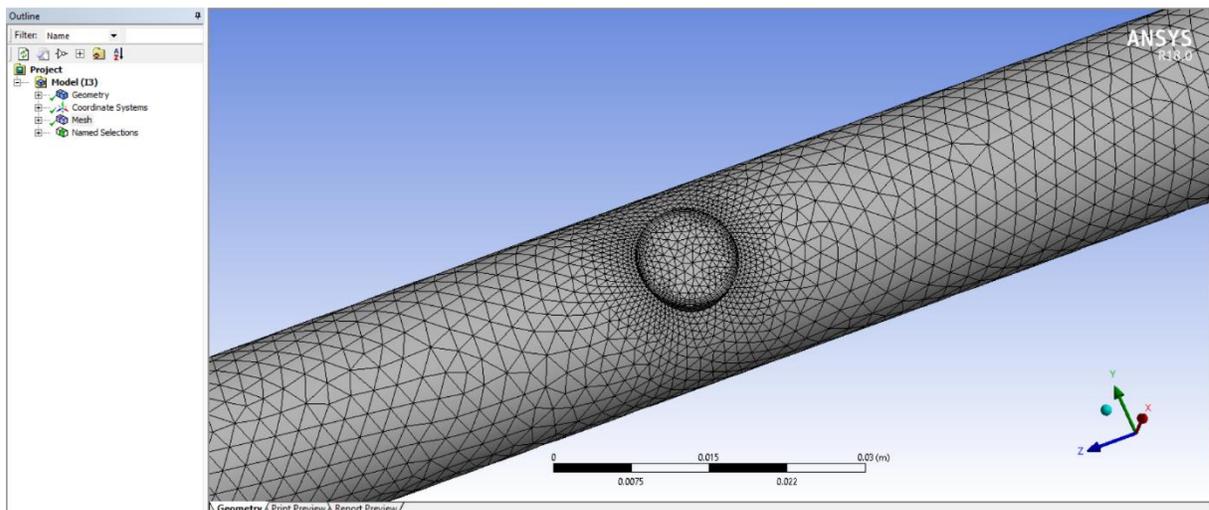


Figure III.9.3.Maillage

3. **Setup** : La configuration (setup) dans ANSYS Fluent consiste à définir les conditions initiales, les conditions aux limites et les paramètres de simulation nécessaires pour exécuter une analyse de dynamique des fluides numérique précise et complète.

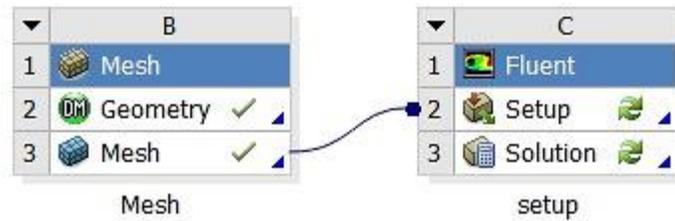


Figure III.9.4.Setup

- **General** : l'étape des paramètres généraux est la première étape dont on doit choisir le mode de nos simulations et d'autres paramètres aussi, comme l'indique la figure.

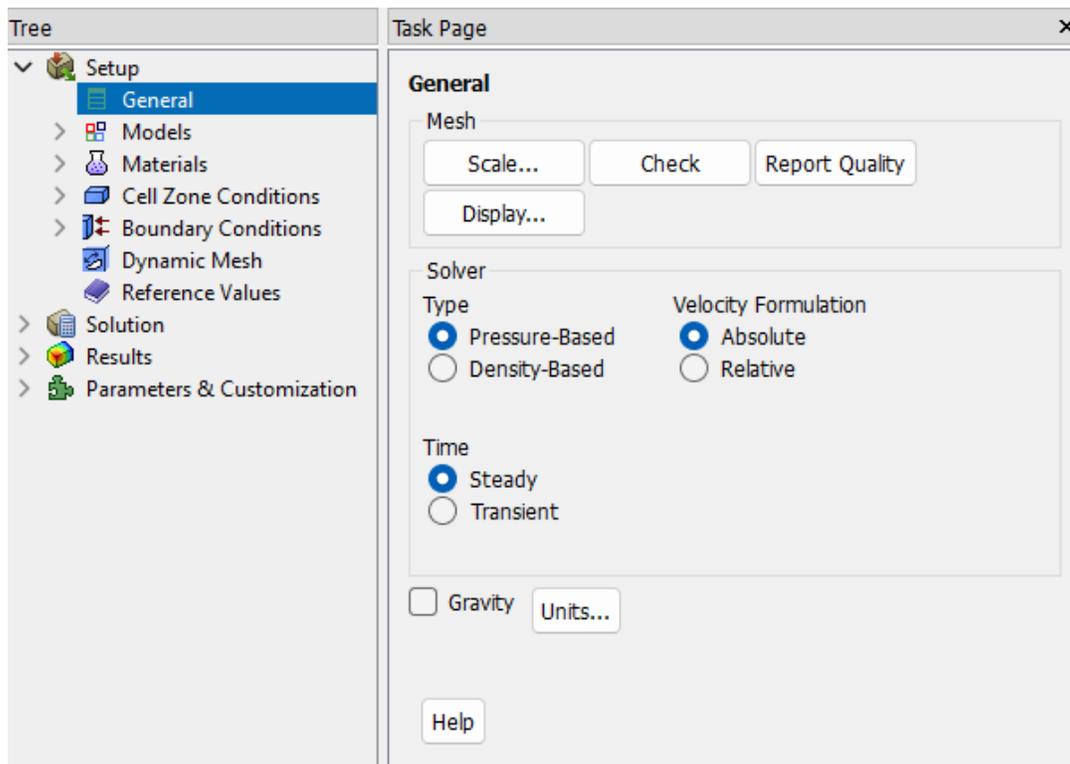


Figure III.9.5.Paramètres généraux

- **Models** : on a considéré le modèle visqueux de résolution (k-epsilon), et les autres paramètres ne sont pas considérés dans cette étude (tels que transfert de chaleur, transfert de masse, transfert d'énergie...).

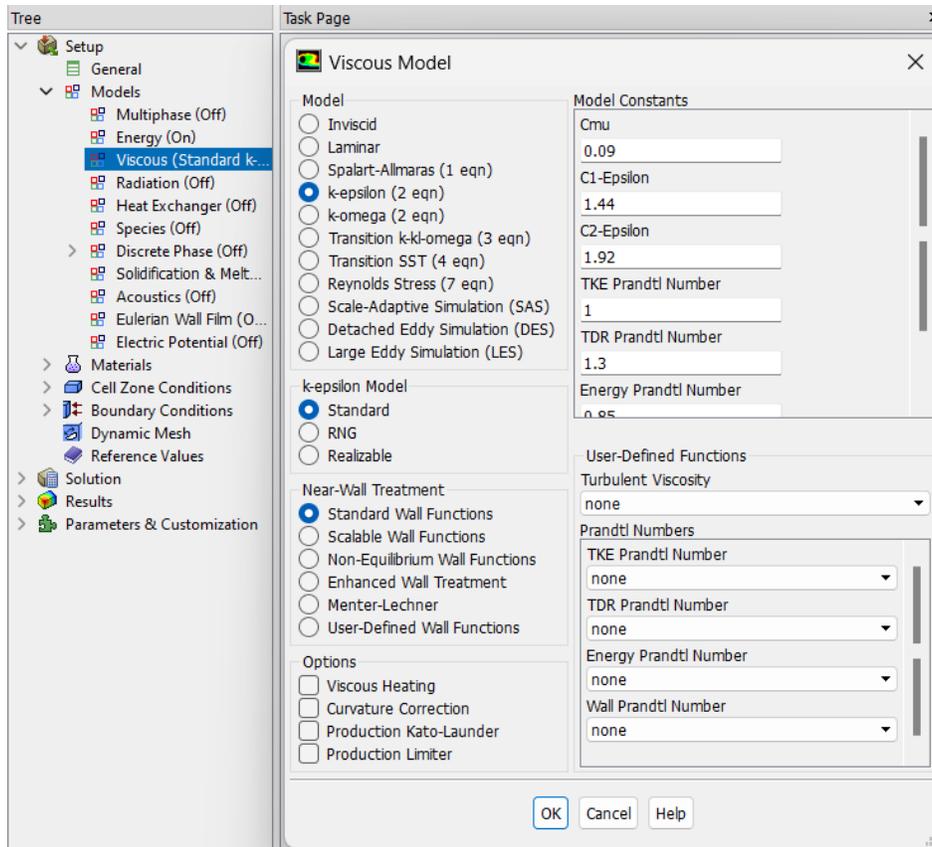


Figure III.9.6. Modèle visqueux

- **Matériel** : la CFD permet de modéliser et de simuler le comportement des écoulements, des transferts de chaleur et d'autres phénomènes liés à l'eau en utilisant l'eau liquide comme matériau dans ANSYS Fluent.
- **Conditions aux limites** : on considère cette étape comme la plus essentielle : L'application des conditions aux limites a été effectuée conformément aux termes clairement définis dans le titre précédent (Conditions aux limites).

La vitesse d'entrée de l'eau liquide :  $V = 0.976 \text{ m/s}$

Pression de la sortie :  $P = 21\,700 \text{ Pa}$

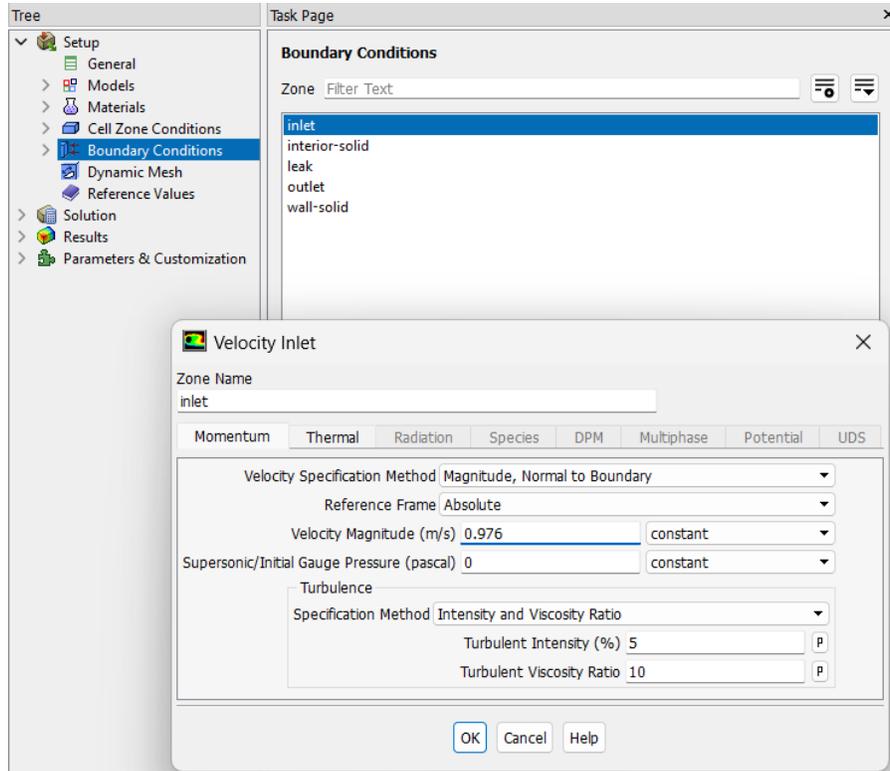


Figure III.9.7. La vitesse d'entrée

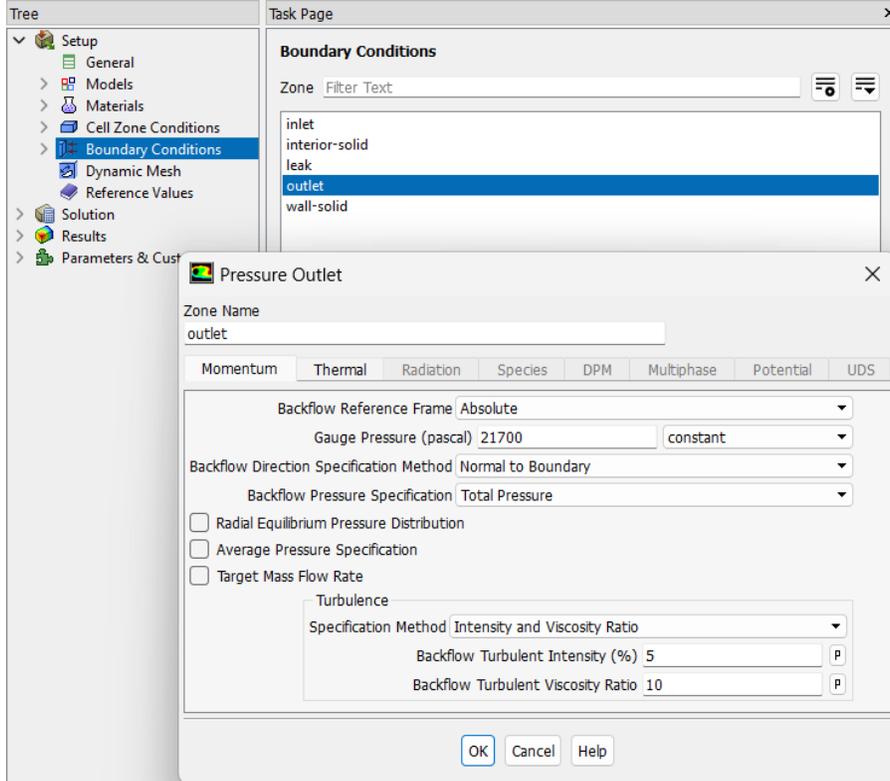


Figure III.9.8. Pression de la sortie

- **Monitors (Résiduel) :** les résidus présents dans ANSYS correspondent aux écarts entre les valeurs calculées et les valeurs prévues dans une simulation numérique. Les mesures de convergence et de précision  $10^{-5}$  des solutions obtenues sont utilisées. Il est important de surveiller et de réduire les résidus afin de garantir l'exactitude des résultats et la stabilité des calculs dans ANSYS.

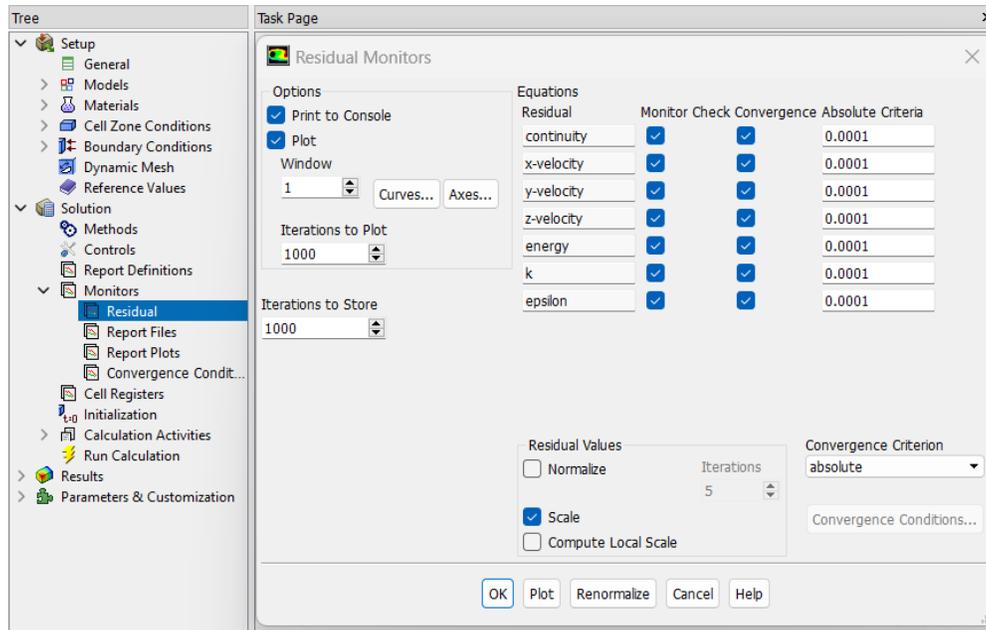


Figure III.9.9. Les résidus

- **Exécute les résultats :** une fois que les conditions aux limites sont définies, ANSYS procède à des itérations pour atteindre une solution stable, garantissant ainsi des résultats précis et fiables pour l'analyse et la modélisation des systèmes physiques.

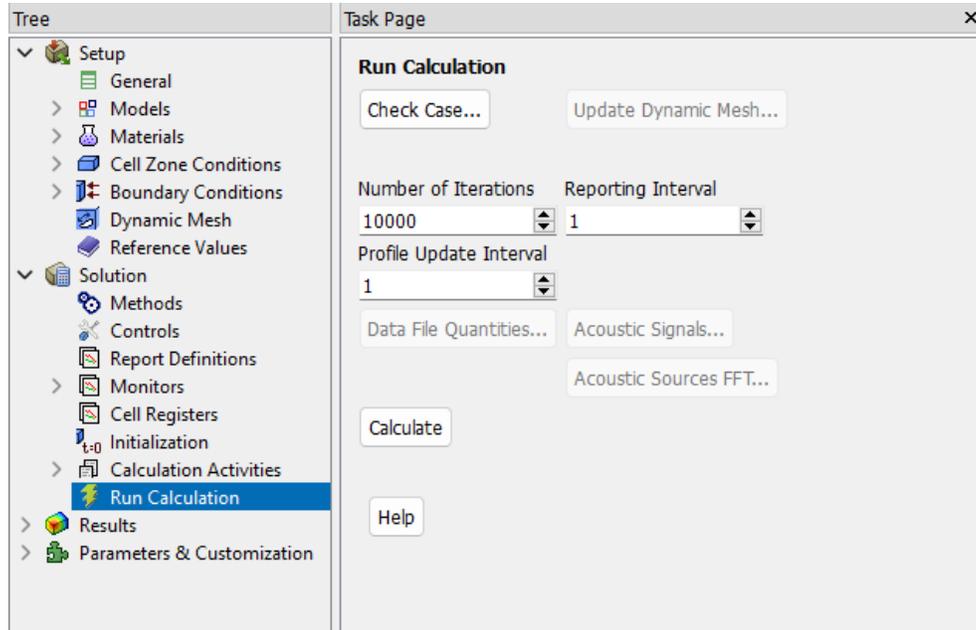


Figure III.9.10. Exécution des résultats

- **Résultats** : Résultats visualisés dans ANSYS fluent

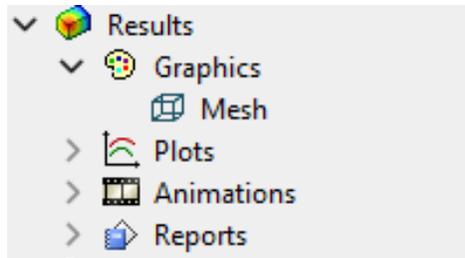


Figure III.9.11. Résultats

### III.10. Conclusion :

On conclut que la simulation a été validée suivant toutes les étapes mentionnées. De plus, l'utilisation du modèle d'ANSYS pour la création de la géométrie assure la conformité de la structure du modèle aux exigences de la simulation, ce qui contribue à la fiabilité et à la crédibilité des résultats qu'on va obtenir.

## ***Chapitre IV :Modèle de L'intelligence artificielle***

---

### **IV.1. Introduction :**

Dans ce chapitre, nous explorons l'un des domaines les plus intéressants et prometteurs de l'informatique moderne : l'intelligence artificielle et du machine Learning.

Il offre une base théorique pour toutes ces notions clés permettant une meilleure compréhension de l'impact dynamique de l'IA pour aborder des défis complexes et pour renforcer l'efficacité, la durabilité et l'innovation dans le secteur de la mécanique.

