

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR- ANNABA



جامعة باجي مختار عنابة

FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIORAT
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

MEMOIRE DE MASTER

DOMAINE SCIENCES ET TECHNOLOGIES

FILIERE MECANIQUE

OPTION ENERGETIQUE

PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER

INTITULE

**Méthodes de détection de fuites dans un système hydraulique
Par analyse de l'onde de pression**

PRESENTE PAR :

BENHAMZA OUSSAMA

DIRECTEUR DE
MEMOIRE:

DJEMILI
ABDELOUHAB

DEVANT LE JURY:

BOUMARAF.L

Président

Professeur

U ANNABA

DJEMILI.A

Membre

M.C.A

U ANNABA

KADRI .S

Membre

M.A.A

U ANNABA

Promotion : JUIN 2019

Résumé

La détection des fuites fait l'objet de recherches scientifiques depuis longtemps.

Plusieurs méthodes ont été mis au point pour détecter l'endroit de la fuite au cours des écoulements en conduites.

L'utilisation des appareils électroniques est efficace mais ce processus prend beaucoup de temps ce qui rend cette méthode coûteuse..

le phénomène transitoire de propagation d'onde représente un problème dans le domaine de l'hydraulique surtout dans les grandes installations hydrauliques comme les centrales hydrauliques et les station de pompages ou les dimensions des conduites sont très importantes et ou le phénomène du coup de bélier peut causer des dégâts énormes.

Dans notre étude on s'est focaliser sur l'une des causes de la propagation des ondes, cas de fermeture brusque d'une vanne dans une conduite et en présence d'une fuite, en passant par deux étapes :

- 1) La modélisation mathématique des équations de conservation (de masse, quantité de mouvement, et de l'énergie) régissant le phénomène de l'écoulement de fluide dans une conduite et des équations au niveau de la fuite.
- 2) La résolution par la méthode des caractéristiques avec celle des différences finies.
- 3) Une autre méthode est basé sur l'analyse de l'onde de pression dans le système de conduite en céramique pour localiser la fuite. Ce procédé utilise la technique de localisation de l'onde réfléchie pour détecter la position de la fuite et son ampleur.

Remerciements

Avant tout je remercie Allah qui ma donné le courage, la volonté, la patience et la capacité pour réaliser ce modeste travail.

Au terme de ce travail, Je tiens à remercier et à exprimer ma gratitude à toutes les personnes qui ont contribué à sa réalisation

Mes vifs remerciements vont aux membres de jury qui me font le grand honneur d'évaluer ce travail :

*Madame **Boumaraf latra** pour l'honneur qu'il ma a fait de présider ce jury.*

*Monsieur **Kadri salim** d'avoir accepté d'examiner ce travail.*

*Je remercie mon encadreur Monsieur **Djemili abdelouhab** docteur à l'Université Badji Mokhtar d'Annaba, de m'avoir accueillie dans son équipe et d'avoir accepté de diriger ce travail. Sa rigueur scientifique, sa disponibilité et ses qualités humaines m'ont profondément touchée.*

*Je remercie également les enseignants du département de génie mécanique pour leurs précieux enseignements et tous les enseignants de l'université de **Badji Mokhtar d'Annaba**.*

Ensuite, je joins ces remerciements à tout le personnel sider d'Annaba pour leur excellent accueil, leur orientation ainsi que leur soutien dans la construction de ce travail.

Enfin, mes remerciements iront à toutes les personnes dont l'empreinte restera dans ce dit travail plus encore dans ma mémoire, pour leurs conseils scientifiques, leurs aides, leurs talents, leurs motivations.

Dédicaces

C'est avec profonde gratitude et sincères mots, que je dédie ce travail de fin d'étude à tous ceux qui me sont chers.

A mon cher père.

L'école de mon enfance qui ma inculquer le sens de la responsabilité, de l'optimisme et de la confiance en soi face aux difficultés de la vie.

A ma chère Mère.

La plus belle créature que Dieu a créée sur terre, à cette source de tendresse, de patience et de générosité qui n'a jamais cessée de formuler des prières à mon égard afin de me soutenir et de m'épauler pour que je puisse atteindre mes objectifs.

A toute ma famille.

A mon promoteur Mr Djemili abdelouhab Qui m'a aidé et ma pris beaucoup de choses durant cette formation.

A tous mes amis de près et de loin.

Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce projet soit possible, je vous dis merci.

Oussama

Sommaire

Introduction générale	i
-----------------------------	---

CHAPITRE I : Etude Bibliographique

I.1. La problématique des fuites	3
I.1.1. Types des fuites	3
I.1.2. Les fuites	3
I.1.3. Les ruptures (défaillances) ou les fuites apparentes	4
I.2. Causes des fuites	9
I.2.1. Les différentes contraintes qui agissent sur une canalisation	9
I.2.2. Les éléments influençant sur l'apparition des fuites	10
I.2.2.1. Les éléments propres à la canalisation	10
I.2.2.2. Les éléments extérieurs aux réseaux	12
I.2.2.3. Les éléments liés à l'exploitation des réseaux	13
I.3. Les manifestations des fuites	14
I.4. La recherche des fuites	15
I.4. 1.La recherche et la localisation des fuites	15
I.4. 2.La réparation des fuites	17

CHAPITRE II : Description détaillée du phénomène transitoire

II.1. Les types d'écoulement	18
II.1.1. Ecoulement permanent	18
II.1.2. Ecoulement non permanent	18
II.1.3 Ecoulement uniforme	18
II.1.4. Ecoulement non uniforme	18
II.1.5. Ecoulement transitoire	18
II.2.Types d'ondes	18
II.2.1.Ondes linéaires	18
II.2.2. Ondes non linéaires	19
II.3. Description du phénomène physique mis en jeu	19
II.3.1.Etat d'équilibre d'un système hydraulique	19
II.3.2 Onde élastique et oscillation en masse	19
II.3.3 Perturbation d'équilibre	19
II.3.4 Le système continu (eau – conduite)	20
II.3.5 Le coup de bélier	20
II.3.5.1.Définition	20
II.3.5.2.Facteurs déterminant la sévérité de propagation d'onde de pression	21
II.3.5.3 Visualisation physique	21
II.3.5.4 Les dommages du coup de bélier	22
II.3.5.5 Les moyens de protection (anti- bélier)	24
A- Les soupapes de décharges	24
B- La cheminée d'équilibre	24
C- Le réservoir d'air	24

CHAPITRE III : Formule de base pour le phénomène transitoire

III.1. Relation de base	25
III.2. Formulation générale	25
III.2.1. Equation de continuité	25
III.2.2. Equation de conservation de la quantité de mouvement	26
III.2.3. Equation de conservation de l'énergie	26
III.3. Loi de comportement du fluide	26
III.3.1. Loi de comportement mécanique du fluide	27
III.3.2. Loi de comportement thermodynamique du fluide	28
III.4. Equation de comportement de la conduite	28
III.5. Equations simplifiés	29
III.5.1. Hypothèse	29
III.5.2. Equation de conservation de la masse	29
III.5.3. Equation de conservation de la quantité de mouvement	33
III.5.4. Equation de conservation de l'énergie	34
III.6. Forme réduite du système d'équation de base	34
III.6. Définition	34
III.7. Conditions aux limites	35
III.7.1. Conditions aux extrémités	35
III.7.2. Conditions au niveau de l'orifice de la fuite	35

CHAPITRE IV : Méthode de résolution

IV.1. Introduction	36
IV.2. Méthode des caractéristiques	36
IV.2.1. Recherche des lignes caractéristiques	37
IV.3. Méthode des différences finies	39
IV.3.1. Calcul de la hauteur de pression H et la vitesse v aux points courants	39
IV.3.2. Critère de stabilité du schéma numérique	40
IV.3.3. Intégration des équations de compatibilité	40
IV.3.4. Calcul de H et V (intégration aux points courants)	41
IV.4. Conditions aux limites	43
1. Extrémité amont (réservoir)	43
2. Extrémité aval (vanne)	43
IV.5. Modélisation mathématique et numérique de la fuite	45
IV.6. Conditions initiales	47
a) - Aux points courants	47
b) - Au niveau de la fuite	47

CHAPITRE V : Application du modèle de calcul sur l'installation

V.1. Application du modèle de calcul sur l'installation	48
1. Configuration de l'installation de distribution hydraulique	48
2. Le fluide utilisé	48
3. Les propriétés physiques de l'installation	48
V.2. Application et résultat de calcul	50
V.3. Interprétation des résultats	51

