

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**  
**UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA**

**FACULTE DU TECHNOLOGIE**  
**DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE**  
N° :INS03/2019



**DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIE**  
**FILIERE : ELECTRONIQUE**  
**OPTION : INSTRUMENTATION**

**Mémoire présenté pour l'obtention**  
**Du diplôme de Master Académique**

**Intitulé**

**Détection des fuites dans les réseaux de  
distribution d'eau**

Réalisé par

LAGUEAGUE Seyfeddine

OUALI Elhadj Taieb

Soutenu devant le jury composé de

Mr. GUERMAT Noubiel

Université de M'sila

Président

Mr. BENTOUMI Miloud et Mr. BAKHTI Haddi

Université de M'sila

Rapporteur

Mr. KHENNOUF Saleh

Université de M'sila

Examineur

**Année universitaire : 2018 /2019**

## REMERCIEMENT

*Avant tout nous tenons à remercier الله عزَّ وَّجَلَّ tout puissant de nos avoir donné la volonté, la santé et la patience durant nos années d'études et surtout pendant la réalisation de ce mémoire.*

*Nous ne pouvons pas réellement trouver les expressions élégantes que mérite notre encadreur **Dr. BENTOUMI Miloud** pour son écoute, son aide, sa sympathie et sa patience, son encouragement et ses conseils, ainsi que pour le temps qu'il a consacré pour évaluer et critiquer ce travail et sa présence total au cours de cette modeste étude.*

*Nos remerciements s'adressent à tous les membres du jury qui ont accepté de juger notre travail.*

*De même, nous remercions vivement **Mr. BAKHTI Haddi** pour la documentation, l'accompagnement et les conseils prodigués tout au long de ce travail.*

*Notre profonde gratitude à tous les enseignants du Département d'Electronique en particulier dans notre spécialité **INST**. Avec un remerciement spécial aux étudiants du département d'Électroniques et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail.*

*Grand Merci*

## *DEDICACE*

*Je dédie ce modeste travail à ma chère mère,  
à mon père **Dr. OUALI Ameur** qui m'ont toujours  
soutenu*

*Et aidé à affronter les difficultés,  
À ma Fiancée*

*Mes très chers frères et mes chères sœurs  
À mes amis et mes collègues*

*Et pour tous ce qui ont fait pour que je puisse les  
honorer et leur patience durant ma vie.*

*OUALI Elhadj Taieb*

## *DEDICACE*

*Je dédie ce modeste travail à ma chère mère, source  
de tendresse pour son soutien tout au long de ma vie  
scolaire et universitaire.*

*à mon père **Mr. LAGUEAGUE Abdelhamid** qui  
m'ont toujours soutenu*

*À mes très chers frères et mes chères sœurs  
À mes amis, mes collègues et enseignants  
Tous qui ont collaboré de près ou de loin à  
l'élaboration de ce travail.*

*LAGUEAGUE Seyfeddine*

# sommaire

## Introduction générale

Introduction générale.....	2
----------------------------	---

## Chapitre I Généralités sur les réseaux de distribution d'eau

I.1. Introduction .....	5
I.2. Présentation générale des réseaux.....	5
I.2.1. Définitions.....	5
a. Conduites principales .....	5
b. Conduites secondaires .....	5
c. Conduites locales .....	5
I.2.2. Types des réseaux de distribution d'eau .....	6
a. Réseaux ramifiés.....	6
b. Réseaux maillés .....	6
c. Réseaux mixtes .....	6
d. Réseaux étagés.....	7
I.2.2. Caractéristiques d'un réseau de distribution .....	7
a. Nature des canalisations .....	7
b. Matières des canalisations .....	7
c. Accessoires de réseau .....	14
d. Age des canalisations .....	16
I.3. Fuites .....	16
I.3.1. Définition d'une fuite.....	16
I.3.2. Types des fuites .....	16
I.3.3. Cause des fuites .....	17
I.3.4. Débit de fuite.....	18
I.3.5. Recherche de fuite.....	18
I.3.6. Techniques de détection de fuite .....	18
a. L'observation visuelle .....	18
b. Technique acoustique .....	19
c. Techniques non acoustiques .....	23
I.4. Conclusion .....	26

## Chapitre II Notions de mécanique des fluides

II.1. Introduction .....	28
II.2. Fluides .....	28
II.2.1. Définition d'un fluide .....	28
II.2.2. Type de fluide .....	28
a.Fluide Parfait.....	28
b.Fluide Réel.....	29
c. Fluide incompressible .....	29
b.Fluide compressible .....	30
II.2.3. Caractéristique physique d'un fluide.....	30
a.Masse volumique .....	30
b.Poids volumique.....	31
c.Densité.....	31
d.Viscosité.....	31
II.3. Pression.....	32
II.3.1. Définition de pression .....	32
II.3.2. Différentes unités de pression .....	32
II.3.3. Différents types de pression.....	33
a.Pression atmosphérique.....	33
b.Pression relative .....	33
c.Pression absolue .....	33
d.Vide.....	34
e.Pression pour les fluides (liquide et gaz) .....	34
II.4. Dynamique des fluides incompressible. ....	35
II.4.1. Définition des fluides réelle .....	35
II.4.2. Ecoulement permanant.....	35
II.4.3. Régimes d'écoulement.....	36
II.4.4. Notion des débits.....	37
II.4.5. Les pertes de charges .....	39
a.Pertes de charge singulières .....	39
b.Pertes de charges linéaires .....	39
II.4.6. Théorème de Bernoulli applique à un fluide réel.....	40
II.4.7.Capteur et transmetteur .....	40
a.Définitions.....	40
b.Transmission.....	41

c. Boucle de courant 4-20mA .....	42
II.5. Conclusion .....	44

### **Chapitre III Traitement du signal**

III.1. Introduction .....	45
III.2. Traitement de signal .....	46
III.3. Principales fonctions du traitement du signal .....	46
III.3.1. Élaboration des signaux .....	46
III.3.2. Interprétation des signaux .....	46
III.4. Définition et représentation des signaux .....	47
III.4.1. Définition d'un signal .....	47
III.4.2. Définition d'un bruit .....	47
III.5. Classification des signaux .....	47
III.5.1. Classification phénoménologique des signaux .....	47
a. Signaux déterministes .....	48
b. Signaux aléatoires .....	48
III.5.2. Classification énergétique .....	49
III.5.3. Classification morphologique des signaux .....	49
III.6. Analyse des signaux non périodiques .....	50
III.6.1. Transformé de Fourier .....	50
III.6.2. Condition d'existence de la Transformée de Fourier .....	51
III.6.3. Transformation inverse de Fourier .....	51
III.6.4. Propriétés de la transformée de Fourier .....	51
a. Propriétés de linéarité .....	51
b. Propriétés de parité .....	52
c. Propriétés de similitude .....	52
d. Propriétés de translation .....	52
e. Propriétés de dérivation .....	52
f. Propriétés liées à la convolution .....	52
III.6.5. Transformée de Fourier Discrète .....	52
III.6.6. Transformée de Fourier Rapide (FFT) .....	53
III.6.7. Corrélacion .....	54
a. Définition .....	54
b. Intercorrélacion de deux signaux .....	54
c. Propriétés de l'intercorrélacion .....	55
III.6.8. Intercorrelacion discrète .....	55

III.6.9. Ondelettes (wavelets) .....	55
III.6.10. Transformé en ondelettes.....	56
III.7.Conclusion .....	57

### **Chapitre IV Mesures pratiques et interprétation des résultats**

IV.1.Introduction.....	59
IV.2.Système d'acquisition .....	59
IV.3.Chaîne d'acquisition .....	59
IV.3.1. Capteur de pression .....	60
IV.3.2. Boucle de courant 4-20 mA.....	62
IV.3.3. Etage de conversion courant tension.....	62
IV.4.Circuit hydraulique .....	62
IV.5.Circuit électronique de conditionnement .....	65
IV.6.Système de détection réalisé .....	66
IV.7.Résultats et discussions.....	68
IV.7.1. Signaux acquis.....	70
IV.7.2. Application de l'ondelette.....	75
IV.8.Conclusion .....	84

#### **Conclusion générale**

Conclusion générale .....	86
---------------------------	----

#### **Références bibliographiques**

Références bibliographiques .....	80
-----------------------------------	----

## LISTE DES FIGURES

Fig.I.1. Schéma d'un réseau de distribution en eau potable ramifié	6
Fig.I.2. Schéma d'un réseau de distribution en eau potable maillés	6
Fig.I.3. Canalisation en fonte ductile	8
Fig.I.4. Canalisation en acier galvanisé	9
Fig I.5. Tuyau Béton armé à âme en tôle	9
Fig I.6. Tubes PVC	10
Fig I.7. Tuyau polyéthylène haute densité	11
Fig I.8. Tuyau polyéthylène basse densité	11
Fig I.9. Canalisations en PRV	12
Fig I.10. Marquis pompe à eau mjm101x	14
Fig I.11. Pompe de Surface Calpeda CT 60	14
Fig I.12. Joints de canalisation d'eau	15
Fig I.13. Vanne plastique	16
Fig I.14. Détecteur par autocorrélation acoustique	20
Fig I.15. Principe de localisation par autocorrélation acoustique	20
Fig I.16. Enregistreur acoustique	22
Fig I.17. Personne effectuant une détection par écoute.	22
Fig I.18. Schéma de la détection par immersion	23
Fig I.19. Détection par gaz traceur	23
Fig I.20. Détection thermographie par caméra infrarouge	24
Fig I.21. Données GPR avant (a) et après (b) l'interprétation de l'image.	25
Fig I.22. Mesure de pression	25
Fig II.1. Un domaine d'un fluide parfait	28
Fig II.2. Eau Fluide incompressible	29
Fig II.3. Air Fluide compressible	30
Fig II.4. Type de pression	34
Fig II.5. Différentes formes d'ingénierie	34
Fig II.6. Pression due à des forces extérieures	35
Fig II.7. Régime laminaire	36
Fig II.8. Régime turbulent	36
Fig II.9. Principe d'équation de continuité	38
Fig II.10. Pertes de charges linéaires	39
Fig.II.11. schéma bloc d'un capteur	41
Fig.II.12. schéma fonctionnel d'un transmetteur	41
Fig.II.13. schéma bloc d'une boucle de courant 4-20mA+Capteur	42
Fig.II.14. Boucle 4-20mA utilisée par transmetteur de pression	44
Fig.III.1. classification phénoménologique des signaux	48
Fig.III.2. Signaux déterministes	48
Fig.III.3. Signaux stationnaire et non stationnaire	49
Fig.III.4. classification morphologique	50
Fig.III.5. Relations de réciprocity temps-fréquence	53

Fig. IV.1.Synoptique du système d'acquisition	59
Fig. IV.2. Positions des capteurs de pression et les fuites	60
Fig. IV.3.Capteur de pression Honeywell modèle 811 FMG	60
Fig. IV.4. Câblage de la boucle 4-20Ma	62
Fig. IV.5.Circuit hydraulique global	63
Fig. IV.6.Électrovanne	64
Fig. IV.7.Bouton poussoir	64
Fig.IV.8.Pompe à eau marque CALPEDA	64
Fig. IV.9.Réservoir	64
Fig. IV.10. Synoptique du système électronique de conditionnement	65
Fig. IV.11.Oscilloscope numérique GDS 1000	65
Fig. IV.12. Alimentation stabilisé GW modèle 3020	66
Fig. IV.13. Circuit électrique du système d'acquisition réalisé	67
Fig. IV.14. Schéma synoptique d'un portion de circuit réalisé	68
Fig. IV.15. Signaux sans fuite issus des deux capteurs de pression	70
Fig. IV.16. Signal d'intercorrélation des deux signaux	70
Fig. IV.17. Signaux avec fuite issus des deux capteurs de pression	71
Fig. IV.18. Décalage temporel entre les deux signaux avec fuite issus	72
Fig. IV.19. Signal d'intercorrélation des deux signaux	72
Fig. IV.20. Signaux avec fuite issus des deux capteurs de pression	72
Fig. IV.21. Décalage temporel entre les deux signaux avec fuite issus	73
Fig. IV.22. Signal d'intercorrélation des deux signaux	74
Fig. IV.23. Signaux débruités avec fuite issus des deux capteurs de pression	75
Fig. IV.24. Décalage temporel entre les deux signaux débruités avec fuite issus	76
Fig. IV.25. fenêtrage débruitage	76
Fig. IV.26. Signal d'intercorrélation des deux signaux débruités	76
Fig. IV.27. Signaux débruités avec fuite issus des deux capteurs de pression	77
Fig. IV.28. Décalage temporel entre les deux signaux débruités avec fuite issus	78
Fig. IV.29. fenêtrage débruitage (Ondelette)	78
Fig. IV.30. Signal d'intercorrélation des deux signaux débruités	78
Fig. IV.31. Situation de débit sous considération	80
Fig. IV.32. Courbe des distances mesuré et distances calculé	84

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 . Avantages et inconvénients des types de canalisations.	12
Tableau I.2 . Les modes de défaillance des conduites de distribution.	17
Tableau II.1. Table de masse volumique et type de fluide	30
Tableau II.2 . Table de conversion d'unités (Pascal, Bar, Atmosphère)	33
Tableau. IV.1.Les caractéristiques du capteur de pression Honeywell modèle 811 FMG	61
Tableau. IV.2. Les distances des fuites par rapport au capteur A	69
Tableau. IV.3.La distance de fuite et les caractéristiques des signaux	73
Tableau. IV.4. La distance de fuite et les caractéristiques des signaux	74
Tableau. IV.5. tableau récapitulatif des mesures de la position de fuite	75
Tableau. IV.6. La distance de fuite et les caractéristiques des signaux débruités	77
Tableau. IV.7. La distance de fuite et les caractéristiques des signaux débruités	79
Tableau. IV.8. tableau récapitulatif des mesures de la position de fuite après application de l'ondelette	79
Tableau. IV.9. Tableau comparatif des mesures de la position de fuite avant et après application de l'ondelette	79
Tableau. IV.10. Mesure prélevée à l'entrée et à la sortie de la conduite	83
Tableau. IV.11. Valeurs des constantes et des variables utilisées pour la régression	83
Tableau. IV.12. Valeurs des distances obtenues par la régression non linéaire	83

# **Introduction générale**

## Introduction générale

La distribution d'eau a pour fonction de livrer de façon continue une eau de bonne qualité et avec une quantité suffisante à une pression adéquate.

les réseaux de distribution subissent des dégradations au cours du temps qui peuvent engendrer des fuites. Des efforts doivent alors être consentis pour minimiser ces fuites qui causent des pertes économiques et des risques pour la santé publique ainsi que des problèmes d'environnement. Les bilans d'eau donnent une idée globale des quantités perdues et permettent de cerner les zones du réseau où se produisent des fuites importantes.

La détection de fuite et sa localisation précise est parmi les facteurs déterminants pour réduire cette perte économique et atteindre un bon rendement de réseau, des différentes techniques sont en mis en œuvre, la plus utilisée est la corrélation acoustique de deux signaux issues de deux capteurs généralement posé sur des bouches d'incendie. Cette dernière besoin toujours des utilisateurs professionnels pour sa localisation, car les bruits environnants dues aux activités quotidiennes ou trafic routiers peuvent lors de leurs corrélation données un pic simulant l'existence d'une fuite. Elle est mise en problème dans le cas des canalisations en plastique par ce que le matériel de détection acoustique des fuites a été conçu principalement pour les conduites métalliques. Les conduites en plastique sont plus silencieuses et ne transmettent pas les bruits autant que les conduites métalliques.

Dans le cadre de ce travail, nous avons pensé à remédier à ce problème par l'utilisation de capteurs de pression. Ces derniers ont l'avantage d'être très précis. Leurs informations ne sont pas influencées par les bruits de l'environnement. Nous avons trouvé lors de l'application de l'intercorrélation des signaux des deux transmetteurs de pression pour la localisation exacte de la fuite par rapport à l'un des capteurs qu'il existe toujours une certaine incertitude ce qui nous a poussé à utiliser une autre méthode pour la localisation de cette fuite. Cette méthode hydraulique utilise des débitmètres. On a développé un modèle mathématique pour la localisation de la fuite, en se basant sur le débit d'entrée et le débit de sortie de la conduite.

Dans le premier chapitre, nous présentons une généralité sur les réseaux de distributions et les fuites d'eau, suivi d'un panorama des différentes techniques de détection de fuites.

Le deuxième chapitre est dédié aux notions des fluides et ces caractéristiques physiques les différents types de pressions ainsi que la dynamique de fluide compressible, suivi par la notion de capteur et de transmetteur.

Dans le troisième chapitre, on donne quelques définitions générales sur les signaux, et les différentes techniques de traitement appliquées avec une étude détaillée sur la technique

d'intercorrélation. Enfin le quatrième chapitre est consacré à l'application de cette technique sur des signaux de fuite réels acquis sur un canal prototype dans le laboratoire. Une autre méthode d'analyse a été effectuée en développant une méthode hydraulique basée sur un modèle mathématique utilisant des débitmètres.

Enfin, le travail est clôturé par une conclusion générale indiquant la contribution de cette mémoire en exposant notamment les éventuelles perspectives.

# **Chapitre I Généralités sur les réseaux de distribution d'eau**

## Chapitre I Généralités sur les réseaux de distribution d'eau

### I.1. Introduction

L'eau stockée dans le réservoir, doit être distribuée à l'aide des canalisations connectées entre elles sur lesquelles des branchements seront piqués en vue de satisfaire le consommateur. Toutes fois une étude préliminaire doit être faite à fin d'attribuer un diamètre adéquat à la canalisation, permettant d'assurer le débit maximal à tous les besoins domestique, industrie ou agricole. La sécurité de la distribution est tributaire de la durabilité du matériel et des raccords, de la localisation rapide en cas de dégât, d'un accès aisé les plus courts. Il faudra mesurer la vulnérabilité des installations aux actions extérieures causées par des tiers ou par des tremblements de terre. Inversement, il y a lieu de prévoir les perturbations apportées au voisinage par les travaux de pose et par les réparations ainsi que les conséquences des dommages provoqués par l'eau. [1].

Dans ce chapitre nous présentons un panorama sur les réseaux de distribution d'eau. Ainsi que les différentes canalisations d'eau potable utilisées à cet effet. Les méthodes et les techniques utilisées pour la localisation de fuite vont être éclaircies. Ces dernières vont être suivies par une étude détaillée sur les différentes techniques de détection. Quelques détecteurs de fuites d'eau les plus connues vont être présentés.

### I.2. Présentation générale des réseaux

#### I.2.1. Définitions

Le canal est le chemin parcouru par un produit pour atteindre le consommateur final, tandis que le circuit est l'ensemble des canaux de distribution par lesquels s'écoulent ces biens entre le producteur et le consommateur ultime, un réseau de distribution d'eau comporte divers types de conduites, qu'on classe selon leur fonction et en pratique, selon leur diamètre [2].

#### a. Conduites principales

Les conduites principales relient la station de purification ou bien les postes de pompage aux divers quartiers de la ville. Ils ont dans la plupart des cas 350 mm ou plus de diamètre.

#### b. Conduites secondaires

Raccordées aux conduites principales avec lesquelles elles forment des réseaux maillés, ont 250 ou 300 mm de diamètre. Elles sont distantes les unes des autres d'environ 1000 m.

#### c. Conduites locales

Les conduites locales sont les plus petites des conduites d'un réseau ; leur diamètre ne peut cependant être inférieur à 150 mm si on veut assurer la protection contre les incendies comme leur nom l'indique. Les conduites locales ne desservent que quelque rue.

### I.2.2. Types des réseaux de distribution d'eau [3]

Il s'agit de conduites en charge. Ces réseaux sont classés selon le schéma adopté et le principe d'interconnexion des conduites.

#### a. Réseaux ramifiés

Le réseau ramifié Figure (I.1) est constitué d'une conduite principale et des conduites secondaires branchées tout le long de la conduite principale. C'est un réseau arborescent (ramifié) qui n'assure aucune distribution de retour. Il suffit qu'une panne se produise sur la conduite principale, toute la population à l'aval sera privée d'eau.

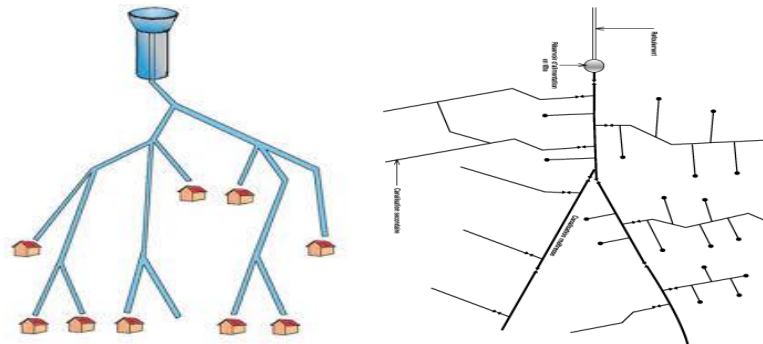


Fig.I.1. Schéma d'un réseau de distribution en eau potable ramifié

#### b. Réseaux maillés

Ce type de réseau Figure (I.2) généralement retenu pour la distribution d'eau de ville. Peut également être sélectionné pour la fourniture d'eau d'irrigation. Ils sont bien adaptés à la distribution « à la demande ». Les réseaux maillés assurent une plus grande sécurité de fonctionnement car il est toujours possible d'assurer le débit en un point quelconque du réseau dans un sens ou dans l'autre et dans le cas de la rupture de la conduite, il est possible de fournir un débit réduit depuis l'autre extrémité de la bouche.

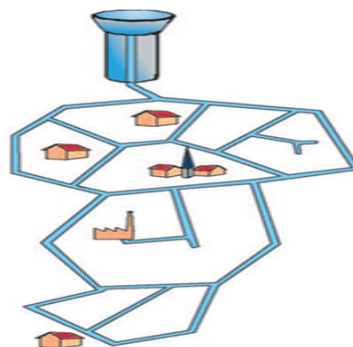


Fig.I.2. Schéma d'un réseau de distribution en eau potable maillé

#### c. Réseaux mixtes

Ces réseaux peuvent être ramifiés au niveau de l'adduction principale ou secondaire - qu'il s'agisse de canaux ou de conduites - et ensuite maillés au niveau des tertiaires.

#### **d. Réseaux étagés**

Le réseau étagé est caractérisé par les différences de niveau très important. Ce qui fait la distribution de l'eau par le réservoir donne des fortes pressions au point le plus bas (norme de pressions ne sont pas respectées. En effet ce système nécessite une installation d'un réservoir intermédiaire alimenté par le premier qui permet de régularisés la pression dans le réseau. N'importe quelle combinaison de canaux et de conduites peut former un réseau, le choix étant fonction surtout de la topographie. Dans ce cas, cependant, les canaux sont toujours situés en amont des conduites.

### **I.2.2. Caractéristiques d'un réseau de distribution**

#### **a. Nature des canalisations**

Distribuer l'eau potable jusqu'au robinet de l'utilisateur nécessite d'utiliser un réseau souterrain constitué de deux types de canalisations

- **Conduites d'adduction**

Elles sont destinées au transport des gros débits d'eau, souvent entre la station de traitement et le réservoir. Elles ont un diamètre important. Leur installation nécessite du matériel lourd, mais se fait en général en zone non encombrée.

- **Conduites de distribution**

Celles-ci sont utilisées pour desservir les domiciles des usagers. Leur diamètre est plus petit. Leur installation ou leur réparation en zone urbaine nécessite du matériel de petite intervention et une extrême prudence, car les travaux sont souvent à réaliser en encombrement souterrain maximum.

#### **b. Matières des canalisations**

On rencontre des canalisations AEP en différentes matières

##### **i. Fonte ductile**

Un produit de métallurgie avancé, offre des propriétés uniques de transport de l'eau sous pression et pour d'autres usages Figure (I.3). Il combine la résistance physique de l'acier structural à la durabilité de la fonte grise. La fonte ductile offre la plus grande marge de sécurité possible contre les défaillances de service dues au mouvement du sol et aux contraintes de poutre. Incassable lors d'une utilisation normale, il offre également une résistance accrue aux bris causés par une manipulation excessive lors de l'expédition et de l'installation. La fonte ductile a une structure différente de celle de la fonte grise et présente les caractéristiques complémentaires suivantes

- Haute limite élastique.
- Résistance à la traction.
- Résistance aux chocs.
- Allongement important.

La fonte ductile présente les propriétés mécaniques suivantes

- Une élasticité de  $Re \geq 270$  Mpa
- Une résistance à la traction de  $Rm \geq 420$  Mpa
- Une excellente résistance aux chocs
- Une capacité importante d'allongement supérieure à 10 %

Ces propriétés extraordinaires permettent une durée de vie pouvant dépasser largement les 50 voire 100 ans à condition que les instructions de mise en œuvre soient respectées.

On définit les différents types de pression

- PFA, **pression de fonctionnement admissible** est la pression interne en régime permanent. Cette pression varie en fonction du diamètre de la conduite et des pièces déracordement utilisées, de 16 à 64 bars,
- PMA, **pression maximale admissible** est la pression supportable de façon sûre en service, y compris le coup de bélier.

$$PMA = 1.2PFA.$$

- PEA, **pression d'épreuve admissible** est la pression hydrostatique maximale supportable par un composant nouvellement mis en œuvre pendant un temps relativement court :

$$PEA = PMA + 5 \text{ bars en général}$$

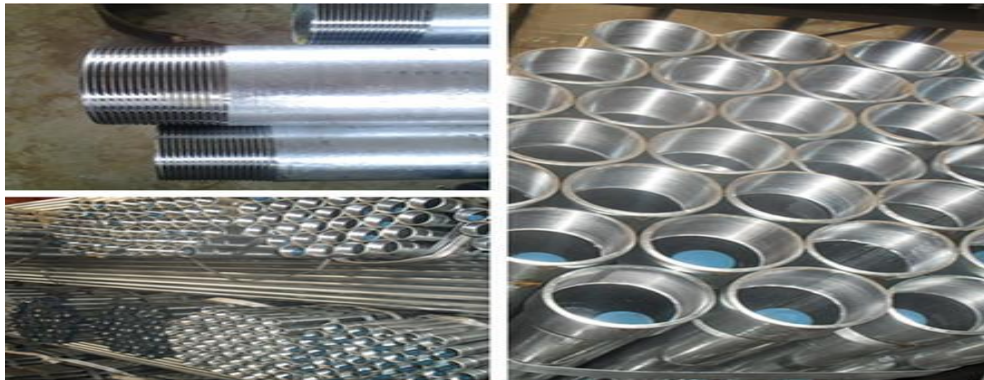
$$PEA = 1,5PFA \text{ si } PFA = 64 \text{ bars}$$



**Fig.I.3.** Canalisation en fonte ductile

## ii. Acier/ Acier galvanisé

Les tubes et raccords en acier ou acier galvanisé Figure (I.4) sont utilisés dans les conduites d'eau chaude ou d'eau froide sanitaire. Ce type d'ouvrage fait l'objet d'une sinistralité liée à la corrosion des éléments dont les conséquences peuvent être d'ordre technique (bon fonctionnement et pérennité de l'installation) et également d'ordre sanitaire (détérioration de la qualité de l'eau distribuée). Outre les défauts liés à la conception des installations, aux caractéristiques de l'eau véhiculée ou à l'exploitation des installations il est apparu que la mauvaise qualité des aciers et leur galvanisation pouvaient être à l'origine de ces désordres.