### **IV.2. L'intelligence artificielle :**

L'intelligence artificielle (IA) est un domaine de l'informatique qui vise à développer des systèmes capables d'accomplir des tâches requérant généralement l'intelligence humaine, telles que l'apprentissage, la résolution de problèmes et la prise de décision. Ces machines peuvent traiter des informations complexes, s'adapter à leur environnement et accomplir des tâches qui nécessiteraient normalement une intervention humaine. [47]

Cependant, l'IA est souvent considérée comme un concept vaste et complexe, difficile à définir précisément en raison de son caractère évolutif.

En effet, l'intelligence artificielle (IA) transforme de nombreux secteurs, y compris la mécanique. Cette technologie puissante offre un large éventail d'opportunités, telles que la construction mécanique, la maintenance prédictive, la surveillance des installations, la robotique...

L'intégration de l'IA dans le domaine de la mécanique permet d'atteindre de nouveaux niveaux de performance et d'innovation, transformant les méthodes traditionnelles et ouvrant la voie à des avancées technologiques significatives.

### **IV.3. Apprentissage automatique (Machine Learning) :**

Le Machine Learning ou apprentissage automatique est un domaine scientifique, et plus particulièrement une sous-catégorie de l'intelligence artificielle. L'une des premières définitions du « Machine Learning » a été proposée en 1959 par l'ingénieur électricien et informaticien Américain Arthur Samuel, qui l'a défini comme étant un domaine d'étude qui donne aux ordinateurs la capacité d'apprendre sans être explicitement programmés. [48]

Le principe du Machine Learning (ML) consiste à donner aux ordinateurs des valeurs d'entrées à analyser et le résultat qu'on veut atteindre pour que la machine puisse créer un modèle capable de déduire de nouvelles informations à partir des anciennes données. Les analystes visent à obtenir un programme précis pouvant être exécuté par un ordinateur afin de résoudre un problème ou une tâche bien définie. Les utilisateurs du Machine Learning n'essayent pas d'écrire un programme par eux-mêmes, au lieu de cela, ils collectent les données d'entrées et les valeurs ciblées souhaitées. Ensuite, ils demandent à l'ordinateur de trouver un programme (ou un algorithme) qui calcule une sortie pour chaque valeur d'entrée ajoutée.

Fondamentalement, le Machine Learning consiste en des algorithmes évolutifs conçus pour simuler le processus d'apprentissage humain en s'adaptant à leur environnement. Il utilise la théorie statistique pour construire des modèles mathématiques, qui peuvent être soit prédictifs pour anticiper des événements futurs, soit descriptifs pour extraire des connaissances à partir des données, voire les deux à la fois. [49]

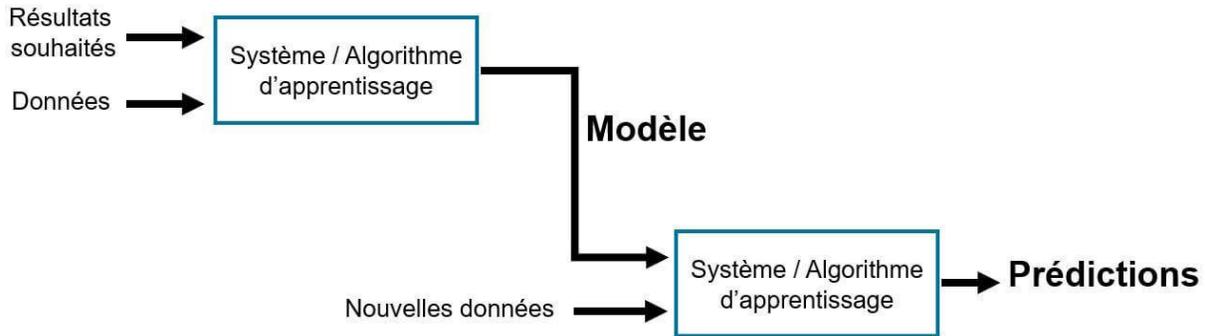


Figure IV.5.1.i.1. Processus de l'apprentissage automatique

### IV.4. Type d'apprentissage automatique :

Il existe quatre techniques de Machine Learning : l'apprentissage supervisé, l'apprentissage non supervisé et l'apprentissage par renforcement. Dans ce qui suit, nous allons détailler les trois types.

#### IV.4.1. L'apprentissage supervisé :

L'apprentissage supervisé est une méthode du Machine Learning, implique de guider l'apprentissage de la machine en lui fournissant des données concernant la tâche à accomplir.

Cette approche, également connue sous le nom de supervised Learning, consiste à utiliser un ensemble d'algorithmes permettant à l'ordinateur de prédire un résultat à partir d'un ensemble de variables prédictives. Ces données doivent inclure une variable dépendante, souvent désignée par Y, que l'ordinateur apprendra à prédire. Les autres variables, appelées prédicteurs ou variables X, sont utilisées par l'ordinateur pour construire des modèles permettant de prédire Y. Lorsque Y est qualitative, le problème relève de la classification, tandis que lorsque Y est quantitative, il s'agit d'un problème de régression. [50]

#### IV.4.2. L'apprentissage non supervisé :

L'apprentissage non supervisé est une approche du Machine Learning qui se distingue de l'apprentissage supervisé par son approche sans étiquettes. Contrairement à ce dernier, où l'ordinateur utilise des données étiquetées pour prédire des résultats spécifiques, l'apprentissage

non supervisé laisse l'ordinateur découvrir les structures ou les schémas intrinsèques dans les données sans étiquettes.

Dans ce contexte, l'apprentissage se déroule de manière autonome, les algorithmes étant laissés à eux-mêmes pour identifier et présenter la structure des données.

Ces algorithmes apprennent les caractéristiques des données sans supervision explicite. Lorsque de nouvelles données sont introduites, elles sont comparées aux caractéristiques précédemment apprises pour effectuer des tâches telles que le classement des données, l'estimation de la densité de distribution ou la réduction de dimensions.

Dans ce type d'apprentissage, les réponses ne sont pas préalablement fournies dans les données, ce qui permet une exploration et une découverte autonomes des modèles sous-jacents. [51]

### **IV.4.3. L'apprentissage par renforcement :**

L'apprentissage par renforcement est une approche du Machine Learning qui repose sur le principe de l'interaction entre un agent et un environnement. Contrairement à l'apprentissage supervisé où l'agent reçoit des exemples étiquetés pour apprendre, et à l'apprentissage non supervisé où il doit découvrir des structures intrinsèques dans les données, l'apprentissage par renforcement implique que l'agent apprend à partir d'essais et d'erreurs.

Dans ce contexte, la machine peut démontrer une grande créativité en développant ses propres stratégies et en s'adaptant dans le temps et l'espace pour accomplir des tâches spécifiques. L'algorithme devient un agent autonome, dont le but est d'effectuer des actions dans un environnement donné. S'il atteint ces objectifs selon les critères fixés par le développeur, il est récompensé, et il lui incombe de déterminer la suite d'actions à entreprendre pour atteindre son but.

Ce type d'apprentissage est couramment utilisé dans des domaines tels que les jeux, la robotique, la gestion de ressources, etc. où les actions de l'agent affectent directement l'environnement dans lequel il opère. L'apprentissage par renforcement vise à trouver la meilleure stratégie de prise de décision pour l'agent afin d'optimiser ses performances dans cet environnement interactif. [52]

### **IV.4.4. L'apprentissage en profondeur :**

L'apprentissage en profondeur (également connu sous le nom de deep Learning) est un type d'apprentissage automatique qui se concentre sur l'utilisation de réseaux de neurones artificiels profonds pour apprendre à partir de données. Contrairement à d'autres méthodes de Machine Learning, qui nécessitent souvent une ingénierie de fonctionnalités manuelle, le deep Learning cherche à apprendre des représentations hiérarchiques des données en utilisant des architectures de réseaux de neurones composées de plusieurs couches.

Ces modèles sont capables de diverses prouesses, allant de la reconnaissance d'objets sur une image ou de la transcription de la parole à la conduite autonome ou même à la création artistique.

Un modèle de deep Learning est, fondamentalement, un programme informatique doté d'une forme d'intelligence grâce à des techniques de traitement des données complexes et sophistiquées.

Bien que le deep Learning requière typiquement d'amples ensembles de données et des ressources de calcul importantes, il a notablement rehaussé les performances dans de multiples domaines grâce à sa capacité à apprendre des modèles à partir de données brutes, sans nécessiter une conception manuelle des caractéristiques. [53]

### **IV.5. Réseaux de neurones (Artificial neural network) :**

Les réseaux de neurones, également désignés sous le nom de réseaux neuronaux artificiels, constituent une méthode de Machine Learning inspirée du fonctionnement du cerveau humain. Ces modèles informatiques sont constitués d'un grand nombre d'unités de traitement appelées neurones, organisées en couches interconnectées. Chaque neurone est relié à ceux des couches adjacentes, facilitant ainsi la transmission d'informations à travers le réseau.

L'apprentissage dans les réseaux de neurones est généralement réalisé par un processus itératif d'ajustement des poids des connexions en fonction des données d'entrée et des résultats attendus en sortie. Ce processus permet au réseau de s'adapter et d'acquérir la capacité de reconnaître des schémas et des relations complexes dans les données.

Du fait de leur aptitude à modéliser des problèmes complexes et à fournir des solutions précises et flexibles, les réseaux de neurones sont largement employés dans divers domaines tels que la vision par ordinateur, le traitement du langage naturel, la reconnaissance vocale, la prédiction de séries temporelles, et bien d'autres encore. [54]

#### **IV.5.1. Architecture des réseaux de neurones artificiels :**

L'architecture des réseaux de neurones artificiels se compose de plusieurs couches de neurones, organisées de manière hiérarchique. Cette structuration revêt une importance capitale, car elle influe considérablement sur les performances, l'efficacité et la flexibilité des modèles dans diverses tâches et applications.

### *IV.5.1.i. Éléments importants de l'architecture des RNA*

#### 1) Couches :

Les réseaux de neurones artificiels sont structurés en plusieurs couches, typiquement divisées en trois catégories distinctes :

- **Couches d'entrée** : Située au début du réseau, cette première couche reçoit les données initiales. Chaque neurone dans cette couche représente une caractéristique ou une variable spécifique des données.
- **Couches cachées** : Intermédiaires entre les couches d'entrée et la couche de sortie, ces couches sont chargées d'extraire et de transformer les caractéristiques des données en utilisant des poids et des fonctions d'activation.
- **Couche de sortie** : Placée à la fin du réseau, cette dernière couche génère les prédictions ou les résultats finaux en se basant sur les données d'entrée. Le nombre de neurones dans cette couche dépend du type de problème à résoudre ; par exemple, une classification à plusieurs classes aura un neurone pour chaque classe dans la couche de sortie.

#### 2) Neurones :

Les neurones sont des composants essentiels des réseaux de neurones artificiels assurant le traitement de l'information. Chaque neurone est une unité de calcul qui reçoit des entrées, effectue des opérations sur ces entrées, puis génère une sortie. Les neurones sont organisés en couches, et chaque neurone dans une couche est connecté à tous les neurones de la couche précédente et de la couche suivante.

Les connexions entre neurones sont pondérées, chaque poids indiquant l'importance de la connexion dans le calcul réalisé par le neurone. Après avoir combiné pondérément les entrées, les neurones activent une fonction d'activation pour générer leur sortie. Cette sortie est ensuite transmise à la couche suivante, où le processus se répète.

Les réseaux de neurones comprennent divers types de neurones, tels que les neurones entièrement connectés dans les réseaux multicouches, les neurones convolutifs dans les réseaux convolutifs pour la vision par ordinateur, ou les neurones récurrents dans les réseaux récurrents pour les données séquentielles. Chaque type de neurone possède ses caractéristiques distinctes, adaptées à des tâches et des données spécifiques.

#### 3) Fonctions d'activation :

Les fonctions d'activation présentes dans les réseaux de neurones artificiels sont essentielles pour représenter la complexité non linéaire des données et pour générer des résultats significatifs.

Chaque neurone dans un réseau de neurones est lié à une fonction d'activation qui opère sur la somme pondérée de ses entrées.

Ces fonctions introduisent une dimension non linéaire au modèle, lui permettant ainsi de saisir les relations complexes entre les variables d'entrée. Sans ces fonctions, les réseaux de neurones se limiteraient à des transformations linéaires des données, limitant ainsi considérablement leur capacité de modélisation.

Diverses fonctions d'activation sont couramment employées dans les réseaux de neurones, et le choix dépend souvent de la nature du problème à résoudre et de la structure du réseau. En expérimentant avec différentes fonctions d'activation, les praticiens peuvent optimiser les performances de leur modèle pour des tâches spécifiques.

#### 4) Architecture spécifique

Selon le type de problème à résoudre, différentes architectures de RNA peuvent être utilisées. Par exemple, les réseaux de neurones multicouches (MLP) sont couramment utilisés.

Pour des tâches de classification et de prédiction, les réseaux de neurones convolutifs (CNN) sont adaptés pour le traitement d'images, et les réseaux de neurones récurrents (RNN) sont utilisés pour des séquences de données. [55]

- **Le perceptron multicouche MLP (Multi-Layer Perceptron)**

Le perceptron multicouche, également connu sous le nom de MLP (Multi Layer Perceptron), est une architecture de réseau de neurones artificiels composée de plusieurs couches de neurones. Contrairement au perceptron simple, qui ne comporte qu'une seule couche de neurones, le MLP comprend au moins une couche cachée entre la couche d'entrée et la couche de sortie.

Chaque neurone dans la couche d'entrée représente une caractéristique ou une variable des données d'entrée. Les neurones dans les couches cachées et de sortie appliquent des fonctions d'activation aux combinaisons linéaires des entrées pondérées pour générer des sorties non linéaires.

Cette architecture permet au MLP de modéliser des relations complexes entre les entrées et les sorties, ce qui le rend adapté à diverses tâches telles que la classification, la régression et le traitement de séquences. Il est couramment utilisé dans des domaines comme la reconnaissance d'images, la prédiction de séries temporelles et le traitement du langage naturel. En ajustant les poids des connexions entre les neurones lors de l'apprentissage, le MLP est capable d'apprendre à résoudre des problèmes complexes et à généraliser à de nouvelles données.

La **Figure IV.5.1.i.1** donne un exemple d'un réseau contenant une couche d'entrée, deux couches cachées et une couche de sortie. La couche d'entrée présente toujours une couche virtuelle associée aux entrées du système. [56]

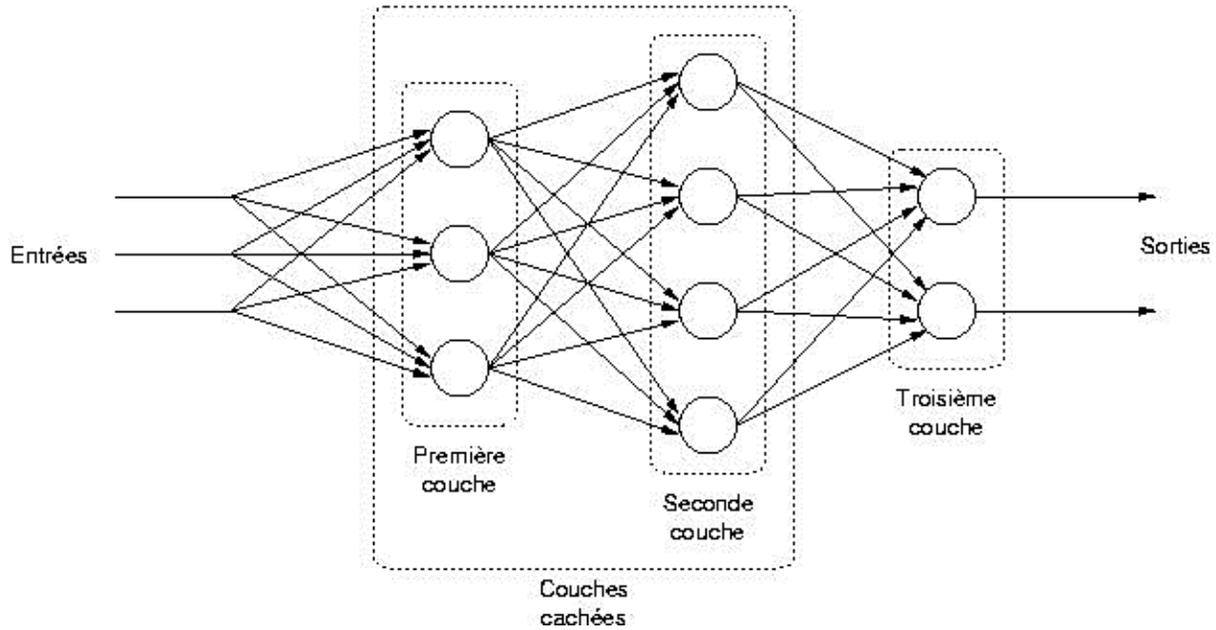


Figure IV.5.1.i.2. Réseau multicouche

#### IV.6. Conclusion :

On conclut qu'une solide compréhension théorique nous permettra d'acquérir une meilleure maîtrise et gestion du modèle d'intelligence artificielle, ce qui facilitera la manipulation de nos données (DATA) et nous permettra de déterminer le modèle prédictif d'IA le plus adapté pour notre travail. Ces aspects seront abordés plus en détail dans les chapitres suivants.

## ***Chapitre V : Validation et étude paramétrique***

---

## V.1. Introduction :

Après avoir réalisé la modélisation primaire sur ANSYS FLUENT, les résultats obtenus permettent de valider la simulation en les comparant aux résultats expérimentaux. Cette validation nous a permis d'entamer les sections suivantes du chapitre, notamment l'étude paramétrique. Cette dernière se concentrera sur les différentes caractéristiques des fuites (localisation, diamètre et forme) et leur impact sur les paramètres hydrodynamiques (distribution de la pression et de débit).

## V.2. Validation :

### V.2.1. Distribution de pression dans la conduite sans fuite :

Pour la conduite sans fuite, la distribution de pression le long de l'axe central est illustrée dans la **Figure V.2.1.1**. La pression initiale de 23,5 kPa à l'entrée de la conduite diminue progressivement pour atteindre 21,7 kPa à la sortie. Cette diminution de pression est typique dans un écoulement de fluide, indiquant des pertes de pression dues au frottement entre le fluide et les parois de la conduite.

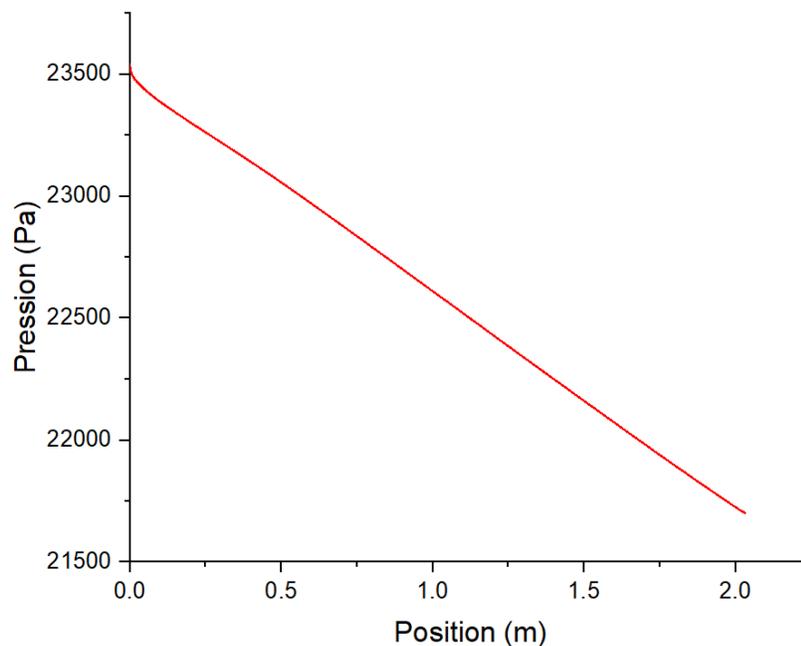


Figure V.3.1.i.1. Distribution de pression au long de l'axe central de la conduite sans fuite

La **Figure V.2.1.2** montre que le gradient de pression reste presque stable tout au long de la conduite, suggérant que les pertes de pression sont principalement causées par le frottement. Ces pertes peuvent également être soumises à l'influence d'autres facteurs comme la viscosité du fluide, la géométrie de la conduite et les paramètres d'écoulement.