Conclusion Générale	56
Nomenclature	57
Références Bibliographiques	58

Liste des Figures

Figure I.1	Une conduite ayant subi une rupture en Acier	5
Figure I.2	Différents types de ruptures des conduites d'eau potable (Eclatement)	6
Figure I.3	Différents types de ruptures des conduites d'eau potable	6
Figure I.4	Différents types de ruptures des conduites d'eau potable	7
Figure I.5	Différents types de ruptures des conduites d'eau potable (Fissure autour de la tulipe et joint).	7
Figure I.6	Fréquence des types de ruptures en fonction du diamètre	8
Figure I.7	Répartition des fuites sur tuyau et sur joint en fonction du diamètre	8
Figure I.8	Causes de l'affaiblissement d'une conduite d'eau potable	9
Figure I.9	Contraintes subis par une conduite d'eau potable	9
Figure I.10	Conduite subi une corrosion (fonte)	11
Figure I.11	Conduite subi une corrosion externe par courant vagabonds	12
Figure I.12	Principe de corrélation acoustique	16
Figure II.1	Conservation de masse	21
Figure II.2	Les conséquences de coup de bélier	23
Figure III.1	Conservation de masse	35
Figure III.2	réservoir conduite vanne avec une fuite	40
Figure IV.1	Schéma de discrétisation des droites caractéristique	40
Figure IV.2	Schéma de numérique de la fuite	44
Figure V.1	Organigramme de calcul	50
Figure V.2	Contrainte circonférentielle au niveau de la vanne	52
Figure V.3	Débit principale au milieu de la conduite	52
Figure V.4	Débit principale dans la conduite	53
Figure V.5	Débit de fuite	53
Figure V.6	Hauteur de pression au niveau de la fuite à $X = 800$	54
Figure V.7	Hauteur de pression	54
Figure V.8	Vitesse au milieu de la conduite	55

INTRODUCTION
GENERALE

Introduction :

Dans la plus part des réseaux de distribution, une forte proportion de l'eau se perd pendant le transport entre les usines de traitement et les points de consommation.

Le volume perdu est généralement de 20% à 30% de la quantité produite

Dans certains réseaux, en particulier les plus anciens, les pertes peuvent atteindre 50%.

Les pertes d'eau peuvent avoir plusieurs causes : fuites, erreurs de mesure, utilisation publique (par exemple lutte contre les incendies ou le nettoyage des conduites), vol.

La cause principale est généralement les fuites.

Les fuites se produisent dans différents éléments de distribution du réseau de distribution : conduites de transmission, conduites de distribution, branchements, raccords, vannes.

Les causes de fuites sont la corrosion, les défauts des matériaux, une mauvaise installation, une pression d'eau excessive, les coups de bélier, les mouvement de terrain attribuables à la sécheresse ou au gel, ainsi que les vibrations et les charges excessives dues à la circulation.

Les fuites d'eau constituent une perte d'argent et de ressources naturelles précieuse, et elles représentent un danger pour la santé publique.

La perte économique principale est le cout de l'eau elle-même, de son traitement et de son transport.

Il y'a aussi l'endommagement de réseau (érosion de l'assise des conduites, rupture des canalisations) et des fondations de routes ou des bâtiments.

Ajoutons à cela les risques pour la santé publique, les contaminants pouvant s'infiltrer dans les conduites par les endroits où l'eau s'échappe, lorsque la pression baisse dans le réseau.

Les contraintes économiques, les questions de santé publique et le besoin d'économiser l'eau incitent les exploitants de réseaux à mettre sur pied des programmes de contrôle de fuites.

Les programmes de contrôle systématique des fuites comportent deux grands volets :

Les bilans d'eau et la détection des fuites.

Ces dernières années, on a fait des efforts importants pour mettre au point des méthodes visant à établir les bilans d'eau ou à détecter les fuites.

Grace à ces efforts, les exploitants de réseau disposent maintenant de plusieurs techniques bien établies et d'appareils modernes qui les aident à limiter les pertes d'eau.

Dans notre étude, un premier chapitre a été consacré à des généralités sur les fuites dans les conduites de distribution d'eau ainsi qu'aux méthodes qui permettent de les détecter.

Un deuxième chapitre, présente l'écoulement transitoire et les différentes actions qui le causent.

Un troisième chapitre, dans lequel on a établi un système d'équations régissant le phénomène d'écoulement instationnaire du fluide dans une conduite.

un quatrième chapitre réservé à la méthode de résolution où nous avons utilisé la méthode des caractéristiques pour la résolution des équations différentielles aux dérivée partielles couplée avec la méthode des différences finies avec un schéma explicite .

enfin nous donnons une conclusion sur la détection de fuite, sa localisation et son ampleur.

CHAPITRE I :
Etude
Bibliographique

I.1. La problématique des fuites

Les fuites engendrent des pertes qui peuvent être de deux types:

- Les pertes au niveau d'adduction qui surviennent dans le cas où il y a des transferts d'eau très importants, entre la production et la mise en distribution. L'absence de comptage tant à l'amont qu'à l'aval ne permet pas d'évaluer ces pertes.
- Les pertes en distribution qui correspondent à la différence entre le volume d'eau distribué et le volume d'eau consommé. Elles sont due aux :
 - Fuites au niveau des joints.
 - Fuites aux différentes prises de branchement,
 - Fuites sur branchements.
 - Cassures des conduites : Erreurs de comptage .
 - Erreurs de comptage.
 - Eaux piratées (branchements illicites).

I.1.1. Types des fuites

L'EPA (Environmental Protection Agency) a regroupé et utilisées des données les fuites ou ruptures dans plusieurs services Américains. Les données recueillies ne sont pas toujours basées sur les mêmes définitions concernant les fuites. On peut distinguer:

➤ **Les fuites (leak repair) :** Ce sont tous les évènements entraînant une réparation sur les conduites, les hydrants, les branchements qui sont :

- Les fuites sur tuyau (main leak).
- Les fuites sur joints (joints leak).

➤ **Les ruptures sur conduites (main break) :** Elles représentent les défaillances structurelles du tuyau ou de l'emboîtement dus à une surcharge excessive, une détérioration du lit de pose, un contact avec les autres structures, la corrosion, ou une combinaison entre ces conditions.

On remarque que les définitions précédentes différencient surtout les fuites sur conduites de celles ayant eu lieu sur les différents organes du réseau (vannes ; pompes) par la suite on distingue aussi les fuites et les ruptures.

- **La défaillance** : Est une rupture ou une fuite apparente nécessitant une intervention sur le réseau. Elle peut avoir lieu soit sur tuyau, soit sur le joint. Ceci exclut les fuites ayant lieu sur les branchements, ainsi que celles ayant lieu sur les organes du réseau, tels que les pompes, les vannes, les hydrants et autres organes régulateurs.

La limite entre rupture et fuite n'est pas toujours bien définie, une **rupture** est une fuite, mais **une fuite** n'est pas obligatoirement une rupture, ces fuites peuvent être visibles ou non. Elles sont classées en deux types :

- Les fuites diffuses ;
- Les ruptures (défaillances) ou les fuites apparentes.

I.1.1.1 Les fuites diffuses

Les fuites diffuses sont mises en évidence lors des mesures bien spécifiques ou lorsque la tranchée d'une conduite est ouverte. Elles n'entraînent pas en général de réparations sur la conduite. Ce sont elles qui en général abaissent le rendement d'un réseau et ne lui permettent pas d'avoir une valeur supérieure à 90% à 95 % . Elles caractérisent, soit une fragilisation du tuyau par de petites ouvertures, soit un mauvais état des joints qui devient alors poreux. On peut les constater de manières différentes :[4]

- Par le constat d'une diminution importante du rendement du réseau .
- Par une augmentation croissante de la consommation de nuit .
- Soit par des campagnes de mesures sur terrain, par des techniques de corrélation acoustique. Ce genre de mesure permet de retrouver précisément quelles sont les conduites les plus dégradées.

L'état de conduite est alors déterminé par le nombre et la taille des fuites que l'on peut détecter [4].

I.1.1.2 Les ruptures (défaillances) ou les fuites apparentes

Ces fuites (ruptures) qui entraînent automatiquement des interventions sur le réseau, on l'appelé par la suite **défaillance**. Elles sont mise en évidence, soit parce qu'elles entraînent, au niveau de la chaussée, une inondation plus au moins importante, soit parce que l'on constate une augmentation brutale de la consommation de nuit. Dans ce cas on peut trouver l'endroit de la rupture avec précision ou de la fuite avec un jeu de vannes.