**Fig.I.4.** Canalisation en acier galvanisé

## iii. Béton armé à âme en tôle

Le tuyau à âme en tôle d'acier et double revêtement intérieur et extérieur en béton armé Figure (I.5) est de plus en plus utilisé notamment dans les gros diamètres en raison de son prix, de sa passivité, de sa faible corrosivité, de son auto portance, de son aptitude aux techniques de pose sans tranchée, par fonçage, et de sa longévité. Dans les conditions extrêmes d'agressivité et/ou de corrosivité de l'eau ou du terrain, des ciments spéciaux peuvent être utilisés et on peut avoir recours à des revêtements internes et/ou externes spéciaux comme pour les autres matériaux de canalisations. On peut même envisager une protection cathodique sur l'âme en tôle.



**Fig I.5.** Le tuyau Béton armé à âme en tôle

#### iv. PVC/ Polymère orienté

Les tubes PVC (POLYCHLORURE DE VINYLE), destinés à l'adduction d'eau Figure (I.6), sont équipés à une extrémité d'une emboîture à joint ou à coller et à l'autre extrémité, d'un chanfrein, ce qui permet d'assurer l'assemblage des tubes entre eux. Ils sont livrés habituellement en longueur de 6 mètres. D'autres longueurs peuvent être fabriquées sur demande. Le développement des canalisations en PVC sur le marché de l'adduction d'eau potable est dû : Aux qualités du produit, l'absence de corrosion, Aux faibles pertes de charge, la bonne résistance mécanique, l'assemblage aisé, une manutention facilitée, une durabilité et une recyclabilité prouvées



Fig I.6. Tubes en PVC

#### v. Polyéthylène (PE)

Il existe deux qualités des canalisations en polyéthylène

##### ✓ Polyéthylène Haute Densité. (PEHD)

Les canalisations sont majoritairement enterrées et sous pression (pression maximale du réseau : 20 bars à 20°C. Les tubes en PEHD Figure (I.7) sont disponibles jusqu'au diamètre extérieur de 630 mm aussi bien la matière première que les tubes doivent être attestés conformes sanitaire pour le transport de l'eau potable. La plus importante propriété des tubes thermoplastiques est leur résistance hydrostatique, qui définit la durée de vie attendue du tube sous pression interne. Celle-ci est liée au type de résine considérée.

Les tubes en polyéthylène haute densité (PE80 ou PE100) sont livrés soit en barres de 6.0m ou 12m soit en couronnes de 50, 100, 200 mètres ou autres longueurs sur demande, leur durée de vie garantie est de 50ans. (Charte Qualité Des Réseaux D'Eau Potable Et D'Assainissement, 2015) Le tube polyéthylène peut être posé à une température ambiante pouvant aller jusqu'à 50°C.

Il existe deux (02) grands types d'assemblage

- Les assemblages par soudure qui se subdivisent en assemblage par Electro soudage.
- Assemblages mécaniques. (Rouisset.B, 2015).



**Fig I.7.** Tuyau polyéthylène haute densité

✓ **Polyéthylène basse densité (PEBD)**

Ces tuyaux Figure (I.8) sont légers, ont une bonne flexibilité, sont résistants à la corrosion et aux conditions climatiques. Faible perte de charge et bonne résistance aux coups de bélier ; Leurs durée de vie est supérieur à 50 ans. (Charte Qualité Des Réseaux D'Eau Potable Et D'Assainissement, 2015)



**Fig I.8.** Tuyau polyéthylène basse densité

### vi. Polyester Renforcé en fibres de Verre. (PRV)

Les principales matières premières utilisées pour la fabrication des canalisations en PRV Figure (I.9) sont la résine polyester et vinylester, la fibre de verre renforcée, et le sable de silice. La longueur standard des canalisations en PRV est de 12 mètres, cependant, il est possible de produire des longueurs allant de 3 mètres jusqu'à 15 mètres ou selon les exigences du projet. Les canalisations en PRV sont produites avec un diamètre nominal (DN) compris entre 300 et 3000mm, pour une pression nominale (PN) de 1 Bar à 32 Bars et pour une classe de rigidité de 2500 N/m<sup>2</sup>, 5000 N/m<sup>2</sup> et 10000 N/m<sup>2</sup>. (Rouisset.B, 2015).



**Fig I.9.** Canalisations en PRV

**Tableau I.1 :** Avantages et inconvénients des types de canalisations.

Matériau	Avantages	Inconvénients
<b>Acier</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Réduction importante du nombre de joints.</li> <li>✓ Etanchéité.</li> <li>✓ Continuité de la résistance mécanique.</li> <li>✓ bonne élasticité.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>☒ Nécessite une protection cathodique contre la corrosion extérieure.</li> <li>☒ Risque d'ovalisation.</li> <li>☒ Prix élevé.</li> <li>☒ le poids élevé.</li> </ul>
<b>Béton</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Pose continue sans joint</li> <li>✓ Bonne résistance contre les corrosions intérieure et extérieure.</li> <li>✓ Bonne résistance mécanique.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>☒ Peut affecter les caractéristiques organoleptiques de l'eau.</li> <li>☒ Poids élevé.</li> </ul>
<b>Fonte ductile</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Bonne résistance mécanique (réduction du risque de fissures).</li> <li>✓ Bonne élasticité.</li> <li>✓ Matériaux flexible.</li> <li>✓ Les conduites sont protégées à l'intérieur avec une couche</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>☒ Nombre de joints important.</li> <li>☒ Poids élevé.</li> <li>☒ Nécessite une protection cathodique passive.</li> <li>☒ Sensibilité à la corrosion.</li> </ul>

	demortier traité de point de vue thermique et à l'extérieur avec protection en Zinc.	<input checked="" type="checkbox"/> Prix élevé. <input checked="" type="checkbox"/> cout de manutention (poids).
<b>Polyester renforcé de fibre de verre (PRV)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Réduction des coups de bélier.</li> <li>✓ Résistance aux corrosions intérieure et extérieure (résistance chimique).</li> <li>✓ Résistance mécanique.</li> <li>✓ Facilité de pose.</li> <li>✓ Etanchéité à long terme (grâce au système d'emboîtement par manchon).</li> <li>✓ Poids réduit (1/4 par rapport aux conduits en fonte).</li> </ul>	<input checked="" type="checkbox"/> Le comportement de longue date n'est pas connu(50ans), autant de point de vue de l'influenceur la qualité de l'eau transportée que sur le comportement structurel.
<b>Polyéthylène PE</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Souple et flexible.</li> <li>✓ Résistance à la corrosion.</li> <li>✓ Résistance à la casse.</li> <li>✓ Résiste aux UV.</li> <li>✓ Prix compétitif.</li> <li>✓ conditions favorable d'écoulement.</li> </ul>	<input checked="" type="checkbox"/> Risque d'ovalisation pour les plus gros diamètres. <input checked="" type="checkbox"/> Savoir-faire spécifique pour les raccords. <input checked="" type="checkbox"/> Peut libérer des substances dans l'eau. <input checked="" type="checkbox"/> Perméable aux hydrocarbures.
<b>Polychlorure de Vinyle (PVC)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Bonne résistance à la corrosion.</li> <li>✓ Flexibilité (résistance aux mouvements de terrain).</li> <li>✓ Facilité de pose.</li> <li>✓ Raccord facile.</li> <li>✓ Poids léger.</li> <li>✓ Rugosité favorable</li> <li>✓ Prix compétitif.</li> </ul>	<input checked="" type="checkbox"/> Dégradation à la lumière et auge <input checked="" type="checkbox"/> Perméable à certains composés gazeux, solvants et hydrocarbures. <input checked="" type="checkbox"/> Peut affecter les caractéristiques organoleptiques de l'eau. <input checked="" type="checkbox"/> matériaux sensible à la variation de température. <input checked="" type="checkbox"/> remblai à exécuter avec le plus grand soin.

### c. Accessoires de réseau

#### i. Réservoir

Le réservoir de stockage est un bassin qui se remplit au cours des faibles consommations et qui se vide pendant les périodes de fortes consommations journalières. Le réservoir présente deux utilités (technique et économique) par les multiples fonctions qu'il remplit

- Fonctions techniques : il permet
  - La régulation du débit pour tous les ouvrages qui se situent en amont et en aval de lui.
  - La régulation de la pression dans le réseau de distribution.
  - L'assurance de la continuité de l'approvisionnement en cas de panne dans les ouvrages situés dans la partie amont.
  - La participation au traitement (utilisation de réactifs).
- Fonctions économiques : il permet
  - La réduction des investissements sur tous les autres ouvrages du réseau d'A.E.P.
  - La réduction des coûts de l'énergie.

La capacité d'un réservoir dépend du mode d'exploitation des ouvrages de la partie amont et de la variabilité de la demande. Pour l'emplacement d'un réservoir, selon que l'agglomération est située en plaine ou en terrain accidenté, il peut être soit enterré, soit semi-enterré, soit surélevé.

#### ii. Pompe

Une pompe est un dispositif auquel l'énergie mécanique est appliquée et transférée à l'eau en tant que charge hydraulique. La charge supplémentaire s'appelle la charge de pompe et est une fonction du débit de la pompe. Les pompes centrifuges sont plus souvent les pompes utilisées dans des systèmes d'alimentation en eau.



**Fig I.10.** Marquis pompe à eau mjm101x



**Fig I.11.** Pompe de surface Calpeda CT 60

### iii. Joints

Ils ont pour fonction d'assurer l'étanchéité des jointures des tuyaux et faire face aux sollicitations mécaniques et chimiques. Pour cela, ils doivent épouser parfaitement la loge qui leur est destinée. Les joints Figure (I.12) constituent la partie la plus fragile de la canalisation à cause de leur souplesse ; tout mouvement du tuyau s'articule sur le joint, ce qui provoque en lui des usures mécaniques. L'action des produits chlorés de l'eau et le dessèchement induisent le vieillissement des joints. Il existe trois principaux types de joints : mécaniques, à emboîtement et à bride.

Les joints mécaniques ou à emboîtement sont utilisés pour relier les conduites enfouies dans le sol, alors que les joints à bride sont utilisés pour raccorder des tronçons à l'intérieur des constructions station de pompage, station de traitement. etc.



**Fig I.12.** Joints de canalisation d'eau

### iv. Vanne

Elles permettent de maîtriser les écoulements dans le réseau, donc de mieux gérer celui-ci. Il existe plusieurs types de vannes qui satisfont à des besoins variés :

- Les vannes d'isolement : permettent d'isoler certains tronçons qu'on veut inspecter, réparer ou entretenir. On distingue deux types : les robinets à papillon pour les conduites de gros diamètres et les robinets-vannes pour les conduites de petits diamètres.
- Les vannes à clapets de non-retour : permettent de diriger l'écoulement dans un seul sens. Elles sont installées sur les conduites de refoulement.
- Les vannes de réduction de pression : permettent de réduire la pression à une valeur prédéterminée.



Fig I.13. Vanne plastique

#### d. Age des canalisations [4]

Le vieillissement des canalisations et de leurs accessoires est par nature, inéluctable les matériaux se dégradent ou se fragilisent au fil du temps, l'environnement évolue et les terrains bougent. Cependant, le vieillissement ne dépend pas que de l'âge de la conduite mais aussi

- De son environnement : il existe des canalisations de plus de cent ans d'âge en très bon état et d'autres de dix ans à peine qui sont déjà hors usage. Car ils sont situés en terrain instable ou agressif.
- Des qualités intrinsèques des matériaux : résistance à la corrosion insuffisante, mauvais revêtement de surfaces ...etc.
- Des conditions d'exploitation et de pose du réseau : remblayages exécutés avec des matériaux inadéquat et sans précautions, coups de bélier.

### I.3.Fuites

#### I.3.1. Définition d'une fuite

C'est une détérioration qui provoque le risque de dysfonctionnement de réseau ; il apparait sous forme une perte physique quantitative du fluide distribué. les fuites produisent des vibrations mécanique et acoustiques dû aux fluctuations de la pression du fluide dans la conduite, elles sont localisées sur les vannes, les points de raccordement, dans les joints et les tube même de la conduite.

#### I.3.2. Types des fuites

Généralement les ruptures transversales ont lieu sur les petits diamètres alors que les gros diamètres subissent plutôt des ruptures longitudinales ou des piquages. Aussi, les fuites sur tuyaux ont surtout lieu sur des petits diamètres, alors que les diamètres plus élevés ont des fuites au niveau des joints (Merzouk, 2005). Les types de ruptures les plus courants dans les conduites de distribution sont illustrés dans le tableau 1.2 (CNRC 2003).

**Tableau I.2** Les modes de défaillance des conduites de distribution.

Type de fuite	La cause
Fissure Circulaire	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Contrainte de flexion due au gel.</li> <li>• Contrainte de flexion due à de l'argile gonflante.</li> <li>• Contraction thermique.</li> <li>• Contrainte longitudinale à proximité des robinets et des raccords.</li> </ul>
Rupture Longitudinale	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Contrainte périphérique due à la pression intime de l'eau.</li> <li>• Contrainte annulaire due à la surcharge exercée par la couverture de sol.</li> <li>• Contrainte périphérique due à de l'eau gelée.</li> <li>• Contrainte annulaire due à la surcharge exercée par la circulation.</li> </ul>
Déboîtement	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dilatation du matériau du joint.</li> </ul>
Cisaillement de l'emboîtement	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Enfoncement excessif du cordon dans l'emboîtement.</li> <li>• Contrainte de flexion</li> </ul>
Rupture en colimaçon	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Combinaison de contrainte de flexion et de contrainte périphérique due à la pression interne de l'eau.</li> </ul>
Rupture/Éclatement	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Contrainte périphérique due à la pression interne de l'eau.</li> <li>• Corrosion des fils de précontrainte en acier dans les tuyaux suppression en béton.</li> </ul>
Trou traversant	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Corrosion par piqûres.</li> <li>• Imperfection dans le moulage.</li> </ul>

### I.3.3. Cause des fuites

De toutes façons, les fuites sont la source essentielle des pertes sur la distribution dans une canal. Elles sont provenues des nombreuses causes

- Déstabilisation du sol de pose des canalisations lors de travaux, terrassements, remblaiement ou compactage du terrain
- Mauvaise pose des canalisations ou malfaçons dans les travaux
- Pression importante dans le réseau de distribution
- Choc hydraulique (dû à la fermeture brusque d'une vanne ou d'un autre appareil) entraînant une surpression (phénomène du « coup de bélier »)
- Modification dans le temps de la tenue des sols impactant la stabilité d'assise des canalisations posées.
- Vieillesse des joints d'étanchéité
- Raccordements à moindre frais et mal faits des branchements et équipements publics

- Phénomènes de corrosion (pour les tuyaux en acier)
- Corrosion interne si l'eau est agressive
- Corrosion externe suivant la nature du sol ou son humidité. [5]

#### **I.3.4. Débit de fuite**

Les fuites sont caractérisées quantitativement par le débit du fluide qui s'échappe du confinement. Il s'exprime par le volume qui circule à travers les fuites par unité de temps (l'unité l'égal étant le mètre cube par seconde ( $m^3/s$ )). [6]

#### **I.3.5. Recherche de fuite**

Dans certains contextes, quelques fuites représentent une part importante du volume perdu. Il est donc souvent opportun d'entreprendre une campagne de recherche de fuite ciblée sur une partie restreinte du réseau, avant d'avoir défini une stratégie d'ensemble. Les efforts de recherche peuvent être accentués sur des zones du réseau connues pour leur proportion à avoir une fuite.

Dans un premier temps, les équipes de détection des fuites déterminent grossièrement l'emplacement des fuites dans le réseau de distribution en observant tous les points accessibles du réseau (p. ex. les bouches d'incendie et les vannes).

Ensuite on repère plus précisément les zones suspectes en auscultant la surface du sol, directement au-dessus de la conduite et à intervalles rapprochés (environ 1 m). Une autre méthode de repérage exact et automatique des fuites consiste à utiliser des appareils modernes de corrélation des bruits de fuites. Ces appareils sont employés couramment depuis quelques années. Ils sont normalement plus précis que les appareils d'auscultation.

Les fuites peuvent également être détectées à l'aide de techniques non acoustiques (p. ex. gaz traceur, imagerie infrarouge et géo radar), mais celles-ci sont encore très peu utilisées et leur efficacité n'est pas aussi bien établie que celle des méthodes acoustiques classiques. [7]

#### **I.3.6. Techniques de détection de fuite**

##### **a. L'observation visuelle**

L'observation visuelle est une traditionnelle et aussi la méthode la plus simple pour détecter les fuites. Cela peut être fait par un personnel expérimenté qui détectent et localisent les fuites soit en volant, conduisant ou en marchant le long du pipeline, la recherche de modèles anormaux à proximité du pipeline ou en écoutant les bruits générés par la fuite. L'efficacité de cette technique dépend de l'expérience de l'opérateur, la taille de la fuite et de la fréquence d'inspection. Pour certains produits, cette technique peut également impliquer l'utilisation de

chiens formés, qui sont sensibles aux substances d'odeur qui pourraient être libérés du pipeline [8].

### **b. Technique acoustique**

Les techniques de détection et de localisation utilisées actuellement sont en majorité basées sur le bruit émis par les fuites [9].

À mesure que l'eau sort de la conduite pressurisée, elle perd et transmet de l'énergie à la paroi de la conduite et au sol environnant. Ce transfert d'énergie se traduit alors par la génération d'ondes sonores pouvant être captées par des appareils électroniques et parfois même par l'oreille humaine. Différents facteurs peuvent influencer la propagation des ondes sonores dont la pression à l'intérieur de la conduite, le type de matériel et le diamètre de la conduite, le type de sol et le type de surface [10].

Depuis plusieurs années, pour limiter ce problème, des amplificateurs ont été ajoutés aux équipements de détection. En plus du problème de transmission des ondes s'ajoute celui causé par les bruits parasites. Puisque ces bruits proviennent en grande partie de la circulation routière, du vent et de la pluie, la détection est généralement plus fructueuse de nuit. Dans le but d'optimiser les différents équipements, des filtres permettant de sélectionner la plage sonore sont aussi disponibles.

### **i. Localisation par autocorrélation**

La détection par autocorrélation acoustique peut favorablement remplacer la détection par écoute sur les conduites non métalliques et les conduites de grand diamètre, car les corrélateurs de bruits de fuites sont moins sensibles aux bruits parasites et à la capacité d'écoute des inspecteurs.

La détection par autocorrélation acoustique consiste à mesurer les bruits émis par une conduite aux deux points qui délimitent l'emplacement d'une fuite suspectée [11].

Le point de fuite est calculé par une relation mathématique simple et facile à calculer qui comprend le décalage temporel entre les signaux mesurés, la distance entre les points de mesure et la vitesse de propagation du son dans la conduite.

### ❖ Principe de localisation par autocorrélation acoustique

La figure ci-dessous représente les différentes distances qui permettent la localisation de la fuite après le calcul du décalage temporel ( $\Delta t$ ) par autocorrélation des signaux.



Fig I.14. Détecteur par autocorrélation acoustique

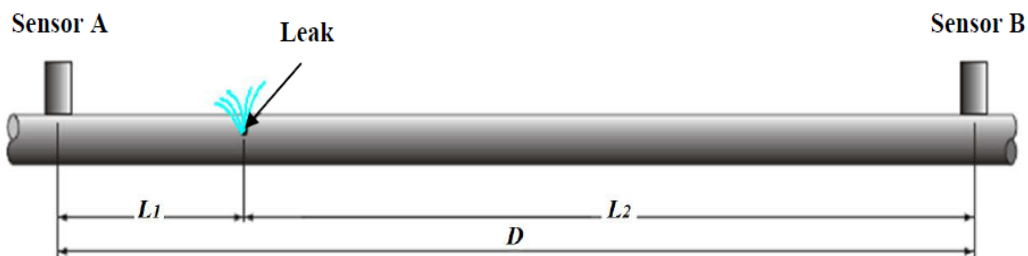


Fig I.15. Principe de localisation par autocorrélation acoustique

D : distance entre les deux capteurs (m)

V : Vitesse de propagation d'onde acoustique (m/s)

L1, L2 : distance entre la fuite et les capteurs

Temps mis par le signal (1) pour arriver :  $T1 = \frac{L1}{V}$

Temps mis par le signal (2) pour arriver :  $T2 = \frac{L2}{V}$

Décalage de temps du signal (2) par rapport au signal (1) :

$$\Delta T = T1 - T2 = \frac{(L2 - L1)}{V} \quad (I.1)$$

$$L2 = D - L1 \rightarrow \quad (I.2)$$

$$\Delta T = \frac{(D - 2L1)}{V} \rightarrow \quad (I.3)$$

$$L1 = \frac{(D - V\Delta T)}{2} \quad (I.4)$$

Paramètres nécessaires à une corrélation précise :

- Le diamètre de la conduite et ces facteurs de fabrication déterminent la vitesse.
- La nature de propagation du son dans la conduite
- La longueur réelle entre les deux capteurs.
- l'homogénéité de la conduite entre les deux capteurs

La technique de détection de corrélation présente, par rapport aux méthodes acoustiques traditionnelles les avantages suivants

- les bruits parasites du sol et du milieu ambiant sont quasiment sans influence sur le résultat.
- Le signal restitué n'est pas influencé par l'effet d'atténuation des bruits dans le sol mais seulement par une atténuation de la propagation du bruit de fuite sur la conduite.
- Le résultat est obtenu directement et non par approches successives (cas des écoutes sur les points d'accès et des écoutes au sol).
- La précision du résultat est excellente ( $\approx 0,5$  m), dans la mesure où les données de saisie sont conformes à la réalité du terrain.

## ii. Détection par enregistrement

La détection acoustique manuelle, peut surtout occulter des fuites et des pertes d'eau importantes, vu l'importance du temps qui peut séparer l'occurrence d'une fuite et sa détection. Pour pallier les limites de la détection acoustique manuelle, les gestionnaires des fuites peuvent aujourd'hui recourir à la détection acoustique automatique, et plus particulièrement aux enregistreurs acoustiques. Les enregistreurs acoustiques sont des appareils compacts composés d'un capteur de vibrations (ou hydrophone), d'un module d'enregistrement de données programmable et d'un module de communication. Déployés en grand nombre, temporairement ou en permanence, sur les vannes souterraines, à une distance qui varie entre 200 et 500 mètres, ces enregistreurs sont programmés pour écouter les bruits des conduites pendant les périodes les plus calmes de la nuit, normalement entre 2 heures et 4 heures. Ils fonctionnent toutes les nuits et transmettent, sans fil, une alerte à un récepteur, mobile ou fixe, dès qu'ils suspectent une fuite.

Sur les réseaux d'eau équipés de lecture automatique des compteurs (LAC), il est possible aujourd'hui de fixer les enregistreurs de bruits sur la conduite de branchement du compteur d'eau des particuliers et de profiter de l'infrastructure de communication sans fil de la LAC pour transmettre les alertes de fuite. De même, la « corrélation des enregistreurs de bruits » permet désormais d'enregistrer un court échantillon du bruit produit par une fuite, de le stocker et de le télécharger sur un ordinateur, via un récepteur fixe ou mobile, où il est corrélé au bruit pour localiser la fuite suspectée [12].



**Fig I.16.** Enregistreur acoustique

### iii. Détection par écoute

La détection par écoute s'effectue à l'aide d'appareils manuels simples, comme l'aqua phone ou le géophone. Malgré leur simplicité, ces appareils sont plus efficaces dans les mains d'inspecteurs expérimentés. La détection par écoute peut également s'effectuer à l'aide de dispositifs électroniques modernes souvent équipés d'amplificateurs de signaux et de filtres de bruits qui permettent aux bruits de fuites de se démarquer dans des environnements bruyants.



**Fig I.17.** Personne effectuant une détection par écoute.

### iv. Détection par immersion

Pour les conduites de grand diamètre, les problèmes posés par la détection par écoute peuvent être résolus par l'immersion d'hydrophones dans les conduites [13].

Dans une application de ce type, des inspecteurs ont immergé un hydrophone captif dans une conduite de grand diamètre, au niveau d'un robinet spécial, pour l'y tracter ensuite à l'aide d'un appareil en forme de parachute, afin de se rapprocher le plus possible des fuites. L'hydrophone

mesure les niveaux sonores des fuites tout au long de son parcours, tandis que les inspecteurs suivent sa position à la surface. Les points de fuite potentiels correspondent alors aux pics sonores enregistrés. Dans une autre application de détection par immersion, les inspecteurs ont immergé une sphère en aluminium enveloppée de mousse flottante contenant un hydrophone et ses accessoires électroniques, dans une conduite de grand diamètre, au niveau d'un robinet spécial. La sphère non captive est ensuite poussée dans la conduite par l'écoulement de l'eau puis repêchée à une vanne en aval. Les systèmes de détection par immersion sont très spécialisés et très sophistiqués et conviennent plus particulièrement aux conduites de grand diamètre.