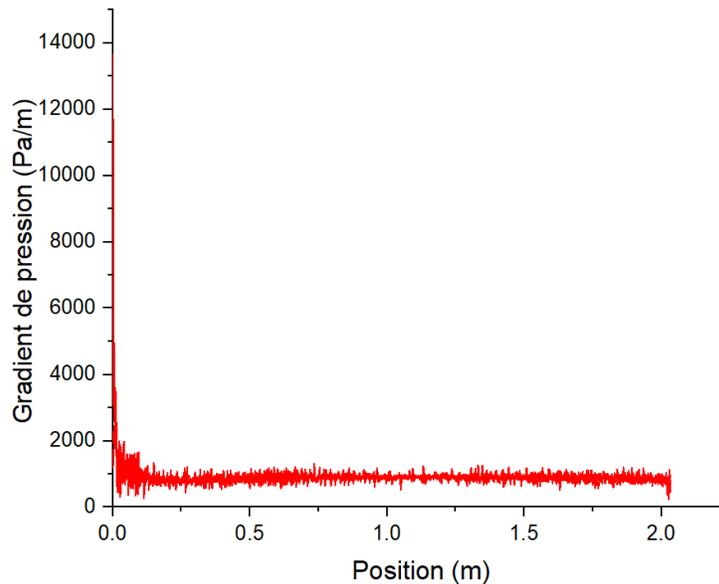


Figure V.2.1.2. Distribution du gradient de pression au long de l'axe central de la conduite sans fuite

Cette distribution de pression le long de la conduite sans fuite sert de référence pour comparer les distributions de pression dans des conduites avec des fuites ou dans des conditions d'écoulement différentes. Une telle comparaison permet de mieux comprendre l'effet des fuites ou des variations d'écoulement sur la distribution de pression dans la conduite.

### V.2.2. Distribution de pression dans la conduite avec fuite

La **Figure V.2.2.1** présente la distribution de la pression le long de l'axe central de la conduite en cas de fuite. Des variations significatives de pression sont observées près de l'entrée et de la sortie de la fuite. La chute de pression sur l'ensemble de la conduite est présente par un pourcentage de variation d'environ 6.84% (atteint environ 1593,6kPa), dépassant largement celle enregistrée dans la conduite sans fuite.

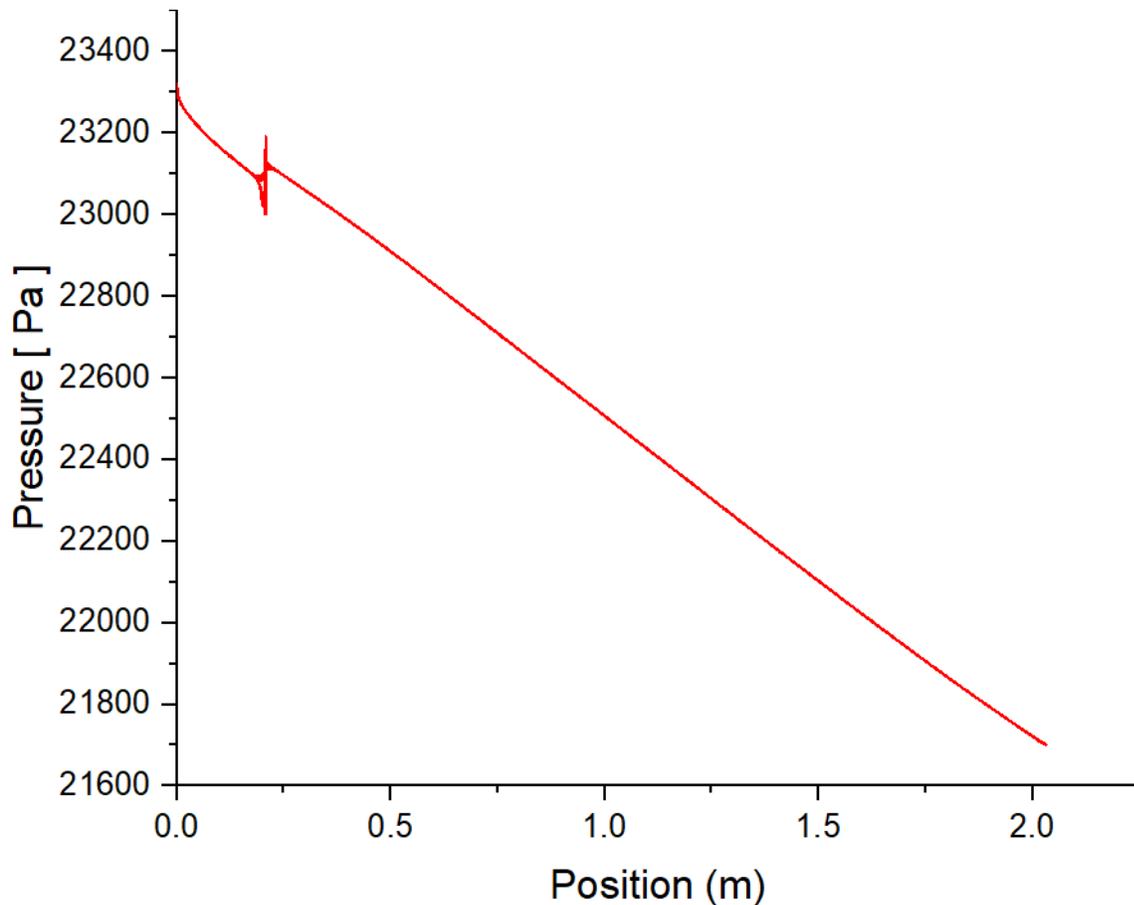


Figure V.3.1.i.1. Distribution de pression au long de l'axe central de la conduite avec fuite

Cette tendance est également bien visible dans la répartition du gradient de pression, comme illustré dans la **Figure V.2.2.2**. On y observe une valeur maximale du gradient de pression atteignant jusqu'à 355 kPa/m, ce qui pose une menace importante pour la sécurité de fonctionnement de la conduite. Ces résultats soulignent clairement l'impact significatif des fuites sur la chute de pression, soulignant ainsi l'importance vitale de surveiller et de gérer ces fuites pour assurer la sécurité et l'efficacité du système de conduites.

Dans le monde pratique (les conduites des unités pétrochimiques), il est nécessaire de surveiller l'évolution de la pression afin d'assurer la stabilité de l'écoulement et d'intervenir en cas d'apparition des anomalies.

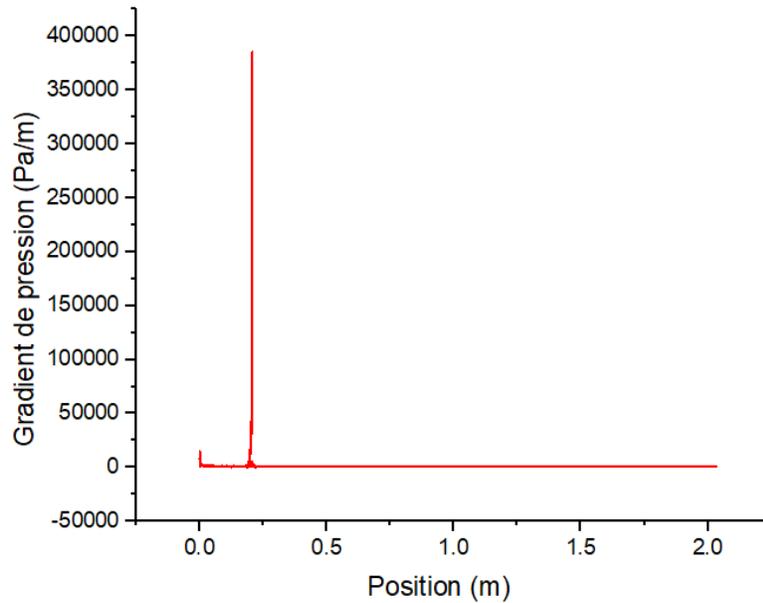


Figure V.3.1.i.1. Distribution du gradient de pression au long de l'axe central de la conduite avec fuite

### V.2.3. Résultante et discussion :

Pour comparer les résultats expérimentaux avec ceux de la simulation, nous avons utilisé les résultats expérimentaux issus de l'étude intitulée "Diagnosis of the single leakage in the fluid pipeline through experimental study and CFD simulation" réalisée par Hao Fu, Lu Yang, Huirong Liang, Sai Wang, et Kegang Ling, de l'Université du Dakota du Nord, Grand Forks, ND, 58202, USA. [57]

Nous avons choisi la chute de pression comme paramètre de référence en fonction des différentes localisations des fuites. Pour valider la simulation, une erreur relative a été calculée pour chaque cas en utilisant la relation suivante:

$$e = \left| \frac{E - S}{E} \right| \times 100\%$$

où

S : le résultat de la simulation

E : le résultat expérimental

Le tableau ci-dessous présente les résultats de cette comparaison :

Tableau V.3.1.i.1. Comparaison de la chute de pression en fonction de différentes positions des fuites

Cas	La chute de pression Pour la simulation (Pa)	La chute de pression expérimentale (Pa)	Erreur relative (%)
Cas 1	1593.6	1523	4.6
Cas 2	1678.4	1536	9.3
Cas 3	1857	1582	17.4
Cas 4	2061.5	1589	29.7

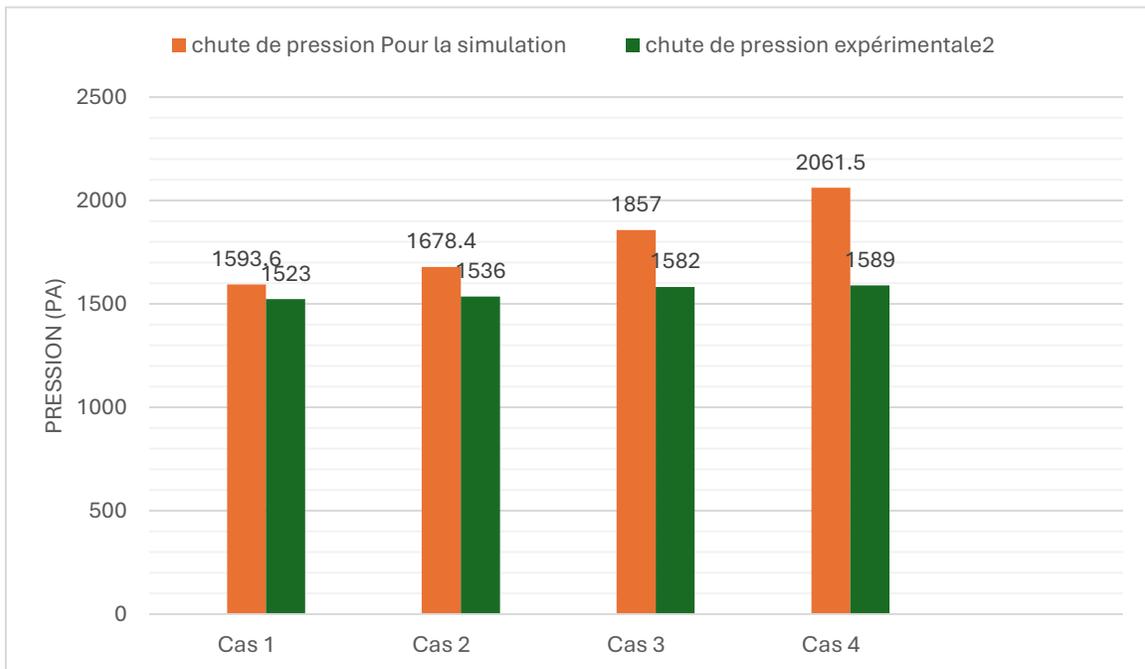


Figure V.3.1.i.2. Diagramme de comparaison de la chute de pression en fonction de différentes Positions des Fuites

### Discussion :

En analysant les données, on constate que les résultats de la simulation CFD correspondent généralement aux résultats expérimentaux, en particulier dans les cas 1 et 2. Les valeurs simulées de chute de pression sont cohérentes avec les mesures expérimentales, indiquant une bonne corrélation entre les deux ensembles de données.

Cependant, une incertitude notable est présente dans le cas 4, principalement en raison du maillage et de la précision des valeurs. Cette incertitude est probablement due au modèle de turbulence utilisé et à l'étalonnage des outils de mesure, ce qui contribue aux variations entre les résultats de la simulation et les résultats expérimentaux.

Globalement, les simulations se sont avérées efficaces et les résultats ont été validés. Les écarts observés entre les résultats numériques et expérimentaux étaient généralement faibles, confirmant ainsi la validité et la précision de l'approche de modélisation utilisée.

Ces résultats indiquent que les simulations CFD sont globalement exactes et fiables pour prévoir la chute de pression en cas de fuites. Les écarts plus marqués dans certains cas soulignent l'importance d'un maillage détaillé et précis, ainsi qu'une attention particulière aux valeurs minimales lors des simulations pour réduire les incertitudes.

### **V.3. Etude paramétrique :**

#### **V.3.1. Effets de la caractérisation des fuites sur la chute de pression :**

Dans les simulations suivantes, nous allons examiner différents paramètres de fuite en variant uniquement l'un des éléments à la fois : la position de la fuite, le débit d'entrée, le diamètre de la fuite, et la forme de la fuite. Pour chaque cas, nous fixerons les autres paramètres tels que la pression de sortie, le maillage, les conditions limites, et les paramètres généraux de la CFD afin de comprendre leur impact spécifique sur la chute de pression dans le système de canalisation.

##### *V.3.1.i. Effet de la position de la fuite sur la chute de pression :*

##### La géométrie :

Dans les simulations suivantes, on varie la position de la fuite tout en fixant les autres paramètres tels que le débit de fuite, le diamètre de fuite, la pression de sortie, la vitesse d'entrée, le maillage, les conditions limites, et les paramètres généraux de la CFD.

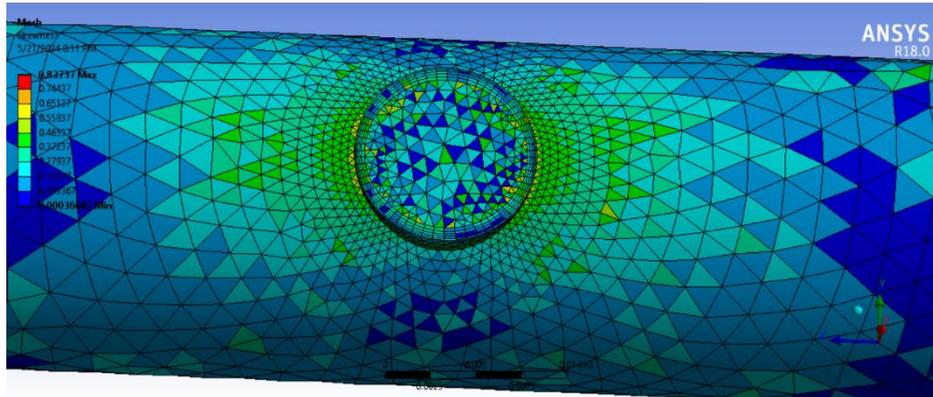


Figure V.3.1.i.1.La géométrie et le maillage de la fuite circulaire

Tableau V.3.1.i.1.La chute de pression en fonction de la position de la fuite

Cas	Diamètre intérieur de pipe (m)	Langueur de pipe (m)	Position de fuite (m)	Chute de pression (Pa)
1	0.018	2.032	0.203	<b>1593.6</b>
2	0.018	2.032	0.400	<b>1678.4</b>
3	0.018	2.032	0.600	<b>1792.1</b>
4	0.018	2.032	0.900	<b>1984.4</b>
5	0.018	2.032	1.500	<b>2404</b>
6	0.018	2.032	1.900	<b>2596.8</b>
7	0.018	2.032	2.000	<b>2665</b>

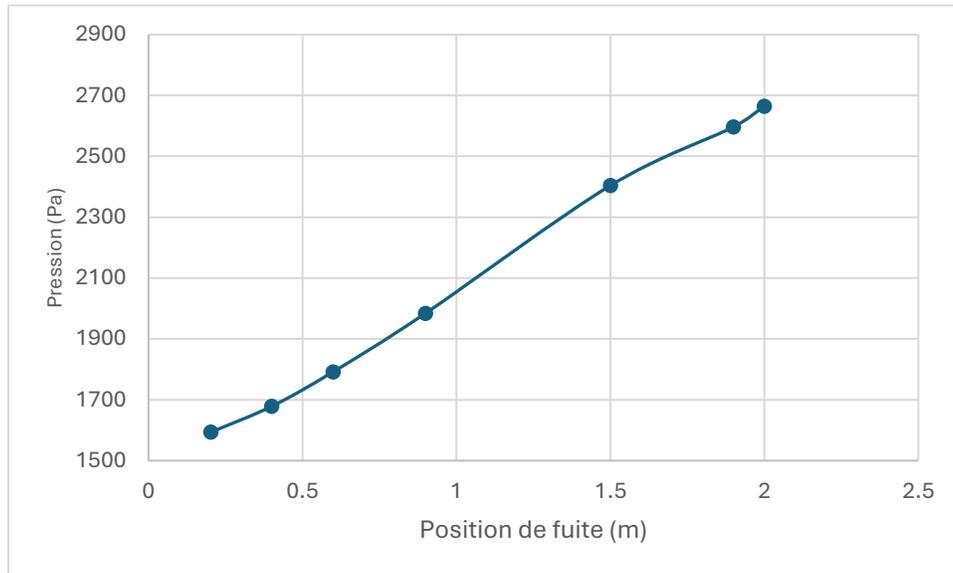


Figure V.3.1.i.2. La chute de pression en fonction de la position de la fuite

### Interprétation :

Les résultats montrent que la position de la fuite a un impact significatif sur la chute de pression dans la canalisation. Plus la fuite est éloignée de l'entrée, plus la chute de pression est importante. Par exemple, une fuite située à 0,203 m de l'entrée entraîne une chute de pression qui est présente par un pourcentage de variation d'environ 6.841% (atteint environ 1593,6kPa), tandis qu'une fuite à 2,000 m de l'entrée entraîne une variation de 10.93% (qui est équivalente à 2665 Pa). Cela est dû à la perte d'énergie le long du pipeline qui s'accumule avec la distance parcourue par le fluide. Une fuite située près de l'entrée du pipeline entraîne une chute de pression moindre car le fluide n'a pas encore parcouru une grande distance et n'a donc pas perdu beaucoup d'énergie. À l'inverse, une fuite située vers la fin du pipeline entraîne une chute de pression plus importante en raison de la perte cumulative d'énergie.

Selon le principe de Bernoulli, une augmentation de la vitesse du fluide entraîne une diminution de la pression statique et vice versa. À mesure que le fluide s'éloigne de la fuite, sa vitesse diminue et la pression augmente. En outre, lorsque le fluide traverse une fuite, une partie de son énergie cinétique est convertie en énergie de pression. Cette conversion entraîne une augmentation de la pression à la sortie de la fuite.

*V.3.1.ii. Effet du débit d'entrée sur le débit de fuite :*

Dans les simulations suivantes, nous allons modifier uniquement le débit d'entrée dans deux positions. En variant le débit d'entrée tout en fixant les autres paramètres tels que le diamètre de fuite, la pression de sortie, le maillage, les conditions limites, et les paramètres généraux de la CFD.