Ces casses caractérisent un mauvais état de la conduite et une certaine fragilisation ; elles peuvent avoir lieu à la suite d'une corrosion dans le temps de la conduite reliée à un mouvement de sol ou une augmentation de la pression interne. Elles correspondent soit à une diminution de la paroi de la conduite, soit à la formation de trous (**figure 1.2**).

En général ces ruptures sont différentes selon le diamètre. En fonction du diamètre et du type de défaillances, les ruptures transversales (**figure 1.3**) ont lieu surtout sur les petits diamètres alors que les gros diamètres subissent plutôt des ruptures petits diamètres alors que les gros diamètres subissent plutôt des ruptures longitudinales ou des piquages (**figure 1.4**).

Elles peuvent également concerner les fuites au niveau des joints (pour les diamètres plus élevés (**1.5**) qui en fonction de leur importance deviennent apparentes .



Figure I.1 : Une conduite ayant subi une rupture en Acier

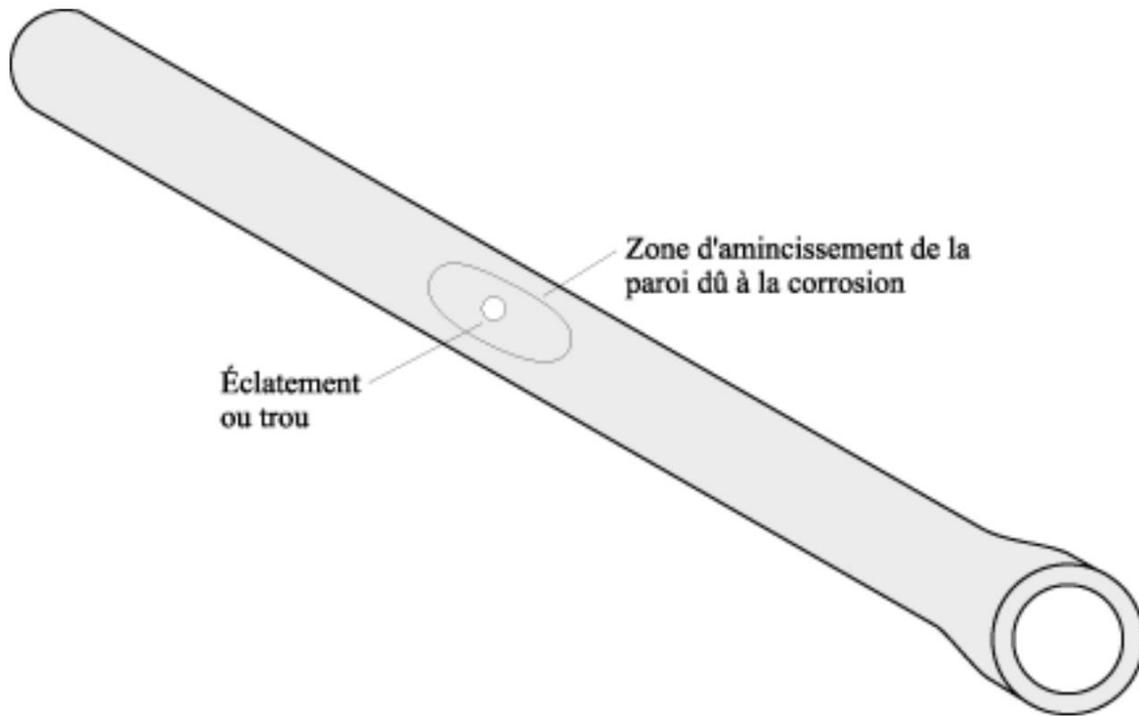


Figure I.2: Différents types de ruptures des conduites d'eau potable (Eclatement) .

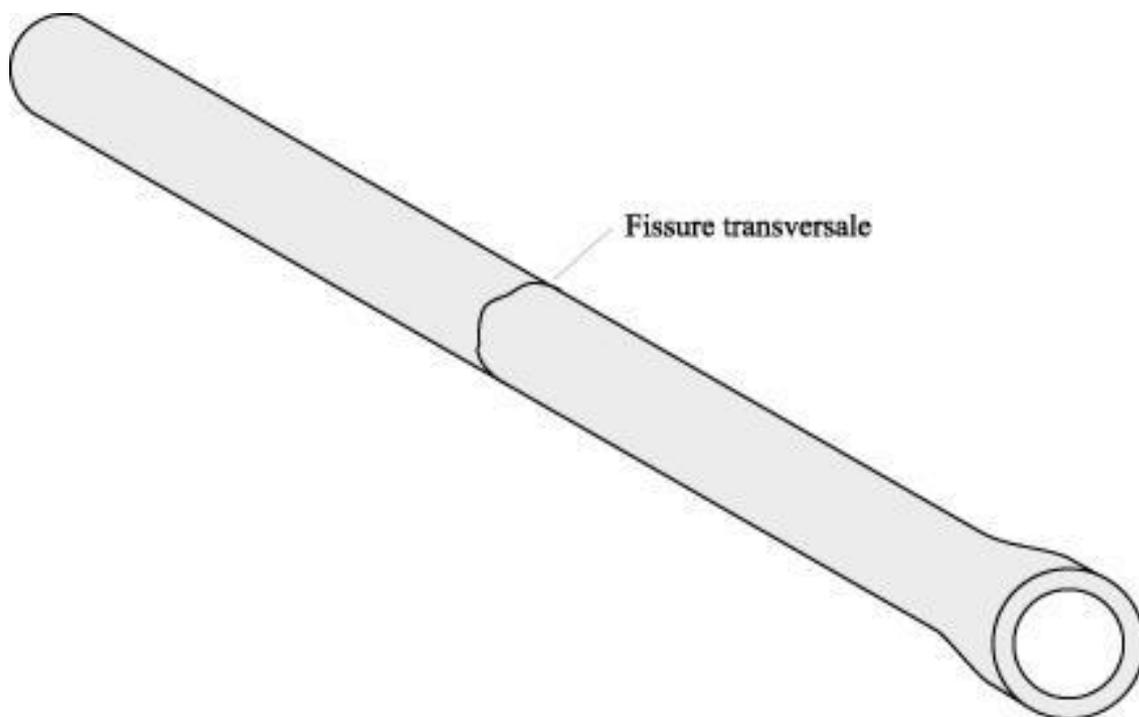


Figure I.3: Différents types de ruptures des conduites d'eau potable (Fissure transversale) .

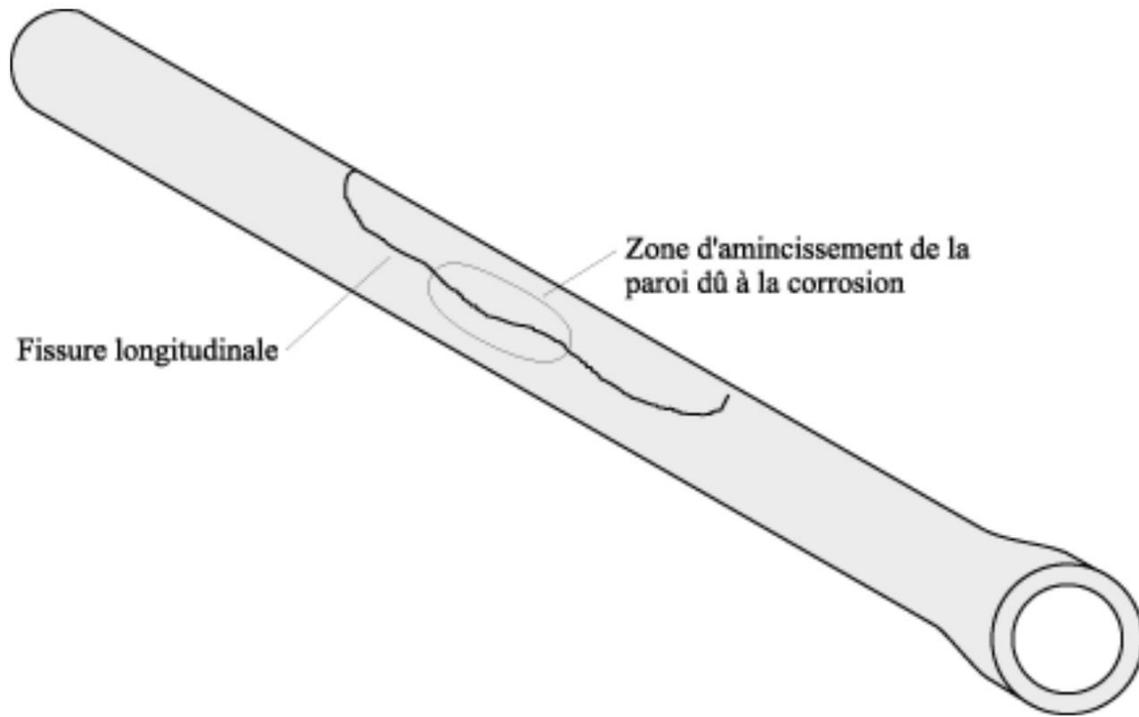


Figure I.4: Différents types de ruptures des conduites d'eau potable (Fissure longitudinale).