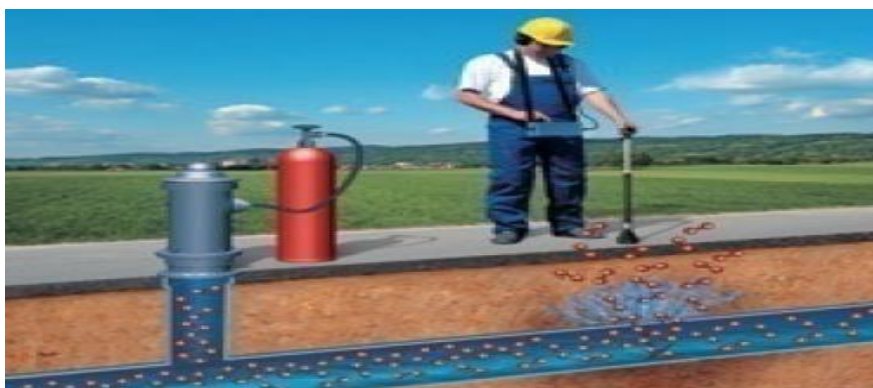


**Fig I.18 .** Schéma de la détection par immersion

### **c. Techniques non acoustiques**

#### **i. Technique du gaz traceur**

Cette technique consiste à injecter dans une partie isolée d'une conduite un gaz non toxique, plus léger que l'air et insoluble dans l'eau (par exemple, l'hélium ou l'hydrogène). Le gaz s'échappe par l'ouverture de la fuite, puis atteint la surface en s'infiltrant à travers le sol et la chaussée. On repère la fuite en balayant la surface du sol située juste au-dessus de la conduite au moyen d'un détecteur de gaz très sensible [14].



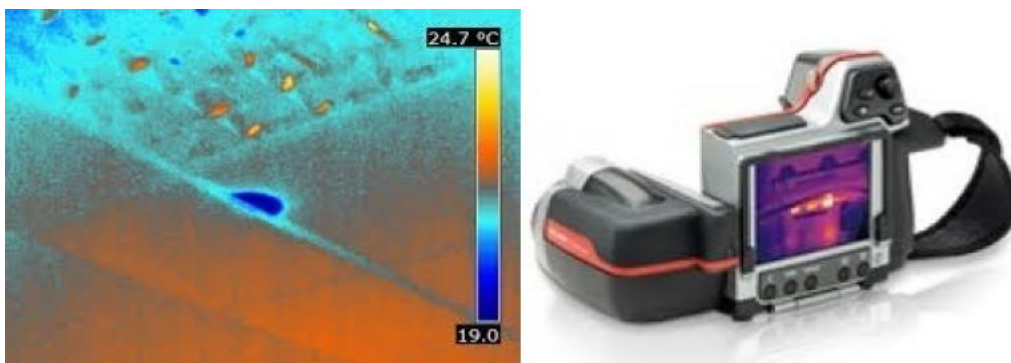
**Fig I.19.** Une détection par gaz traceur

**• Avantages de la technique du gaz traceur**

- La technique du traçage à gaz (hélium) est polyvalente, fiable et économique.
- Elle est indépendante de la nature des réseaux (métallique ou plastique) et de leur diamètre.
- Son efficacité n'est pas perturbée par les bruits environnants.
- Elle permet de déceler des fuites « silencieuses ».
- Le gestionnaire du réseau sait immédiatement s'il s'agit d'une grosse fuite à réparer d'urgence, d'une fuite mineure à traiter ultérieurement ou d'un simple suintement.
- L'inspection est rapide, avec environ 4 km parcourus par jour.
- Aucune manœuvre préalable n'est requise.

**ii. Thermographie**

Le principe d'utilisation de la thermographie pour la détection des fuites est le suivant : l'eau s'échappant d'une conduite souterraine modifie les caractéristiques thermiques du sol environnant (p.ex. elle crée une zone d'absorption thermique plus efficace que le sol sec environnant). Les anomalies thermiques produites au-dessus de la conduite sont décelées par des caméras infrarouges portatives ou embarquées dans un véhicule terrestre ou un avion.



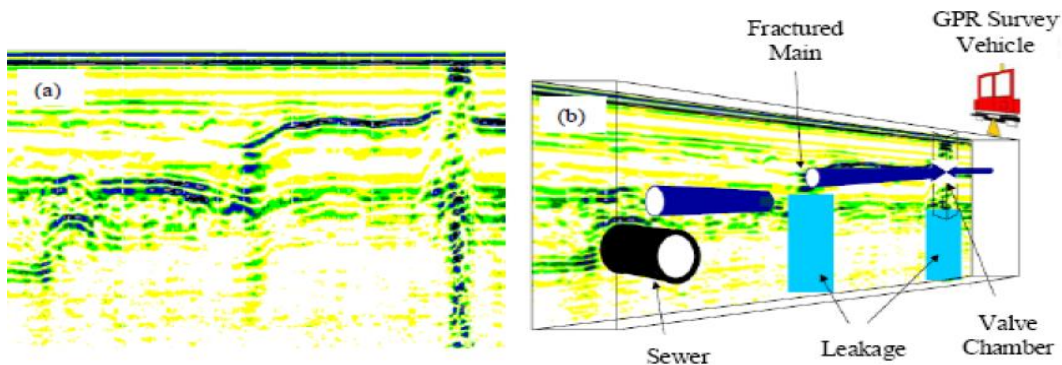
**Fig I.20.** Détection thermographie par caméra infrarouge

**iii. Géo-radar (GPR)**

Les radars permettent de repérer de deux façons les fuites dans les conduites d'eau enfouies : ils détectent les vides créés dans le sol par l'eau qui fuit et circule autour de la conduite, ou bien les segments de canalisations qui semblent plus profonds qu'ils ne le sont en réalité à cause de l'augmentation de la valeur de la constante diélectrique du sol gorgé d'eau, aux alentours de la fuite.

Les ondes sont partiellement réfléchies vers la surface du sol lorsqu'elles rencontrent une anomalie dans les propriétés diélectriques (p. ex. un vide ou une conduite).

En balayant la surface du sol, on obtient la taille et la forme de l'objet sur l'écran du radar. Le décalage entre le moment où l'onde est émise et le moment où elle est réfléchi détermine la profondeur de l'objet qui réfléchit l'onde [16].



**Fig I.21.** Données GPR avant (a) et après (b) l'interprétation de l'image.

#### iv. Chute de Pression

Le contrôle d'étanchéité par la méthode de chute de pression est une méthode qui consiste à charger l'installation en gaz (azote ou fluide frigorigène) jusqu'à la pression maximale de service. Ensuite, la variation de pression est mesurée pendant une durée définie dépendant du volume de l'installation.

La température doit être enregistrée, car la pression de l'installation varie avec la température alors que le but du contrôle est de mesurer d'éventuelles variations de pression dues à des fuites [16].

Cette méthode de détection de fuites est le plus souvent utilisée sur le terrain, lors de l'installation comme en fin de production et avant la charge en fluide frigorigène. Ce contrôle permet d'obtenir une connaissance de l'état global de l'étanchéité du système.



**Fig I.22.** Mesure de pression

**v. Difficultés dans le cas des tubes en plastique**

La plupart des utilisateurs professionnels estiment que les méthodes acoustiques permettent de bien détecter les fuites dans les conduites en métal mais qu'elles sont problématiques dans le cas des tubes en plastique. Le matériel de détection acoustique des fuites a été conçu principalement pour les conduites métalliques. Or les signaux émis par les fuites dans les tubes en plastique ont des caractéristiques acoustiques sensiblement différentes de ceux qui sont produits par des fuites dans des conduites métalliques. Les tubes en plastique sont plus silencieux et ne transmettent pas les bruits autant que les conduites métalliques. De plus, les bruits produits par les fuites dans les tubes en plastique sont constitués principalement de signaux de basse fréquence, contrairement à ceux émis par les fuites dans les conduites métalliques [17].

**I.4. Conclusion**

Les fuites dans les réseaux de distribution d'eau est un problème incontournable préoccupant les gouvernements et les responsables des réseaux dans le monde. A cet effet ces derniers ont besoin d'agir et d'utiliser des moyens en perpétuelle évolution afin de résoudre le problème dans des délais records. On a exposé dans ce chapitre les différents réseaux de distribution et nous avons montré que ces réseaux souffrent à cause des dégradations ou bien des mouvements causés par le trafic routier. Nous avons traité également les différents détecteurs qui sont utilisés à cet effet. Afin de traiter un problème lié à un type d'écoulement et connaître ces caractéristiques, on a besoin de connaître des informations ayant une relation avec la mécanique des fluides. Ces derniers vont être exposés dans le deuxième chapitre.

# **Chapitre II**

## **Notions de mécanique des fluides**

## Chapitre II Notions de mécanique des fluides

### II.1. Introduction

La mécanique de fluide traite le comportement des fluides et des forces internes qui sont lui associée. C'est la science des lois de l'écoulement des fluides. L'étude de la mécanique des fluides remonte au moins à l'époque de la Grèce antique avec le célèbre savon Archimède, connu par son principe qui fut à l'origine de la statique des fluides. Aujourd'hui, la dynamique des fluides est un domaine actif de la recherche avec de nombreux problèmes non résolus ou partiellement résolus.

Dans ce chapitre, nous allons classer les types de fluides et citer leurs caractéristiques. Une attention particulière est donnée aux équations de BERNOULLI et les théorèmes relatifs aux dynamiques de fluide incompressibles réels. Nous allons définir aussi les notions des différentes pressions. Nous terminerons par des informations sur les transmetteurs de pression et en particulier ceux qu'on va utiliser dans notre application.

### II.2. Fluides

#### II.2.1. Définition d'un fluide

On appelle fluide un corps qui n'a pas de forme propre et qui est facilement déformable. Les liquides et les gaz sont des fluides, ainsi que des corps plus complexes tels que les polymères ou les fluides alimentaires. Ils se déforment et s'écoulent facilement. Un fluide englobe principalement deux états physiques : l'état gazeux et l'état liquide. Il existe deux catégories de fluides : les fluides newtoniens et les fluides non-newtoniens.

Un fluide newtonien a une viscosité qui ne dépend ni du temps ni de la force appliquée à ce dernier. Exemple : l'eau, l'air et la plupart des gaz. En revanche, la viscosité d'un fluide non-newtonien peut dépendre de ces deux variables.

Exemples : le sang, les gels, les boues, les pâtes, les suspensions et les émulsions.

#### II.2.2. Type de fluide [18]

##### a. Fluide Parfait

Soit un système fluide, c'est-à-dire un volume délimité par une surface fermée  $\Sigma$  fictive ou non.

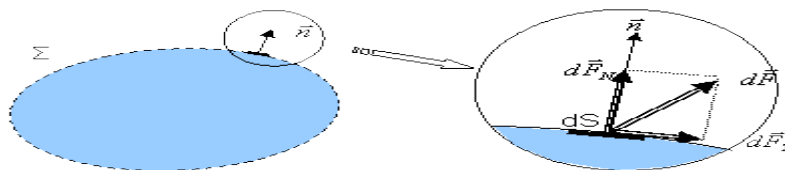


Fig II.1. Un domaine d'un fluide parfait

Considérons  $d\vec{F}$  la force d'interaction au niveau de la surface élémentaire  $dS$  de normale  $\vec{n}$  entre le fluide et le milieu extérieur.

On peut toujours décomposer  $d\vec{F}$  en deux composantes :

- une composante  $d\vec{F}_T$  tangentielle à  $dS$ .
- une composante  $d\vec{F}_N$  normale à  $dS$ .

En mécanique des fluides, un fluide est dit parfait s'il est possible de décrire son mouvement sans prendre en compte les effets de frottement. C'est-à-dire quand la composante  $d\vec{F}_T$  est nulle. Autrement dit, la force  $d\vec{F}$  est normale à l'élément de surface  $dS$ .

### b. Fluide Réel

Contrairement à un fluide parfait, qui n'est qu'un modèle pour simplifier les calculs, pratiquement inexistant dans la nature, dans un fluide réel les forces tangentielles de frottement interne qui s'opposent au glissement relatif des couches fluides sont prise en considération. Ce phénomène de frottement visqueux apparaît lors du mouvement du fluide.

C'est uniquement au repos, qu'on admettra que le fluide réel se comporte comme un fluide parfait, et on suppose que les forces de contact sont perpendiculaires aux éléments de surface sur lesquels elles s'exercent. La statique des fluides réels se confond avec la statique des fluides parfaits.

### c. Fluide incompressible

Un fluide est dit incompressible lorsque le volume occupé par une masse donnée ne varie pas en fonction de la pression extérieure. Les liquides peuvent être considérés comme des fluides incompressibles (eau, huile, etc.)

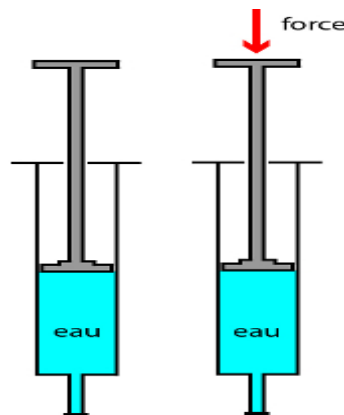


Fig II.2. Eau Fluide incompressible

### b. Fluide compressible

Un fluide est dit compressible lorsque le volume occupé par une masse donnée varie en fonction de la pression extérieure. Les gaz sont des fluides compressibles. Par exemple, l'air, l'hydrogène, le méthane à l'état gazeux, sont considérés comme des fluides compressibles.

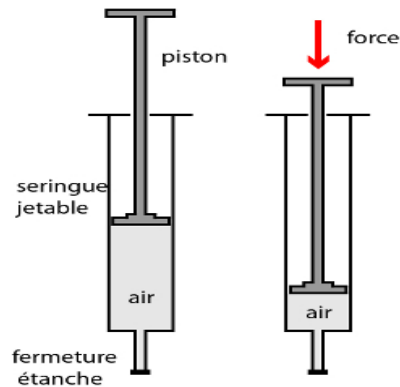


Fig II.3. Air Fluide compressible

### II.2.3. Caractéristique physique d'un fluide

#### a. Masse volumique

La masse volumique d'une substance, aussi appelée densité volumique de masse est une grandeur physique qui caractérise la masse de cette substance par unité de volume. Elle est généralement notée par les lettres grecques  $\rho$  (rhô) ou  $\mu$  (mu). On utilise ces deux notations en fonction des habitudes du domaine de travail donc

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (II.1)$$

où :  $\rho$  : Masse volumique en ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ),

$m$  : masses-en (kg),

$V$  : volume en ( $\text{m}^3$ ).

Tableau II.1. Table de masse volumique et type de fluide

Fluide	Masse volumique ( $\text{Kg}/\text{m}^3$ )	Type de fluide
PEHD	$0,980.10^3$	<b>Incompressible</b>
Eau	$0,99829.103$ à $20\text{ }^\circ\text{C}$	
Huile d'olive	$0,918. 10^3$	
Mercure	$13,546. 10^3$	
Air	$0,001205. 103$ à $20\text{ }^\circ\text{C}$	<b>Compressible</b>
Hydrogène	$0,000085. 103$	
Méthane	$0,000717. 103$	

**b. Poids volumique**

Est le poids par unité de volume d'un matériau. Le symbole du poids spécifique est  $\gamma$  (la lettre grecque gamma). Le poids spécifique de l'eau à la surface de la Terre à 5 °C est de 9 807 N/m<sup>3</sup>.

$$\gamma = \frac{m \cdot g}{V} = \rho \cdot g \quad (II.2)$$

$\gamma$  : Poids volumique en (N/m<sup>3</sup>).

m : masses-en (kg),

g : accélération de la pesanteur en (m/s<sup>2</sup>),

V : volume en (m<sup>3</sup>)

**c. Densité [19]**

Densité est le rapport de sa masse volumique à la masse volumique d'un corps pris comme référence. Pour les liquides et les solides, le corps de référence est l'eau pure à 4 °C. Dans le cas de gaz ou de vapeur, le corps de référence gazeux est l'air, à la même température et sous la même pression.

$$d = \frac{\text{masse volumique du fluide}}{\text{masse volumique d'un fluide de référence}} = \frac{\rho}{\rho_{\text{ref}}} \quad (II.3)$$

**d. Viscosité [20]**

La viscosité tient son nom du Latin *Viscum* signifiant résistance à l'écoulement se produisant dans la masse d'une matière. Elle est définie aussi comme la résistance à l'écoulement des différentes couches d'un fluide (les unes sur les autres). Lorsque la viscosité augmente, la capacité du fluide à s'écouler diminue.

La viscosité est le critère qui différencie un fluide réel d'un fluide parfait. Elle est la cause des frottements internes qui entraînent la dissipation d'énergie mécanique en chaleur.

**i. Viscosité dynamique**

La viscosité dynamique correspond à la contrainte de cisaillement qui accompagne l'existence d'un gradient de vitesse d'écoulement dans la matière.

On classe notamment les huiles mécaniques selon leur viscosité, en fonction des besoins de lubrification du moteur et des températures auxquelles l'huile sera soumise lors du fonctionnement du moteur.

Si le coefficient de viscosité dynamique  $\mu$  des liquides est bien supérieur à celui des gaz, cependant le coefficient de viscosité cinématique est souvent inférieur.

Contrairement au cas des gaz, la viscosité des liquides diminue avec la température. Des formules empiriques ou semi-empiriques permettent de relier  $\mu$  à  $T$ . C'est par exemple celle de Walther qui est applicable aux huiles de graissage :

$$\mu = \mu_0 e^{\left(\frac{T_0}{T}\right)^m} \quad (II.4)$$

avec  $m$  une constante qui dépend du liquide étudié.

## ii. Viscosité cinématique

Beaucoup d'équations de la mécanique des fluides comprennent le ratio  $\mu/\rho$ . Parce qu'il se produit si souvent, ce ratio a été donné le nom spécial viscosité cinématique. Le symbole utilisé pour identifier la viscosité cinématique est  $\nu$ . L'unité de la viscosité cinématique est  $[m^2/s]$ , comme indiqué.

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} [m^2/s] \quad (II.5)$$

-Lorsque la température augmente, la viscosité d'un fluide décroît car sa densité diminue.

## II.3. Pression

### II.3.1. Définition de pression

Un corps liquide ou gazeux enfermé dans un récipient, qu'il remplit entièrement, exerce sur toutes les parois de celui-ci une force dite de pression. La pression est une grandeur dérivée du système international. Elle est définie comme le quotient d'une force par une surface. Ce quotient est indépendant de l'orientation de la surface. La pression s'exerce perpendiculairement à la surface considérée. [21]

$$P = \frac{F}{S} \quad (II.6)$$

P : La pression (Pascal)

F : La force (Newton)

S : La surface (mètre carré)

### II.3.2. Différentes unités de pression

La relation  $p = \frac{dF}{dS}$  Définit, à la fois, la pression et l'unité de pression en tant qu'unité dérivée. Cette unité, le pascal (Pa), correspond dans le Système International (S.I.) à une pression uniforme exerçant sur une surface d'un mètre carré, une force totale d'un newton. La pression d'un pascal étant relativement faible on utilise de préférence pour la mesure des pressions dans l'industrie son multiple le bar valant 105 pascals. [22]

**Tableau II.2.** Table de conversion d'unités (Pascal, Bar, Atmosphère)

	<b>Pascal (Pa)</b>	<b>Bar (b)</b>	<b>Atmosphère</b>
(1 pascal) <sup>1</sup>	1	$10^{-5}$	$9,869 \cdot 10^{-6}$
(1 bar) <sup>2</sup>	$10^5$	1	0,987167
(1kgf/cm <sup>2</sup> ) <sup>3</sup>	98039	0,9803	0,968
(1atmosphère) <sup>4</sup>	101 325	1,0133	1
(1 cm d'eau) <sup>5</sup>	98,04	$980 \cdot 10^{-6}$	$968 \cdot 10^{-6}$
(1 mm de Hg) <sup>6</sup>	133	$1,333 \cdot 10^{-3}$	$1,316 \cdot 10^{-3}$
(1mb) <sup>7</sup>	102	$10^{-3}$	$987 \cdot 10^{-6}$
(1 inch Hg) <sup>8</sup>	$3,386 \cdot 10^3$	$33,86 \cdot 10^{-3}$	$33,42 \cdot 10^{-3}$
(1 psi) <sup>9</sup>	6892	$68,9 \cdot 10^{-3}$	$68 \cdot 10^{-3}$
(1 torr) <sup>10</sup>	133	$1,33 \cdot 10^{-3}$	$1,316 \cdot 10^{-3}$

### II.3.3. Différents types de pression [23]

#### a. Pression atmosphérique

La pression atmosphérique moyenne au niveau de la mer, à 15 °C, est de 1013 mbar. Elle peut varier, de  $\pm 25$  mbar, avec la pluie ou le beau temps. Elle est fonction de l'altitude (hydrostatique).

#### b. Pression relative

C'est la différence de pression par rapport à la pression atmosphérique. C'est la plus souvent utilisée, car la plupart des capteurs, soumis à la pression atmosphérique, mesurent en relatif.

Pour mesurer en absolu, il leur faut un vide poussé dans une chambre dite de référence.

Exemple : La pression de gonflage d'un pneu de voiture.

#### c. Pression absolue

C'est la pression réelle, dont on tient compte dans les calculs sur les gaz. Elle est comptée à partir de zéro.

**Remarque :** On peut rajouter 1 bar à la pression relative pour avoir une approximation de la pression absolue.

#### d. Vide

Est une pression inférieure à la pression atmosphérique. Le vide parfait correspond théoriquement à une pression absolue nulle. Il ne peut être atteint, ni dépassé. Quand on s'en approche, on parle alors de vide poussé.

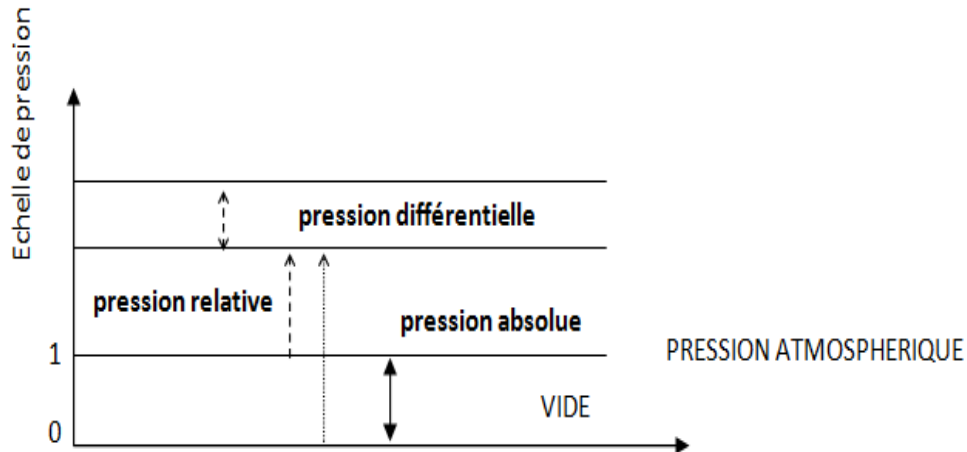


Fig II.4. Types des pression

#### e. Pression pour les fluides (liquide et gaz) [24]

Les fluides sont également soumis à la force de pesanteur. C'est pourquoi par exemple, dans le cas d'une colonne liquide, contenue dans un tube ouvert, placé verticalement, la pression en un point M, à la distance h de la surface libre, est égale à la pression atmosphérique  $p_0$  augmentée du poids de la colonne s'exerçant sur l'unité de surface. De même, pour un fluide soumis à une accélération quelconque, il y a lieu de tenir compte de l'influence de la force d'inertie sur la pression.

##### i. Pression hydrostatique

À l'intérieur d'une colonne de fluide se crée une pression due au poids de la masse de fluide sur la surface considérée. Cette pression est Pour chacun des trois récipients, la pression au fond de ceux-ci est identique :  $P1 = P2 = P3 = P4 = \rho \times g \times h$

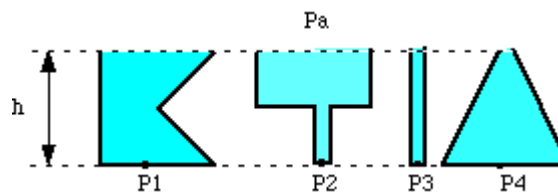


Fig II.5. Différentes formes d'ingénierie

## ii. Pression due à des forces extérieures

Si la force  $F$  agit sur un fluide enfermé, il en résulte une pression

$$P_0 = \frac{F}{S} \quad (II.7)$$

Si l'on néglige la pression hydrostatique, la pression est la même dans tout le liquide.

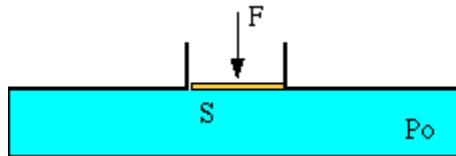


Fig II.6. Pression due à des forces extérieures

## iii. Pression hydrodynamique

Un fluide se déplaçant crée une pression supplémentaire  $P$  :

$$p = \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (II.8)$$

avec  $V$  la vitesse de déplacement du fluide. La pression totale est la somme de la pression hydrostatique, de la pression due aux forces extérieures et de la pression hydrodynamique. Celle-ci a la même valeur en tous points pour un fluide en mouvement horizontal (incompressible de viscosité négligeable), c'est le théorème de Bernoulli.

## II.4. Dynamique des fluides incompressible.

### II.4.1. Définition des fluides réelle

Un fluide est dit réel si, pendant son mouvement, les forces de contact ne sont pas perpendiculaires aux éléments de surface sur lesquelles elles s'exercent (elles possèdent donc des composantes tangentielles qui s'opposent au glissement des couches fluides les unes sur les autres). Cette résistance est caractérisée par la viscosité [25].

### II.4.2. Ecoulement permanent

L'écoulement d'un fluide est dit permanent si le champ des vecteurs « vitesses » des particules fluides est constant dans le temps. Notons cependant que cela ne veut pas dire que le champ des vecteurs « vitesse » est uniforme dans l'espace. L'écoulement permanent d'un fluide parfait incompressible est le seul que nous aurons à considérer dans ce cours. Un écoulement non permanent conduirait à considérer les effets d'inertie des masses fluides [26].