*Tableau V.3.1.ii.1. Le débit de fuite en fonction de débit d'entrée*

Cas	Diamètre intérieure de pipe (m)	Langueur de Pipe (m)	Localisation de fuite (m)	Débit d'entrée ( $m^3/s$ )	Débit de fuite ( $m^3/s$ )
1	0.018	2.032	0.203	$1.27 \times 10^{-5}$	$3.01 \times 10^{-5}$
2	0.018	2.032	0.203	$2.39 \times 10^{-5}$	$3.04 \times 10^{-5}$
3	0.018	2.032	0.203	$2.53 \times 10^{-5}$	$3.9 \times 10^{-5}$
4	0.018	2.032	0.203	$2.97 \times 10^{-5}$	$4.3 \times 10^{-5}$
5	0.018	2.032	0.400	$1.27 \times 10^{-5}$	$1.8 \times 10^{-5}$
6	0.018	2.032	0.400	$2.39 \times 10^{-5}$	$2.4 \times 10^{-5}$
7	0.018	2.032	0.400	$2.53 \times 10^{-5}$	$2.8 \times 10^{-5}$
8	0.018	2.032	0.400	$2.97 \times 10^{-5}$	$3.5 \times 10^{-5}$

Interprétation :

L'augmentation du débit d'entrée entraîne une augmentation proportionnelle du débit de fuite. Par exemple, à un débit d'entrée de  $1.27 \times 10^{-5} m^3/s$ , le débit de fuite est de  $3.01 \times 10^{-5} m^3/s$ . Lorsque le débit d'entrée est doublé à  $2.53 \times 10^{-5} m^3/s$ , le débit de fuite passe à  $3.9 \times 10^{-5} m^3/s$ , ou une augmentation d'environ 29.57% est présente. Cette tendance est observée à deux positions de fuite différentes, montrant que l'impact du débit d'entrée sur le débit de fuite est cohérent. Ce phénomène est important pour la gestion des systèmes de canalisation car il met en évidence la relation directe entre le débit d'entrée et le contrôle des pertes par fuite.

Selon le principe de Bernoulli, une augmentation du débit d'entrée augmente la vitesse du fluide, ce qui entraîne une diminution de la pression statique à la fuite, favorisant l'augmentation du débit de fuite. En outre, lorsque le fluide traverse la fuite, une partie de son énergie cinétique, créée par l'augmentation de débit, est convertie en énergie de pression, entraînant une augmentation de la pression à la sortie de la fuite.

*V.3.1.iii. Effet de variation du diamètre de fuite sur la chute de pression :*

Dans les simulations suivantes, nous allons modifier uniquement le diamètre de la fuite. En variant le diamètre de la fuite tout en fixant les autres paramètres tels que la position de la fuite, la pression de sortie, la vitesse d'entrée, le maillage, les conditions limites, et les paramètres généraux de la CFD.

Tableau V.3.1.iii.1.La chute de pression en fonction du diamètre de la fuite

Cas	Diamètre intérieure de pipe (m)	Longueur de Pipe (m)	Position de la fuite (m)	Diamètre de fuite (mm)	Chute de pression (Pa)
1	0.018	2.032	0.203	2	<b>2196.4</b>
2	0.018	2.032	0.203	6	<b>2021</b>
3	0.018	2.032	0.203	8	<b>1901</b>
4	0.018	2.032	0.203	10	<b>1807.9</b>
5	0.018	2.032	0.203	12	<b>1732.4</b>
6	0.018	2.032	0.203	13	<b>1712</b>
7	0.018	2.032	0.203	15	<b>1669</b>

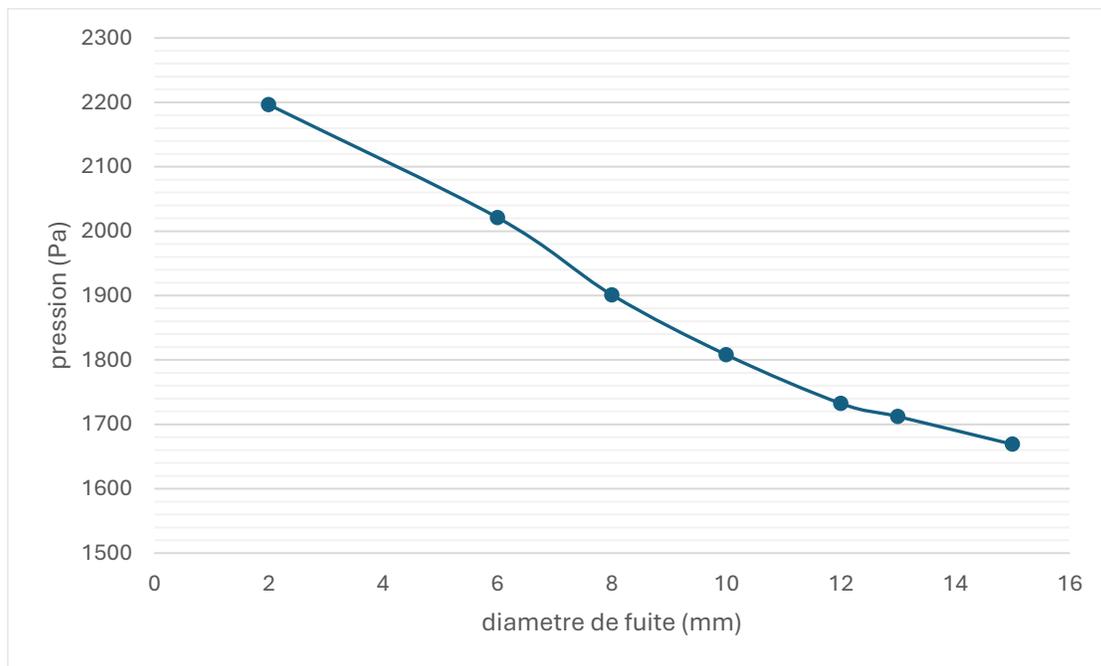


Figure V.3.1.iii.1.La chute de pression en fonction du diamètre de la fuite

Interprétation :

Un diamètre de fuite plus grand entraîne une chute de pression plus faible pour une vitesse d'entrée constant. Par exemple, une fuite de 2 mm de diamètre entraîne une chute de pression de 2196,4 Pa, alors qu'une fuite de 15 mm de diamètre réduit cette chute à 1669 Pa. Cela est dû au fait qu'une plus grande section de fuite permet au fluide de s'échapper plus facilement, réduisant ainsi la résistance et donc la chute de pression. Par contre, un diamètre de fuite plus petit augmente la résistance à l'écoulement du fluide, entraînant une chute de pression plus

importante. Cette observation est essentielle pour la conception de systèmes de canalisations car elle souligne l'importance de la dimension des fuites dans la gestion des pertes de pression.

Selon le principe de Bernoulli, une diminution de la vitesse du fluide due à une plus grande section de sortie entraîne une augmentation de la pression. Par conséquent, des fuites de plus grand diamètre, permettant une diminution de la vitesse du fluide, entraînent une chute de pression réduite. En outre, lorsque le diamètre de la fuite augmente, la résistance à l'écoulement diminue, ce qui réduit la conversion d'énergie potentielle en énergie cinétique. Ainsi, une chute de pression moins importante est observée.

*V.3.1.iv. Effet de la forme de fuite sur la chute de pression :*

Dans toutes les simulations qui suivent, la surface de la fuite sera toujours conservée et égale à celle de la forme circulaire ( $78,54 \text{ mm}^2$ ). Seulement la forme de la fuite sera modifiée.

*a. La forme elliptique horizontale :*

- *Effet de la Position de la fuite :*

Dans cette simulation, nous allons modifier uniquement la position de la fuite tout en conservant une forme elliptique horizontale ( $a=10\text{mm}$ ,  $b=2.5\text{mm}$ ). Les autres paramètres, tels que la pression de sortie, la vitesse d'entrée, le maillage, les conditions limites, et les paramètres généraux de la CFD, restent constants.

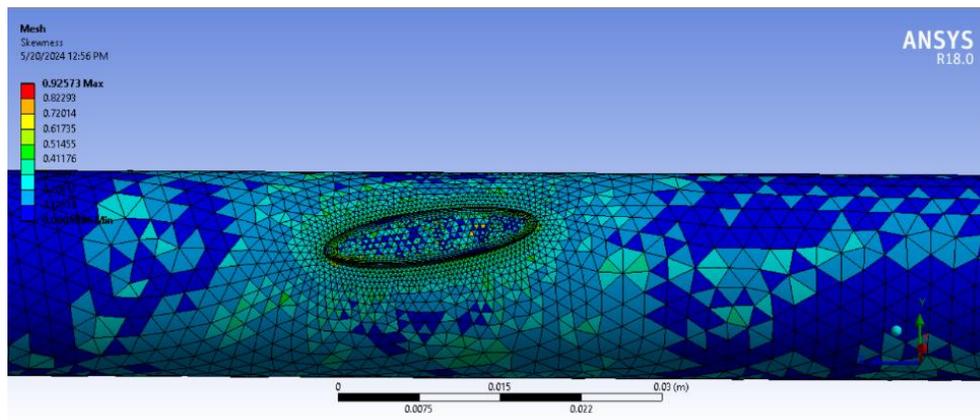


Figure V.3.1.iv.1. La géométrie et le maillage de la fuite elliptique horizontale

Tableau V.3.1.iv.1.la chute de pression en fonction de la position de la fuite

Cas	Diamètre intérieure de pipe (m)	Longueur de Pipe (m)	Position de fuite(mm)	Chute de pression (Pa)
1	0.018	2.032	0.203	<b>1557.4</b>
2	0.018	2.032	0.400	<b>1676.1</b>
4	0.018	2.032	0.600	<b>1836.3</b>
7	0.018	2.032	0.900	<b>2029.8</b>
8	0.018	2.032	1.200	<b>2254.5</b>
9	0.018	2.032	1.700	<b>2481.4</b>
10	0.018	2.032	1.900	<b>2713.6</b>

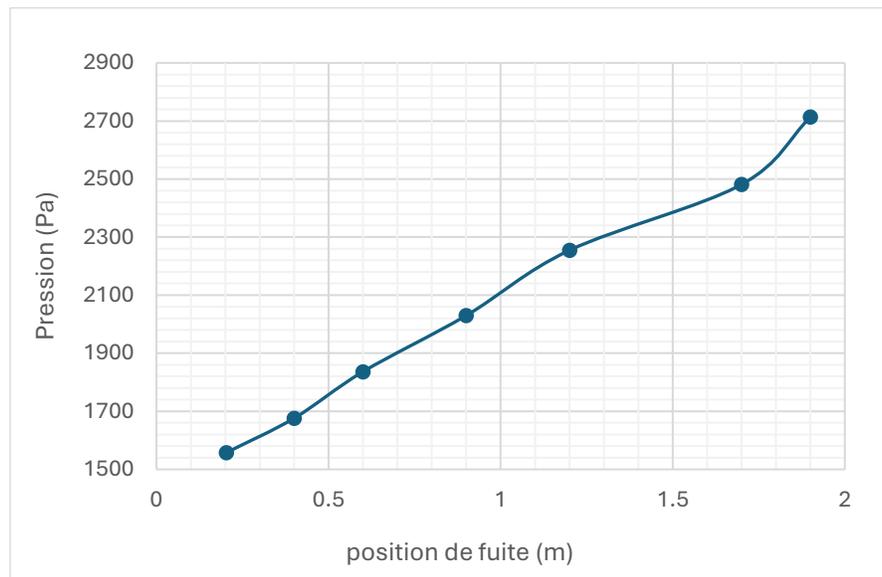


Figure V.3.1.iv.2.la chute de pression en fonction de la position de la fuite

Interprétation :

La forme elliptique horizontale de la fuite montre des résultats de chute de pression légèrement différents de ceux des fuites circulaires. Par exemple, un pourcentage de variation d'environ 6.96% est remarqué pour la fuite elliptique horizontale à 0,203 m de l'entrée ou la chute de pression est de 1557,4 Pa, tandis qu'une fuite à 1,900 m de l'entrée augmente le pourcentage jusqu'à 11.11% équivaut à une chute de 2713,6 Pa. La configuration allongée horizontalement modifie la dynamique du fluide près de la fuite, entraînant une distribution différente de la chute de pression le long du pipeline. Cela peut être attribué à la manière dont le

fluide interagit avec la forme elliptique, créant des variations dans la perte de pression en fonction de l'orientation de la fuite par rapport à l'écoulement principal.

Selon le principe de Bernoulli, les variations de vitesse induites par des fuites de formes différentes affectent la distribution de la pression. Les fuites elliptiques horizontales modifient la vitesse du fluide de manière unique, influençant ainsi les profils de pression le long du pipeline.

En outre, lorsque le fluide traverse une fuite elliptique horizontale, une partie de son énergie cinétique est convertie en énergie de pression, ce qui modifie la distribution de la pression le long du pipeline. La forme elliptique perturbe le flux de manière unique, influençant la chute de pression différemment par rapport à une fuite circulaire.

- *Effet du Débit d'entrée sur le débit de fuite :*

Dans les simulations suivantes, nous allons modifier uniquement le débit d'entrée dans deux positions. En variant le débit d'entrée tout en fixant les autres paramètres tels que la pression de sortie, le maillage, les conditions limites, et les paramètres généraux de la CFD.

Tableau V.3.1.iv.2. Le débit de fuite en fonction de débit d'entrée

Cas	Diamètre intérieure de pipe (m)	Longueur de pipe (m)	Position de fuite (mm)	Débit d'entrée ( $m^3/s$ )	Débit de fuite ( $m^3/s$ )
1	0.018	2.032	0.203	$1.27 \times 10^{-5}$	$2.8 \times 10^{-5}$
2	0.018	2.032	0.203	$2.39 \times 10^{-5}$	$3 \times 10^{-5}$
3	0.018	2.032	0.203	$2.53 \times 10^{-5}$	$3.1 \times 10^{-5}$
4	0.018	2.032	0.203	$2.97 \times 10^{-5}$	$4.3 \times 10^{-5}$
5	0.018	2.032	0.400	$1.27 \times 10^{-5}$	$1.8 \times 10^{-5}$
6	0.018	2.032	0.400	$2.39 \times 10^{-5}$	$2 \times 10^{-5}$
7	0.018	2.032	0.400	$2.53 \times 10^{-5}$	$2.2 \times 10^{-5}$
9	0.018	2.032	0.400	$2.97 \times 10^{-5}$	$3.5 \times 10^{-5}$

Interprétation :

Pour les fuites elliptiques horizontales, l'augmentation du débit d'entrée entraîne également une augmentation du débit de fuite. Par exemple, à un débit d'entrée de  $1.27 \times 10^{-5} m^3/s$ , le débit de fuite est de  $2.8 \times 10^{-5} m^3/s$ . Lorsque le débit d'entrée est augmenté à  $2.97 \times 10^{-5} m^3/s$ , le débit de fuite atteint  $4.3 \times 10^{-5} m^3/s$ , soit une augmentation d'environ 53.57%. Cette relation montre que la forme elliptique horizontale influence la dynamique de l'écoulement de manière similaire à la forme circulaire, mais avec des valeurs de débit de fuite légèrement différentes.

Comme pour les fuites circulaires, l'augmentation du débit d'entrée selon le principe de Bernoulli entraîne une augmentation de la vitesse du fluide et une diminution de la pression

statique à la fuite, favorisant ainsi un débit de fuite accru. En outre, lorsque le fluide traverse une fuite elliptique horizontale, une partie de son énergie cinétique est convertie en énergie de pression, modifiant ainsi la distribution de la pression le long du pipeline. La forme elliptique perturbe l'écoulement différemment d'une fuite circulaire, influençant la répartition de la pression de manière unique.

*b. La forme elliptique verticale :*

- *Effet de la position de la fuite :*

Dans les simulations suivantes, nous allons modifier uniquement la position de la fuite. En variant la localisation tout en fixant les autres paramètres tels que le débit d'entrée, la pression de sortie, le maillage, les conditions limites, et les paramètres généraux de la CFD.

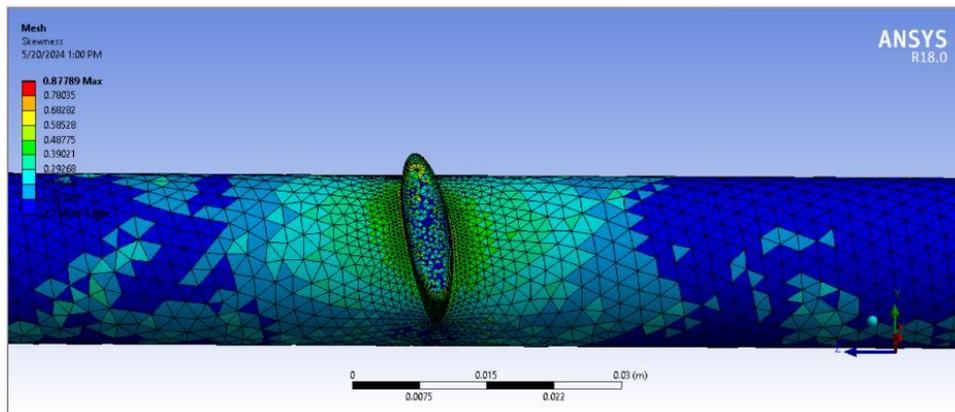


Figure V.3.1.iv.3. La géométrie et le maillage de la fuite elliptique verticale

Tableau V.3.1.iv.3. La chute de pression en fonction de la position de la fuite

Cas	Diamètre intérieure de pipe (m)	Longueur de Pipe (m)	Position de fuite(mm)	Chute de pression (Pa)
1	0.018	2.032	0.203	<b>1581</b>
2	0.018	2.032	0.400	<b>1680.3</b>
4	0.018	2.032	0.600	<b>1794.7</b>
7	0.018	2.032	0.900	<b>1956</b>
8	0.018	2.032	1.200	<b>2152.4</b>
9	0.018	2.032	1.700	<b>2350.7</b>
10	0.018	2.032	1.900	<b>2381.9</b>

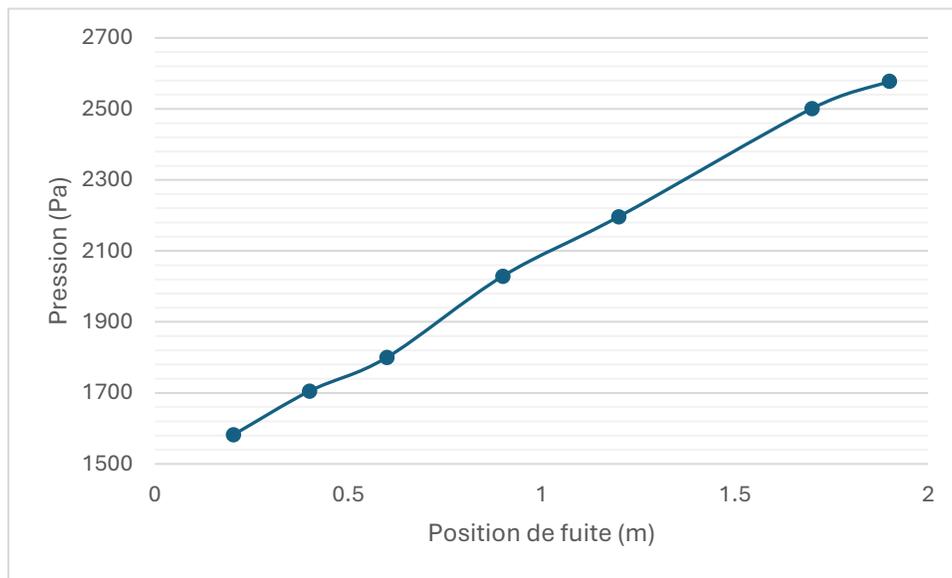


Figure V.3.1.iv.4. La chute de pression en fonction de la position de la fuite

### Interprétation :

Une fuite elliptique verticale tend à avoir un impact sur la chute de pression similaire à celui des autres formes de fuites. Par exemple, une fuite elliptique verticale à 0,203 m de l'entrée entraîne une chute de pression de 1581 Pa, représentant une augmentation de pression d'environ 6.79%. Tandis qu'à 1,900 m, la chute de pression atteint 2381,9 Pa, ce qui représente une augmentation de pression d'environ 9.89%. Cependant, la configuration verticale peut entraîner une chute de pression légèrement différente en raison de la manière dont le fluide interagit avec les parois du pipeline. La forme verticale peut créer des variations dans la distribution de la pression, affectant ainsi les performances globales du système de canalisation.