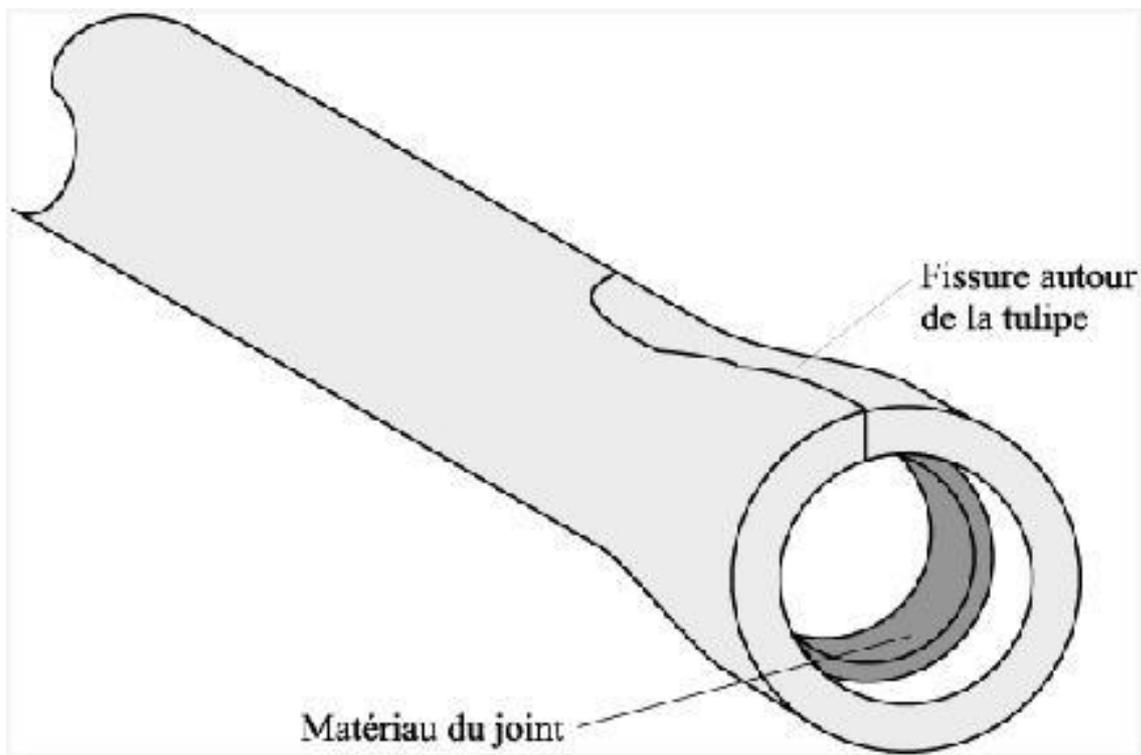


Figure I.5: Différents types de ruptures des conduites d'eau potable (Fissure autour de la tulipe et joint).

Une rupture ou les fuites apparentes correspondent à un affaiblissement de la conduite, c'est-à-dire une diminution de la paroi, en un endroit précis (piquage) ou non (fissure) combinée à une augmentation de contraintes sur la canalisation, soit à une non- étanchéité du joint. Comme on a cité auparavant ; les ruptures transversales ont lieu surtout sur les petits diamètres alors que les gros diamètres subissent des ruptures longitudinales ou des piquages. **La figure 1.7** montre la fréquence des défaillances en fonction du diamètre et du type de défaillances [1].

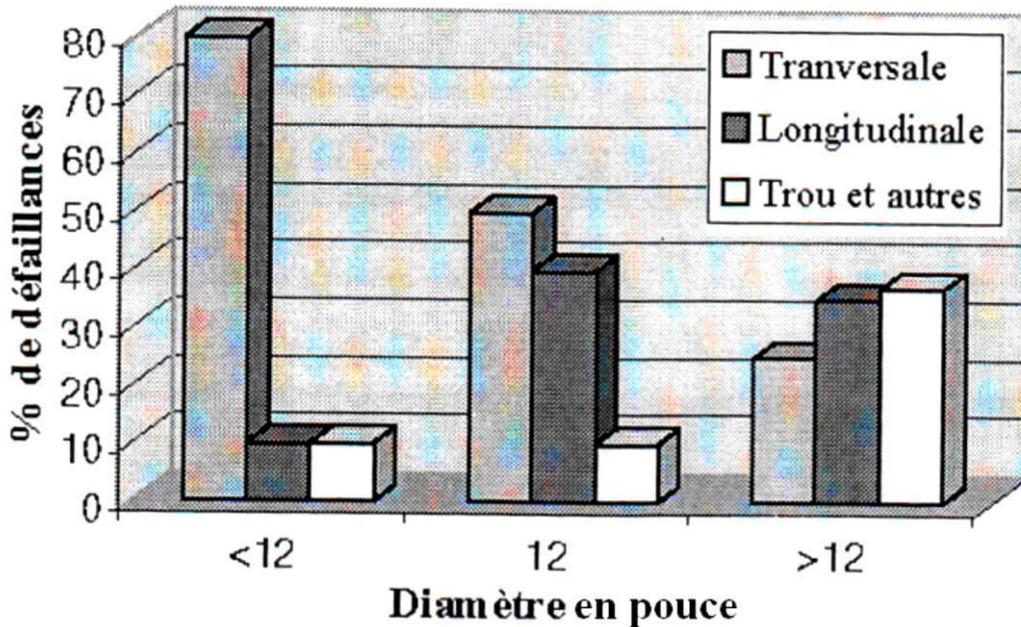


Figure I.6 : Fréquence des types de ruptures en fonction du diamètre .

Aussi les fuites se trouvent au niveau des petits diamètres, alors que les diamètres plus élevés ont des fuites au niveau des joints (**figure 1.8**) :

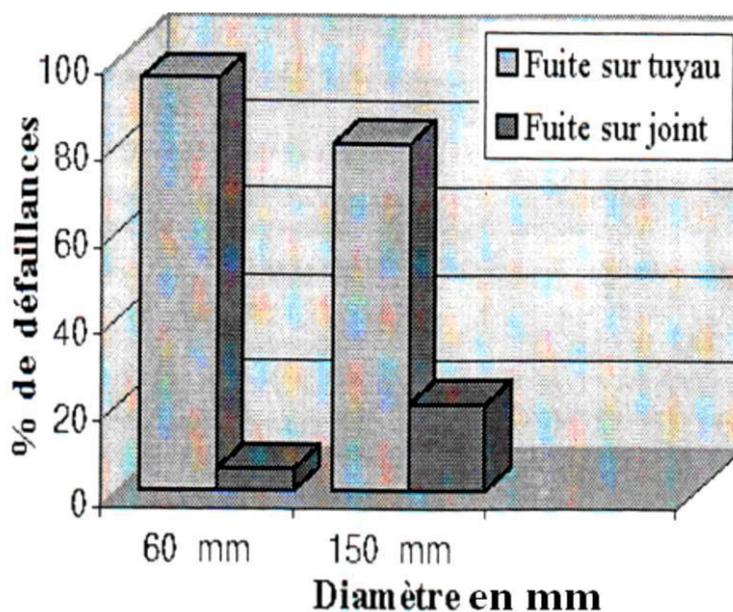


Figure I.7 : Répartition des fuites sur tuyau et sur joint en fonction du diamètre .

I.2. Causes des fuites

Les fuites peuvent êtres dues aux plusieurs facteurs. Ils peuvent être répartis en groupes :

- Les éléments propres au type de la canalisation
- Les éléments liés à l'exploitation des réseaux
- Les éléments extérieurs aux réseaux.