### II.4.3. Régimes d'écoulement [27]

Les expériences réalisées par Reynolds en 1883 lors de l'écoulement d'un liquide dans une conduite cylindrique rectiligne dans laquelle arrive également un filet de liquide coloré, ont montré l'existence de deux régimes d'écoulement : régime laminaire et régime turbulent.

- Régime laminaire : Les filets fluides sont des lignes régulières, sensiblement parallèles entre elles.

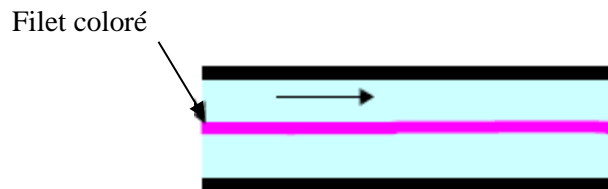


Fig II.7. Régime laminaire

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



Fig II.8. Régime turbulent

Des études plus fines ont montré qu'il existe encore une subdivision entre :

- les écoulements turbulents lisses.
- les écoulements turbulents rugueux.

La limite entre ces différents types d'écoulements est évidemment difficile à appréhender.

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

$$R_e = \frac{V \cdot d}{\nu} \quad (II.9)$$

- $V$  : Vitesse moyenne d'écoulement à travers la section considérée en (m/s).
- $d$  : Diamètre de la conduite ou largeur de la veine fluide en (m).
- $\nu$  : Viscosité cinématique du fluide ( $m^2/s$ ).

Résultats empirique à titre indicatif :

Si  $Re < 2000$  l'écoulement est laminaire

Si  $Re > 2000$  l'écoulement est turbulent :

- Lisse si  $2000 < Re < 100000$

- Rugueux si  $Re > 100000$

#### II.4.4. Notion des débits [28]

##### a. Débit massique

Dans une section droite quelconque  $S$  de la veine fluide à travers laquelle le fluide s'écoule à la vitesse moyenne  $V$

$$Qm = \rho \cdot S \cdot V \quad (II.10)$$

où  $Qm$  débit massique en (kg/s).

$\rho$  masse volumique en ( $kg/m^3$ ).

$S$  section de la veine fluide en ( $m^2$ ).

$V$  vitesse moyenne du fluide à travers ( $S$ ) en ( $m/s$ ).

##### b. débit volumique

Le débit volumique d'une veine fluide est la limite du rapport  $\frac{dV}{dt}$  quand  $dt$  tend vers zéro

$$Qv = \frac{dV}{dt} \quad (II.11)$$

Où  $Qv$  volume de fluide par unité de temps qui traverse une section droite quelconque de la conduite  $dV$  volume élémentaire en ( $m^3$ ), ayant traversé une surface  $S(m^2)$  pendant un intervalle de temps  $dt$  en secondes ( $s$ ).

Avec la relation :  $dV = \frac{dm}{\rho}$ , on peut écrire également que

$$Qv = \frac{Qm}{\rho} \quad (II.12)$$

$$\text{donc : } Qv = S \cdot V \quad (II.13)$$

A partir des relations précédentes on peut déduire facilement la relation entre le débit massique et le débit volumique

$$Qm = \rho \cdot Qv \quad (II.14)$$

### c. Equation de continuité [29]

En Considérant une veine d'un fluide incompressible de masse volumique  $\rho$  animée d'un écoulement permanent.

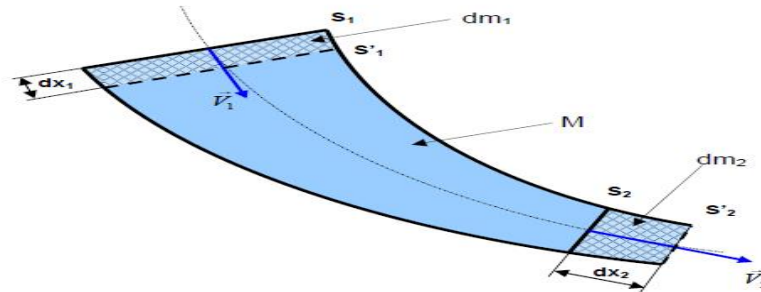


Fig II.9. Principe d'équation de continuité

On désigne par :

- $S_1$  et  $S_2$  respectivement la section d'entrée et la section de sortie du fluide à l'instant  $t$ .
- $S'_1$  et  $S'_2$  respectivement les sections d'entrée et de sortie du fluide à l'instant

$$t' = (t + dt) \quad (II.15)$$

- $V_1$  et  $V_2$  les vecteurs vitesse d'écoulement respectivement à travers les sections  $S_1$  et  $S_2$  de la veine.
- $dx_1$  et  $dx_2$  respectivement les déplacements des sections  $S_1$  et  $S_2$  pendant l'intervalle de temps  $dt$ .
- $dm_1$  : masse élémentaire entrante comprise entre les sections  $S_1$  et  $S'_1$ .
- $dm_2$  : masse élémentaire sortante comprise entre les sections  $S_2$  et  $S'_2$ .
- $M$  : masse comprise entre  $S_1$  et  $S_2$ .
- $dV_1$  : volume élémentaire entrant compris entre les sections  $S_1$  et  $S'_1$ .
- $dV_2$  : volume élémentaire sortant compris entre les sections  $S_2$  et  $S'_2$ .

A l'instant  $t$  : le fluide compris entre  $S_1$  et  $S_2$  a une masse égale à

$$(dm_1 + M) \quad (II.16)$$

A l'instant  $t + dt$  : le fluide compris entre  $S'_1$  et  $S'_2$  a une masse égale à

$$(dm_2 + M) \quad (II.17)$$

Par conservation de la masse :  $dm_1 + M = M + dm_2$ , en simplifiant par  $M$  on aura

$$dm_1 = dm_2 \quad (II.18)$$

$$\text{Donc } \rho_1 \cdot dV_1 = \rho_2 \cdot dV_2 \quad (II.19)$$

$$\text{ou encore } \rho_1 \cdot S_1 \cdot dx_1 = \rho_2 \cdot S_2 \cdot dx_2 \quad (\text{II.20})$$

En divisant par  $dt$  on aboutit à

$$\rho_1 \cdot S_1 \cdot \frac{dx_1}{dt} = \rho_2 \cdot S_2 \cdot \frac{dx_2}{dt} \iff \rho_1 \cdot S_1 \cdot V_1 = \rho_2 \cdot S_2 \cdot V_2$$

Puisque le fluide est incompressible :  $\rho_1 = \rho_2 = \rho$  On peut simplifier et aboutir à l'équation de continuité suivante :

$$S_1 \cdot V_1 = S_2 \cdot V_2 \quad (\text{II.21})$$

### II.4.5. Les pertes de charges [30]

#### a. Pertes de charge singulières

Quand la conduite subit de brusque variation de section ou de direction il se produit des pertes de charges dites singulières, elles sont généralement mesurables et font partie des caractéristiques de l'installation. On les exprime par

$$J_S = -K_S \frac{V^2}{2} \quad (\text{II.22})$$

où  $K_S$  : Coefficient (sans unité) de pertes de charge. Il dépend de la nature et de la géométrie de l'accident de forme.

#### b. Pertes de charges linéaires

Les pertes de charges linéaires, sont des pertes de charge réparties régulièrement le long des conduites. En chaque point d'un écoulement permanent les caractéristiques de l'écoulement sont bien définies et ne dépendent pas du temps. La représentation graphique de l'écoulement prend l'allure ci-dessous.

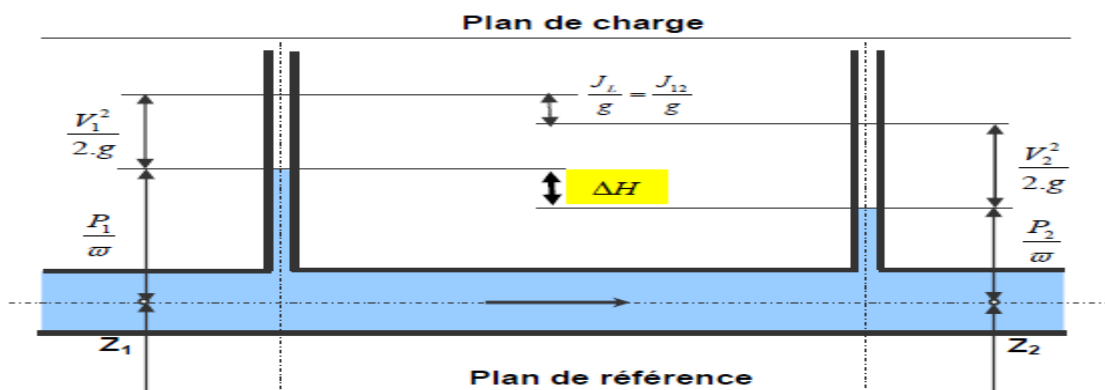


Fig II.10. Pertes de charges linéaires

La vitesse étant constante, la ligne piézométrique et la ligne de charge sont parallèles. La variation de hauteur piézométrique, évaluée en hauteur de liquide est égale à la perte de charge linéaire entre les deux points de mesure.

Les pertes de charge linéaires sont proportionnelles à la longueur  $L$  de la conduite, inversement proportionnelles à son diamètre  $d$ , proportionnelle au carré de la vitesse débitante  $V$  du fluide.

$$J_S = -\lambda \frac{V^2}{2} \cdot \left(\frac{L}{d}\right) \quad (II.23)$$

-  $V$  : vitesse moyenne d'écoulement dans la conduite (m/s).

-  $L$  : longueur de la conduite (m).

-  $d$  : diamètre de la conduite (m).

-  $\lambda$  : coefficient de perte de charge linéaire, il dépend du régime d'écoulement et notamment du nombre de Reynolds  $Re$ .

#### II.4.6. Théorème de Bernoulli appliqué à un fluide réel [31]

Considérons un écoulement entre deux points (1) et (2) d'un fluide réel dans une conduite. On suppose éventuellement, qu'il existe entre (1) et (2) des machines hydrauliques.

On note

- $J_{12}$  : Somme de toutes les pertes de charge, singulière et linéaires entre les sections (1) et (2).
- $P_n$  : Puissance mécanique échangé entre le fluide et les machines éventuellement placées entre (1) et (2).

Le Théorème de Bernoulli prend la forme générale suivante :

$$\frac{1}{2}(v_2^2 - v_1^2) + \frac{1}{2}(P_2 - P_1) + g \cdot (Z_2 - Z_1) = J_{12} + \frac{P_n}{q_m} \quad (II.24)$$

tel que

$v$  : Vitesse moyenne d'écoulement de la veine fluide à travers  $S_x$ .

$Z$  : Altitude de centre de gravité de masse  $dm_x$ .

$P$  : pression du fluide au niveau de section  $S_x$ .

$q_m$  : Débit volumique de la machine hydraulique.

#### II.4.7. Capteur et transmetteur

##### a. Définitions

Un capteur est un élément d'un appareil de mesure auquel est directement appliquée une grandeur à mesurer et dont le signal de sortie n'est pas directement utilisable comme signal d'entrée dans une boucle de mesure ou de régulation (comme par exemple un thermocouple délivrant une fem de quelques mV). Le signal en sortie du capteur est en général une variation

de tension électrique, dans le cas d'un capteur actif (par exemple piézoélectrique), ou une variation d'impédance, dans le cas d'un capteur passif. Pour ce dernier, il est nécessaire d'y



Fig.II.11. Schéma bloc d'un capteur

adjoindre une alimentation et un conditionneur (circuit électrique) qui transforme ces variations en une différence de tension ou un courant.

Un transmetteur est un appareil de mesure dont l'entrée est issue d'un capteur et dont la sortie est un signal conforme à un standard analogique (0.2-1bar ou 4-20mA) ou numérique, directement utilisable dans une boucle de mesure ou de régulation.

Cependant le terme capteur est souvent utilisé à tort pour désigner un transmetteur ou le couple "capteur -transmetteur " [32].

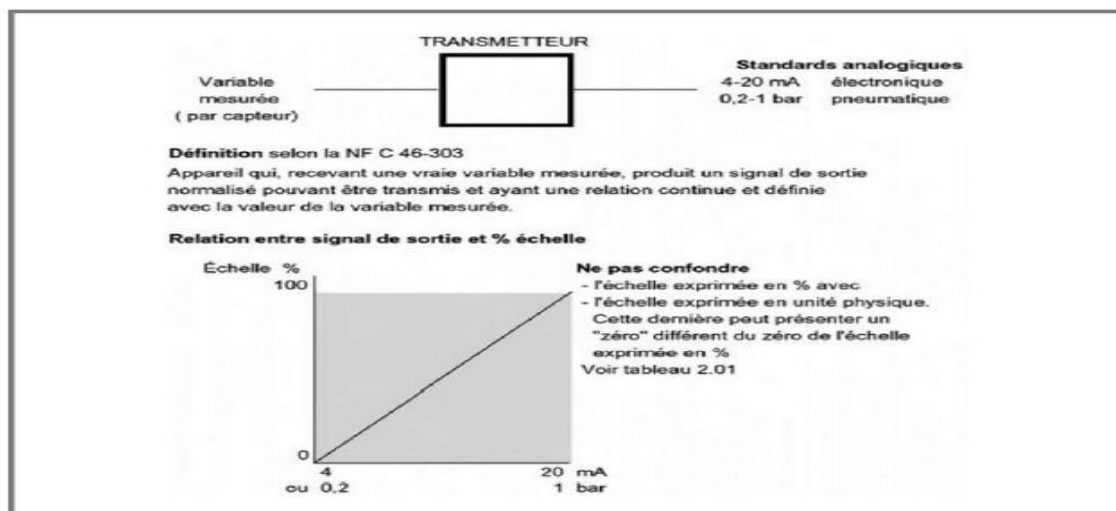


Fig.II.12. schéma fonctionnel d'un transmetteur

### b. Transmission

C'est de transmettre une information d'un endroit l'émetteur vers un autre le récepteur, séparés d'une distance plus ou moins importante. Lorsque la distance est importante, la transmission d'une information analogique provenant d'un capteur est plus difficile et soumise à des perturbations. En effet l'utilisation d'une simple variation de tension comme grandeur de transmission n'est pas assez fiable, car un changement dans la longueur des fils et donc de leur résistance a pour conséquence de modifier la valeur transmise.

Au début les ingénieurs ont eu de grandes difficultés à trouver un signal électrique qui pouvait être transmis sur des fils sans introduire des erreurs. Pour transmettre un signal à distance on dispose de plusieurs procédés, dont chacun présente des avantages et des inconvénients. Telles une par transmission d'impulsion PWM (Pulse Width Modulation) ou par variation proportionnelle d'une fréquence selon la valeur analogique. Ces deux solutions coûtaient cher et étaient difficiles à mettre en œuvre. Lorsque la boucle 4-20 mA est arrivée, elle est rapidement devenue le standard par le fait d'être très précise et de ne pas être affectée par la résistance des fils et par les variations de la tension d'alimentation.

### c. Boucle de courant 4-20mA

#### i. Présentation de la boucle de courant 4 - 20mA

Inventée vers 1930, par un ingénieur du groupe ESSO (S.O. = Standard Oil of New Jersey) aux Etats-Unis, ce procédé est destiné à transmettre un signal analogique à quelques dizaines ou centaines de mètres. Il repose sur le constat que le long d'un câble, aussi long soit-il, le courant continu qui le traverse est constant. Par contre la différence de potentiel en raison de la chute de tension dans le câble va évoluer en fonction de la distance de la source et décroître avec l'augmentation de cette distance. Il était donc exclu de transmettre de façon fiable une faible ddp générée par un capteur en tant que telle. Cependant, si l'on sait transformer le générateur de tension équivalent à un capteur en générateur de courant, le problème est alors différent.

Dans les années 30 les balbutiements de l'électronique à tubes dans lesquels les Courants étaient de l'ordre 2 ou 3 dizaines de mA ont induit ce concept dit 4-20mA.

L'idée est de réaliser un dispositif, capteur + circuit associé, dont la consommation en mA sera proportionnelle à la tension que l'on devrait mesurer aux bornes du capteur et de faire en sorte que celle-ci se situe dans la plage 4-20mA, ces limites correspondant alors aux limites d'utilisation du capteur. On aurait pu choisir 0-20mA mais ceci peut être problématique en cas de dérive qui décale le courant vers les valeurs négatives, la plage 0-4mA constitue donc une marge de sécurité. De plus, le fait de retenir la plage 4-20mA permet de détecter un défaut dans la boucle si le courant devient nul.

#### ii. Constitution d'une boucle de courant 4-20mA

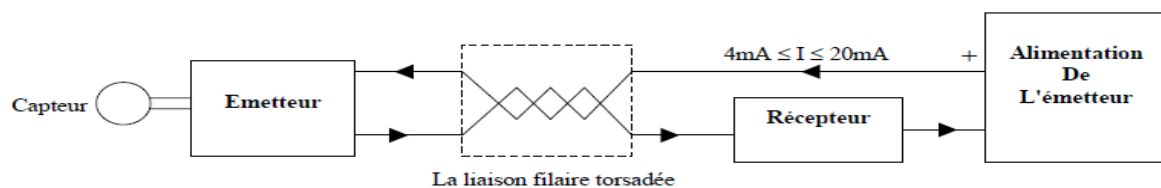


Fig.II.13. schéma bloc d'une boucle de courant 4-20mA+Capteur

Pour réaliser la boucle 4-20mA, il faut au 4 éléments principaux minimum : l'émetteur, l'alimentation de la boucle, les fils de la boucle et le récepteur. Ces 4 éléments sont connectés ensemble pour former une boucle.

#### ❖ Le capteur

Le capteur va mesurer des grandeurs physiques comme la température, la pression et délivrer une tension de faible amplitude.

#### ❖ L'émetteur

L'émetteur convertit la valeur mesurée par le capteur en un courant compris dans l'intervalle 4-20mA. On a un courant de 4mA pour la première valeur de l'échelle de mesure du capteur et 20mA pour la dernière mesure du capteur

Exemple : si un capteur doit mesurer une température de  $-20^{\circ}\text{C}$  à  $75^{\circ}\text{C}$ , alors 4mA correspondra à  $-20^{\circ}\text{C}$  et 20mA à  $75^{\circ}\text{C}$ . Si on lit 0mA soit la boucle ne fonctionne plus, soit le capteur est en défaut.

#### ❖ L'alimentation

L'émetteur doit être alimenté pour fonctionner et ceci par une alimentation externe et par l'intermédiaire des deux fils de la boucle. Le courant minimum de la boucle étant de 4mA ceci impose que l'émetteur doit donc consommer moins de 4mA. La plupart des émetteurs sont alimentés en 24V mais certain n'ont besoin que de 12V.

#### ❖ La liaison filaire

Ce sont 2 fils qui relient tous les composants ensemble en respectant des conditions sur le choix de ces fils pour garantir une bonne transmission. Il faut qu'ils possèdent

- une très faible résistance.
- une bonne protection contre la foudre.
- Ne pas subir d'impulsion de tension induite par un moteur électrique ou un relais.
- avoir également une seule mise à la masse, car plusieurs masses rendrait la boucle inopérante. Il suffit d'une petite fuite de courant de masse dans la boucle pour affecter l'exactitude de la transmission.

#### ❖ Le récepteur

On a toujours au moins un récepteur dans la boucle. Il peut être un afficheur digital, une table d'enregistrement un déclencheur de vanne.

Lorsque l'on utilise plusieurs récepteurs, ces derniers sont câblés en série dans la boucle (I boucle commun), mais il y a une contrainte à respecter. Ils ont tous une chose en commun, une résistance d'entrée. Il peut y avoir plus d'un récepteur dans la boucle sous la condition que la

tension pour alimenter cette boucle soit suffisante, on peut insérer autant de récepteur que l'on veut [33].

#### ❖ Câblage utilisé 4-20mA en 3 fils

Le schéma illustré ici 'c'est de transmetteur utilisé contient un capteur de pression absolue contient une carte électronique intégré afin de transmettre un signal de courant 4-20mA proportionnel à la grandeur physique appliquée au capteur.

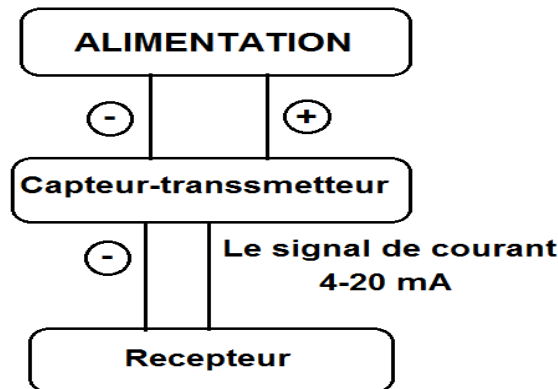


Fig.II.14. Boucle 4-20mA utilisée par transmetteur de pression

## II.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons donné une majeure importance sur la dynamique des fluides compressibles réelles pour comprendre le régime d'écoulement et de connaître les différentes pertes sur notre canalisation. Nos informations de la fuite sont obtenues à partir des transmetteurs de pression qui fonctionne à base de la méthode 4-20mA la plus utilisée due à sa précision. Autrement dit, la fiabilité de ces transmetteurs est sans équivoque. Pour cela la conservation des informations des signaux captés est inédite. Plusieurs techniques de traitement de signal sont appliquées, nous citons parmi eux la méthode d'intercorrélation, la base théorique de cette dernière est exposée au chapitre suivant.

# **Chapitre III**

## **Traitement du signal**

## Chapitre III Traitement du signal

### III.1. Introduction

Afin de comprendre ou cerner un phénomène particulier, nous avons besoin d'utiliser des moyens d'analyse théoriques adéquats. Avec les avancements des recherches, ces outils mathématiques sont développés. Au début, les analyses sont basées sur la convolution des signaux par la suite la corrélation a été introduite. La transformée de Fourier pour connaître les composantes spectrales d'un signal a pris part pour l'analyse des événements qui se produisent sur nos signaux. Ensuite on a passé à la STFT (transformé de Fourier à fenêtre temporelle). Dernièrement les analyses se font par ondelettes. Dans ce chapitre nous exposons des notions fondamentales sur le traitement de signal. Des notions sur l'intercorrélation des signaux vont être éclairci . Finalement , les ondelettes discrètes très utilisés pour le débruitage des signaux applicables généralement sur des signaux comportant des singularités vont être traitées.

### III.2. Traitement de signal

Le traitement du signal est la discipline technique qui, s'appuyant sur les ressources de l'électronique, de l'informatique et de la physique appliquée, a pour objet l'élaboration ou l'interprétation des signaux. Son champ d'application se situe donc dans tous les domaines concernés par la perception, la transmission ou l'exploitation des informations véhiculées par ces signaux.

### III.3. Principales fonctions du traitement du signal [34]

Les fonctions du traitement du signal peuvent se diviser en deux catégories : l'élaboration des signaux (incorporation des informations) et l'interprétation des signaux (extraction des informations). Les principales fonctions intégrées dans ces deux parties sont les suivantes :

#### III.3.1. Élaboration des signaux

- synthèse : création de signaux de forme appropriée en procédant exemple à une combinaison de signaux élémentaires .
- modulation, changement de fréquence : moyen permettant d'adapter un signal aux caractéristiques fréquentielles d'une voie de transmission.
- codage : traduction en code binaire (quantification), etc.

#### III.3.2. Interprétation des signaux

- filtrage : élimination de certaines composantes indésirables .
- détection : extraction du signal d'un bruit de fond (corrélation) .
- identification : classement d'un signal dans des catégories préalablement définies.

- analyse : isolement des composantes essentielles ou utiles d'un signal de forme complexe (transformée de Fourier).
- mesure : estimation d'une grandeur caractéristique d'un signal avec un certain degré de confiance (valeur moyenne, etc.).

### **III.4. Définition et représentation des signaux**

#### **III.4.1. Définition d'un signal**

Un signal est la représentation physique de l'information, qu'il convoie de sa source à sa destination. C'est une expression d'un phénomène qui peut être mesurable par un appareil de mesure. Bien que la plupart des signaux soient des grandeurs électriques (généralement courant, tension, champ, ...) la théorie du signal reste valable quelle que soit la nature physique du signal.

#### **III.4.2. Définition d'un bruit**

Le bruit est défini comme tout phénomène perturbateur gênant la perception ou l'interprétation d'un signal, par analogie avec les nuisances acoustiques (interférence, bruit de fond, etc.). La différenciation entre le signal et le bruit est artificielle et dépend de l'intérêt de l'utilisateur : les ondes électromagnétiques d'origine galactique sont du bruit pour un ingénieur des télécommunications par satellites et un signal pour les radioastronomes [35].

### **III.5. Classification des signaux [36]**

Plusieurs approches sont possibles concernant la classification des signaux, parmi celles-ci on citera :

- La classification phénoménologique qui met l'accent sur le comportement temporel du signal.
- La classification énergétique où l'on classe les signaux suivant qu'ils sont à énergie finie ou à puissance finie
- La classification morphologique.

#### **III.5.1. Classification phénoménologique des signaux**

Dans cette classification on répartit généralement les signaux en deux classes principales et quatre sous-classes illustrées par la figure ci-dessous :

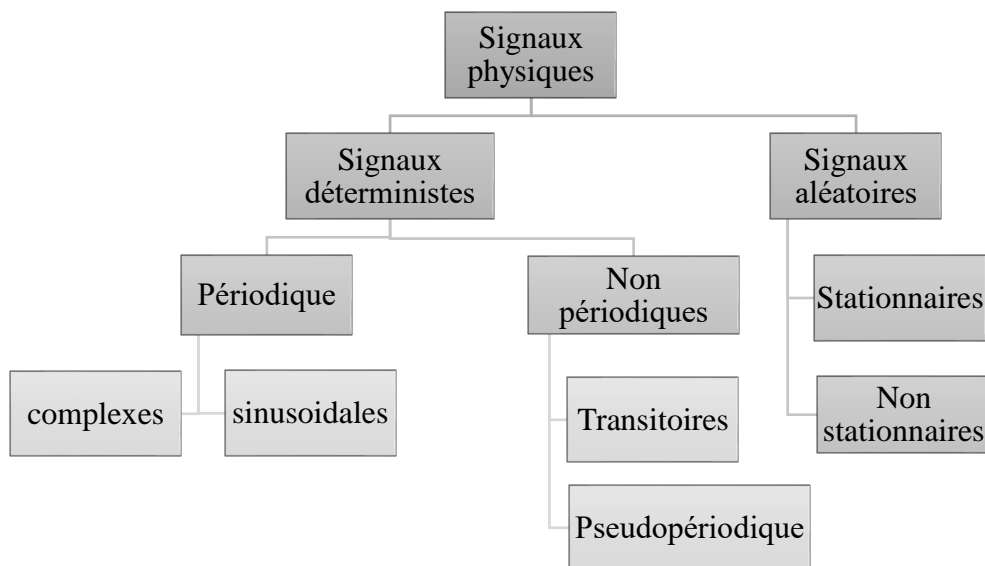


Fig.III.1. Classification phénoménologique des signaux

**a. Signaux déterministes**

Signaux dont l'évolution en fonction du temps  $t$  peut être parfaitement décrite grâce à une description mathématique ou graphique.