Selon le principe de Bernoulli, les changements dans la vitesse du fluide dus à des formes de fuites différentes affectent la pression. Les fuites elliptiques verticales changent la vitesse du fluide de manière distincte, influençant les profils de pression. En outre, lorsque le fluide s'écoule à travers une fuite elliptique verticale, une transformation d'énergie cinétique en énergie de pression se produit, altérant ainsi la répartition de la pression dans le système de canalisation. La configuration verticale de la fuite induit des interactions spécifiques avec les parois du pipeline, engendrant des variations dans la distribution de la pression, ce qui influe sur les performances globales du système.

- *Impact du Débit d'entrée sur le débit de fuite*

Dans les simulations suivantes, nous allons modifier uniquement le débit d'entrée dans deux positions. En variant le débit d'entrée tout en fixant les autres paramètres tels que la pression de sortie, le maillage, les conditions limites, et les paramètres généraux de la CFD.

Tableau V.3.1.iv.4. Le débit de fuite en fonction de débit d'entrée

Cas	Diamètre intérieure de pipe (m)	Langueur de pipe(m)	Localisation de fuite (mm)	Débit d'entrée ( $m^3/s$ )	Débit de fuite ( $m^3/s$ )
1	0.018	2.032	0.203	$1.27 \times 10^{-5}$	<b><math>2.8 \times 10^{-5}</math></b>
2	0.018	2.032	0.203	$2.39 \times 10^{-5}$	<b><math>3 \times 10^{-5}</math></b>
3	0.018	2.032	0.203	$2.53 \times 10^{-5}$	<b><math>3.3 \times 10^{-5}</math></b>
5	0.018	2.032	0.203	$2.97 \times 10^{-5}$	<b><math>3.8 \times 10^{-5}</math></b>
6	0.018	2.032	0.400	$1.27 \times 10^{-5}$	<b><math>2.1 \times 10^{-5}</math></b>
7	0.018	2.032	0.400	$2.39 \times 10^{-5}$	<b><math>2.2 \times 10^{-5}</math></b>
9	0.018	2.032	0.400	$2.53 \times 10^{-5}$	<b><math>2.6 \times 10^{-5}</math></b>
10	0.018	2.032	0.400	$2.97 \times 10^{-5}$	<b><math>3 \times 10^{-5}</math></b>

Interprétation :

Les fuites elliptiques verticales montrent également une augmentation du débit de fuite avec l'augmentation du débit d'entrée. Par exemple, un débit d'entrée de  $3.93 \times 10^{-5} m^3/s$  entraîne un débit de fuite de  $2.8 \times 10^{-5} m^3/s$ . Lorsque le débit d'entrée est augmenté à  $8.24 \times 10^{-5} m^3/s$ , le débit de fuite augmente à  $3.8 \times 10^{-5} m^3/s$ , ce qui représente une augmentation d'environ 36.04%. ce qui représente une augmentation d'environ 36.04%. Cette relation est similaire aux fuites elliptiques horizontales et circulaires, avec des variations dans les valeurs spécifiques en fonction de l'orientation elliptique.

Le principe de Bernoulli explique également cette tendance où l'augmentation de la vitesse du fluide due à l'augmentation du débit d'entrée réduit la pression statique à la fuite, augmentant ainsi le débit de fuite. En outre, pendant le passage à travers la fuite elliptique vertical, une conversion d'une partie de l'énergie cinétique du fluide en énergie de pression se produit, entraînant ainsi une augmentation de la pression à la sortie de l'obstacle. Cette transformation énergétique contribue à influencer le débit de fuite résultant.

*c. Forme de fuite carrée*

- *Effet de la position de la fuite :*

Dans les simulations suivantes, nous allons modifier uniquement la position de fuite. En variant la localisation tout en fixant les autres paramètres tels que le débit d'entrée, la pression de sortie, le maillage, les conditions limites, et les paramètres généraux de la CFD.

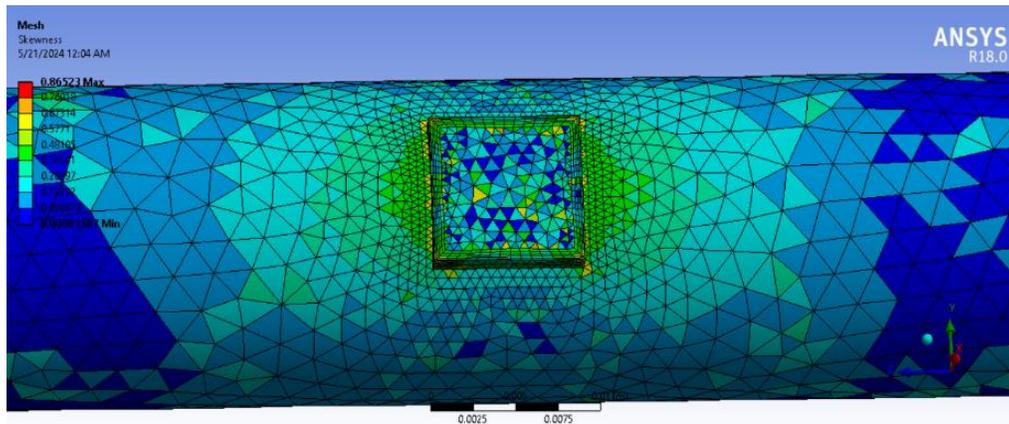


Figure V.3.1.iv.5. La géométrie et le maillage de la fuite carrée

Tableau V.3.1.iv.5. La chute de pression en fonction de la position de la fuite

Cas	Diamètre intérieure de pipe (m)	Longueur de Pipe (m)	Position de fuite (mm)	Chute de pression (Pa)
1	0.018	2.032	0.203	<b>1582.2</b>
2	0.018	2.032	0.400	<b>1705.1</b>
4	0.018	2.032	0.600	<b>1800</b>
7	0.018	2.032	0.900	<b>2029</b>
8	0.018	2.032	1.200	<b>2196.6</b>
9	0.018	2.032	1.700	<b>2501.2</b>
10	0.018	2.032	1.900	<b>2577.6</b>

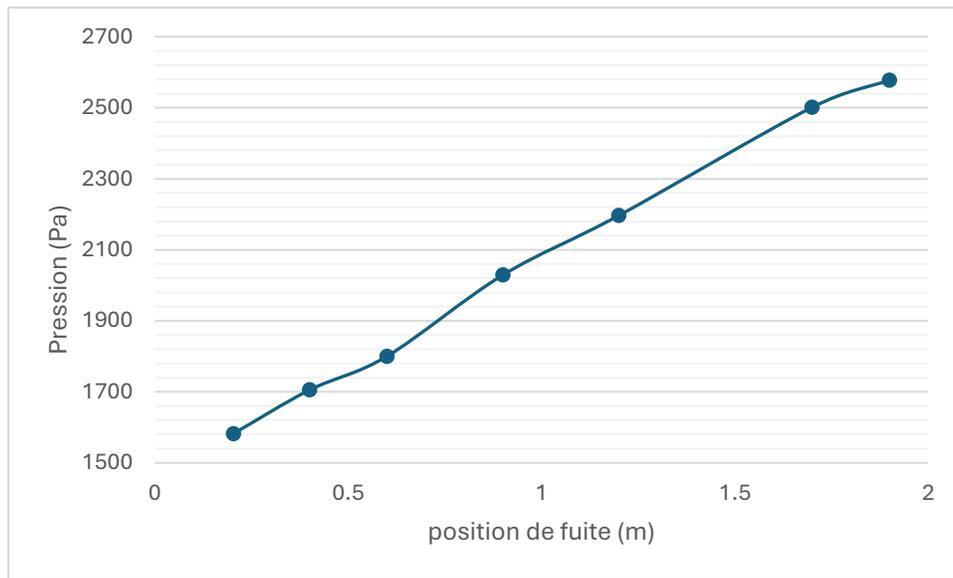


Figure V.3.1.iv.6. La chute de pression en fonction de la position de la fuite

### Interprétation :

Les fuites de forme carrée montrent une chute de pression différente par rapport aux fuites circulaires en raison des coins et des arêtes qui modifient la dynamique du fluide. Par exemple, une fuite carrée à 0,203 m de l'entrée entraîne une chute de pression de 1582,2 Pa, représentant une augmentation de pression d'environ 6.80%. tandis qu'une fuite à 1,900 m entraîne une chute de 2577,6 Pa ce qui correspond à une variation de pression d'environ 10.62%. Ces différences de forme peuvent créer des turbulences supplémentaires affectant ainsi la chute de pression mesurée le long du pipeline. La présence de coins accentue les perturbations dans l'écoulement, ce qui peut augmenter la résistance et donc la chute de pression.

Selon le principe de Bernoulli, les perturbations dans la vitesse du fluide induites par des formes angulaires affectent la pression. Les fuites carrées, avec leurs coins, créent des changements de vitesse qui influencent les profils de pression. En outre, lorsque le fluide traverse l'obstacle, une partie de son énergie cinétique est convertie en énergie de pression. Cette conversion entraîne une augmentation de la pression à la sortie de l'obstacle.

- *Impact du Débit d'entrée sur le débit de fuite*

Dans les simulations suivantes, nous allons modifier uniquement le débit d'entrée dans deux positions. En variant le débit d'entrée tout en fixant les autres paramètres tels que la pression de sortie, le maillage, les conditions limites, et les paramètres généraux de la CFD.

Tableau V.3.1.iv.6. Le débit de fuite en fonction de débit d'entrée

Cas	Diamètre intérieure de pipe (m)	Langueur de pipe (m)	Position de fuite (mm)	Débit d'entrée ( $m^3/s$ )	Débit de fuite ( $m^3/s$ )
1	0.018	2.032	0.203	$1.27 \times 10^{-5}$	$2.4 \times 10^{-5}$
2	0.018	2.032	0.203	$2.39 \times 10^{-5}$	$2.7 \times 10^{-5}$
4	0.018	2.032	0.203	$2.53 \times 10^{-5}$	$3.4 \times 10^{-5}$
5	0.018	2.032	0.203	$2.97 \times 10^{-5}$	$3.7 \times 10^{-5}$
6	0.018	2.032	0.400	$1.27 \times 10^{-5}$	$1.5 \times 10^{-5}$
8	0.018	2.032	0.400	$2.39 \times 10^{-5}$	$2.3 \times 10^{-5}$
9	0.018	2.032	0.400	$2.53 \times 10^{-5}$	$3 \times 10^{-5}$
10	0.018	2.032	0.400	$2.97 \times 10^{-5}$	$3.2 \times 10^{-5}$

Interprétation :

Les fuites carrées suivent également une tendance similaire où une augmentation du débit d'entrée entraîne une augmentation du débit de fuite. Par exemple, à un débit d'entrée de  $1.27 \times 10^{-5} m^3/s$ , le débit de fuite est de  $2.4 \times 10^{-5} m^3/s$ . Lorsque le débit d'entrée est augmenté à  $2.97 \times 10^{-5} m^3/s$ , le débit de fuite atteint  $3.7 \times 10^{-5} m^3/s$ . Cela représente une augmentation d'environ 54.17%. Les valeurs spécifiques de débit de fuite varient en fonction de la forme de la fuite, mais la relation générale reste cohérente.

Pour les fuites carrées, le principe de Bernoulli s'applique également, où l'augmentation de la vitesse du fluide due à l'augmentation du débit d'entrée réduit la pression statique à la fuite, augmentant ainsi le débit de fuite. En outre, lorsque le fluide traverse la fuite carrée, une partie de l'énergie cinétique est convertie en énergie de pression, ce qui entraîne une augmentation de la pression à la sortie de la fuite.

*V.3.1.v. Synthèse des résultats :*

Les valeurs spécifiques observées pour chaque type de fuite démontrent l'importance de la forme et de l'emplacement de la fuite dans les caractéristiques d'écoulement et les débits de fuite correspondants. En outre, les simulations révèlent que le débit de fuite augmente proportionnellement au débit d'entrée, quel que soit le type de fuite. Cette observation est cohérente avec les principes de la mécanique des fluides, notamment le principe de Bernoulli et les lois de conservation de l'énergie. Ainsi, ces résultats confirment la validité des théories fondamentales de la dynamique des fluides dans la prédiction et la compréhension des écoulements de fuite dans différents contextes et avec différentes formes de fuite.

## V.4. Analyse adimensionnelle pour la prédiction de fuite :

### V.4.1. Paramètres adimensionnels :

Pour proposer un modèle de prédiction afin de localiser et estimer les fuites dans les pipelines, plusieurs paramètres adimensionnels sont introduits comme suit :

V.4.1.i. *Chute de pression adimensionnelle :*

$$\Delta p_D = \frac{\Delta P'}{\Delta P} \quad \text{V.4.1}$$

Où  $\Delta p_D$  est la chute de pression adimensionnelle,  $\Delta P'$  est la chute de pression à travers le pipeline avec fuite, et  $\Delta P$  est la chute de pression à travers le pipeline sans fuite.

V.4.1.ii. *Localisation adimensionnelle de la fuite :*

$$L_D = \frac{L'}{L} \quad \text{V.4.2}$$

Où  $L_D$  est la localisation adimensionnelle de la fuite,  $L'$  est la distance entre l'entrée du pipeline et la position de la fuite,  $L$  est la longueur totale du pipeline.

V.4.1.iii. *Diamètre de la fuite adimensionnel :*

$$D_D = \frac{d_{fuite}}{D} \quad \text{V.4.3}$$

Où  $D_D$  est le diamètre de la fuite adimensionnel,  $d_{fuite}$  est le diamètre de la fuite, et  $D$  est le diamètre intérieur du pipeline.

V.4.1.iv. *Débit d'entrée adimensionnel :*

$$Q_D = \frac{Q'}{Q_{max}} \quad \text{V.4.4}$$

Où  $Q_D$  est le débit d'entrée adimensionnel,  $Q'$  est le débit d'entrée,  $Q_{max}$  est le débit d'entrée maximal.

**Analyse adimensionnelle des fuites :**

À partir des données de simulation CFD, traçons des courbes adimensionnelles. Les courbes de tendance sont générées en utilisant un logiciel de traitement de données (ORIGINPRO), comme illustré dans les figures suivantes.

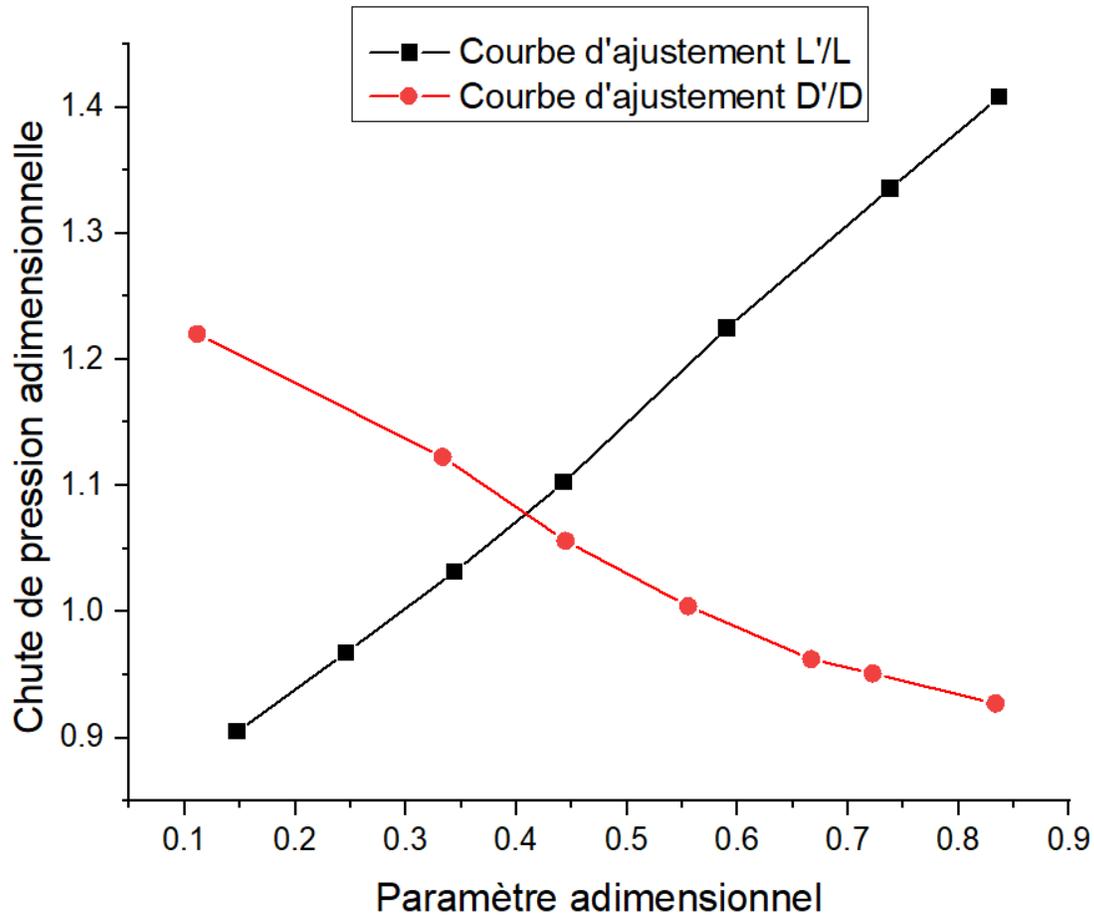


Figure V.4.1.iv.1. Chute de pression adimensionnelle a travers un pipe Sous Différents Paramètres

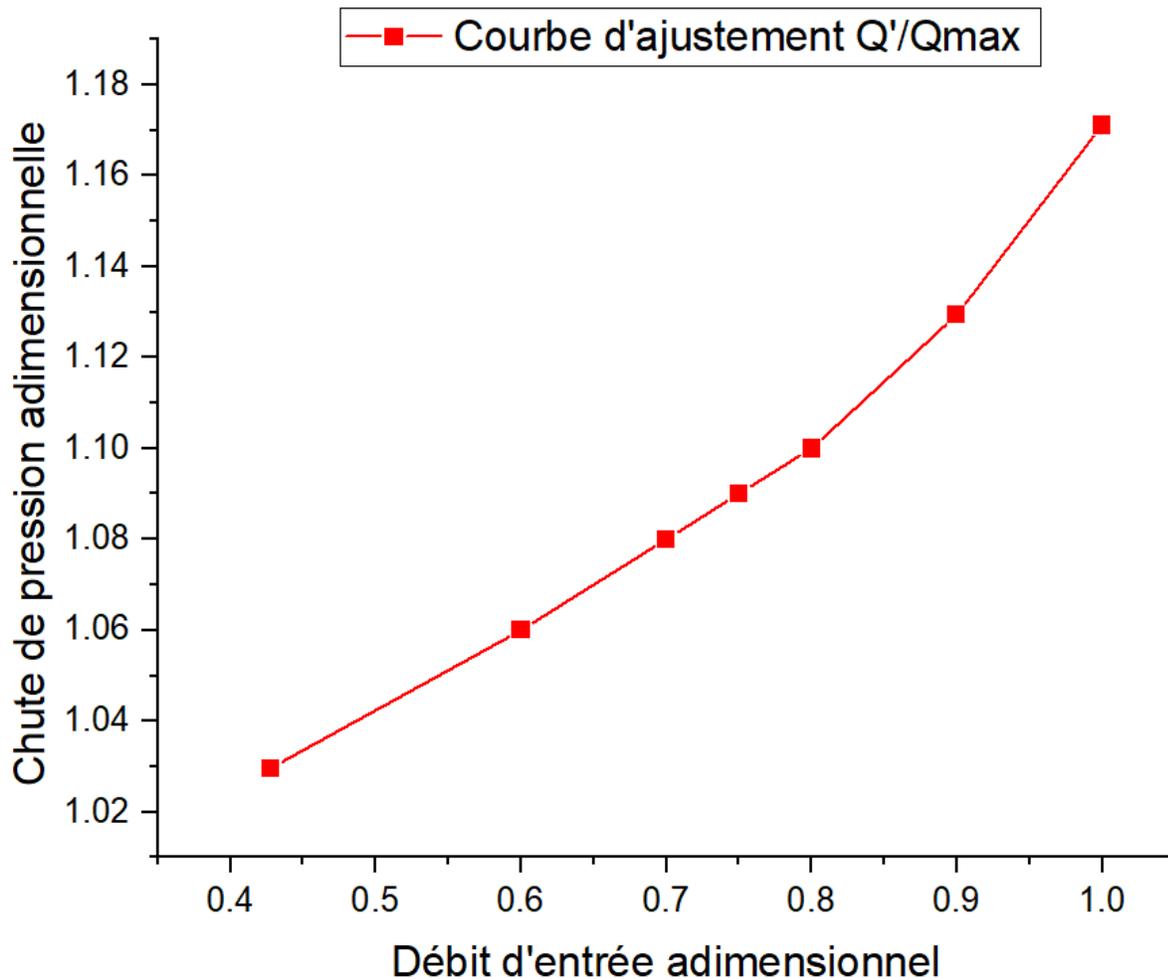


Figure V.4.1.iv.2. Chute de pression adimensionnelle à travers une pipe en fonction du débit d'entrée adimensionnelle.