La figure 1.9 : montre les différentes causes qui peuvent entraîner l'affaiblissement d'une conduite d'eau potable.

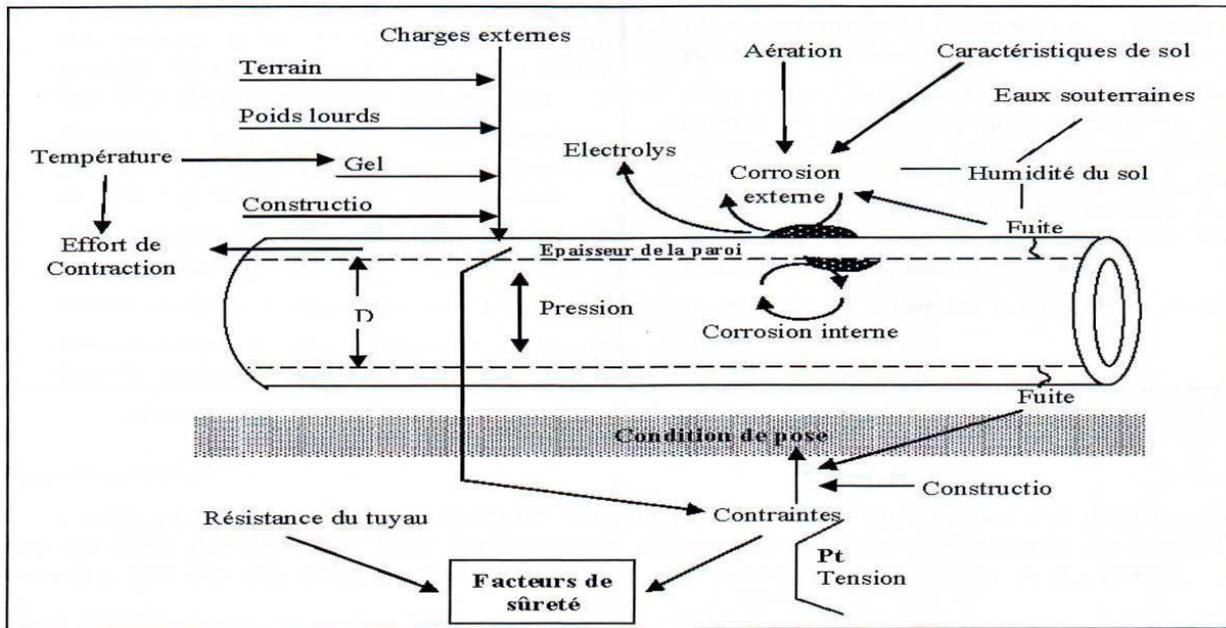


Figure I.8 : Causes de l'affaiblissement d'une conduite d'eau potable.

I.2.1. Les différentes contraintes qui agissent sur une canalisation

La figure I.10 : récapitule les différentes contraintes mécaniques qui agissent sur une conduite.

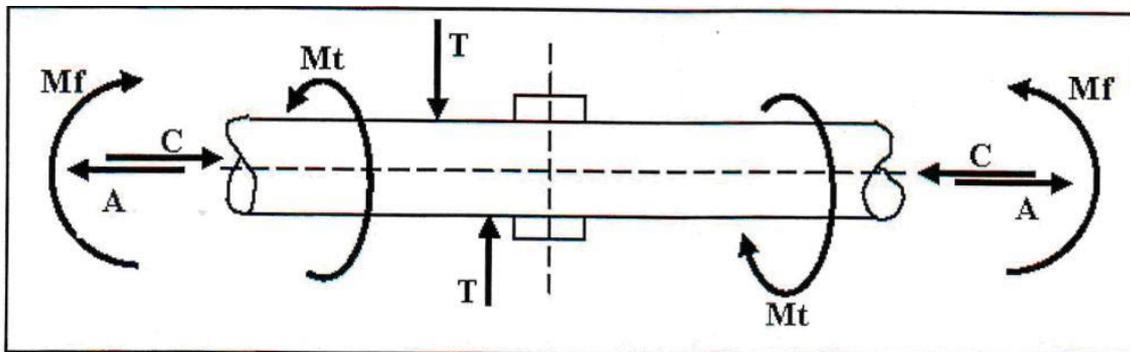


Figure I.9 : Contraintes subis par une conduite d'eau potable.

Mf : moment de flexion susceptible de provoquer une courbure de la canalisation.

Mt : moment de torsion susceptible de tordre la canalisation autour de son axe.

T : contrainte de cisaillement.

A : effort de traction axiale.

C : contrainte de compression.

Ces contraintes peuvent être variées à cause de :

- mouvement violent ou lent du sol.
- transmission directe excessive de charges accidentelles en surface.
- travaux de voiries.

I.2.2. Les éléments influençant l'apparition des fuites

I.2.2.1. Les éléments propres à la canalisation

La durée de vie d'une conduite dépend de son matériau constructif, de ses dimensions (diamètre, épaisseur de la paroi), de ses résistances aux efforts internes et externes qui s'y appliquent et du processus de corrosion qui se développe .

- le diamètre .
- le matériau.
- le type de joint.
- La corrosion interne.

■ **Le diamètre**

Le diamètre peut jouer un rôle important dans le mécanisme d'apparition des défaillances. Ainsi un petit diamètre est plus sensible aux efforts de traction. Les tuyaux de diamètre inférieur à 100mm ont presque toujours des ruptures transversales .

■ **Le matériau**

Tout matériau de canalisation d'eau potable doit se conformer à certaines spécifications de telle sorte qu'on évite de détériorer la qualité de l'eau transportée et retarder au maximum le vieillissement du réseau .

■ **Le type des joints**

Les joints sont conçus pour relier des tronçons de tuyaux. Ils doivent être placés entre des tuyaux alignés pour éviter leur détérioration prématurée .Ils existent trois types de joints; en plomb, en caoutchouc et en matière plastique elles se distinguent par leurs caractéristiques:

- Les joints au plomb ne sont pas élastiques et transmettent donc les tensions d'un tuyau à l'autre.
- Les joints en caoutchouc sont bien entendu élastiques. Cependant leur vieillissement est encore mal connu.
- Les joints en matière plastique, les joints élastomères et les joints collés, entraînent des fuites diffuses importantes. Les services techniques ayant posé ce type de joint ont observé bien souvent une diminution du rendement de réseau [1] .

■ **La corrosion interne**

La corrosion est toujours le résultat de la présence simultanée de deux agents : le métal et le milieu corrosif qui est l'eau dans le cas de la corrosion interne. La corrosion interne est régie par nombreux facteurs

- La vitesse de l'eau peut avoir une influence sur les zones de dépôt.
- Quand le PH d'équilibre n'est pas atteint, l'eau est alors agressive favorisant cette corrosion qui est particulièrement importante pour les tuyaux en acier .
- Si l'équilibre calco-carbonique de l'eau n'est pas atteint, il se produit soit une diminution d'épaisseur de la paroi de la canalisation (eau agressive), soit une diminution de la section de la canalisation (eau incrustante) .



Figure I.10 : Conduite subi une corrosion (fonte).

Les principales conséquences de la corrosion interne sont la modification des diamètres des canalisations, la dégradation de la qualité de l'eau transportée et les capacités hydrauliques de la conduite

I.2.2.2. Les éléments extérieurs aux réseaux

Les facteurs liés à l'extérieur de la canalisation sont :

A. La corrosion externe

Elle correspond à l'échange d'ions entre le sol et la paroi de la conduite et peut avoir diverses origines.

- **Les courants vagabonds**

Ils sont générés par les installations électriques alimentées en courant continu, peuvent augmenter les risques de corrosion des canalisations. Ainsi une part importante de ces cas courants peut emprunter comme chemin de retour la canalisation en tant que conducteur, ce qui provoque une corrosion au niveau des points de sortie des courants .

- **L'hétérogénéité par contact**

Elle a lieu au niveau des raccordements de canalisation de matériaux différents, ce qui peut entraîner une différence de potentiel importante et peut induire une pile de corrosion par contact. Pour interdire le passage du courant, il faut isoler les conduites au niveau des raccordements .

- **L'hétérogénéité de surface**

Est la conséquence du non-respect des conditions de pose. Un choc lors de pose, peut provoquer une altération surfacique ou une discontinuité locale et création d'un phénomène de pile électrique.