- **Sous catégories :**

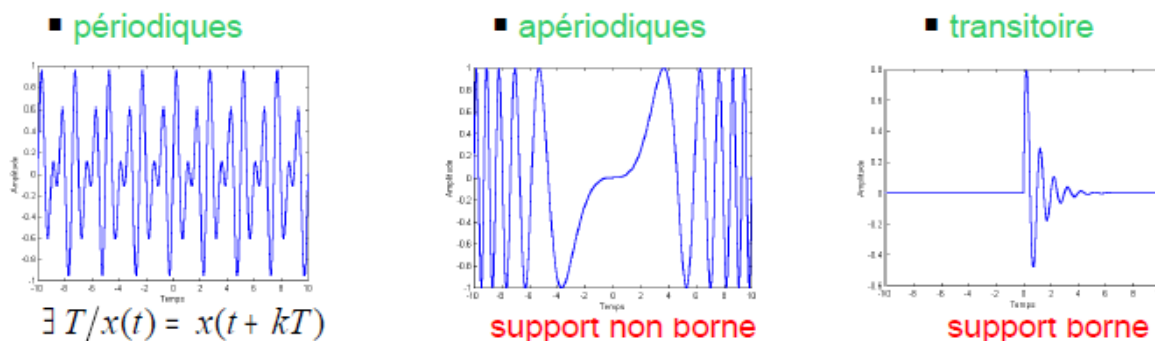


Fig. III. 2. Signaux déterministes

**b. Signaux aléatoires**

Signaux dont l'évolution temporelle est imprévisible et dont on ne peut pas prédire la valeur à un temps  $t$ . La description est basée sur les propriétés statistiques des signaux (moyenne, variance, loi de probabilité, ...)

- **Sous catégories**

Un signal est dit stationnaire si ses composantes de fréquences ne changent pas avec le temps en particulier la moyenne statistique et la variance. Par contre, un signal non stationnaire est celui dont les composantes de fréquences changent avec le temps (le contenu de fréquences change d'un intervalle à un autre).

La majorité des phénomènes physiques ne vérifient pas l'hypothèse de stationnarité et par conséquent l'analyse de Fourier devient inefficace.

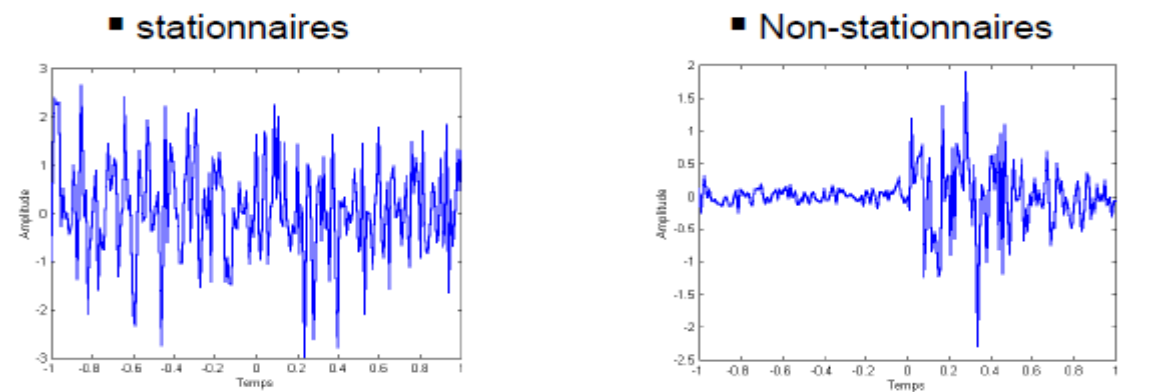


Fig. III. 3 Signaux stationnaire et non stationnaire

### III.5.2. Classification énergétique [37]

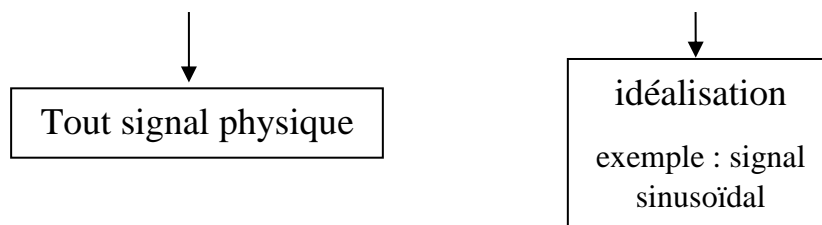
#### Définition

par analogie avec les signaux électriques

$$\text{Energie d'un signal } x(t) : W_x = \int_{-\infty}^{+\infty} |x(t)|^2 dt \tag{III.1}$$

$$\text{Puissance moyenne de } x(t) : P_x = \lim_{T \rightarrow +\infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} |x(t)|^2 dt \tag{III.2}$$

- Classification : signaux à énergie finie  $\iff$  à Puissance moyenne finie



### III.5.3. Classification morphologique des signaux

On distingue les signaux à évolution temporelle continue et des signaux à évolution temporelle discrète ainsi que ceux dont l'amplitude est continue ou discrète .

On obtient donc 4 classes de signaux [38]

- Les signaux analogiques dont l'amplitude et le temps continus
- les signaux quantifiés dont l'amplitude est discrète et le temps continu.
- Les signaux échantillonnés dont l'amplitude est continue et le temps discret.
- Les signaux numériques dont l'amplitude et le temps discrets.

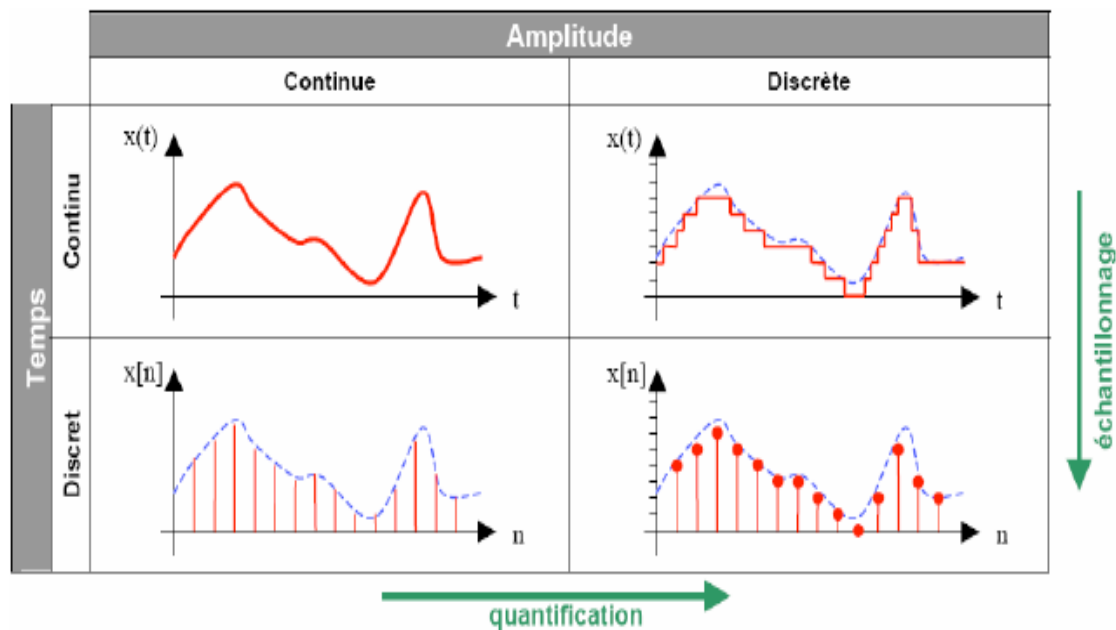


Fig. III. 4. Classification morphologique

### III.6. Analyse des signaux non périodiques

#### III.6.1. Transformé de Fourier

Tout signal continu et périodique de période  $T_p$  présente un spectre discret dont les raies sont espacées par des multiples de  $f_p$

Lorsqu'un signal est périodique de période  $T_p = \frac{1}{f_p}$ , son spectre fait apparaître des raies distantes de  $f_p$  et correspondant aux diverses harmoniques présentes dans le signal, plus la période  $T_p$  est élevée, plus les raies se rapprochent.

Si l'on pousse le raisonnement à sa limite, un signal apériodique peut être interprété comme un signal périodique de période infinie.

L'espace entre les raies se réduit alors à zéro et le spectre, au lieu d'être composé de plusieurs raies espacées, se transforme en une courbe continue où tous les points viennent se toucher.

On ne peut alors plus vraiment parler d'harmoniques de rang  $n$ . L'espace fréquentiel n'est plus discret mais continu (le spectre, quel qu'il soit, est défini pour toute valeur de  $f$ ).

Tout (ou presque tout) signal apériodique  $s(t)$  borné et d'énergie bornée (finie) admet une transformée de Fourier [39]

$$F(s)(f) = S(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t)e^{-2j\pi ft} dt \quad (\text{III.3})$$

Qui permet d'établir un spectre continu du signal  $s(t)$ .

### III.6.2. Condition d'existence de la Transformée de Fourier

L'existence de la TF est liée à la convergence absolue de l'intégrale  $\int_{-\infty}^{+\infty} |x(t)|^2 dt < \infty$ .

Toutefois :  $\int_{-\infty}^{+\infty} |x(t)|^2 dt \leq (\int_{-\infty}^{+\infty} |x(t)| dt)^2$  ce qui implique la convergence des signaux de carré sommables, c'est à dire les signaux à énergie finie (ceci est le cas de tous les signaux en pratique).

### III.6.3. Transformation inverse de Fourier

Il existe un moyen de revenir du domaine fréquentiel au domaine temporel en utilisant la transformation de Fourier inverse.

Tout (ou presque tout) spectre  $S(f)$  admet une transformée de Fourier inverse

$$F^{-1}(s)(f) = S(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) e^{-2j\pi f t} dt \quad (\text{III.4})$$

Lorsque le signal n'est pas périodique, on peut supposer qu'il est périodique à l'infini.

Si le signal n'est pas périodique (ou périodique à l'infini), le spectre est continu.

La Transformée de Fourier s'obtient de manière équivalente à la série de Fourier, mais en faisant tendre la période  $T$  vers l'infini. La sommation devient une intégrale. Ainsi on obtient :

$$X(f) = \lim_{T \rightarrow \infty} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) e^{-2j\pi f t} dt \quad (\text{III.5})$$

A partir de  $x(t)$  on peut calculer le spectre du signal par Transformée de Fourier.

$$\text{Par conséquent, on peut écrire } X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-2j\pi f t} dt \quad (\text{III.6})$$

Mais, on peut aussi passer du domaine fréquentiel au domaine temporel :

A partir de la Transformée de Fourier  $X(f)$ , on peut calculer le signal  $x(t)$  :

$$x(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(f) e^{+2j\pi f t} df \quad (\text{III.7})$$

Il s'agit de la transformée de Fourier Inverse.

### III.6.4. Propriétés de la transformée de Fourier [40]

#### a. Propriétés de linéarité

La TF est une opération linéaire :

$$x(t) \leftrightarrow X(f)$$

$$y(t) \leftrightarrow Y(f)$$

$$\text{Ceci entraîne : } a x(t) + b y(t) \leftrightarrow a X(f) + b Y(f)$$

**b. Propriétés de parité**

Si  $x$  est paire alors :  $x(-t) = x(t)$

$$X(f) = TF[x(t)] = 2 \int_0^{+\infty} x(t) \cdot \cos(2\pi ft) dt \quad (\text{III.8})$$

Si  $x$  est impaire :  $x(-t) = -x(t)$

$$X(f) = TF[x(t)] = -2j \int_0^{+\infty} x(t) \cdot \sin(2\pi ft) dt \quad (\text{III.9})$$

**c. Propriétés de similitude**

$$x(t) \leftrightarrow X(f) \implies x(at) \leftrightarrow \frac{1}{|a|} X\left(\frac{f}{a}\right)$$

**d. Propriétés de translation**

$$x(t) \leftrightarrow X(f)$$

$$x(t-a) \leftrightarrow e^{-j2\pi af} X(f)$$

Cette propriété de translation est évidemment réciproque, c'est-à-dire :

$$X(f-a) \leftrightarrow e^{+j2\pi at} x(t)$$

**e. Propriétés de dérivation**

Si  $x(t) \leftrightarrow X(f)$

$$\frac{dx(t)}{dt} \leftrightarrow (2j\pi f)X(f)$$

$$\frac{d^n x(t)}{dt^n} \leftrightarrow (2j\pi f)^n X(f)$$

**f. Propriétés liées à la convolution**

$$x(t) \leftrightarrow X(f)$$

$$y(t) \leftrightarrow Y(f)$$

$$x(t) * y(t) \leftrightarrow X(f) \cdot Y(f), \text{ de même : } x(t) \cdot y(t) \leftrightarrow X(f) * Y(f)$$

**III.6.5. Transformée de Fourier Discrète**

La transformée de Fourier Discrète, généralement notée TFD, assigne à la séquence finie de  $N$  termes d'index  $k$ ,  $0 \leq k \leq N-1$  d'un signal dans le domaine temporel

$$\{x(k)\}_{0 \leq k \leq N-1} = \{x(0), x(1), x(2) \dots \dots \dots x(N-1)\} \quad (\text{III.10})$$

La séquence finie de  $N$  termes d'index  $\ell$

$$0 \leq \ell \leq N-1$$

$$\{X(\ell)\}_{0 \leq \ell \leq N-1} = \{X(0), X(1), X(2) \dots \dots X(N-1)\} \quad (\text{III.11})$$

Dans le domaine spectral telle que

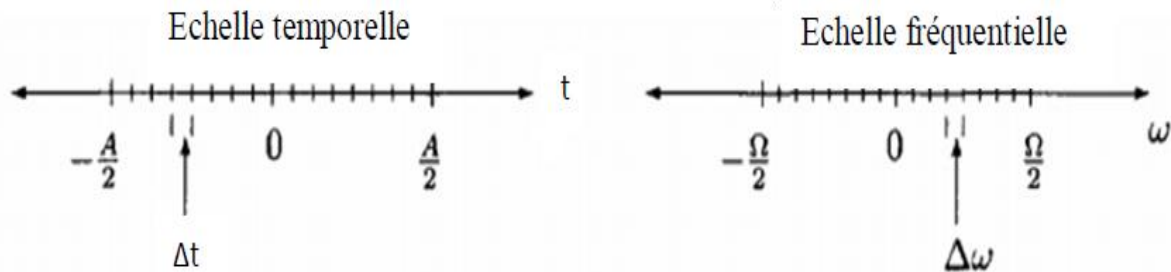
$$X(\ell) = DFT \{x(k)\} = \sum_{k=0}^{N-1} x(k) e^{-\frac{j2\pi \ell k}{N}} \quad (\text{III.12})$$

Où le terme  $N$  représente le nombre de points de calcul de la TFD. Ce terme joue sur la précision du tracé alors que le terme  $X$  est lié à la résolution en fréquence.

La transformée de Fourier inverse est donnée par

$$x(k) = IDFT\{X(\ell)\} = \frac{1}{N} \sum_{\ell=0}^{N-1} X(\ell) e^{j2\pi\ell k} \quad (\text{III.13})$$

Le passage d'un plan à un autre est illustré par la (**Fig.III. 5**) [41]



**Fig.III. 5.** Relations de réciprocité temps-fréquence

Tenant compte que l'échelle temporelle de la DFT est associée avec l'échelle fréquentielle à travers les relations de réciprocité.

$$A \cdot \Omega = N$$

$$\Delta t \cdot \Delta \omega = \frac{1}{N}$$

### III.6.6. Transformée de Fourier Rapide (FFT)

La transformée de Fourier rapide TFR ou FFT (**F**ast **F**ourier **T**ransform) est simplement un algorithme permettant de réduire le nombre d'opérations, pour calculer la TFD.

La relation permettant de calculer la TFD est

$$DFT \{x(k)\} = \sum_{k=0}^{N-1} x(k) e^{-\frac{j2\pi\ell k}{N}} \text{ Pour } n \in \{0, 1, \dots, N-1\} \quad (\text{III.14})$$

Les opérations à effectuer pour obtenir ces N valeurs de la transformée de Fourier discrète dans le cas de N échantillons du signal initial sont

- $N \times N = N^2$  multiplications complexes .
- $N \times (N - 1)$  additions complexes .

Etant donné que la durée d'exécution d'une addition est négligeable devant la durée d'une multiplication, le coût de calcul de la TFD va donc essentiellement dépendre du temps de réalisation d'une multiplication.

Il existe différents algorithmes de Transformée de Fourier Rapide. Le plus connu et le plus utilisé est celui de Cooley-Tukey (appelé aussi entrelacement temporel). Le nombre des multiplications complexes est :  $\frac{N}{2} \log_2 N$  .

Le gain en fonction du nombre d'échantillons est important, sachant que le calcul de TFD se fait généralement sur un minimum de 512 ou 1024 échantillons et que le temps de calcul

d'une multiplication est prépondérant par rapport à l'addition, le temps de calcul d'une TFD par FFT peut être réduit d'un facteur supérieur à 100 .[42]

$$\frac{N^2}{N/2(\log_2 N)} = \frac{2N}{\log_2 N} \quad (\text{III.15})$$

### III.6.7. Corrélation

#### a. Définition

Une opération mathématique qui par sa forme est très proche de la convolution est la fonction de corrélation de deux signaux. Cependant, contrairement à la convolution, le but de la corrélation est de mesurer le degré de ressemblance de ces signaux et d'extraire des informations qui, dans une large mesure, dépendent de l'application considérée. La corrélation est utilisée dans les radars, les sonars, les communications numériques, la détection de signaux noyés dans du bruit, la mesure de temps de transmission, le GPS (Global Positioning System), etc. Dans chaque cas, on dispose de deux fonctions : le signal de référence  $x(t)$  et le signal reçu  $y(t)$ . Il faut alors trouver une opération mathématique permettant de comparer ces signaux et d'en mesurer la ressemblance ou corrélation. Ceci se fait simplement en effectuant l'intégrale du produit des signaux que l'on décale progressivement l'un par rapport à l'autre.

#### b. Intercorrélation de deux signaux [43]

Considérant deux signaux  $x(t)$  et  $y(t)$  à énergie finie, on définit la fonction d'intercorrélation (FIC) comme l'intégrale du produit du signal  $x(t)$  avec le signal  $y(t)$  décalé d'une valeur  $\tau$  :

$$C_{xy}(\tau) = \int_{+\infty}^{-\infty} x(t) \cdot y(t + \tau) dt \quad (\text{III.16})$$

Par changement de variable  $\theta = t + \tau$ , on montre que

$$C_{xy}(\tau) = \int_{+\infty}^{-\infty} x(\theta - \tau) \cdot y(\theta) d\theta = C_{yx}(-\tau) \quad (\text{III.17})$$

On voit ainsi que la fonction  $C_{xy}(\tau)$  est aussi la version retournée de  $C_{yx}(\tau)$  autour de l'ordonnée  $Oy$ . Comme on peut le constater, les fonctions d'intercorrélations :

$$C_{xy}(\tau) = \int_{+\infty}^{-\infty} x(t) \cdot y(t + \tau) dt \quad (\text{III.18})$$

et de convolution

$$C_{xy}(\tau) = \int_{+\infty}^{-\infty} x(\theta) \cdot y(t - \theta) dt = x(t) * y(t) \quad (\text{III.19})$$

sont formellement très proches. On montre qu'elles sont reliées entre elles par :

$$C_{xy}(\tau) = x(-\tau) * y(\tau) \quad (\text{III.20})$$

**c. Propriétés de l'intercorrélation [44]**

- En général la FIC n'est ni paire, ni impaire.
- Le maximum de la FIC se situe à l'endroit du décalage correspondant au maximum de similitude entre les deux signaux. Cette propriété est très utilisée pour mesurer des temps de propagation.
- Comme le fait de retarder  $y(t)$  par rapport à  $x(t)$  d'une valeur  $\tau$  équivaut à avancer le signal  $x(t)$  par rapport à  $y(t)$ , on aura :  $C_{xy}(\tau) = C_{yx}(-\tau)$
- Si les deux signaux sont périodiques de même période, la FIC sera également périodique.

**III.6.8. Intercorrelation discrète**

Un signal est centré si sa valeur moyenne est nulle.

Soient deux signaux discrets  $x$  et  $y$ , l'intercorrélation  $C_{xy}$  de  $x$  par  $y$  est définie par

$$c_{xy}(i) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} x(k)y^*(k-i) \quad (\text{III.21})$$

En traitement de signal on préfère avoir des signaux centrés, c'est à dire des signaux dont la moyenne est nulle.

Si les signaux ne sont pas centrés on peut les rendre centrés en soustrayant leurs moyennes, la formule peut alors s'écrire

$$C_{xy}(i) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} (x(k) - \bar{x})(y^*(k-i) - \bar{y}) \quad (\text{III.22})$$

Où  $\bar{x}$  et  $\bar{y}$  désignent respectivement la moyenne de  $x$  et  $y$  et  $y^*$  le conjugué de  $y$

**• Usage de l'intercorrélation**

- Les principales applications de l'intercorrélation sont :
  - mesures du retard entre signaux
  - indicateur de déformation d'un signal
  - Détection d'un signal dans du bruit

**III.6.9. Ondelettes (wavelets)**

Il est apparu que la décomposition obtenue par la transformée de Fourier et de Gabor, n'était pas toujours la plus satisfaisante et la première transformation en ondelettes (le nom n'est pas encore utilisé) est proposée par Haar en 1910 ; il serait plus judicieux de parler alors de «paléo-ondelette». Les précurseurs conscients de cette technique ont été des mathématiciens (Calderon 1964), des physiciens (Aslaken et Klauder en 1968, Paul en 1985), et surtout des ingénieurs (ou des chercheurs en sciences pour l'ingénieur) comme Esteban et Galand (1977), Smith et Barnwell (1986), Vetterli (1986), nous pourrions parler dans leur cas de «pré-ondelette». Mais le premier à avoir utilisé la méthode et le premier à avoir proposé le nom d'ondelettes fut Jean Morlet (1983) [45]

Le terme ondelette désigne une fonction  $\psi \in \mathfrak{R}$  qui oscille sur un intervalle de longueur finie, donc d'intégrale nulle. Au-delà, la fonction décroît très vite vers zéro. Elle est normée  $|\psi| = 1$  et elle vérifie la condition d'admissibilité :

$$\int_R \frac{|\hat{\psi}^*(t)|^2}{|t|} dt = \int_{R^-} \frac{|\hat{\psi}(t)|^2}{|t|} dt < +\infty \quad (\text{III.23})$$

Où  $\hat{\psi}$  désigner-la transformée de Fourier de  $\psi$ .

A partir de l'unique fonction  $\psi$ , on construit par translation et dilatation une famille d'ondelettes

$$\psi(a, b)(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right), \quad a \in \mathfrak{R}^+, b \in \mathfrak{R}^+ \quad (\text{III.24})$$

Dans cette expression,  $a$  est le facteur d'échelle et  $b$  le paramètre de translation. La variable  $a$  joué le rôle de l'inverse de la fréquence : plus  $a$  est petit moins l'ondelette (la fonction analysante) est étendue temporellement, donc plus la fréquence centrale de son spectre est élevée.

### III.6.10. Transformé en ondelettes

La transformée en ondelettes est un outil qui découpe les données, les fonctions ou les opérateurs en composantes fréquentielles suivant une résolution adaptée à l'échelle. C'est un moyen efficace de réaliser une analyse temps-fréquence et un outil pour la détection des singularités. Autrement dit les deux résolutions doivent varier en sens inverse en conservant un produit constant pour un pavage énergétiquement régulier de l'espace-temps fréquence. Ceci doit conduire à une utilisation rationnelle de cet espace par la réalisation dans tous les cas du meilleur compromis possible entre la résolution temporelle et la résolution fréquentielle. Il existe aussi de nombreuses manières de classer les types de transformées en ondelettes. On peut utiliser les ondelettes orthogonales pour le développement en ondelettes discret et les ondelettes non orthogonales pour le développement en ondelettes continu. D'une autre manière, on peut classer les transformées en ondelettes selon la famille à laquelle appartiennent les fonctions analysantes choisies. Les transformées obtenues sont suivant les cas discrètes ou continues, redondantes ou non [45].

Dans la littérature l'ondelette a été utilisée comme moyenne efficace de débruitage. Pour cela, elle a été éclaircie afin d'être appliquée dans notre cas sur les deux signaux acquis des deux capteurs de vibration.

**III.7. Conclusion**

Un panorama des différentes méthodes appliquées dans le domaine de traitement de signal à fait l'objet de ce chapitre. Sans oublier de donner des notions sur le signal et leurs caractéristiques. Les signaux aléatoires peuvent être stationnaires ou non stationnaires. Dans la majorité des cas les signaux physiques sont des signaux non stationnaires. Le traitement du signal est devenu une science incontournable de nos jours. Toutes applications de mesures, de traitement d'information mettent en œuvre des techniques de traitement sur le signal pour extraire l'information pertinente. L'analyse en ondelettes convient mieux pour les signaux non stationnaires où chaque composante de fréquence existe à tout instant. L'application de cette technique fait l'objet du prochain chapitre.