Dans **Figure V.4.1.ii 1**, l'axe horizontal représente les paramètres de localisation adimensionnelle et de diamètre adimensionnel de la fuite, tandis que l'axe vertical représente la chute de pression adimensionnelle à travers le pipeline.

Dans la **Figure V.4.1. ii 2**, l'axe horizontal indique le débit d'entrée adimensionnel, tandis que l'axe vertical représente également la chute de pression.

L'analyse de figures montre que lorsque la localisation adimensionnelle de la fuite augmente, la chute de pression adimensionnelle augmente également de manière significative. De même, une augmentation du débit d'entrée adimensionnel est corrélée à une augmentation de la chute de pression adimensionnelle. En revanche, une augmentation du diamètre adimensionnel de la fuite est associée à une diminution de la chute de pression adimensionnelle.

En se basant sur les courbes d'ajustement des données, un modèle de distribution des fuites est proposé pour prédire la localisation et estimer les fuites dans le pipeline. Ce modèle, détaillé dans les Figure, intègre les courbes d'ajustement du diamètre adimensionnel, de la localisation adimensionnelle et du débit d'entrée adimensionnel.

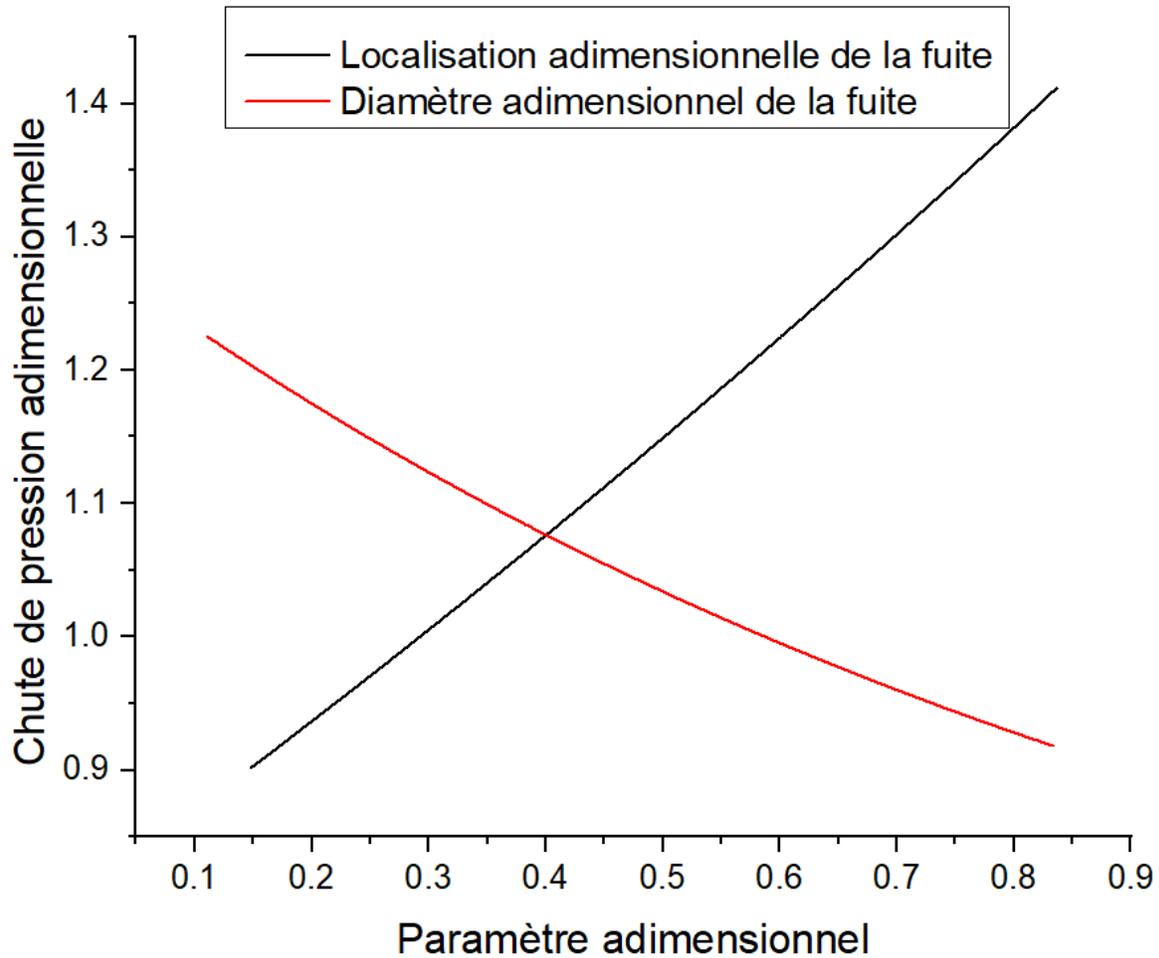


Figure V.4.1.iv.3. Chute de pression adimensionnelle a travers une pipe sous différents paramètres

(Diamètre et localisation adimensionnel).

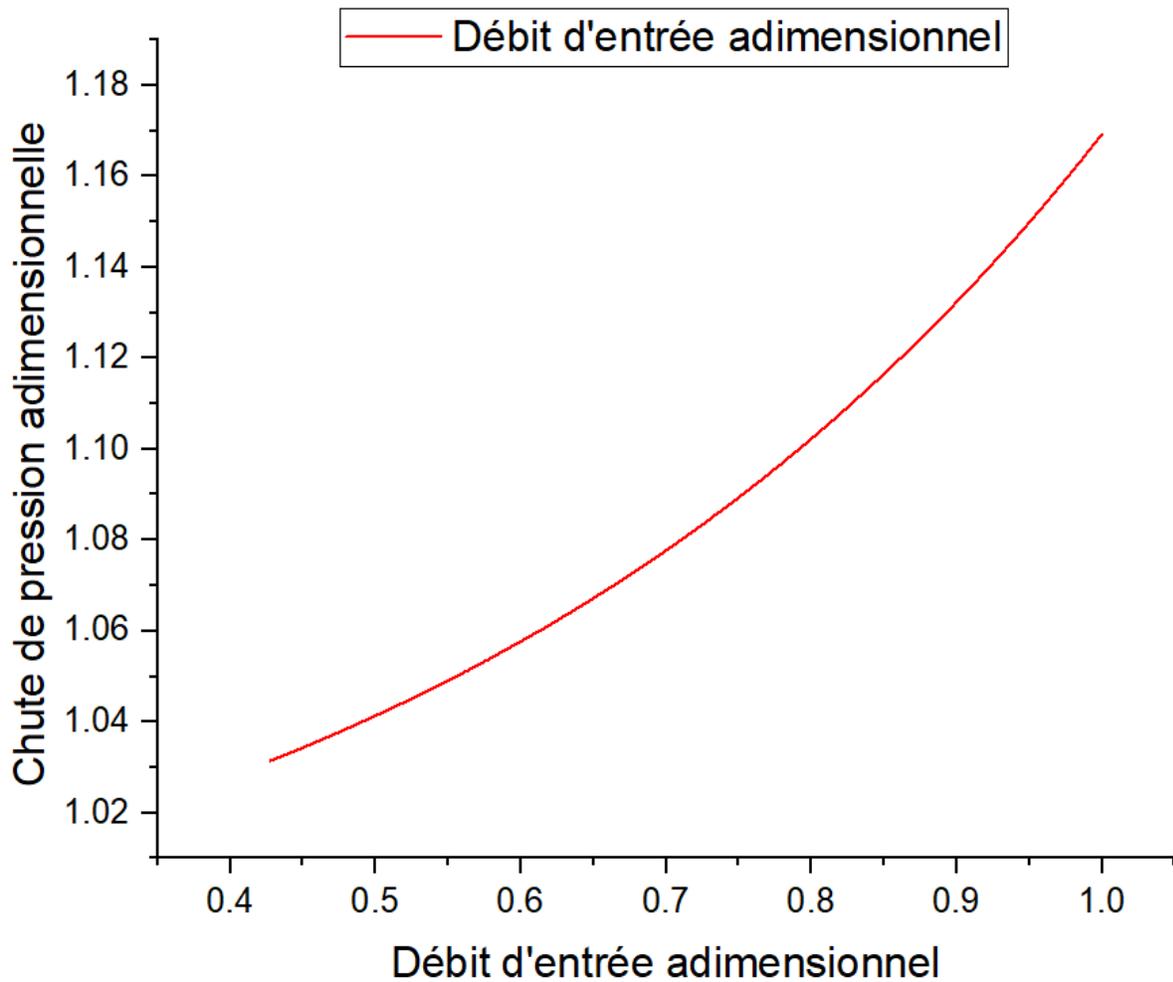


Figure V.4.1.iv.4. Chute de pression adimensionnelle a travers une pipe en fonction du débit d'entrée adimensionnelle.

Selon les courbes de tendance, la localisation, le diamètre et le débit d'entrée adimensionnel correspondent respectivement à un comportement exponentiel :

$$\frac{\Delta p}{\Delta p'} = 2.11533 \times \exp\left(-\frac{\frac{L'}{L}}{-3.31807}\right) - 1.31013 \quad \text{V.4.5}$$

$$\frac{\Delta p}{\Delta p'} = 0.68381 \times \exp\left(-\frac{\frac{d_{fuite}}{D}}{1.04433}\right) + 0.61036 \quad \text{V.4.6}$$

$$\frac{\Delta p}{\Delta p'} = 0.02614 \times \exp\left(-\frac{Q'}{0.49119}\right) + 0.96902 \quad V.4.7$$

*V.4.1.v. Modèle de prédiction des fuites basé sur des paramètres adimensionnel :*

Pour élaborer un modèle de prédiction des fuites, nous introduisons des paramètres adimensionnels spécifiques. Parmi ceux-ci, on trouve la localisation adimensionnelle de la fuite, qui est le rapport entre la position de la fuite et la longueur de la conduite ; le diamètre adimensionnel de la fuite, correspondant au rapport entre le diamètre de la fuite et celui de la conduite ; le débit d'entrée adimensionnel, qui est le rapport entre le débit d'entrée et le débit d'entrée maximal, et la chute de pression adimensionnelle, définie comme le rapport entre la chute de pression dans une conduite présentant une fuite et celle dans une canalisation sans fuite.

Comme illustré dans la Figure, nous avons analysé la chute de pression adimensionnelle pour différentes localisations, diamètres de fuite et débits d'entrée, ce qui nous a permis de dériver une formule adimensionnelle. Cependant, les résultats montrent clairement que plus la position de la fuite dans la conduite est éloignée ou plus le débit d'entrée est élevé, plus la chute de pression adimensionnelle est importante. De plus, plus le diamètre de la fuite est grand, plus la chute de pression est faible. Ces trois paramètres semblent suivre une distribution gaussienne naturelle, avec des coefficients de détermination ajustés ( $R^2$  ajustés) supérieurs à 0,97. La formule d'ajustement est la suivante :

$$z = z_0 + A \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{D_D - x_c}{w_1}\right)^2 - \frac{1}{2}\left(\frac{L_D - y_c}{w_2}\right)^2 - \frac{1}{2}\left(\frac{Q_D - w_c}{w_3}\right)^2\right] \quad V.4.8$$

Où  $z$  représente la chute de pression adimensionnelle,  $L_D$  représente la localisation adimensionnelle de fuite,  $D_D$  représente le diamètre adimensionnel de fuite et  $w$  représente le débit d'entrée.  $A$ ,  $x_c$ ,  $y_c$ ,  $w_c$ ,  $w_1$ ,  $w_2$ ,  $w_3$  et sont des constantes, Les valeurs de toutes ces constantes ont été obtenues à travers le logiciel ORIGIN :

$$z_0 = 0.70647 \pm 0.09989$$

$$A = 0.81258 \pm 0.22182$$

$$x_c = 1.16203 \pm 0.32054$$

$$y_c = -0.34751 \pm 0.96405$$

$$w_c = 3.31866 \pm 26.04091$$

$$w_1 = 0.61962 \pm 0.23254$$

$$w_2 = 1.0741 \pm 7.03093$$

$$w_3 = 0.70685 \pm 0.11328$$

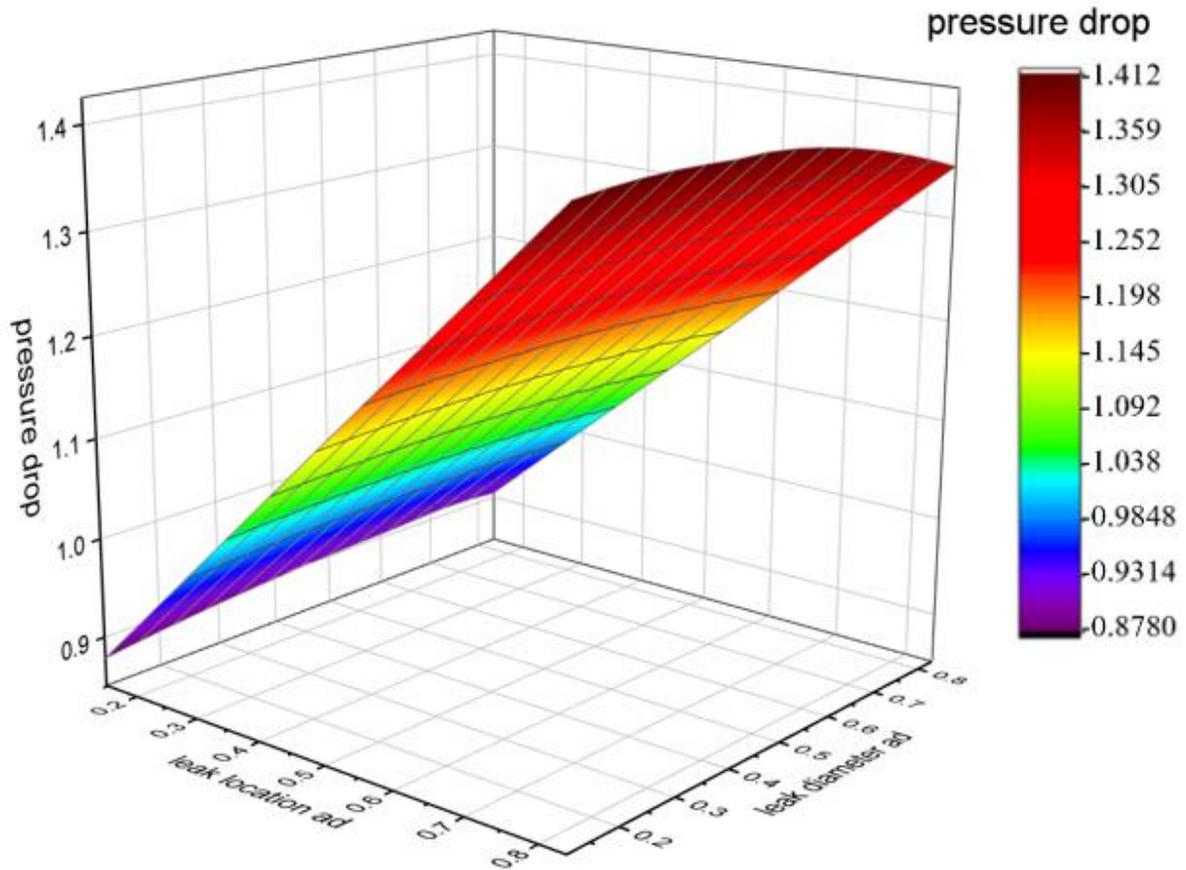


Figure V.4.1.v.1.. Variables adimensionnel dans diffèrent paramètre et condition

La capacité de prédiction du modèle dépend essentiellement de l'écart significatif entre les scénarios avec et sans fuite. En d'autres termes, la différence dans la chute de pression le long de la conduite, entre un scénario sans fuite et un scénario avec fuite, doit être suffisamment prononcée pour être détectée avec précision. Le modèle semble particulièrement sensible à l'amplitude et à l'étendue de la fuite plutôt qu'à sa localisation précise.

## V.5. Interprétation du Modèle de l'intelligence artificiel

### V.5.1. La base des données (Data)

Notre ensemble de données provient d'une simulation CFD effectuée sur une conduite de 2,032 m de long et de 0,018 m de diamètre. Ce qui rend cette modélisation si intéressante, c'est la variation des caractéristiques de la fuite à chaque itération. Cela inclut le diamètre de la fuite et sa localisation par rapport à l'entrée de la conduite. En modifiant ces paramètres, nous avons obtenu des données sur diverses configurations de fuite. Cette approche nous a permis d'étudier comment la chute de pression évolue en fonction des changements des caractéristiques de la fuite.

Les caractéristiques contenues dans notre base de données sont : la localisation, le diamètre de la fuite, et la chute de pression, qui est la différence de pression entre l'entrée et la sortie de la conduite.

### V.5.2. Explication de code

Ce code est une implémentation d'une régression MLP (Multi-Layer Perceptron) à l'aide de la bibliothèque scikit-learn.