- **L'hétérogénéité du sol**

Lorsqu'une canalisation traverse des sols différents, il peut se créer une pile géologique dans laquelle la parie de la canalisation se trouvant dans le terrain le moins aéré devient anodique et se corrode (pile d'aération différentielle).



Figure I.11 : Conduite subi une corrosion externe par courant vagabonds [5]

B. Les mouvements de sol et le trafic

Il faut considérer le poids des voitures, des camions et leur fréquence de passage qui, en fonction de l'épaisseur et du type de sol qui recouvrent la conduite ainsi que du type de chaussée en surface (rigide ou souple), génèrent des problèmes de fatigue et de surcharge.

C. Les charges du terrain

Sous l'appellation charges des terrains, on considère le poids des terres au dessus de la conduite (d'où l'importance de la profondeur de pose de la canalisation). Ce poids variera d'un site à un autre en fonction de la teneur en eau et du type de matériaux constituant le sol .

I.2.2.3. Les éléments liés à l'exploitation des réseaux

Les éléments liés à l'exploitation du réseau sont :

- **La vitesse de l'écoulement**

Une demande croissante en eau aura lieu une conséquence de l'augmentation de la vitesse de l'écoulement ce qui introduit une corrosion et générer des contraintes mécaniques excessives. A l'inverse une diminution ou décroissante aura pour conséquence relative des temps de séjour de l'eau dans les conduites, ce qui favorise la sédimentation et l'amorce de nouvelles formes de corrosion. La vitesse de l'eau dans les conduites doit être de l'ordre de 3m/s.

- **La pression**

Il faut que la pression chez l'utilisateur ne dépasse pas 4 bars. Au-delà de cette valeur, il y a risque d'apparition de désordres. A l'inverse la pression minimale à l'entrée doit être 1 bars.

- **La température de l'eau**

Le risque de la température se traduit dans les branches mortes du réseau, où l'eau peut stagner. Une rapide diminution de la température peut alors entraîner une contraction de la canalisation. Et une augmentation des contraintes longitudinale de traction. D'où une fragilisation des tuyaux.

- **Les conditions d'exploitation**

Une augmentation de la charge hydraulique peut avoir lieu, suite à une modification du régime hydraulique, telle que le passage d'une adduction gravitaire à une alimentation avec pression ou la réduction de section due à une réhabilitation de canalisation. Cette surcharge hydraulique peut alors entraîner une augmentation du nombre de fuites ou de ruptures dans les semaines suivant le changement.

- **Les manœuvres sur réseau**

Le phénomène du coup de bélier est très violent et est dû à la circulation d'une onde de pression ou dépression dans les conduites suite à l'ouverture ou fermeture brusque d'une vanne; ou la coupure de l'alimentation en électricité ce qui engendre une coupure de pompage brusque. Ce phénomène peut fragiliser dangereusement les conduites .

I.3. Les manifestations des fuites

Les symptômes des fuites peuvent êtres multiples tels que :

- La non concordance des volumes mesurés sur les compteurs.
- L'anomalie dans la distribution, bruits anormaux sur les réseaux.
- L'affaissement des terrains.
- La présence de végétation anormalement développée.
- Les terrains humides par temps sec.
- L'arrivée de l'eau claire dans les égouts.
- La baisse anormale du niveau d'eau dans le réservoir.
- L'humidité anormale sur la chaussée.

I.4- La recherche et la localisation des fuites :

1- Localisation par observation directe :

On peut localiser directement les fuites en se basant sur les observations suivantes :

- Les déformations de la chaussée, des bordures et des trottoirs ainsi que les bruits audibles près des bornes d'incendie sont d'autres indices pertinents.
- Les observations de citoyen.
- L'observation visuelle en surface.
- Pour les fuites les plus importantes, des remontées de bassin d'égout.

2- La sectorisation :

L'isolation temporaire et la mesure du débit de nuit de secteurs constituent un moyen très efficace d'identifier les groupes de conduites présentant des fuites.

3- L'écoute de la fuite :

C'est la plus ancienne des méthodes de détection et de localisation des fuites. L'écoute est facilitée par un équipement qui capte le bruit émis par la fuite et le transmet amplifié à l'oreille du dépitteur.

- Les trois bruits de la fuite :

Le premier bruit tire son origine de la vibration de l'orifice de la fuite dans la conduite. La fréquence de ce bruit se situe dans la gamme 500 à 800 Hz.

Les deux autres bruits se situent plutôt dans la gamme de 20 à 250 Hz, le premier correspond à l'impact du jet d'eau sur le sol et le second à la circulation de l'eau dans le sol.

Les deux derniers bruits sont présents dans le voisinage immédiat de la fuite.

Ils pourront être utilisés pour la localisation précise de la fuite.

- La transmission du bruit :

Plusieurs facteurs effectuent la transmission du bruit ou son écoute :

L'amortissement du bruit augmente avec le diamètre de la conduite.

Le type de matériaux de la conduite affecte la vitesse de propagation.

Pour une écoute au sol, l'amortissement augmente avec la profondeur de la conduite.

La présence de bruits d'origine hydraulique (vannes de réduction de pression) ou mécanique (pompe) peut gêner considérablement l'écoute.

- La détection et la localisation des fuites :

Le principe d'écoute est le plus utilisé en recherche ou en localisation d'une fuite.

4- Appareils de recherche de fuite :

La plupart des appareils utilisés en recherche de fuite sont basés sur la corrélation acoustique : la comparaison des signaux reçus par deux capteurs situés de part et d'autre d'une fuite donne le décalage temporel entre ces signaux et permet de localiser cette fuite entre les deux capteurs (figure 4.1).

Oscilloscope pour la visualisation des signaux.

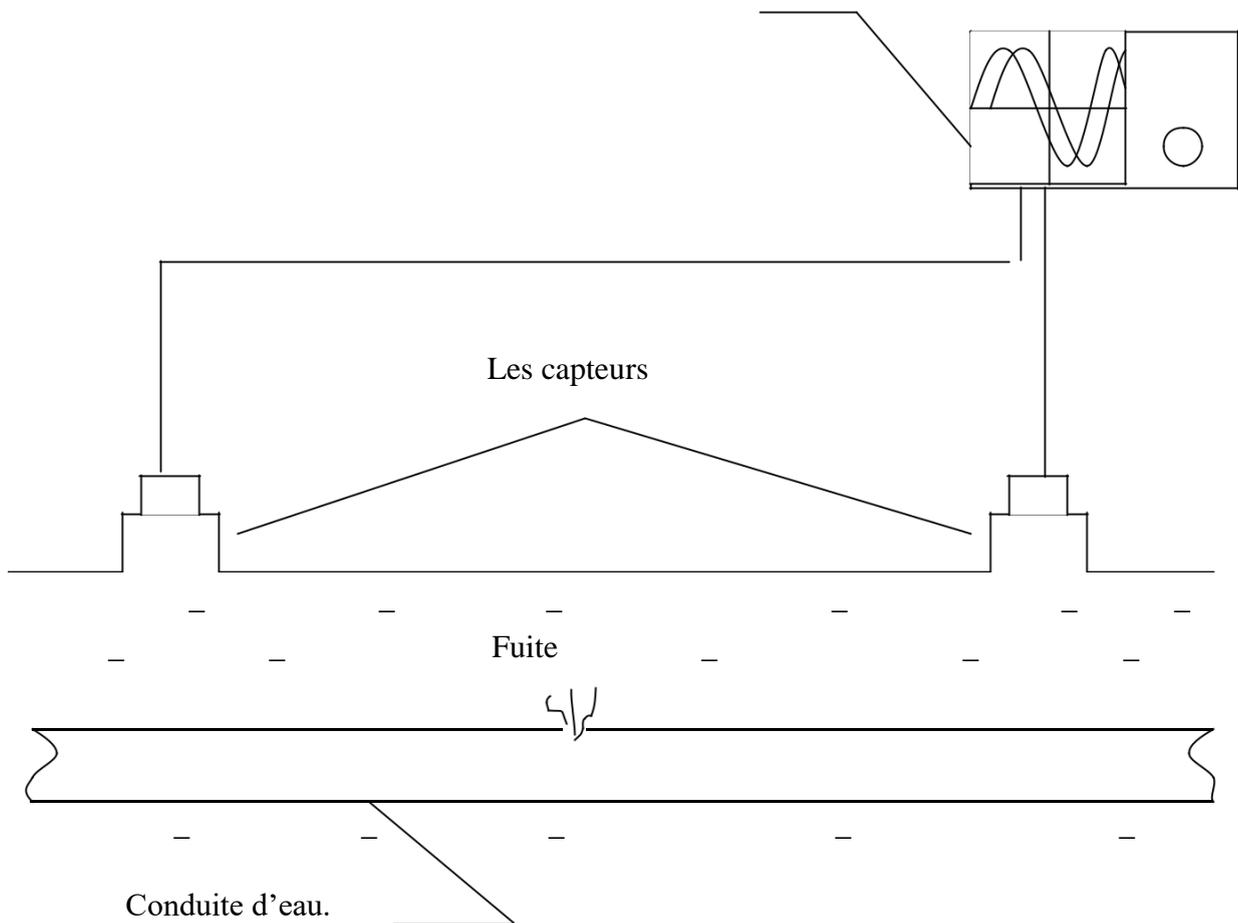


Figure 1.12 : Principe de corrélation acoustique.