## **Chapitre IV**

# **Mesures pratiques et interprétation des résultats**

## Chapitre IV Mesures pratiques et interprétation des résultats

### IV.1.Introduction

Dans le cadre de la détection de fuites sur les réseaux de distribution, nous avons pensé à utiliser des capteurs de pression au lieu des capteurs acoustiques sur les canalisations en PEHD, nous avons exploité l'oscilloscope GDS1000 pour l'acquisition de nos signaux de fuite provenant des deux capteurs-transmetteurs, en utilisant une carte SD comme interfaçage entre l'oscilloscope et le PC. La numérisation de ces signaux nous a permis d'appliquer les différents algorithmes élaborés sous environnement MATLAB.

Nous avons appliqué comme première méthode, une technique de traitement de signal appelée l'intercorrélacion qu'elle permet de déterminer l'endroit de la fuite imposé préalablement sur notre conduite d'eau. La technique d'ondelette sur les signaux acquis est appliquée pour voir son apport pour la détermination la position de la fuite.

Pour la deuxième méthode, nous avons basés sur l'analyse de débit par des équations mathématiques développés pour une géométrie d'orifice circulaire "10 mm", ces équations théoriques permettent de déterminer la position de la fuite.

### IV.2. Système d'acquisition

Notre système de détection de fuite est basé principalement sur des détecteurs de pression de précision Honeywell modèle 811 FMG de Honeywell. L'image de la pression donnée par les transmetteurs de pression est un courant utilisant la fameuse boucle 4-20 mA qui peut être convertit en une tension. Cette dernière est visualisée sur un oscilloscope de type GW-INSTEK modèle GDS1000.les signaux visualisés peuvent être numérisés et mémorisés dans une carte mémoire type SD card sous forme d'un fichier EXCEL qui vont être traités par nos programmes élaborés sous MATLAB.

### IV.3. Chaîne d'acquisition

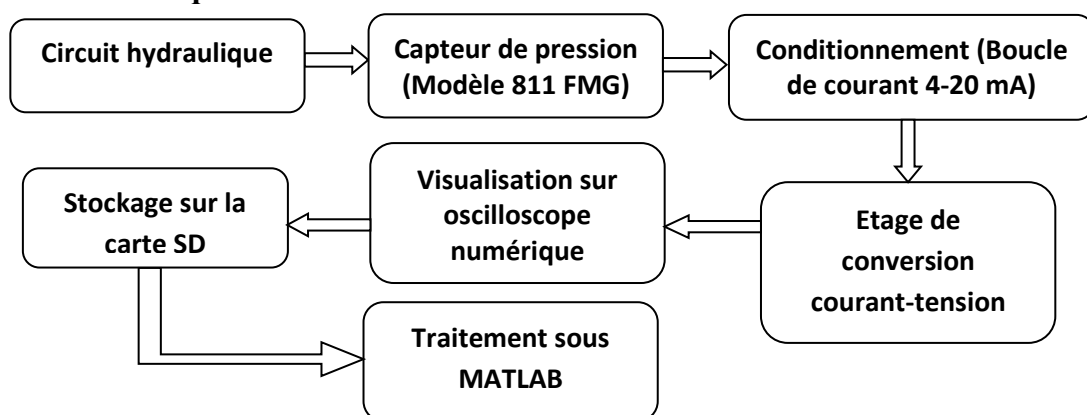


Fig. IV.1.Synoptique du système d'acquisition



**Tableau. IV.1.** Les caractéristiques du capteur de pression Honeywell modèle 811 FMG

Performance	Plage de pression Précision (min) Non linéarité (max) Hystérésis (max) Non adaptable (max) Sortie (std) résolution...	0-100psig $\pm 0.25\% \text{F.S.}$ $\pm 0.15\% \text{F.S.}$ $\pm 0.10\% \text{F.S.}$ $\pm 0.05\% \text{F.S.}$ 4-20mA Infini
Environnementale	Température fonctionnement Température compensée Effet de température Zéro (max) Span (max)	0°F a 180°F 60°F a 160°F  $.01\% \text{F.S./}^\circ\text{F}$ $.01\% \text{Rdg./}^\circ\text{F}$
Electrique	Type de strain gage Excitation la résistance d'isolement	Feuille collée 15 a 40 VDC 5000migaohm@50VDC #22(See Pg.AP-8) 1/2-14NPT male w/7/8"
Mécanique	Médias Surcharge sécuritaire Port de pression Matériau de pièces mouillées type Matière céramique	Gaz, liquide 50% capacité 1/4-18NPT female 1/2-14NPT male w/1 "Hex 17-4 PH inoxydable Calibre ou absolu acier inoxydable

#### ❖ *Étalonnage du transmetteur de pression*

Pour étalonner le transmetteur de pression nous devons faire les tests suivants

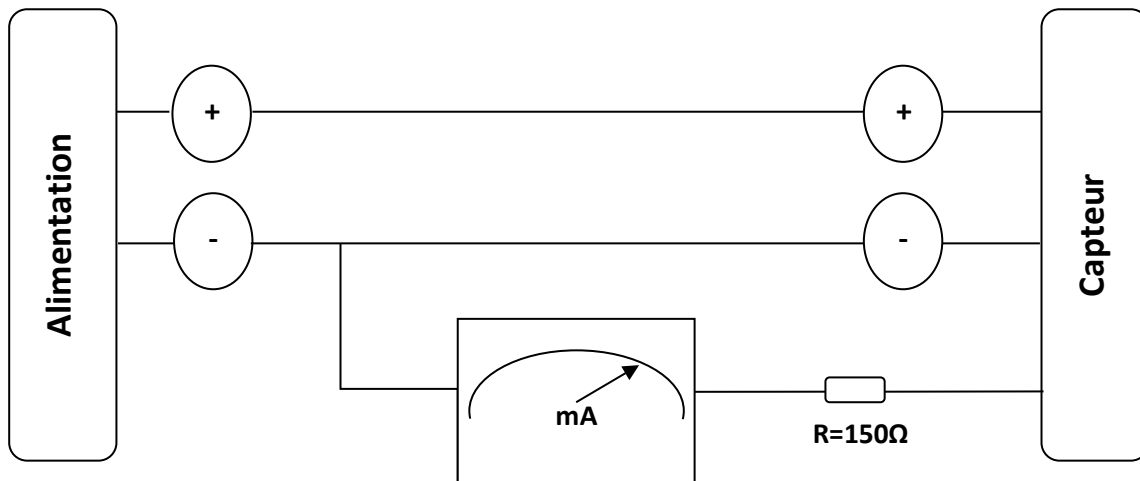
- On alimente le capteur de pression par une tension de 24 volts et fermer la sortie sur un milliampèremètre. Si le transmetteur est en bon état il doit indiquer 4mA quand il n'est pas soumis à aucune pression extérieure (c.-à-d. sous pression atmosphérique uniquement).

- On lie l'orifice du transmetteur à un ballon. Une fois presser sur le ballon ce qui veut dire donner une pression au transmetteur. Je règle la pression en agissant sur le ballon jusqu'à ce que le milliampèremètre indique la valeur de 20mA. Cette dernière doit correspondre à une certaine valeur de pression.
- On dit que notre transmetteur est étalonné si cette pression équivalente à 20mA correspond à la valeur maximale donner par le constructeur sur le corps du transmetteur.

### IV.3.2. Boucle de courant 4-20 mA

La boucle de courant 4-20 mA est un moyen de transmission permettant de transmettre un signal analogique sur une grande distance sans perte ou modification de ce signal.

Pour réaliser la boucle 4-20mA, il faut utilisée au moins 4 éléments, l'alimentation, capteur les câbles et une résistance Figure (IV.4).



**Fig. IV.4.** Câblage de la boucle 4-20mA

Le capteur possède trois fils de couleur blanc, noire et rouge. Le fil blanc doit être relié à la masse, le fil rouge est relié avec l'alimentation (+24 V) et le fil noir est lié à une résistance de 150Ω en série avec un ampèremètre lié à la masse comme le montre la figure (IV.4).

### IV.3.3. Etage de conversion courant-tension

Le bloc de la résistance signifie la conversion courant - tension de la boucle 4-20 mA tel que  $U = R_{(150\Omega)} \times I$  donc l'image du courant minimal est  $U_{\min} = 600\text{mV}$  et pour le courant maximal  $U_{\max} = 3\text{V}$ .

## IV.4. Circuit hydraulique

Le circuit hydraulique illustré sur la figure (IV.5) est réalisé au niveau du laboratoire de fin d'études.



**Fig. IV.5.**Circuit hydraulique global

Le circuit hydraulique est composé de plusieurs éléments

❖ **Conduite**

Nous avons utilisé une conduite en PEHD de diamètre  $\varnothing=4$  cm, avec une longueur de 26 m.

❖ **Accessoires**

Pour former un circuit hydraulique fermé, nous avons besoin d'utiliser des coudes et des joints pour éliminer les fuites qui peuvent apparaître. Afin de fixer les tuyaux au mur, nous avons utilisé également des colliers.

❖ **Fuite d'eau**

Pour simuler une fuite nous avons percé des trous de diamètre de  $\varnothing=10$  mm au niveau de la conduite.

❖ **Electrovanne**

L'électrovanne ou électrovalve est une vanne commandée électriquement. Grâce à cet organe il est possible d'agir sur l'ouverture ou la fermeture par un signal électrique Figure (IV.6). L'électrovanne utilisé ayant une puissance de 8 watts, fonctionnant sous une tension de 220V. Elle est placée sur la conduite pour simuler la fuite. Elle est commandée à partir d'un bouton poussoir.



**Fig. IV.6.**Électrovanne



**Fig. IV.7.**Bouton poussoir

❖ *Pompe*

Notre pompe d'eau est de la marque CALPEDA ayant ces caractéristiques :

- 1- Débit :  $Q_{\min/\max} = 0,4/2,3 \text{ m}^3/\text{h}$
- 2- Puissance : 0,33 kw
- 3- Vitesse de rotation : 2900 tr/min



**Fig.IV.8.**Pompe à eau marque CALPEDA

❖ *Réservoir*

Notre réservoir est en plastique d'une capacité 100 litres, elle est utilisée pour stocker l'eau qui circule dans la conduite.



**Fig. IV.9.**Réservoir

### IV.5. Circuit électronique de conditionnement

Le circuit électronique du signal provenant des capteurs de pression du système d'acquisition réalisé au laboratoire est indiqué sur la figure synoptique ci-dessous

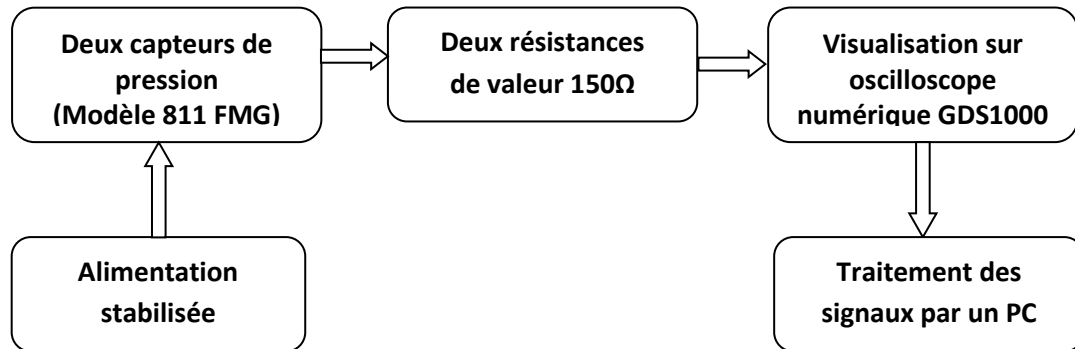


Fig. IV.10. Synoptique du système électronique de conditionnement

#### ❖ L'oscilloscope numérique GDS 1000

L'oscilloscope GW-INSTEK modèle GDS 1000 est utilisé pour la visualisation et la mémorisation des signaux provenant des capteurs de pression après la boucle de conditionnement, pour les stocker sous forme de fichiers numériques exploitables.

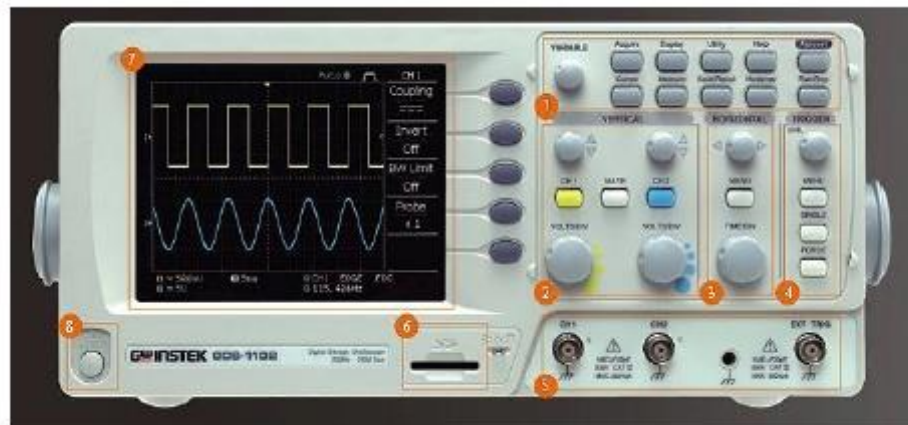


Fig. IV.11. Oscilloscope numérique GDS 1000

#### ▪ Fonctionnalité d'oscilloscope GDS 1000

Comme tout oscilloscope le GDS 1000 ayant les fonctions standard en plus il a :

- Encoche pour la carte SD
- Visualisation de la TFT
- Port USB type B
- Système de débruitage

**▪ Caractéristiques techniques**

- Deux canaux de bande passante 25MHZ\_100MHZ
- Une fenêtre de longueur de 4k échantillon par seconde
- détection de crête aussi vite que 10ns
- sauvegarder / rappel des 15 paramètres et des formes d'onde de la face avant
- 5.6 " écran couleur TFT pour tous les modèles
- 19 mesures automatiques
- temps 1ns gamme de base ~ 10s / div.
- connexion PC avec USB type B
- opérateurs arithmétiques additionner, soustraire, FFT

**❖ Alimentation stabilisée**

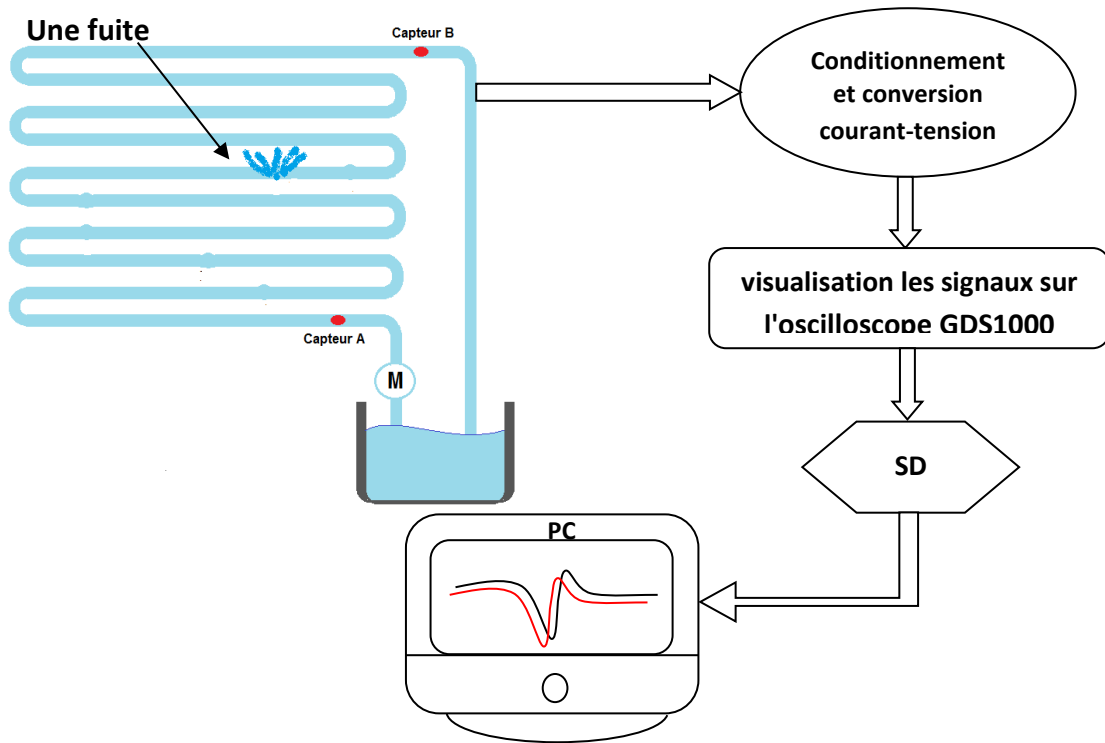
Nous avons utilisé une alimentation stabilisée GW INSTEK modèle GPC-30-20 afin d'alimenter les différents étages de notre système d'acquisition.



**Fig. IV.12.** Alimentation stabilisée GW modèle 3020

**IV.6. Système de détection réalisé**

Le système de détection de fuite que nous avons réalisé est composé de deux parties: l'une hydraulique contenant les conduites et leurs accessoires et l'autre électronique comprenant le capteurs, le système de conditionnement ainsi que le système de visualisation et de stockage.



**Fig. IV.13.** Circuit électrique du système d'acquisition réalisé

Les capteurs de pressions utilisés sont basés sur des transducteurs, ces derniers transforment les signaux de pressions à des signaux électriques sous forme de courant amplifié par la boucle de courant 4-20mA, par la suite en tension via une résistance pour rendre le signal visualisable sur l'oscilloscope et exploitable, la plage linéaire de fonctionnement des transmetteurs utilisés est  $4mA \rightarrow 0 \text{ PSIG}$  et  $20mA \rightarrow 100 \text{ PSIG}$

La modélisation de la fonction de notre transmetteur est donnée par la fonction suivante

$$I = 0.16P + 4 \text{ [mA]} \quad (\text{IV.1})$$

-  $I$ : courant en mA

-  $P$ : pression en PSIG

L'information pour qu'elle soit visualisée par l'oscilloscope on a besoin d'une conversion courant-tension. Cette dernière est obtenue en utilisant une résistance d'une valeur égale à  $R = 150 \Omega$ , par conséquent

$$U = 24P + 600 \text{ [mV]} \Rightarrow P = \frac{U - 600}{24} \text{ [PSIG]} \quad (\text{IV.2})$$

Donc: Pour  $0 \text{ PSIG}$ ,  $U_{\min}$  correspondante est de  $= 600 \text{ mV}$

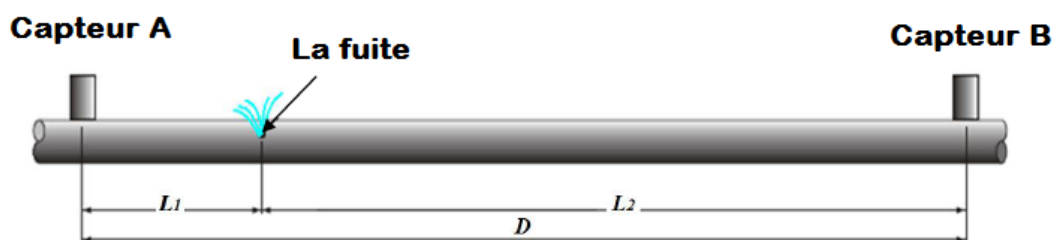
également pour  $(100 \text{ PSIG})$ ,  $U_{\max}$  correspondante est de  $= 3000 \text{ mV}$ .

Les informations de nos signaux acquis vont être stocker dans une carte mémoire SD. Avant de faire l'enregistrement des signaux, on doit mettre en place cette carte à l'endroit prévu sur l'oscilloscope. On règle la vanne sur la conduite dans une certaine position correspondante à une certaine valeur de pression. L'image de cette dernière est un courant indiqué par un ampèremètre. Afin de sauvegarder les données de notre signal on agit sur le bouton sauvegarde de l'oscilloscope. Les données sont sauvegardées dans un fichier Excel.

#### IV.7. Résultats et discussions

Les signaux issues des capteurs de pression relevés auparavant seront traités en utilisant la technique d'intercorrélation entre les deux signaux acquis permettant la détection et localisation des fuites.

Sachant que les difficultés d'acquisitions des signaux portant l'information, nous a amené à faire plusieurs acquisitions pour différentes positions pour deux valeurs de pression sur la canalisation. La représentation des signaux échantillonnés peut se faire en exploitant les données enregistrées dans un fichier Excel, en utilisant un programme élaboré sous MATLAB. La Figure (IV.14) ci-dessous représente un tronçon de la conduite sur le quelle nous avons placé deux transmetteurs de pression distant de  $D$ . Nous avons simulé une fuite à une position pris arbitrairement de tel sorte qu'elle ne soit pas au milieu de notre tronçon. Une fois qu'il y a une singularité constaté sur nos signaux correspondante à une dépression, nous disons que nous avons détecté une anomalie sur notre tronçon( détecter une fuite). La localisation peut se faire avec plusieurs méthodes. On s'y basé sur deux techniques l'une est très utilisé dans les détecteurs bon marché appelée technique d'intercorrélation, l'autre est hydraulique basée sur des débitmètres.



**Fig. IV.14.** Schéma synoptique d'un portion de circuit réalisé

Dans notre application, nous avons pris une distance entre les deux capteurs égale à  $D=24.36m$ . La vitesse de propagation d'onde de pression dépend de la nature du matériau entrant dans la fabrication de la conduite (PEHD, PVC,ACIER) et ces dimensions. Cette relation est donnée par l'équation ci-dessous :

$$V = \frac{1}{\sqrt{\rho \left( \frac{1}{\varepsilon} + \frac{d}{eE} \right)}} \quad (\text{IV.3})$$

Avec:  $\rho$  masse volumique d'eau, pour 20°C = 998.2 Kg/m<sup>3</sup>

$\varepsilon$  module d'élasticité d'eau, pour 20°C = 2.2×10<sup>9</sup> Pa.

$d$  diamètre intérieur de la conduite = 4×10<sup>-2</sup> m

$e$  épaisseur de la conduite = 2.4×10<sup>-3</sup> m .

$E$  module de Young de la conduite = 9×10<sup>8</sup> N/m<sup>2</sup> .

Nous avons trouvé la vitesse de propagation de l'onde de pression dans notre cas égale à **V= 229.78 m/s.**

L1 et L2 représentent les distances entre la fuite et les deux capteurs A et B respectivement.

Dans notre étude, nous avons choisi arbitrairement cinq positions de la fuite, le tableau ci-dessous regroupe les différentes distances des fuites choisies par rapport au capteur A.

**Tableau. IV.2.** Les distances des fuites par rapport au capteur A

<b>X<sub>1</sub>= 3.56m</b>	<b>X<sub>2</sub>= 6.16m</b>	<b>X<sub>3</sub>= 7.78m</b>	<b>X<sub>4</sub>=11.8m</b>	<b>X<sub>5</sub>=14.3m</b>
-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	----------------------------	----------------------------

Le temps nécessaire à l'onde de propagation pour arriver au capteur A est donné par

$$T_1 = L_1/V \quad (\text{IV.4})$$

D'une même façon pour le capteur B:

$$T_2 = L_2/V \quad (\text{IV.5})$$

Le décalage temporel du signal (2) par rapport au signal (1) :

$$\Delta t = T_2 - T_1 = \frac{(L_2 - L_1)}{V} \quad (\text{IV.6})$$

$$\text{Avec : } D = L_2 + L_1 \Rightarrow L_2 = D - L_1 \quad (\text{IV.7})$$

Donc le décalage temporel va être

$$\Delta t = \frac{(D - V \Delta t)}{2} \quad (\text{IV.8})$$

Les signaux acquis de part et d'autre de la fuite sont sous la forme de vecteurs X<sub>1</sub>[n] et X<sub>2</sub>[n]. Ils ont la même taille correspondant à un nombre d'échantillons N=4000. Ces deux signaux possèdent la même fréquence d'échantillonnage  $f_s$ . Théoriquement, les signaux issus des deux capteurs sont identiques et proviennent à ces derniers à des temps différés. L'existence d'une fuite dans la conduite est décelée par un pic dans le graphe d'intercorrélacion ( R<sub>X<sub>1</sub> X<sub>2</sub>,k</sub>)

connaissant la valeur  $k$  pour laquelle la fonction d'intercorrélation est maximale, on peut en déduire le temps de retard par l'équation ci-dessous :

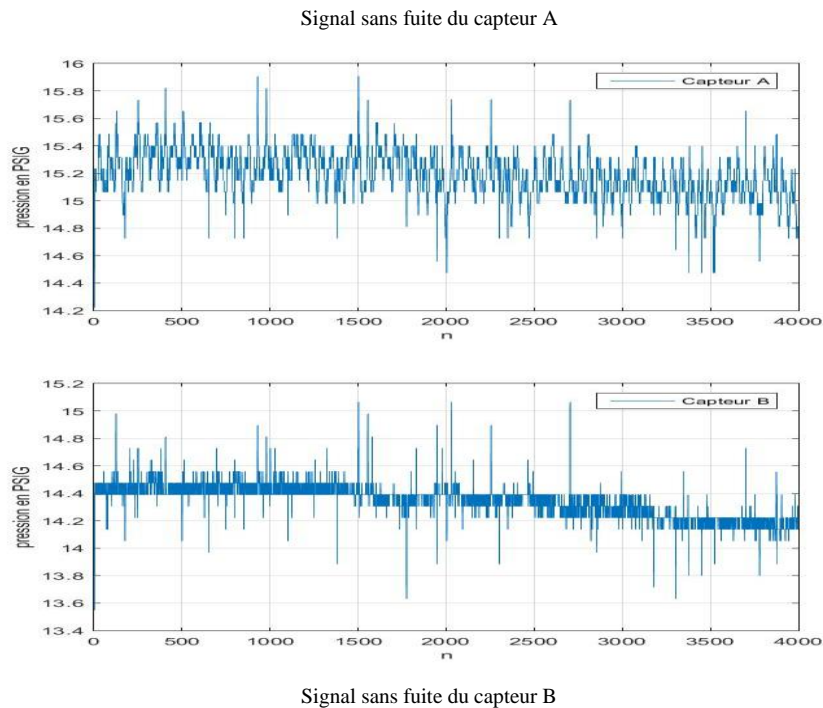
$$\Delta t = \frac{N-1-k_{pic}}{f_s} \quad (IV.9)$$

### IV.7.1. Signaux acquis

Nous avons fait plusieurs acquisitions pour deux différentes pressions 15 PSIG et 22.5 PSIG, afin de détecter et localiser les positions des fuites ,en utilisant logiciel MATLAB pour notre traitement.