Voici une explication étape par étape du code :

#### 1. Importation des bibliothèques :

- ``pandas``: Utilisée pour la manipulation et l'analyse de données tabulaires via les DataFrames.
- ``numpy``: Utilisée pour effectuer des calculs numériques et des opérations sur des tableaux multidimensionnels de manière efficace.
- ``train_test_split`` de ``sklearn.model_selection``: Utilisée pour diviser les données en ensembles d'entraînement et de test pour l'évaluation des modèles.
- ``GridSearchCV`` de ``sklearn.model_selection``: Utilisée pour la recherche des meilleurs hyperparamètres d'un modèle via une validation croisée.
- ``cross_val_score`` de ``sklearn.model_selection``: Utilisée pour évaluer les performances d'un modèle à l'aide de la validation croisée.
- ``StandardScaler`` de ``sklearn.preprocessing``: Utilisée pour standardiser les données en ajustant la moyenne à zéro et l'écart-type à un.
- ``PolynomialFeatures`` de ``sklearn.preprocessing``: Utilisée pour générer des caractéristiques polynomiales à partir de données existantes pour capturer des relations non linéaires.

- `MLPRegressor` de `sklearn.neural\_network` : Utilisée pour construire des modèles de régression utilisant des réseaux de neurones à couches multiples (MLP).
- `mean\_squared\_error` de `sklearn.metrics` : Utilisée pour calculer l'erreur quadratique moyenne entre les prédictions d'un modèle et les valeurs réelles.

```
[1] # 1. Importation des bibliothèques
import pandas as pd
import numpy as np
from sklearn.model_selection import train_test_split
from sklearn.preprocessing import StandardScaler
from sklearn.neural_network import MLPRegressor
from sklearn.metrics import mean_squared_error, r2_score
from sklearn.impute import SimpleImputer
import matplotlib.pyplot as plt
from google.colab import drive
```

### 2. Téléchargement des données :

Les données sont téléchargées depuis Google Drive en montant le lecteur et en lisant un fichier CSV spécifié.

```
# 2. Montage de Google Drive et lecture des données
drive.mount('/content/drive')
file_path = '/content/drive/MyDrive/Dossier sans titre/data.csv'
```

### 3. Séparation des données en variables explicatives et variables cibles

- Les colonnes ' Diamètre de la Fuite ', ' Position de la Fuite ', et ' débit d'entrée ' sont extraites comme variables explicatives et stockées dans la variable `X`.
- La colonne ' chute de pression (Pa) ' est extraite comme variable cible et stockée dans la variable `y\_pressure`.

```
# 3. Séparation des données en variables explicatives et variables cibles
X = data[['Diamètre de la Fuite (mm)', 'Position de la Fuite (m)', "debit d'entrée m3/s"]]
y_pressure = data['chute de pression (Pa)']
```

#### 4. Gestion des valeurs manquantes et normalisation des données

- `SimpleImputer` avec la stratégie 'mean' est utilisé pour remplacer les valeurs manquantes par la moyenne de chaque colonne.
- `StandardScaler` est utilisé pour normaliser les données.

```
# 4. Gestion des valeurs manquantes et normalisation des données
imputer = SimpleImputer(strategy='mean')
X = imputer.fit_transform(X)
y_pressure = imputer.fit_transform(y_pressure.values.reshape(-1, 1)).ravel()

scaler = StandardScaler()
X_scaled = scaler.fit_transform(X)
```

#### 5. Division des données en ensembles d'entraînement et de test

`train\_test\_split` divise les données en ensembles d'entraînement et de test avec une taille de test de 20%, en utilisant une graine aléatoire pour assurer la reproductibilité.

```
# 5. Division des données en ensembles d'entraînement et de test
X_train, X_test, y_pressure_train, y_pressure_test, = train_test_split(X_scaled, y_pressure, test_size=0.2, random_state=42)
```

#### 6. Construction et entraînement du modèle de régression MLP

`MLPRegressor` crée un modèle de régression basé sur un réseau de neurones à couches multiples avec deux couches cachées de 400 neurones chacune, utilisant la fonction d'activation ReLU, l'algorithme d'optimisation Adam, un taux d'apprentissage adaptatif, et une régularisation L2.

`fit` entraîne le modèle MLP en ajustant ses poids en fonction des caractéristiques d'entraînement et des cibles d'entraînement.

```
# 6. # Construction et entraînement du modèle de régression MLP avec plus de neurones et couches
mlp_pressure = MLPRegressor(hidden_layer_sizes=(400,400), activation='relu', solver='adam', learning_rate='adaptive', alpha=0.0001, batch_size=32, max_iter=100000000, random_state=42)

mlp_pressure.fit(X_train, y_pressure_train)
```

```
MLPRegressor
MLPRegressor(batch_size=32, hidden_layer_sizes=(400, 400),
              learning_rate='adaptive', max_iter=100000000, random_state=42)
```

### 7. Évaluation du modèle :

- Le score du modèle est calculé sur les données de test à l'aide de la méthode ``score ()``.
- Le score est affiché.

### 8. Prédiction des valeurs cibles pour les données de test :

Les valeurs cibles sont prédites pour les données de test à l'aide de la méthode ``predict ()``.

```
#Plot the actual vs predicted values
plt.figure(figsize=(8, 6))
plt.scatter(y_pressure_test, y_pressure_pred, color='blue', label='Predicted')
plt.xlabel('Real Pressure Drop')
plt.ylabel('Predicted Pressure Drop')
plt.title('Pressure Drop: Real vs Predicted')

plt.show()
```

### 9. Valeurs réelles par rapport aux valeurs prédites

Un graphique de dispersion est généré avec les valeurs réelles placées sur l'axe des x et les valeurs prédites sur l'axe des y.

Une ligne en pointillés est ajoutée pour symboliser une relation linéaire idéale, complété par des étiquettes pour les axes et un titre pour le graphique.

```
# Plot of Actual vs Predicted Pressure Drop with Indices
plt.scatter(np.arange(len(y_pressure_test)), y_pressure_test, label='Actual')
plt.scatter(np.arange(len(y_pressure_pred)), y_pressure_pred, label='Predicted')
plt.xlabel('Index')
plt.ylabel('Pressure Drop')
plt.legend()
plt.show()
```

### 10. Prédiction des valeurs cibles pour de nouvelles données :

Toutes les données du dataset original sont extraites pour la prédiction de la chute de pression.

Ces données sont transformées en utilisant un scaler déjà ajusté aux données d'entraînement et de test, assurant leur standardisation.

Le modèle MLP utilise les données transformées pour prédire la chute de pression pour chaque point du dataset.

Les valeurs prédites de la chute de pression pour l'ensemble des données sont ensuite affichées.

```
# 9. Extraction de toutes les valeurs du dataset d'origine pour la prédiction
X_all = X[:] # Extraction de toutes les données
X_all_poly = scaler.transform(X_all)

# 10. Prédiction pour toutes les valeurs
y_pressure_pred_all = mlp_pressure.predict(X_all_poly)

print(f'Predicted pressure drop values for all data points: {y_pressure_pred_all}')
```

Predicted pressure drop values for all data points: [1666.99947277 1703.91178957 1745.10585109 1788.89980552 1835.89991734 1885.01673299 1990.57213753 2045.08778049 2159.92636853 2334.87567111 2453.43948974 2577.21643877 2650.5209499 1856.23226238 1802.81785126 1801.40216237 1796.21130312 1775.44786612 1845.32675093 1791.38614931 1789.93334868 1784.60641305 1763.2986705 1740.45108022 1708.75103947 1690.15408008 1666.99947277 1790.96387813 1934.4895009 2227.23702391 1833.2093286 1787.49400541 1771.89223778 1745.10585109 1851.58413049 1992.04597092 2280.63763514 1668.58117341 1750.78730943 1793.53071613 1839.54564675 1888.09114009 1940.8774163 1993.86744715 2163.77512801 2457.01626444 2577.5888716 1852.29928595 1799.43577379 1798.0200849 1792.82922565 1772.06578864 1841.86489744 1787.62700732 1786.1742067 1780.84727106 1759.53952851 1668.58117341 1750.78730943 1793.53071613 1839.54564675 1888.09114009 1940.8774163 1993.86744715 2163.77512801 2457.01626444 2577.5888716 1852.29928595 1799.43577379 1798.0200849 1792.82922565 1772.06578864 1841.86489744 1787.62700732 1786.1742067 1759.53952851 1750.78730943 1668.58117341 1750.78730943 1793.53071613 1839.54564675 1888.09114009 1940.8774163 1993.86744715 2163.77512801 2457.01626444 2577.5888716 1852.29928595 1799.43577379 1798.0200849 1792.82922565 1759.53952851 1841.86489744 1787.62700732 1786.1742067 1780.84727106 1759.53952851]

### V.5.3. Résultante et discussion pour le Modèle de l'intelligence artificiel :

```
mlp_pressure.fit(X_train, y_pressure_train)
test_score = mlp_pressure.score(X_test, y_pressure_test)
print(f'Test Score: {test_score}')
```

Test Score: 0.7143472691887978

Après avoir entraîné le modèle sur les données d'apprentissage et évalué sa performance sur les données de test, un score de 0.714 a été obtenu. Ce score indique que le modèle est capable de prédire avec précision environ 71,4 % des valeurs cibles dans l'ensemble de test

Ces résultats ne dépassent pas ce pourcentage en réseau de données trop rapprochées et incohérentes, probablement à cause de paramètres de fuite.

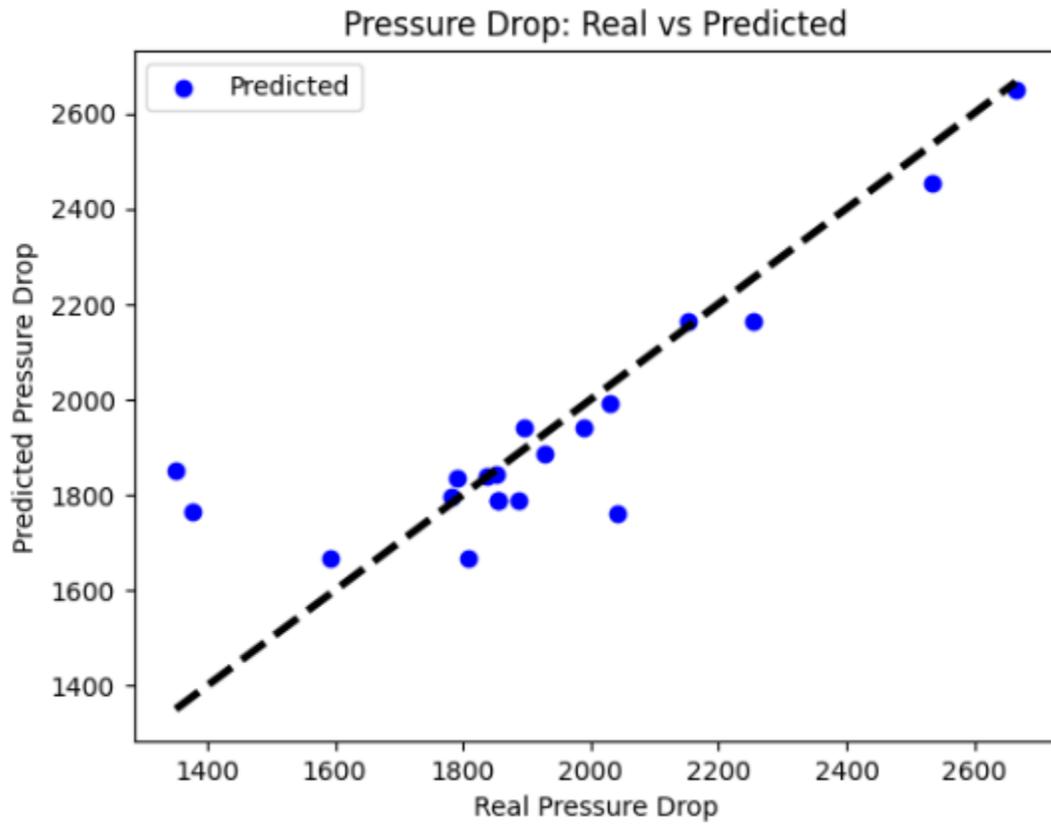


Figure V.4.1.v.1. Graphe "Actual vs hauteur" (Réal vs Prédit pour la hauteur).

- Le nuage de points représente les paires de valeurs (valeur réelle, valeur prédite) pour les données de test actuelles. Chaque point représente une observation.
- La ligne en pointillés (--) diagonale de couleur noire représente une ligne de référence qui indique une correspondance parfaite entre les valeurs réelles et les valeurs prédites.

On observe une dispersion variable des points autour de la ligne moyenne inclinée, principalement due à un échantillonnage limité de données. Malgré cette dispersion, les valeurs prédites se rapprochent de manière significative des valeurs réelles, indiquant une capacité raisonnable du modèle à généraliser et à estimer les données.

Les points correspondant aux valeurs réelles sont marqués en utilisant le label "Real pressure drop", tandis que les points correspondant aux valeurs prédites sont marqués en utilisant le label "Predicted pressure drop".

Ce graphique offre une visualisation comparative entre les valeurs réelles et prédites pour chaque observation, en illustrant leur position au sein de l'ensemble de données de test.

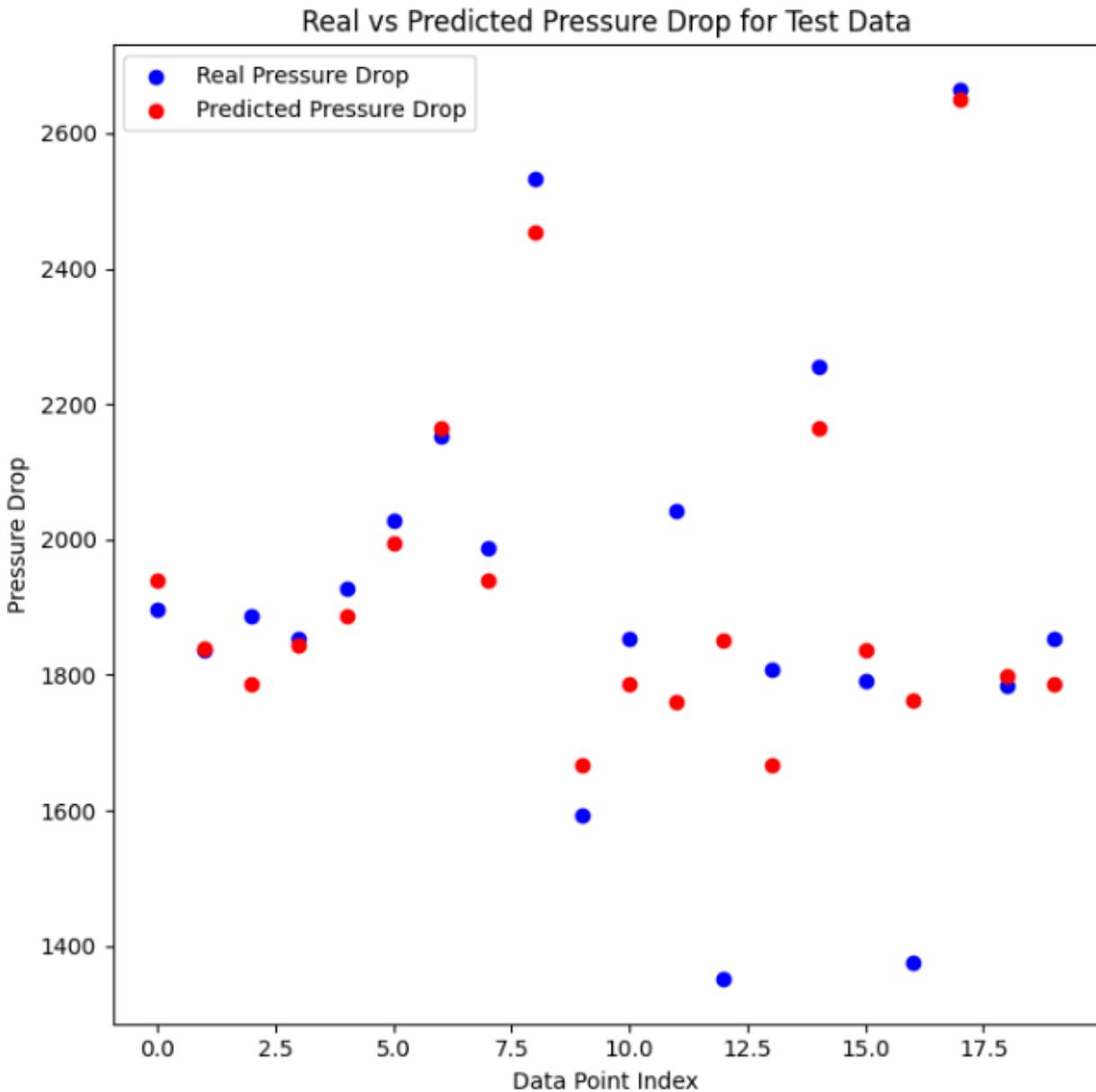


Figure V.4.1.v.2. Le graphe des valeurs réelles (Actual) et les valeurs prédites (Predicted)

Les points correspondant aux valeurs réelles sont marqués en utilisant le label "Real pressure drop", tandis que les points correspondants aux valeurs prédites sont marqués en utilisant le label "Predicted pressure drop".

Ce graphique offre une visualisation comparative entre les valeurs réelles et prédites pour chaque observation, en illustrant leur position au sein de l'ensemble de données de test.

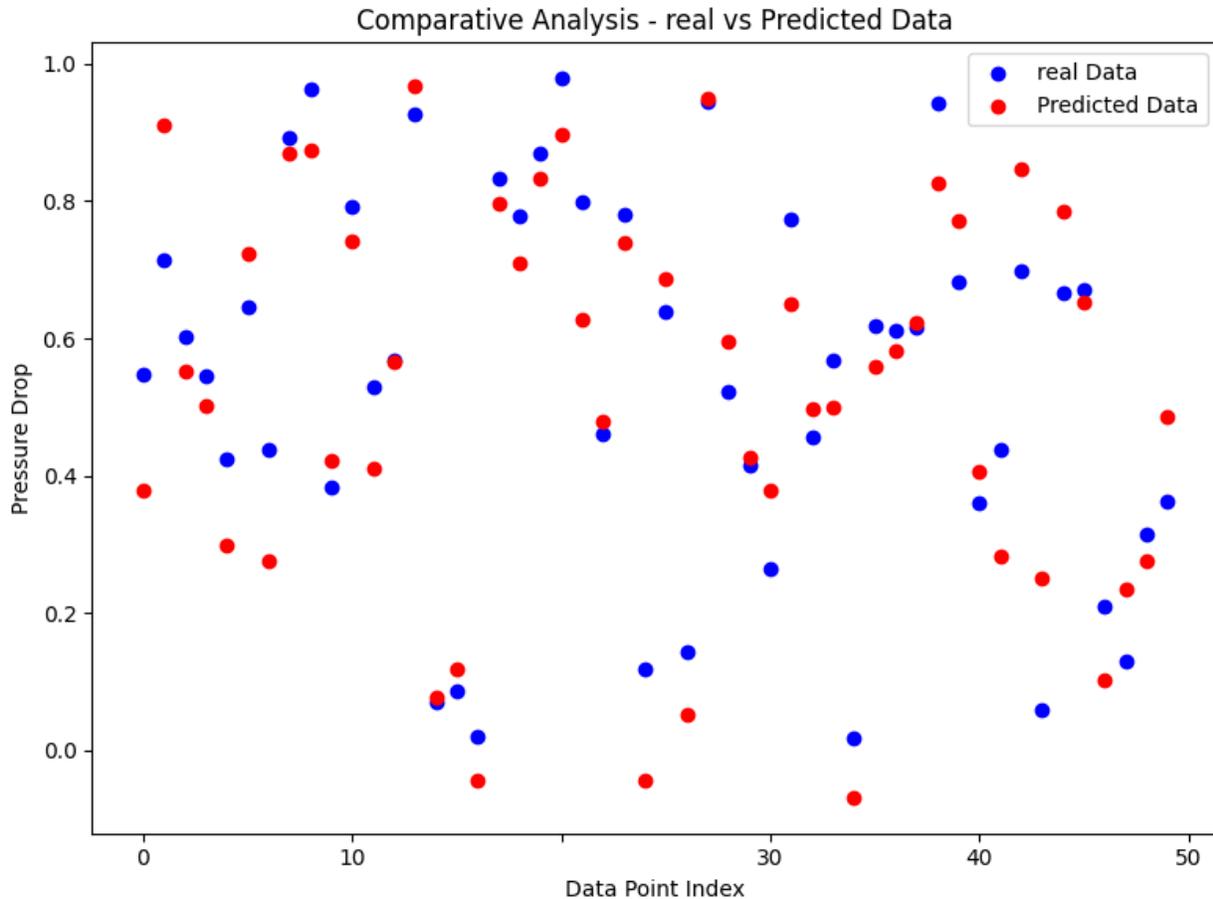


Figure V.4.1.v.3. Analyse comparative entre les données existantes et les nouvelles données

Un graphique où l'axe des x représente l'index et l'axe des y représente les valeurs cibles ('chute de pression'). Les valeurs prédites pour les nouvelles données sont affichées en tant que points rouges, et les valeurs cibles de l'ensemble de données d'origine sont affichées en tant que points bleus.