III- La réparation des fuites :

• **Réparation des ruptures et des fissures :**

Les ruptures et les fissures circonférentielles peuvent se réparer à l'aide des manchons. Les manchons les plus utilisés sont en acier inoxydable et d'une longueur au moins égale au diamètre de la conduite à réparer.

♣ **Réparation de joints :**

Lorsqu'il n'est pas possible de remettre le joint en bon état, il est nécessaire de couper et de remplacer les conduites de chaque coté du joint.

• **Fuite au raccordement de service :**

Le raccordement défectueux est bouché et on effectue un autre.

♣ **Pose de manchons :**

Le nettoyage de la surface externe de la conduite devant recevoir un manchon est particulièrement important. On s'assurera également de la continuité de la conductivité électrique. IL est recommandé dans tous les cas d'écouter à nouveau sur les lieux de la réparation dans les semaines qui suivent.

Etant donné que l'apparition de fuites est un phénomène continu, il faut penser

exercer un suivi des réparations et à planifier chaque année un certain nombre d'activités de prévention.

CHAPITRE II :

Description détaillée du phénomène transitoire

II.1. Types d'écoulements

II.1.1 Ecoulement permanent

L'écoulement d'un liquide est dit permanent, lorsque les propriétés du fluide et les caractéristiques hydrauliques de celui-ci, restent invariables dans le temps, c'est-à-dire :

$$\frac{\partial V}{\partial t} = 0 \quad , \quad \frac{\partial P}{\partial t} = 0 \quad , \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$$

V : la vitesse d'écoulement.

P : la pression.

ρ : la masse volumique.

II.1.2. Ecoulement non permanent

L'écoulement du liquide est dit non permanent, si la vitesse et la pression varient dans le temps en un point donné de l'espace.

Les vitesses et les pressions en écoulement non permanent sont les équations de quatre variables indépendantes ; à savoir, les coordonnées du point (x, y, z) examiné dans le temps(t).

II.1.3. Ecoulement uniforme

Un écoulement est dit uniforme lorsque la vitesse du fluide à un instant donné, à une même direction et une même intensité en tout point de ce fluide.

II.1.4. Ecoulement non uniforme

Un écoulement est dit non uniforme si la vitesse du fluide varie d'une section à l'autre

II.1.5. Ecoulement transitoire

Un écoulement est dit transitoire lorsque les paramètres hydrauliques à savoir, la vitesse, la pression et les propriétés du fluide sont des fonctions du temps et de l'espace.

Ce phénomène transitoire peut se manifester soit, dans un canal à ciel ouvert ou bien, dans une conduite en charge par accroissement ou décroissement du débit.

II.2. Types d'ondes

II.2.1. ondes linéaires

Du point de vue physique, les ondes linéaires sont celles qui se propagent dans le fluide sans modifier les propriétés physiques locales (compressibilité, masse spécifique, conductivité, viscosité.....).

Voici quelques exemples de ces types d'ondes :

Les ondes du son.

Les ondes de lumière.

Les ondes électromagnétiques.

II.2.2. Ondes non linéaires

Les non linéaires sont celles qui se propagent dans le fluide en provoquant des variations dans les propriétés de ce dernier.

II.3. Description du phénomène physique mis en jeu

II.3.1. Etat d'équilibre d'un système hydraulique

Les phénomènes transitoires hydrauliques apparaissent lorsque l'équilibre des forces agissant sur un système est modifié.

Quand un liquide est en mouvement dans une conduite et ce que ce mouvement ne varie pas dans le temps, il y a un état d'équilibre permanent.

En fait il y a un équilibre entre l'énergie disponible (ou potentielle) et l'énergie due au mouvement (cinétique) et qui sera perdue par le frottement, ce qui définit un mouvement permanent.

Cette vision est macroscopique car, à une échelle plus petite, on observe que les vitesses fluctuent constamment autour d'une valeur moyenne, c'est une manifestation de la turbulence. Pour les besoins de l'analyse que nous ferons ici, nous allons considérer les effets moyens dans le temps, de la turbulence, notamment en ce qui concerne l'évaluation des forces de frottement qui sont les responsables majeurs des pertes de charges, selon le régime d'écoulement.

II.3.2. Ondes élastiques et oscillation en masse

Les variations de régime dans un système sous pression peuvent adopter deux comportements différents comme cités au début.

Si le système est fermé, c'est-à-dire qu'il ne contient pas d'endroit où il est possible d'accumuler de l'eau en grande quantité, on observe une variation locale importante ; c'est le coup de bélier par onde élastique.

Dans le cas où l'eau peut être accumulée dans un réservoir ou une cheminée d'équilibre on parle plutôt d'oscillation en masse.

Dans ce qui suit, nous examinerons avec plus d'attention le phénomène de propagation d'ondes élastiques, car il entraîne des effets plus contraignants sur le matériel que le phénomène, plus particulier aux cheminées d'équilibre, de l'oscillation en masse. [J.L.Robert.2004]

II.3.3. Perturbation de l'équilibre, effet sur les pressions

Si on considère la conduite dans laquelle coule un liquide en régime permanent, le niveau de la pression est fort raisonnable, soit inférieur à celui de la pression hydrostatique dans des conditions d'écoulement nul.

Qu'advient-il lorsque, pour une raison ou une autre, il y a une modification temporelle de l'écoulement par accélération ou décélération ?

La réponse du physicien se base sur les principes de la mécanique newtonienne.

Il y aura un transfert d'énergie entre l'énergie potentielle et cinétique pour chercher à atteindre un nouvel équilibre en tenant compte des pertes et sans transgresser le principe de conservation de l'énergie.

Cette réponse, toute rigoureuse, peut nous paraître bien aride et nous pouvons demander comment cela peut s'appliquer au simple cas de la masse d'eau qui circule en régime permanent dans une conduite et qui voit son mouvement modifié.

Partant des principes que, dans un fluide, l'énergie potentielle se traduit par une énergie de pression et que, d'autre part l'eau n'est pas absolument incompressible et que la conduite admet des déformations élastiques, on peut faire des analyses sur des cas particuliers. [J.L.Robert.2004]

II.3.4. Le système continu [eau-conduite]

En général les systèmes continus sont composés de masses réparties et déformables, ainsi que d'éléments élastiques et dissipatifs continus et liés en général directement aux propriétés constitutives des masses associés.

Un réseau hydraulique ou une station hydroélectrique sont des exemples d'un système continu.

Une perturbation appliquée au fluide se propage travers le système avec une vitesse finie due à la compressibilité du fluide et l'élasticité des conduites.

Et afin de pouvoir décrire les phénomènes transitoires, on considère le liquide comme un enchainement de tranches infinitésimalement minces. [G.Blommaret.2000]

II.3.5. Le coup de bélier

II.3.5.1. Définition

Quand le régime d'écoulement dans une conduite fermée se trouve modifié brusquement, il se produit une série d'ondes de pressions, qui se propagent sur toute la longueur de la conduite, et qui s'amortissent progressivement en raison des pertes d'énergie dues au force de frottement.

Ainsi toute phase d'opération produisant des modifications de la pression dynamique du fluide ou plus précisément créant des trains d'ondes de pressions peut présenter un risque de «**coup de bélier**». Les causes les plus fréquentes de création de train d'ondes de pression (et de dépression) d'amplitudes importantes sont les suivants :

- Un démarrage ou arrêt d'une pompe.
- Une modification de position de vanne.
- Une ouverture ou fermeture rapide d'une vanne.
- Un changement de vitesse.
- Une panne d'alimentation d'énergie.
- Des opérations incontrôlées.