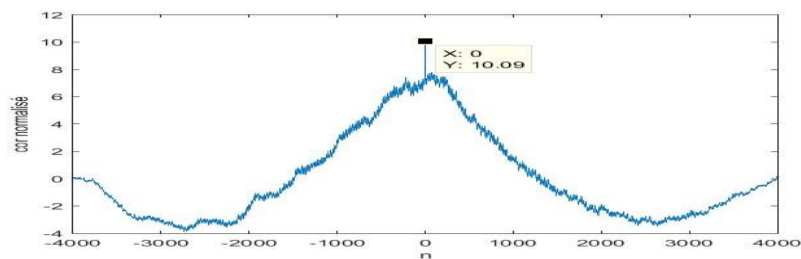
Nous présentons un exemple de mesure parmi plusieurs acquisition faits à différents positions choisis aléatoirement.

Nous remarquons que les signaux ont une nature aléatoire pour l'analyse on doit tenir compte de la moyenne et l'écart type de ces signaux.



**Fig. IV.15.**Signaux sans fuite issus des deux capteurs de pression

Après l'application de l'intercorrélation des deux signaux, nous avons trouvé



**Fig. IV.16.**Signal d'intercorrélation des deux signaux

```

xmooy =
    15.1912

ymooy =
    14.3477

z1 =
    0.1647

z2 =
    0.1195

lagDiff =
    0

Il n y a pas de fuite
fx >>

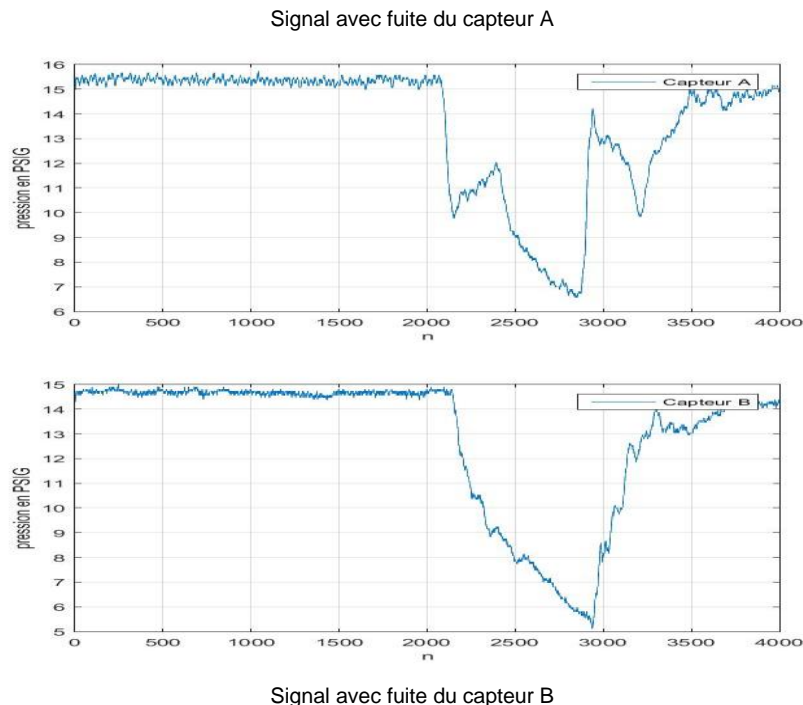
```

Théoriquement lorsque nous appliquons la corrélation à ces deux signaux le pic doit être obtenu pour  $K=0$ . En analysant la courbe d'intercorrélation de la Figure (IV.16) et le résultat après exécution du programme, nous constatons que le pic de la corrélation appliqué aux signaux sans fuite est situé au milieu de la courbe signifiant l'analogie entre le résultat pratique et théorique.

#### ❖ Signaux obtenues pour une pression de 15 PSIG

Dans le cas d'une pression de 15 PSIG, théoriquement le pic doit être décaler par rapport au zéro pour les signaux avec fuite .

Les signaux ci-dessous correspondent aux signaux avec fuite pour une distance mesuré égale à  $X_3=7.78$  m.



**Fig. IV.17.** Signaux avec fuite issus des deux capteurs de pression

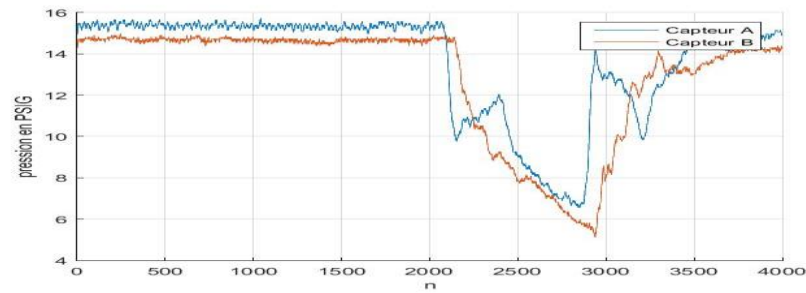


Fig. IV.18. Décalage temporel entre les deux signaux avec fuite issus

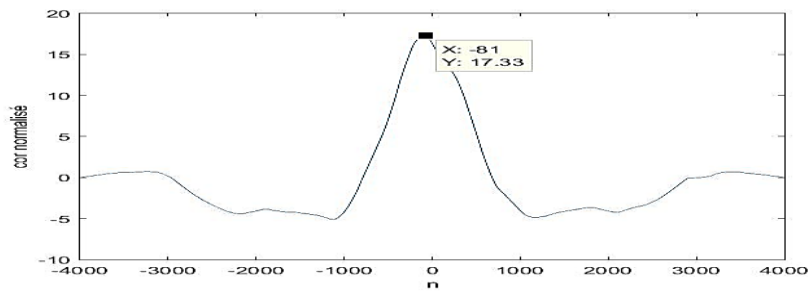


Fig. IV.19. Signal d'intercorrélation des deux signaux

```

lagDiff =
    -81

timeDiff =
    0.0320

x =
    8.5035

fx >>

```

Nous remarquons que les deux signaux présentent une singularité indiquant l'existence d'une fuite et un décalage temporel entre eux qui nous permet de connaître la position exacte de la fuite, en appliquant l'intercorrélation.

De la même manière une perte de charge est constatée clairement Figure (IV.18) due à une perte d'une certaine quantité d'eau à cause de la fuite.

Le traitement sous MATLAB permet de calculer la distance de la fuite et les caractéristiques statistiques des signaux acquis. Pour confirmer leur non-stationnarité.

$M$  : Moyenne .

$\sigma$  : Ecart type .

$\Delta t$  : Décalage temporel entre les deux signaux .

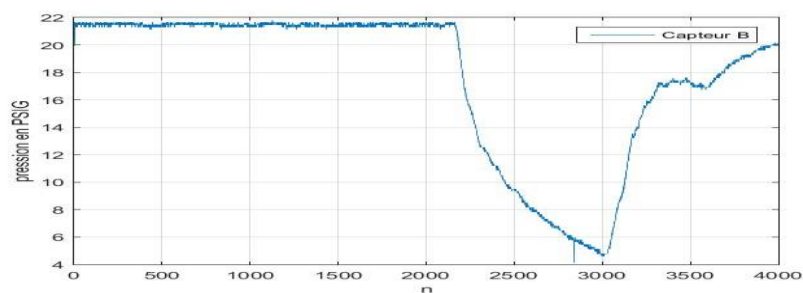
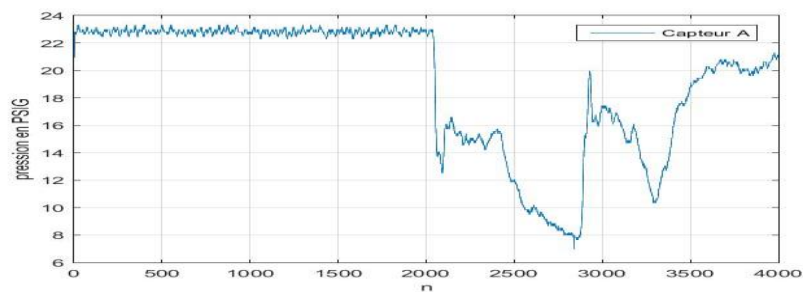
**Tableau. IV.3.**La distance de fuite et les caractéristiques des signaux

	<b>M</b>	<b><math>\sigma</math></b>
<b>Signal A</b>	<b>13.6282</b>	<b>2.5782</b>
<b>Signal B</b>	<b>12.8842</b>	<b>2.8124</b>
<b><math>\Delta t</math></b>	<b>0.032 s</b>	
<b>Distance calculé <math>X_3</math></b>	<b>8.5035 m</b>	

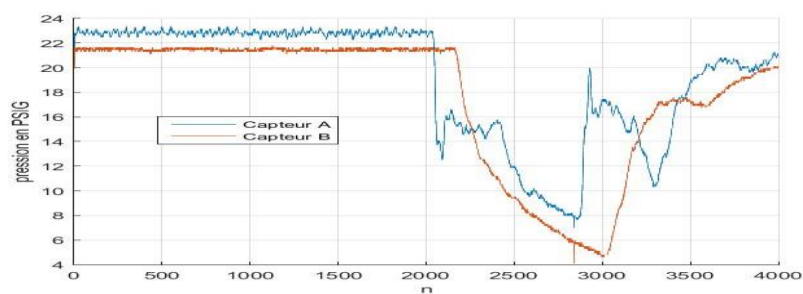
❖ *Signaux obtenues avec une pression de 22.5 PSIG :*

Les signaux avec fuite ci-dessous sont pour une distance mesuré égale à  $X_1 = 3.56$  m.

Signal avec fuite du capteur A



Signal avec fuite du capteur B

**Fig. IV.20.**Signaux avec fuite issus des deux capteurs de pression**Fig. IV.21.**Décalage temporel entre les deux signaux avec fuite issus

Après l'application de l'intercorrélation des deux signaux, nous avons trouvé

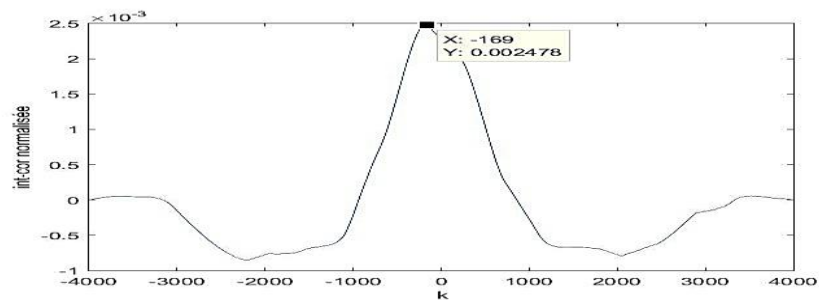


Fig. IV.22. Signal d'intercorrélation des deux signaux

```
lagDiff =
    -169

timeDiff =
    0.0672

x =
    4.4594

fx >>
```

Donc la distance de fuite et les caractéristiques statistiques des signaux acquis sont illustrés sur le tableau suivant.

Tableau. IV.4. La distance de fuite et les caractéristiques des signaux

	<b>M</b>	<b><math>\sigma</math></b>
<b>Signal A</b>	<b>19.0881</b>	<b>4.7291</b>
<b>Signal B</b>	<b>17.5821</b>	<b>5.4955</b>
<b><math>\Delta t</math></b>	<b>0.0672 s</b>	
<b>Distance calculé <math>X_1</math></b>	<b>4.4594 m</b>	

Le tableau ci-dessous récapitule la position de la fuite après application de l'intercorrélation pour des différentes distances avec deux différentes pressions, ainsi que les erreurs entre la valeur réelle de la distance et la mesure obtenus.

**Tableau. IV.5.** tableau récapitulatif des mesures de la position de fuite

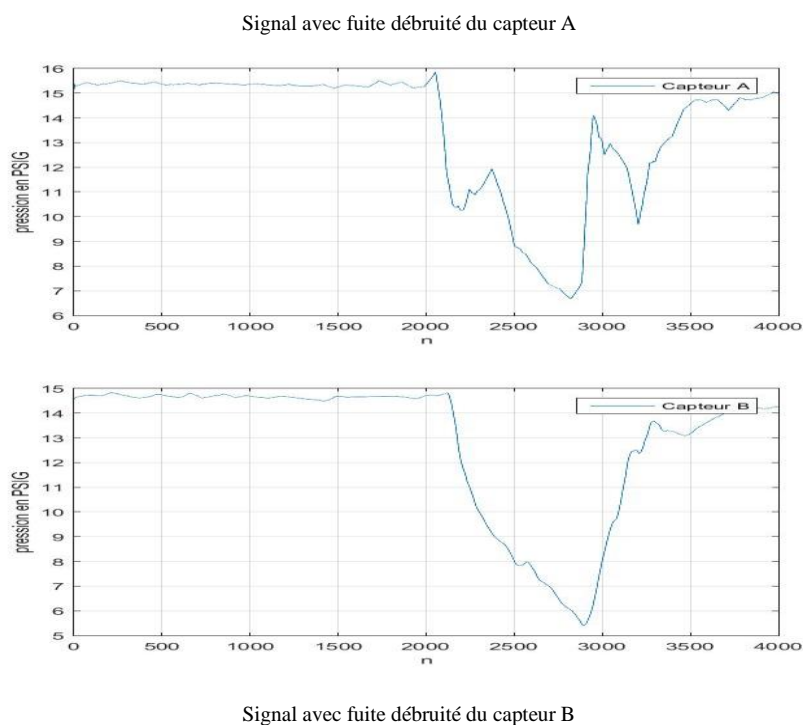
<b>X mesuré</b>		<b>3.56</b>	<b>6.16</b>	<b>7.78</b>	<b>11.8</b>	<b>14.3</b>
<b>15PSIG</b>	<b>X calculé</b>	<b>3.0348 m</b>	<b>7.4465 m</b>	<b>8.5035 m</b>	<b>11.8124m</b>	<b>13.8804 m</b>
	<b>Erreur relative</b>	<b>14%</b>	<b>20%</b>	<b>9%</b>	<b>0.1%</b>	<b>2.9%</b>
<b>22.5 PSIG</b>	<b>X calculé</b>	<b>4.4594m</b>	<b>8.2278 m</b>	<b>8.7793 m</b>	<b>11.9962 m</b>	<b>13.6965 m</b>
	<b>Erreur relative</b>	<b>25%</b>	<b>33%</b>	<b>12.8%</b>	<b>1.6%</b>	<b>4.2%</b>

#### IV.7.2. Application de l'ondelette

Afin d'éliminer les bruits entaché avec les signaux, nous avons appliqué l'ondelette Daubechies 4 de niveau 6 pour la première pression et Daubechies 6 niveau 6 pour la deuxième. Les résultats trouvés après l'application de l'ondelette sont

##### ❖ *Signaux obtenues pour une pression de 15 PSIG*

L'ondelette décompose le signal à des approximations ( signaux basses fréquences) et des détails ( signaux hautes fréquences). Avec un choix judicieux de threshold, nous avons obtenus les signaux ci-dessous.

**Fig. IV.23.**Signaux débruités avec fuite issus des deux capteurs de pression

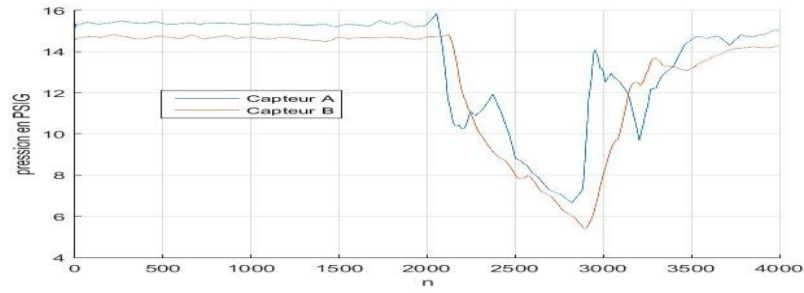


Fig. IV.24. Décalage temporel entre les deux signaux débruités avec fuite issus

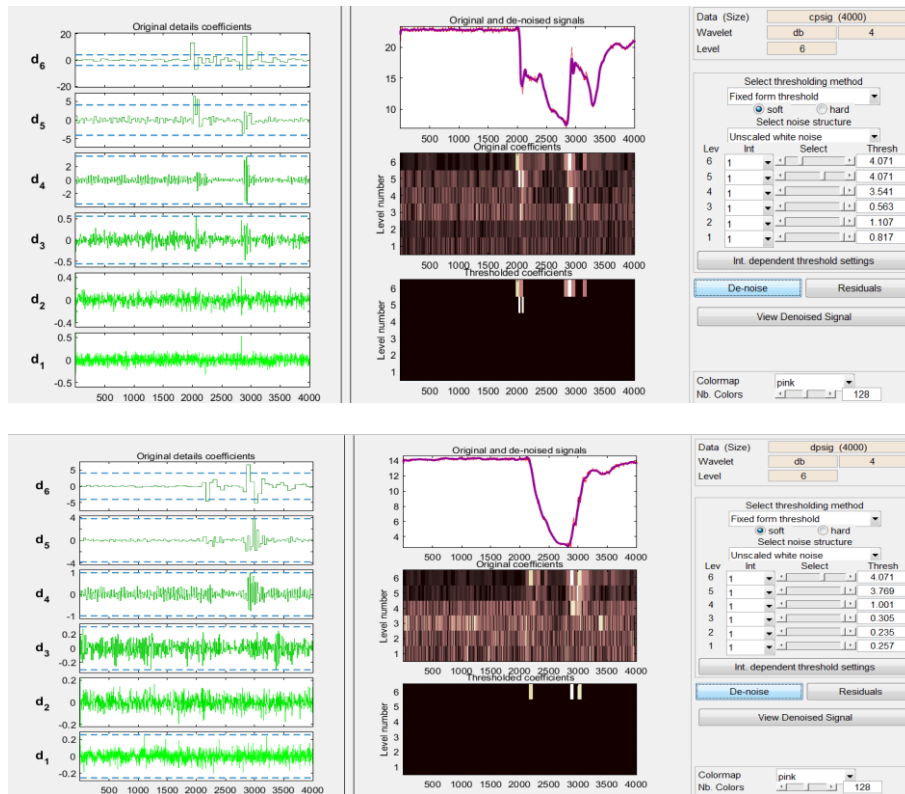


Fig. IV.25. fenêtre débruitage

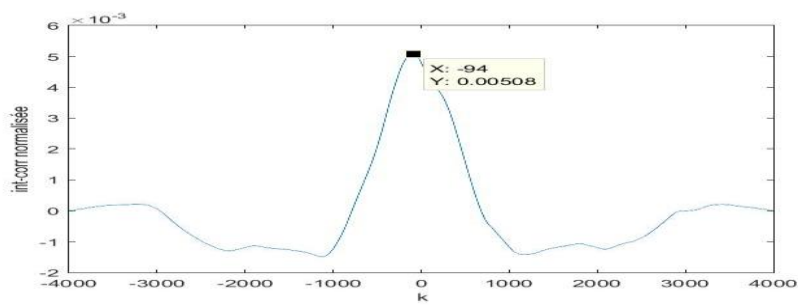


Fig. IV.26. Signal d'intercorrélation des deux signaux débruités

```

lagDiff =
    -94

timeDiff =
    0.0372

x =
    7.9061

fx >>
    
```

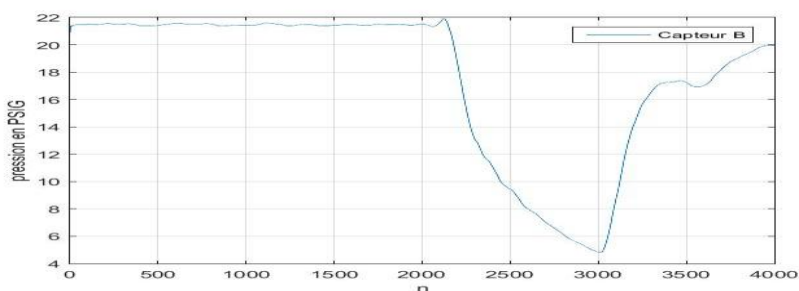
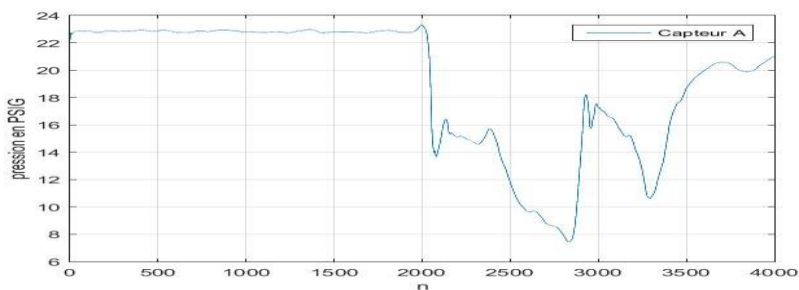
Après l'application de l'ondelette, un lissage très souhaité est obtenu pour nos signaux avec fuite qui va conduire certainement à des résultats meilleurs.

**Tableau. IV.6.** La distance de fuite et les caractéristiques des signaux débruités

	<b>M</b>	<b><math>\sigma</math></b>
<b>Signal A</b>	<b>13.6274</b>	<b>2.5660</b>
<b>Signal B</b>	<b>12.8841</b>	<b>2.8081</b>
<b><math>\Delta t</math></b>	<b>0.0372 s</b>	
<b>Distance calculé <math>X_3</math></b>	<b>7.9061 m</b>	

❖ *Signaux obtenues pour une pression de 22.5 PSIG :*

Signal avec fuite débruité du capteur A



Signal avec fuite débruité du capteur B

**Fig. IV.27.** Signaux débruités avec fuite issus des deux capteurs de pression

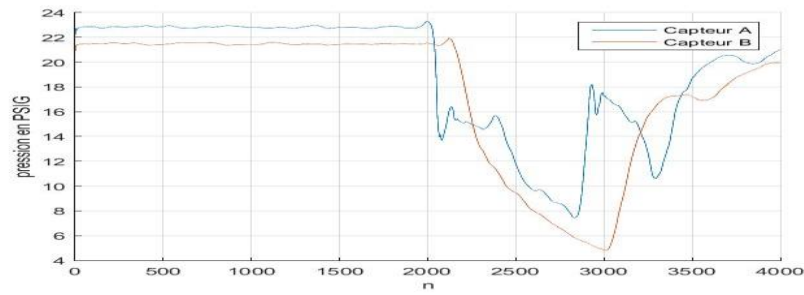


Fig. IV.28. Décalage temporel entre les deux signaux débruités avec fuite issus

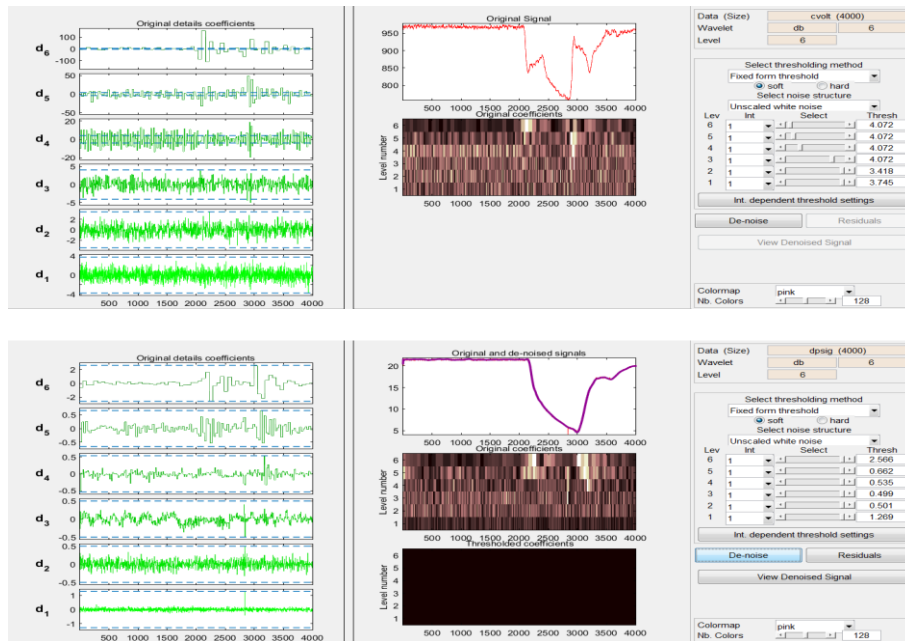


Fig. IV.29. fenêtre débruitage (Ondelette)

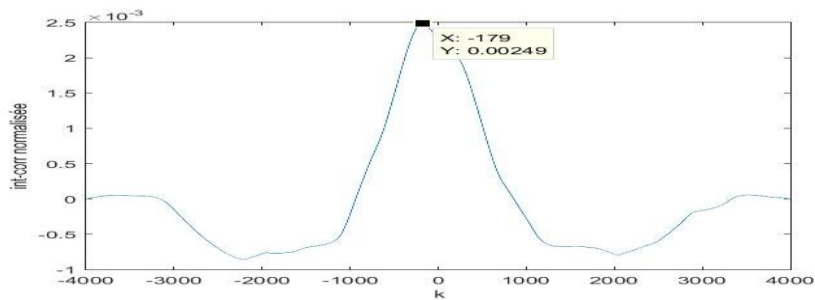


Fig. IV.30. Signal d'intercorrélation des deux signaux débruités

```

lagDiff =
    -179

timeDiff =
    0.0712

x =
    3.9998

fx >>
    
```

**Tableau. IV.7.** La distance de fuite et les caractéristiques des signaux débruités

	<b>M</b>	<b><math>\sigma</math></b>
<b>Signal A</b>	<b>19.0871</b>	<b>4.7101</b>
<b>Signal B</b>	<b>17.5816</b>	<b>5.4930</b>
<b><math>\Delta t</math></b>	<b>0.0712 s</b>	
<b>Distance calculé <math>X_2</math></b>	<b>3.9998 m</b>	

Après application de l'ondelette aux signaux de fuite. L'intercorrelation pour des différentes distances avec deux différentes pression, ainsi que les erreurs entre la valeur réelle de la distance et la mesure obtenus sont données par le tableau ci-dessous.