En observant les graphiques, on peut constater une similitude et un accord acceptable entre les données réelles et les données prédites. Cela indique une bonne précision prédictive du modèle. Cela est une indication positive de la qualité du modèle et de sa capacité à fournir des prédictions précises.

- Pour ajuster le code afin de tester l'efficacité du modèle en prenant en compte différents cas de fuite à différentes positions.

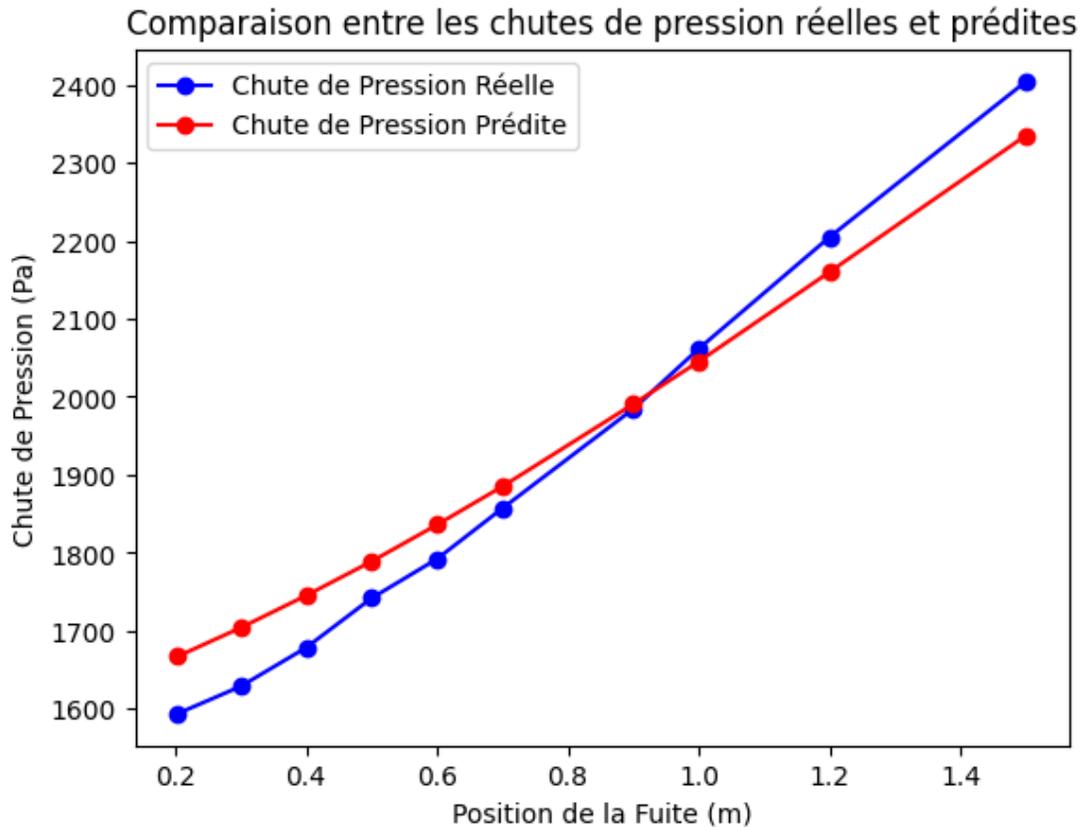


Figure V.4.1.v.4. Comparaison entre la chute de pression réelles et chute de pression prédites

le graphe représente les variations de chute de pression en fonction de position de fuite

On note que le graphe de données prédictif correspond au graphe de données réel, et on peut dire que le modèle prédictif donne des résultats satisfaisants.

## V.6. Conclusion :

La validation des simulations ANSYS FLUENT avec les données expérimentales a confirmé la précision des modèles pour prédire la chute de pression, tandis que l'étude paramétrique a révélé l'influence significative de la position et du diamètre des fuites sur les résultats. L'analyse dimensionnelle a permis de généraliser les résultats et de comprendre les interactions complexes entre les paramètres. De plus, l'intégration du modèle d'intelligence artificielle (IA) a amélioré la

précision des prédictions, démontrant son potentiel pour affiner les analyses de chute de pression dans des systèmes de conduites avec fuites.

## ***Conclusion générale***

---

## Conclusion générale

Cette étude approfondie sur les pipelines souligne l'importance cruciale de ces infrastructures dans le transport des hydrocarbures et met en lumière les défis auxquels elles sont confrontées. À travers cinq chapitres richement illustrés, nous avons exploré les multiples facettes de la gestion et de la maintenance des pipelines, en mettant l'accent sur la détection des fuites et l'utilisation de technologies avancées.

L'emploi de la dynamique des fluides numérique (CFD), notamment via le logiciel ANSYS Fluent, s'est révélé être un outil puissant pour modéliser et analyser les scénarios de fuite. Cette approche permet non seulement de reproduire fidèlement les conditions d'écoulement réelles, mais aussi de valider les données expérimentales, offrant ainsi une méthode fiable pour améliorer la sécurité et l'efficacité des pipelines. La cohérence entre les simulations CFD et les données expérimentales confirme la fiabilité de ces modèles numériques.

Une méthode basée sur l'analyse des variables adimensionnelles a été proposée pour la détection des fuites. Ce modèle mathématique, construit à partir de paramètres tels que le taux de fuite adimensionnel, le débit d'entrée adimensionnel, la localisation de la fuite adimensionnelle et la chute de pression adimensionnelle, offre un outil précieux pour localiser les points de fuite dans des situations réelles. Les résultats montrent que la chute de pression dans le pipeline est influencée à la fois par le taux de fuite et par la position de la fuite par rapport à l'entrée du pipeline.

L'intégration de l'intelligence artificielle et du machine learning dans ce domaine ouvre de nouvelles perspectives pour la prévention et la gestion des défaillances. Les architectures de réseaux neuronaux et les différents types d'apprentissage automatique présentés démontrent le potentiel considérable de ces technologies pour révolutionner la maintenance prédictive et l'optimisation des opérations.

Les études de cas et les applications pratiques présentées illustrent concrètement comment ces approches innovantes peuvent être mises en œuvre pour résoudre des problèmes spécifiques et améliorer les performances opérationnelles dans des projets réels. Bien que les résultats expérimentaux ne puissent pas être appliqués directement aux conditions réelles, ils fournissent une base précieuse pour l'extrapolation et la mise à l'échelle dans des conditions de terrain.

En conclusion, cette étude souligne l'importance d'une approche multidisciplinaire combinant l'ingénierie traditionnelle, la simulation numérique avancée et les technologies d'intelligence artificielle pour assurer la sécurité, la fiabilité et l'efficacité des réseaux de pipelines. Ces avancées technologiques promettent non seulement d'améliorer la gestion des infrastructures existantes, mais aussi de guider le développement de systèmes de transport de fluides plus sûrs et plus durables pour l'avenir.

Les recherches futures devraient se concentrer sur la détection de fuites multiples dans des pipelines simples ou parallèles, en étendant le modèle mathématique actuel et en continuant à exploiter l'analyse des paramètres adimensionnels pour localiser les fuites dans des systèmes de pipelines plus complexes.

## Bibliographie

- [1] A. P. Institute, "API Recommended Practice 1173-Pipeline Safety Management System Requirements.," 2014. [Online]. Available: <http://www.pipelinelaw.com..>
  - [2] Johnsen, K., Helle, K., Rønneid, S., Holt, H., "DNV recommended practice: design and operation of CO<sub>2</sub> pipelines. Energy Procedia 4, 3032–3039.," 2011. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.02.214..>
  - [3] G. DeWolf, "Process safety management in the pipeline industry: parallels and differences between the pipeline integrity management (IMP) rule of the Office of pipeline Safety and the PSM/RMP approach for process facilities. J. Hazard. 104(1–3), 169–192.," 2003. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2003.08.008..>
  - [4] Rui, Z., Wang, X., Zhang, Z., Chen, G., Zhou, X., Patil, S., "A realistic and integrated model for evaluation SAGD projects for Canadian oil sands. Appl. Energy 213, 76–91.," 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.01.015..>
  - [5] Xie, M., Tian, Z., "A review on pipeline integrity management utilizing in-line inspection data. Eng. Fail. Anal. 92, 222–239.," 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2018.05.010>.
  - [6] Liu, Y., Chen, S., Guan, B., Xu, P., "Layout optimization of large-scale oil-gas gathering system based on combined optimization strategy. Neurocomputing 332, 159–183.," 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2018.12.021..>
  - [7] Jiang, J., Rui, Z., Randy, M., Lu, J., "An integrated technical-economic model for evaluating CO<sub>2</sub> enhanced oil recovery development. Appl. Energy 247, 190–211.," 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.04.025>.
  - [8] Shi, J., Deng, F., Xiao, L., Liu, H., Ma, F., Wang, M., Zhao, R., Chen, S., Zhang, J., Xiong, C., "A proposed NMR solution for multi-phase flow fluid detection. Petrol. Sci. 16 (5), 1148–1158.," 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s12182-019-00367-3>.
  - [9] Wang, Z., Bai, Y., Zhang, H., Liu, Y., "Investigation on gelation nucleation kinetics of waxy crude oil emulsions by their thermal behavior. J. Petrol. Sci. Eng. 181, 106230.," 2019a. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.106230>.
  - [10] Wang, Z., Lin, X., Yu, T., Zhou, N., Zhong, H., Zhu, J., "Formation and rupture mechanisms of visco-elastic interfacial films in polymer-stabilized emulsions. J. Dispersion Sci. Technol. 40 (4), 612–626.," 2019b. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1080/.](https://doi.org/10.1080/)
-

- 
- [11] Yu, T., Li, C., Yao, B., Zhang, Z., Guo, Y., Liu, L., "Standard friction prediction model of long-distance hot oil pipelines. *Petrol. Sci.* 17, 487–498.," 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s12182-019-00417-w>.
- [12] Jia, B., Tsau, J., Barati, R., "Investigation of shale-gas-production behavior: evaluation of the effects of multiple physics on the matrix. *SPE Reservoir Eval. Eng.*," 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.2118/197069-PA>.
- [13] Jia, B., Jin, L., Mibeck, B.A.F., Smith, S.A., Sorensen, J.A., "An integrated approach of measuring permeability of naturally fractured shale. *J. Petrol. Sci. Eng.* 186, 106716.," 2019a. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.106716>.
- [14] Jia, B., Tsau, J., Barati, R., "Fuel. A review of the current progress of CO<sub>2</sub> injection eor and carbon storage in shale oil reservoirs. *Fuel* 236, 404–427.," 2019b. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.08.103>.
- [15] Wang, Z., Yu, X., Li, J., Wang, J., Zhang, L., "The use of biobased surfactant obtained by enzymatic syntheses for wax deposition inhibition and drag reduction in crude oil pipelines. *Catalysts* 6 (61).," 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/catal6050061>.
- [16] Diao, X., Shen, G., Jiang, J., Chen, Q., Wang, Z., Ni, Lei, Mebarki, A., Dou, Z., "Leak detection and location in liquid pipelines by analyzing the first transient pressure wave with unsteady friction. *J. Loss Prev. Process. Ind.* 60, 303–310.," 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2019.04.017>.
- [17] A. Al-Khomairi, "Leak detection in long pipelines using the least squares method. *J. Hydraul. Res.* 46 (3), 392–401.," 2008. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3826/jhr.2008.3191>.
- [18] Zadkarami, M., Shahbazian, M., Salahshoor, K., "Pipeline leak diagnosis based on wavelet and statistical features using dempster-shafer classifier fusion technique. *Process Saf. Environ.* 105, 156–163.," 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2016.11.002>.
- [19] Kim, M., Lee, S., "Detection of leak acoustic signal in buried gas pipe based on the time-frequency analysis. *J. Loss Prev. Process. Ind.* 22, 990–994.," 2009. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2008.08.009>.
- [20] Liu, C., Li, Y., Yan, Y., Fu, J., Zhang, Y., "A new leak location method based on leakage acoustic waves for oil and gas pipelines. *J. Loss Prev. Process. Ind.* 35,236–246.," [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2015.05.006>.
- [21] Cui, C., Jiang, S., He, X., Wang, K., Shao, H., Wu, Z., "Experimental study on the location of gas drainage pipeline using cellular automata. *J. Loss Prev. Process. Ind.* 56, 68–77.," 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2018.07.022>.
-

- [22] Liu, C., Wang, Y., Li, Y., Xu, M., "Experimental study on new leak location methods for natural gas pipelines based on dynamic pressure waves. *J. Nat. Gas Eng.* 54, 83–91.," 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2018.03.023>.
- [23] Chen, Y., Kuo, T., Kao, W., Tsai, J., Chen, W., Fan, K., "An improved method of soil-gas sampling for pipeline leak detection: flow model analysis and laboratory test. *J. Nat. Gas Eng.* 42, 226–231.," 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2017.03.008>.
- [24] Lu, H., Huang, K., Fu, L., Zhang, Z., Wu, S., Lyu, Y., Zhang, X., "Study on leakage and ventilation scheme of gas pipeline in tunnel. *J. Nat. Gas Eng.* 53, 347–358.," 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2018.03.019>.
- [25] Xu, T., Chen, S., Guo, S., Huang, X., Li, J., Zeng, Z., "A small leakage detection approach for oil pipeline using an inner spherical ball. *Process Saf. Environ.* 124, 279–289.," 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.11.009>.
- [26] Yan, Y., Dong, X., Li, J., "Experimental study of methane diffusion in soil for an underground gas pipe leak. *J. Nat. Gas Eng.* 27, 82–89.," 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2015.08.039>.
- [27] Z. L. W. Z. L. Qiu, "Tracing and prediction analysis of an urban pipeline leakage accident based on the catastrophe DBN model. *J. Nat. Gas Eng.* 57, 339–348.," 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2018.07.019>.
- [28] Doshmanziari, R., Khaloozadeh, H., Nikoofard, A., "Gas pipeline leakage detection based on sensor fusion under model-based fault detection framework. *J. Petrol. Sci. Eng.* 184, 106581," 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.106581>.
- [29] Carnahan, J.V., Miller, K., Segan, E., "Leak location and repair cost for underground heat distribution systems. *J. Transport. Eng.* 117 (3)," 1991. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X).
- [30] L. Sun, "Mathematical modeling of the flow in a pipeline with a leak. *Math. Comput. Simulat.* 82, 2253–2267.," 2012. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.matcom.2012.06.007>.
- [31] Quy, T.B., Kim, J., "Leak detection in a gas pipeline using spectral portrait of acoustic emission signals. *Measurement* 152, 107403.," 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.107403>.
- [32] Kranenburg, C., Vegt, E., "Leakage from ruptured submarine oil pipeline. *J. Transport. Eng.* 111 (5)," 1985. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X).
- [33] Wu, X., Lu, H., Huang, K., Yuan, Z., "Mathematical model of leakage during pressure tests of oil and gas pipelines. *J. Pipeline Syst. Eng.* 6 (4)," 2015. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)PS.1949-1204.0000195](https://doi.org/10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000195).
-

- [34] Schwaller, J., Van Zyl, J.E., "Modeling the pressure-leakage response of water distribution systems based on individual leak behavior. *J. Hydraul. Eng.* 141 (5),04014089," 2014. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000984](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000984).
- [35] Zhang, R., Cong, T., Tian, W., Qiu, S., Su, G., "Effects of turbulence models on forced convection subcooled boiling in vertical pipe. *Ann. Nucl. Energy* 80, 293–302.," 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2015.01.039>.
- [36] Yang, L., Fu, H., Liang, H., Wang, Y., Han, G., Ling, K., "Detection of pipeline blockage using lab experiment and computational fluid dynamic simulation.*J. Petrol. Sci. Eng.* 183, 106421.," 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.106421>.
- [37] M. Rania, "Transport de pétrole par pipelines et leurs éléments de protection," ENP, 2017.
- [38] D. Martin, " methods of prevention, detection and control of spillages in european oil pipelines," CONCAWE, Brussels, 1998.
- [39] K.Younsi, "Cours de réhabilitation des pipelines," INH, Boumerdes, 2024.
- [40] "Visiativ," 19 12 2022. [Online]. Available: <https://www.visiativ.com>. [Accessed 2024].
- [41] T. Ltd, "TWI Global," [Online]. Available: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/faq-what-is-simulation>. [Accessed 2024].
- [42] M. Mohamed and A. Abdelmounaim, "Etude numérique (CFD) d'un échangeur de chaleur coaxial," UNIVERSITE SAAD DAHLAB, BLIDA, 2021.
- [43] S. Patankar, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, Boca Raton, 1980.
- [44] Ansys, "Pressure-Based Solver," ANSYS, Inc, 2009.
- [45] ANSYS, "Density-Based Solver," ANSYS, Inc, 2009.
- [46] H. K. Versteeg and W. Malalasekera, *An Introduction to Computational Fluid Dynamics - THE FINITE VOLUME METHOD-*, England: Pearson Education, 2007.
- [47] P.Wang, On defining artificial Intelligence, *Journal of Artificial General Intelligence*, 2019.
- [48] J. McCarthy, E. Feigenbaum and A. Samuel, "Pioneer in Machine Learning," *AI Magazine*, vol. 11, no. 3, 1990.
- [49] I. El Naqa and M. Murphy, "Qu'est- ce que l'apprentissage automatique?," Springer, Cham.
- [50] M. M. A. Berry and B. (. Yap, "Apprentissage supervisé et non supervisé pour la science des données," Springer Nature, 2019.
-

- [51] K. S. Sindu Meena, "Une enquête sur les techniques d'apprentissage supervisé et non supervisé," *Editions internationales Springer*, pp. 627-644, 2020.
- [52] "Apprentissage par renforcement," [Online]. Available: <https://www.lebigdata.fr/reinforcement->. [Accessed 2024].
- [53] I. B. Y. e. C. A. oodfellow, "L'apprentissage en profondeur," *Presse du MIT*, 2016.
- [54] B. L. Solaiman, "Les réseaux de neurones artificiels et leurs applications en imagerie et en vision par ordinateur," *Presse Universitaire du Québec*, 2003.
- [55] M. Parizeau, "Réseaux de neurones.," p. 124, 2004.
- [56] I. H. S. D. A. F. R. L. L. d. R. A. S. d. S. I. .. e. d. R. A. S. da Silva, "Réseaux de perceptrons multicouches. Réseaux de neurones/artificiels : Un cours Pratique," 2017.
- [57] L. Y. H. L. S. W. e. K. L. Hao Fu, "Diagnosis of the single leakage in the fluid pipeline through experimental study and CFD simulation," *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2020.
-