**Tableau. IV.8.** tableau récapitulatif des mesures de la position de fuite après application de l'ondelette

<b>X mesuré</b>		<b>3.56</b>	<b>6.16</b>	<b>7.78</b>	<b>11.8</b>	<b>14.3</b>
<b>15PSIG</b>	<b>X calculé</b>	<b>3.6781 m</b>	<b>7.2168 m</b>	<b>7.9061 m</b>	<b>11.4447 m</b>	<b>13.9263 m</b>
	<b>Erreur relative</b>	<b>3.3%</b>	<b>17%</b>	<b>1.6%</b>	<b>3%</b>	<b>2.6%</b>
<b>22.5 PSIG</b>	<b>X calculé</b>	<b>3.9998 m</b>	<b>8.4116 m</b>	<b>8.7333 m</b>	<b>11.9043 m</b>	<b>13.7425 m</b>
	<b>Erreur relative</b>	<b>12%</b>	<b>36%</b>	<b>12%</b>	<b>0.8%</b>	<b>3.8%</b>

**Tableau. IV.9.** Tableau comparatif des mesures de la position de fuite avant et après application de l'ondelette

<b>X mesuré</b>		<b>3.56</b>	<b>6.16</b>	<b>7.78</b>	<b>11.8</b>	<b>14.3</b>
<b>15PSIG</b>	<b>Erreur relative Sans l'ondelette</b>	<b>14%</b>	<b>20%</b>	<b>9%</b>	<b>0.1%</b>	<b>2.9%</b>
	<b>Erreur relative Après l'ondelette</b>	<b>3.3%</b>	<b>17%</b>	<b>1.6%</b>	<b>3%</b>	<b>2.6%</b>
<b>22.5 PSIG</b>	<b>Erreur relative Sans l'ondelette</b>	<b>25%</b>	<b>33%</b>	<b>12.8%</b>	<b>1.6%</b>	<b>4.2%</b>
	<b>Erreur relative Après l'ondelette</b>	<b>12%</b>	<b>36%</b>	<b>12%</b>	<b>0.8%</b>	<b>3.8%</b>

Nous constatons que l'effet de débruitage par application de l'ondelette a mené à des bons résultats concernant la détermination de la position de la fuite.

- ❖ Comme deuxième tâche, on a voulu à travers ce travail minimiser l'erreur voire l'annuler, en développant un modèle reflétant notre système hydraulique géré par des équations mathématiques déterminant la position de la fuite à base des débitmètres. []

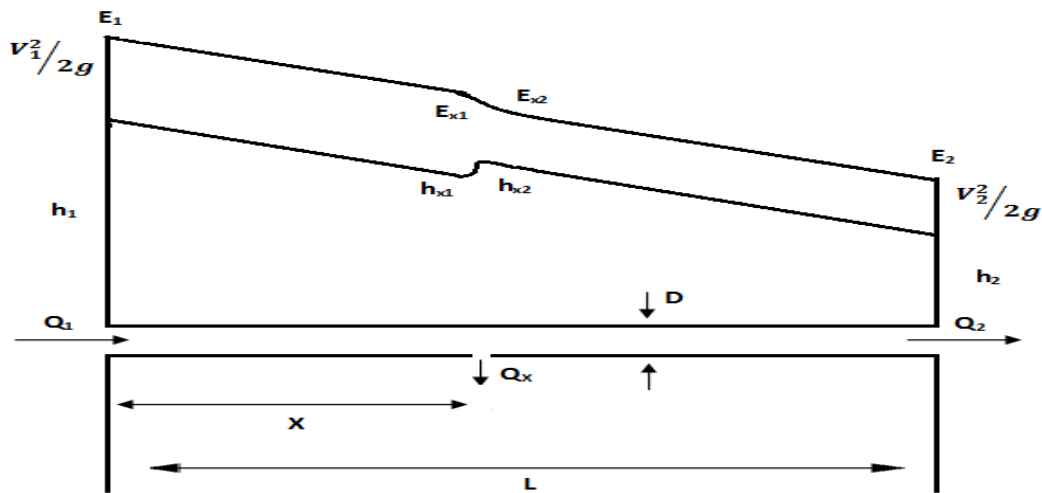


Fig. IV.31. Situation de débit sous considération

Les variables affectant le problème de l'état d'équilibre sont les suivantes

$Q_1$  : Débit d'entrée à la conduite.

$Q_2$  : Débit de sortie de la conduite.

$h_1$  : Hauteur statique à la section d'entrée.

$h_2$  : Hauteur statique à la section de sortie.

- A l'emplacement d'orifice, on a les variables suivantes

$Q_x$  : Débit de décharge par l'orifice.

$h_{x1}$  : Hauteur statique juste en amont de l'orifice de la fuite.

$h_{x2}$  : Hauteur statique juste en aval de l'orifice de la fuite.

$(c_d \times A_x)$  = surface d'écoulement effective à travers l'orifice.

(produit de la surface réelle d'orifice  $A_x$  et son coefficient de décharge  $c_d$ ).

$X$  : Position de fuite mesurée à partir de la section d'entrée.

La variable  $E$  dans la Figure (IV.31) indique l'énergie totale par unité de poids, c'est-à-dire la somme de l'énergie statique et de l'énergie dynamique

$$E_i = h_i + \frac{V_i^2}{2g} \quad (\text{IV.10})$$

Où  $i$  est égal à 1 à l'entrée, 2 à la sortie de la conduite,  $X_1$  juste avant l'orifice, et  $X_2$  juste après

De la liste de variables susmentionnée, il y a neuf inconnues. Si l'on mesure à la fois le débit et la pression à l'entrée et à la sortie de la conduite, cinq des équations sont nécessaires pour résoudre le problème (c'est-à-dire pour obtenir un modèle mathématique bien posé).

Les cinq équations décrivant le modèle mathématique qui donne la solution du problème sont comme suit

- Equation de continuité :  $Q_1 + Q_2 = Q_x$  (IV.11)

- Les pertes de charge dues au frottement dans la portion de la conduite de longueur X, en amont de l'orifice peuvent être exprimées sous la forme

$$h_1 - h_x = f_1 \frac{X}{D} \frac{Q_1^2}{2g.A^2} = k_1 X Q_1^2 \quad (IV.12)$$

ou A représenté la surface de la section de la conduite d'une longueur L et diamètre D.

$f_1$  Facteur de frottement correspondant à la vitesse d'écoulement  $V_1$ .

g Accélération de la pesanteur.

$k_1 = f_1 \frac{Q_1^2}{2g.D.A^2}$  Résistance hydraulique par unité de longueur.

- Les pertes de charge dues au frottement dans la portion de la conduite ayant une longueur L-X en aval de l'orifice peuvent être exprimées sous la forme

$$h_x - h_2 = f_2 \frac{L-X}{D} \frac{Q_2^2}{2g.A^2} = k_2 (L-X) Q_2^2 \quad (IV.13)$$

- La décharge à travers l'orifice est obtenue par l'équation suivante

$$Q_x = c_d A_x \sqrt{2gE_{x1}} \quad (IV.14)$$

- Enfin, en appliquant le bilan énergétique global sur le système considéré, l'énergie totale perdue à travers l'orifice est

$$\begin{aligned} H &= Q_1 E_1 - Q_2 E_2 - Q_1 (E_1 - E_{x1}) - Q_2 (E_2 - E_{x2}) \\ \Rightarrow H &= Q_1 E_{x1} - Q_2 E_{x2} \end{aligned} \quad (IV.15)$$

L'équation ci-dessus est valable pour un fluide incompressible (eau dans notre cas)

Lorsque le flux débite dans l'atmosphère:  $H = (Q_1 - Q_2) \cdot \frac{V_x^2}{2g}$  (IV.16)

Avec:  $V_x = \frac{Q_x}{c_d A_x}$  (IV.17)

la vitesse du fluide sortante de l'orifice.

En remplaçant l'équation (IV.11) et (IV.17) dans (IV.16), on obtient

$$H = C \cdot (Q_1 - Q_2)^3 \quad (\text{IV.18})$$

$$\text{Où : } C = \frac{1}{2g(c_d A_x)^2}$$

- En égalant les deux expressions pour  $H$ , exprimant  $E_{x1}$  et  $E_{x2}$  en termes de sommes correspondantes des énergies statiques et dynamiques, et en désignant la constante  $1/2gA^2$  par  $B$ , on obtient

$$\begin{aligned} Q_1 h_{x1} - Q_2 h_{x2} &= (Q_1 - Q_2) [ (C - B)Q_1^2 - (2C + B)Q_1 Q_2 + (C - B)Q_2^2 ] \\ &= (Q_1 - Q_2) \lambda \end{aligned} \quad (\text{IV.19})$$

$$\text{Avec : } \lambda = [ (C - B)Q_1^2 - (2C + B)Q_1 Q_2 + (C - B)Q_2^2 ]$$

#### ▪ Formulation mathématique pour la détermination de la position de la fuite

L'ensemble des équations décrivant le phénomène physique considéré a été donné dans la section précédente. Nous voulons maintenant trouver l'expression qui nous permet de prédire l'emplacement de la fuite en termes de débits mesurés à l'entrée et à la sortie de la conduite.

Afin d'atteindre cet objectif, nous remplaçons dans l'équation (IV.19), les valeurs de  $h_{x1}$  et  $h_{x2}$  des équations (IV.12) et (IV.13) respectivement.

$$\text{La position de la fuite va être : } X = \frac{(h_1 - h_2) - k_2 L Q_2^2 + \left(\frac{Q_1}{Q_2} - 1\right)(h_1 - \lambda)}{\frac{k_1 Q_1^2 Q_1}{Q_2} + k_2 Q_2^2} \quad (\text{IV.20})$$

Pour des différentes pressions et pour plusieurs positions de la fuite par rapport à l'un des capteurs, on a prélevé les débits d'entrée et de sortie, en utilisant au lieu des débitmètres des mesures traditionnelles, en prélevant à chaque fois le temps correspondant à cinq litres d'eau. Ces mesures de débit sont effectuées pour des distances prédéfinies préalablement, constituant une base de données. Cette dernière sera utilisée lors de l'application des régressions non linéaires. L'apprentissage du modèle mathématique ainsi développé va être fait pour certaines distances et la validation va être faite pour d'autres distances. Les régressions sont utilisées dans le but d'obtenir les paramètres physiques du circuit hydraulique telles que les frottements et la section effective de la fuite.

Le tableau (IV.10) illustre les mesures prélevées à l'entrée et à la sortie de la conduite pour des différentes positions de la fuite.

**Tableau. IV.10.** Mesure prélevée à l'entrée et à la sortie de la conduite

	5L/S	5L/S	5L/S	5L/S	5L/S	Moyenne 5L/S	Q=L/S	Q=m <sup>3</sup> /s
position1	14,8	15	15,1	15	15,1	15	0,333333	0,015
position2	15,8	15,9	16	16,1	16	15,96	0,313283	0,01596
position3	16,4	16				16,2	0,308642	0,0162
position4	15,9	15,8	15,8	16	15,9	15,88	0,314861	0,01588
position5	15,5	15,6	15,5	16,5	15,3	15,68	0,318878	0,01568
position6	14,9	14,3	14,2	13,9	14,3	14,32	0,349162	0,01432
Q entré	9,6	9,6	9,5	9,5	9,4	9,52	0,52521	0,00952

En appliquant la régression non linéaire pour optimiser les paramètres indiqués en haut. En prenant les valeurs de  $h_1$ ,  $h_2$  et  $L$  comme indiqué par le tableau ci-dessous.

**Tableau. IV.11.** Valeurs des constantes et des variables utilisées pour la régression

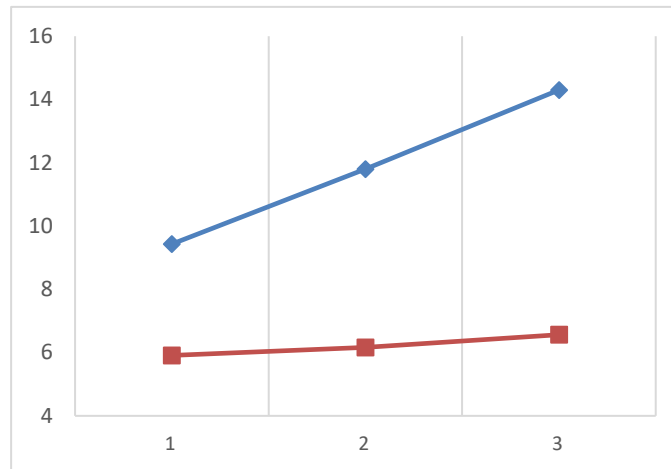
	Valeur	Unité	
h1	1,56	m	cte
h2	1,6	m	cte
K1	1		var
K2	1		var
L	26	m	cte
LAMDA	1		var

Après l'application de la régression, on a trouvé les distances indiquées par le tableau ci-dessous.

**Tableau. IV.12.** Valeurs des distances obtenues par la régression non linéaire

x mes	x calcul	Erreur quadratique	
3,56		12,6736	
6,16		37,9456	
7,78		60,5284	
9,43	5,91052	12,38671	Erreur q m
11,8	6,15965	31,81351	34,67899
14,3	6,56458	59,83675	

Pour la régression , on a opté pour que l'erreur quadratique moyenne soit minimale. On a trouvé après l'application de la régression les courbes indiquées ci-dessous.



**Fig. IV.32.** Courbe des distances mesuré et distances calculé

Après plusieurs tentatives, on a constaté que les deux courbes ne peuvent converger. Cela est due au mesure qu'est ont été effectuée manuellement, qui nous a causé la divergence des deux courbes.

#### **IV.8. Conclusion**

La régression non linéaire est un moyen d'optimisation des paramètres des modèles de systèmes. L'application de l'intercorrélation au deux signaux de pression nous a amené à déterminer la distance de la fuite par rapport à l'un des capteurs, les résultats obtenues comportes des erreurs par rapport au distances effectives. Après l'application de débruitage sur nos signaux, on à constater un rapprochement des valeurs réelles . Malgré tout ça il y'a des erreurs très petites, pour cela on a essayé de chercher un autre moyen plus précis. Ce dernier se base sur un modèle mathématique qu'on a développé , les résultats qu'on a obtenus ont divergé à cause des erreurs commises sur les mesures effectuées .

**CONCLUSION  
GENERALE**

### Conclusion générale

La détection et la localisation de fuite est devenue plus importante et bénéfique pour les grands réseaux de distribution d'eau, où la réduction du temps compris entre la formation d'une fuite et sa localisation précise est parmi les facteurs déterminants pour atteindre un bon rendement de ces réseaux. Donc pour les responsables des réseaux de distribution, l'amélioration du rendement d'un réseau a été toujours un souci majeur pour les responsables afin de minimiser ces fuites qui causent des risques sur la santé publique et provoquent également des pertes économiques.

Le travail que nous avons réalisé dans le cadre de ce mémoire porte essentiellement sur la détection et la localisation de fuite dans un réseau de distribution d'eau en PEHD, nous avons utilisé deux méthodes l'une se base sur des transmetteurs de pression et l'autre hydraulique exploitant des débitmètres. La première méthode de localisation a été basée sur le traitement du signal d'une mesure d'onde de pression en appliquant la technique d'intercorrélation, et l'autre technique utilise des débitmètres, placés en amont et en aval de la conduite. L'analyse de débit unidimensionnelle est gérée par un modèle expérimental mathématique dont les équations sont obtenues à partir des relations de Bernoulli.

Dans le premier chapitre, nous avons présenté une généralité sur les réseaux de distributions et les fuites d'eau, suivi d'un panorama des différentes techniques de détection de fuites.

Le deuxième chapitre a été dédié aux notions des fluides et ces caractéristiques physiques les différents types de pressions ainsi que la dynamique de fluide compressible, suivi par la notion de capteur et de transmetteur.

Dans le troisième chapitre, on a présenté quelques définitions générales sur les signaux, et les différentes techniques de traitement appliquées avec une étude détaillée sur la technique d'intercorrélation.

Enfin le quatrième chapitre a été consacré à l'application de cette technique sur des signaux de fuite réels acquis sur un canal prototype dans le laboratoire. Une autre méthode d'analyse a été effectuée en développant une méthode hydraulique basée sur un modèle mathématique utilisant des débitmètres.

Comme perspective, nous pensons à faire des acquisitions et localisations en temps réel en exploitant des cartes DSP. On pense également à utiliser des cartes Arduino pour transmettre nos signaux à distance. Éventuellement, la méthode hydraulique a besoin pour quelle soit efficace d'utiliser des débitmètres de précision.

**Références  
bibliographiques**

### Références bibliographiques

- [1] René Vittone, Bâtir : manuel de la construction p936
- [2] François G. Brière, Distribution et collecte des eaux.3<sup>ème</sup> édition, p154
- [3] Y Labye, Conception et optimisation des réseaux d'irrigation, p5
- [4] DENIPA,1.2.3 GUI1 Réhabilitation Réseau eau potable, p6
- [5] <https://wikiwater.fr/e14-la-recherche-et-la-suppression>
- [6] HAFSI, Lakhdar. : 'Application de la technique EMD pour l'analyse des données des signaux de fuite dans les réseaux de distribution d'eau', master, université Mohamed Boudiaf- M'sila, Juin 2016
- [7] Osama Hunaidi, " La détection des fuites dans les conduites de distribution d'eau " CANADA 10/2012, p 3-5
- [8] Zhang, J., Designing a cost-effective and reliable pipeline leak-detection system. Pipes and Pipelines International, 1997. 42(1) : p. 20-26
- [9] Association québécoise des techniques de l'eau, Les fuites dans les réseaux de distribution d'eau : problèmes et solutions, Guide technique. Ministère de l'environnement du Québec, Montréal1980
- [10] Heim, P.M. 1979. Conducting a leak detection search. Journal of American Water Works Association, 71(2): 66–69
- [11] Osama Hunaidi, "Stratégies de détection acoustique des fuites sur les conduites de distribution d'eau", Solutions constructives N°79, mai 2012
- [12] Osama Hunaidi, "Stratégies de détection acoustique des fuites sur les conduites de distribution d'eau", Solutions constructives N°79, mai 2012
- [13] Pure Technologies Ltd., Sahara and SmartBallLeakDetection and Condition AssessmentSystems, Calgary. [www.puretechnologiesltd.com](http://www.puretechnologiesltd.com) (Cité en décembre 2010)
- [14] Osama Hunaidi, " La détection des fuites dans les conduites de distribution d'eau " CANADA 10/2012, p 3-5
- [15] Hamilton, S., Hartley, D., Misconceptions around acoustic leak detection, in Water21-Magazine of the International Water Association. 2008, IWA Publishing. p. 54-56.
- [16] X. Cazauran et J. Pioger, " détection de fuite : méthodes directes et indirectes", CETIM, ISBN 15/10 /2009, p 3.
- [17] Osama Hunaidi, " La détection des fuites dans les conduites de distribution d'eau " CANADA 10/2012, p 5
- [18] Notion de mécanique de fluide , RIADH BEN HAMOUDA :P2/3
- [19] Mécanique de fluide-théorie et applications,M.ELGUERRI2015-P11
- [20] Mécanique de fluide-théorie et applications,M.ELGUERRI2015/P13
- [21] Capteur de pression , R.HATTERER professeur de Physique Appliquée au lycée de la Méditerranée de la Ciotat/P6

- [22] Capteur de pression , R.HATTERER professeur de Physique Appliquée au lycée de la Méditerranée de la Ciotat/P6
- [23] Capteur de pression , R.HATTERER professeur de Physique Appliquée au lycée de la Méditerranée de la Ciotat/P7
- [24] Capteur de pression , R.HATTERER professeur de Physique Appliquée au lycée de la Méditerranée de la Ciotat/P7-P8
- [25] notion de mécanique de fluide , RIADH BEN HAMOUDA :P88
- [26] Mécanique de fluide-théorie et applications,M.ELGUERRI2015/P40
- [27] notion de mécanique de fluide , RIADH BEN HAMOUDA :P89
- [28] notion de mécanique de fluide , RIADH BEN HAMOUDA :P54-P55
- [29] notion de mécanique de fluide , RIADH BEN HAMOUDA :P89
- [30] notion de mécanique de fluide , RIADH BEN HAMOUDA :P94
- [31] notion de mécanique de fluide , RIADH BEN HAMOUDA :P95
- [32] Michel Grout Patrick Salaun-livre d'instrumentation industrielle-spécification et installation des capteurs et des vannes de regulation
- [33] La Boucle de courant 4-20mA, Sources: vcyrien@wanadoo.fr  
<http://www.sensorique.fr.st/>, Contrôleur pH / Conductivité, Projet Baccalauréat 2005.
- [34] Francis Cottet-Aide-mémoire Traitement de signal .p4-p5
- [35] Francis Cottet-Aide-mémoire Traitement de signal .p4
- [36] Adel A.mimi. Support de cours traitement de signal/P6
- [37] Adel A.mimi. Support de cours traitement de signal/P7
- [38] Sonde Abdelmouleh/Cours traitement de signal -P5]
- [39] Olivier. Bacheier. : ' Cours : Un premier pas en traitement du signal ; 2ème année d'IUT de Mesures Physiques, Courriel : Olivier.Bachelier@univ-poitiers.fr
- [40] Essid.Chaker.: 'Support de cours de Systèmes et Signaux : partie 1'
- [41] L. William, Manual. : 'The Discrete Fourier Transform', Briggs University of Colorado, Boulder, Van Emden Henson Naval Postgraduate School
- [42] Adel Amimi. Support de cours traitement de signal/P52
- [43] Adel Amimi. Support de cours traitement de signal/P22
- [44] Adel Amimi. Support de cours traitement de signal/P24
- [45] Frédéric, Truchetet. : 'Ondelettes pour le signal numérique', Editions Hermes, Paris, 1998.

## Références bibliographiques

Fig I.5. [http://img.archiexpo.fr/images\\_ae/photo-g/150569-10297356.jpg](http://img.archiexpo.fr/images_ae/photo-g/150569-10297356.jpg)

Fig I.6. <https://sf2.viepratique.fr/wp-content/uploads/sites/8/2018/06/quelles-differences-entre-un-tuyau-en-pvc-classique-et-un-modele-en-pvc-surchlore.jpg>

Fig I.7. <https://www.net-bricolage.com/794/tuyau-polyethylene-pe80-bande-bleue-90-mm-10-kg-bars-1100-m.jpg>

Fig I.8. [https://www.produjardin.fr/2295-thickbox\\_default/tuyau-pebd-diam-32-4-bar.jpg](https://www.produjardin.fr/2295-thickbox_default/tuyau-pebd-diam-32-4-bar.jpg)

Fig I.9. <https://docplayer.fr/docs-images/66/56139883/images/22-1.jpg>

<https://www.revueein.com/media/redaction/actualite/089a5e3c6d5b150d7a16a394bf7bc0258c18074c3690.jpg>

Fig I.10. [https://avatars.mds.yandex.net/get-mpic/1363658/img\\_id4876433330949776359.jpeg/9hq](https://avatars.mds.yandex.net/get-mpic/1363658/img_id4876433330949776359.jpeg/9hq)

Fig I.11. <https://images-na.ssl-images-amazon.com/images/I/51WZH59KADL.jpg>

Fig I.12. [http://bricolage.bricovideo.com/videos/bricolage\\_videos/video/outils/image-plomberie/joints.jpg](http://bricolage.bricovideo.com/videos/bricolage_videos/video/outils/image-plomberie/joints.jpg)

[https://fr.cdn.v5.futurasciences.com/buildsv6/images/largeoriginal/b/7/4/b746ba778f\\_50029157\\_joint-canalisation-eau-plomb-francois-b-cc-nc-nd-3jpg.jpg](https://fr.cdn.v5.futurasciences.com/buildsv6/images/largeoriginal/b/7/4/b746ba778f_50029157_joint-canalisation-eau-plomb-francois-b-cc-nc-nd-3jpg.jpg)

Fig I.13. <http://geplomb.com/images/vanne/big/vanne-plastique-papillon-du.jpg>

[http://img.directindustry.fr/images\\_di/photo-mg/30819-6133131.jpg](http://img.directindustry.fr/images_di/photo-mg/30819-6133131.jpg)

## Résumé

Les réseaux de distribution actuels fabriqués en PEHD ou anciens en acier souffrent des endommagements causés par plusieurs facteurs tels que : La nature de la terre, les travaux au voisinage de ces réseaux... etc.

Les fuites qui sont les principales conséquences de ces endommagements causent une perte économique sans équivoque, cela à pousser les responsables des réseaux à chercher des moyens efficaces pour réduire leurs effets. Le travail dans ce mémoire est divisé en deux parties, une partie pratique et une autre de programmation. La partie pratique se base sur l'acquisition des signaux comportant l'information de la fuite et la partie programmation se base sur l'application des algorithmes qui sont connus dans ce domaine.

Mots clés : Détection, fuite, réseaux de distribution.

## Abstract

Current distribution networks made of PEHD or old steel suffer from damage caused by several factors such as: The nature of the earth, work near to these networks ... etc.

The leaks that are the main consequences of these damages cause an unequivocal economic loss, that push the leaders of the networks to look for effective means to reduce their effects. The work in this memoir is divided into two parts, a practical part and a programming part. The practical part is based on the acquisition of the signals containing the information of the leak and the programming part is based on the application of the algorithms which are known in this field.

Key words: Detection, leakage, distribution networks.

## ملخص

تتسبب شبكات التوزيع الحالية المصنوعة من PEHD أو الفولاذ القديم من أضرار ناجمة عن عدة عوامل مثل: طبيعة الأرض، والعمل بالقرب من هذه الشبكات ... إلخ.

تتسبب التسريبات التي تمثل العواقب الرئيسية لهذه الأضرار في خسارة اقتصادية لا لبس فيها، والتي تدفع بمسؤولي الشبكات إلى البحث عن وسائل فعالة للحد من آثارها. ينقسم العمل في هذه المذكرة إلى قسمين، جزء عملي وجزء برمجة. يعتمد القسم العملي على الحصول على الإشارات التي تحتوي على معلومات التسرب والجزء البرمجة يعتمد على تطبيق الخوارزميات المعروفة في هذا المجال.

الكلمات المفتاحية: الكشف، التسرب، شبكات التوزيع.