Les trains d'ondes se réfléchissent aux extrémités et se propagent dans un sens puis dans un autre, ces trains d'ondes successifs créent des pression et des dépression suivant leur sens de propagation et suivant les différent points considérés de la conduite.

Les variations de pression qui s'ajoutent algébriquement la pression normale qui règne peuvent en résulter des surpressions qui peuvent devenir dangereuses conduisant à la formation d'occlusion gazeuses dont la résorption peut amplifier dangereusement l'onde de surpression au moment de son retour.

Donc généralement le coup de bélier est considéré comme une onde de choc qui se propage dans un tronçon de conduite lors d'un changement d'une de ses conditions aux limites.

Le phénomène est répétitif(mais il devient stable avec l'intervention des forces de frottement) et il se reproduit avec une période qui est égal à $4L/a$ ou a désigne, la célérité ou la vitesse de propagation de l'onde de pression dans la conduite de longueur L.

II.3.5.2. Les facteurs déterminant la sévérité de la propagation de l'onde de pression ou du coup de bélier

La vitesse d'écoulement en régime initial (généralement le régime est permanent) dans la conduite (V).

Le module d'élasticité du matériau constituant la conduite (E_c).

Le module d'élasticité de l'eau (E_e).

Le diamètre intérieur de la conduite (d).

L'épaisseur des parois de la conduite (e).

La durée de fermeture de la vanne (t_f).

La longueur de la conduite (L).

II.3.5.3. Visualisation physique

Analysons le cas général d'une fermeture instantanée d'une vanne en aval.

A l'instant $t_0 = 0$, la propagation du coup de bélier ainsi généré se subdivise en quatre phases.

Le rapport ($t_{ca} = L / a$), est défini comme étant le temps caractéristique du tronçon de conduite.

Avec $a = C$, la vitesse de l'onde de pression.

L , la longueur de la conduite.

Phase 1 : $t < t < t_{ca}$

A l'amont de la vanne, l'eau se comprime faiblement et la canalisation gonfle.

Tranche par tranche les particules liquides transforment la vitesse en surpression.

On observe ainsi la formation et la progression d'une onde de choc.

Celle-ci remonte de la vanne ou elle a pris naissance vers le réservoir.

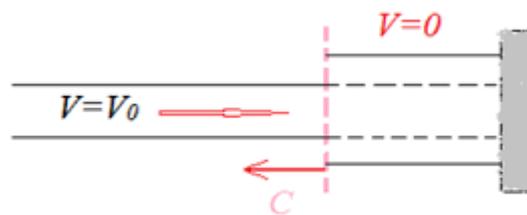


Figure II.1 : les quatre phases de coup de bélier

Phase 2 : $t_{ca} < t < 2t_{ca}$

La pression dans le réservoir étant beaucoup plus faible que la surpression dans la conduite, la canalisation au voisinage du réservoir va retrouver sa forme initiale.

La diminution du diamètre de la conduite va chasser l'eau vers le réservoir la vitesse V_0 .

De proche en proche ce phénomène se produit et crée ainsi une onde de choc se déplaçant cette fois-ci vers la vanne.



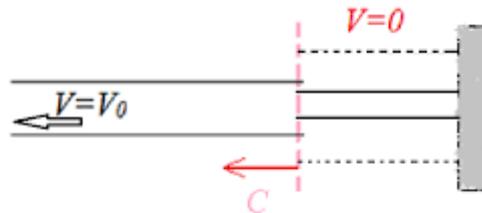
Phase 3 : $2t_{ca} < t < 3t_{ca}$

Remontée de l'onde sous forme d'une onde de dépression, produite par la réflexion totale à la vanne en aval, qui représente un nœud de débit.

La conduite se contracte.

Compte tenu de son inertie, l'eau au voisinage de la vanne entre en dépression et la conduite diminue son diamètre.

Une onde de choc en dépression se crée et se déplace vers le réservoir.



Phase 4 : $3t_{ca} < t < 4t_{ca}$

Redescente de l'onde de dépression.

La conduite reprend sa forme initiale.

Comme précédemment, le réservoir impose la pression au niveau de l'entrée de la conduite qui va donc retrouver sa forme initiale.

Le volume d'eau manquant est pris dans le réservoir et la conduite retrouve sa vitesse initiale V_0 .



II.3.5.4. Les dommages dus au coup de bélier

Tous les systèmes de canalisation sont susceptibles à la surpression, ces forces puissantes qui peuvent paralyser l'infrastructure essentielle.

La surpression du coup de bélier peut entraîner des dommages courts et à long terme pour les systèmes en provoquant des conséquences telles que les vibrations, la rupture, les fuites, et des déplacements de la structure.

En conséquence, les pipelines peuvent devenir contaminés.

Pour éviter l'arrêt des services et des réparations coûteuses, les ingénieurs de conception des infrastructures de canalisation doivent prendre en considération la surpression due au coup de bélier et déterminer les solutions les plus efficaces, et la stratégie d'atténuation rentables.

Sans une conception adéquate et une solution d'atténuation appropriée, les forces dynamiques dans les pipelines provoqués par les coups de bélier peuvent conduire à des complications graves, et les photos de quelques accidents (figures 2 à 5) montrent très clairement que ces dommages dépassent de loin les frais calculés par les mesures préventives de sécurité.



Figure II.2 : les conséquences de coup de bélier

II.3.5.5. Les moyens de protection (anti-bélier)

L'effet du coup de bélier ne peut en aucun cas être supprimé totalement, une fois créé. Cependant il convient de rechercher toujours à atténuer ces effets tels qu'ils ne puissent pas nuire aux différentes installations.

Les dispositifs anti bélier auront donc pour rôle, la limitation des variations brusques des pressions (surpression ou dépression).

Les appareils les plus utilisés sont les suivants :

Les soupapes de décharges qui interviennent dans la protection contre les surpressions.

Les cheminées d'équilibre qui interviennent la fois dans la protection contre les surpressions et les dépressions.

Le réservoir d'air qui est une protection contre les surpressions et les dépressions.

A. Soupapes de décharge

La soupape de décharge est appareil anti-bélier qui écrête les surpression en décrivant un certain débit à l'extérieur de la conduite dès que la pression dépasse une certaine valeur de réglage, estimée généralement à $1.04 \div 1.1$ de la pression maximale admissible.

Domaine d'application

La sensibilité, la rapidité d'ouverture et la stabilité de ces appareils mis en évidence dès les premiers essais d'application ont été largement confirmés dans la pratique par la sécurité réelle apportée aux installations munies des soupapes.

Elles constituent sans défaillances possibles un écran protecteur entre les points d'origine de la surpression et le tronçon de conduite à garantir.

B. Cheminée d'équilibre

La cheminée d'équilibre est une réserve d'eau en contact permanent avec la conduite et dont la surface libre traduit exactement les variations de pression du fluide.

La cheminée doit donc avoir une section assez large pour combler la dépression sans se vider complètement et doit être assez haute pour ne pas déborder lorsqu'une surpression fait monter son niveau.

La présence d'une cheminée modifie le mouvement transitoire engendrée par une disjonction.

Au lieu d'un mouvement oscillatoire de période $4L/a$ caractéristique du coup de bélier d'onde, s'instaure un mouvement oscillatoire de période plus grande, l'oscillation en masse.

C. Réservoir d'air

Le réservoir d'air est une réserve d'eau en qui se vide pour combler les dépressions et grossit pour absorber les surpressions.

Le principe de fonctionnement est le même que pour les cheminées d'équilibres.

La différence provient de ce que cette réserve n'a pas une surface libre à la pression atmosphérique mais se trouve à la pression absolue du fluide l'endroit où est piqué le ballon.

C'est le volume d'air enfermé dans le ballon qui régularise les variation de pression du liquide e se comprimant ou en se détendant au gré des besoin

CHAPITRE III :
**Formules de
base pour le
phénomène
transitoire**

III.1 Relation de base

Dans ce chapitre on vise à développer les équations de base qui résultent des lois et des principes généraux de la mécanique des fluides et solides.

En ce qui concerne le milieu fluide, nous avons :

- L'équation de continuité ou l'équation de la conservation de la masse.
- L'équation de la conservation de la quantité du mouvement.
- L'équation de la conservation de l'énergie.
- L'équation du comportement mécanique du fluide.
- L'équation du comportement thermodynamique du fluide.

D'autre part, l'équation traduisant le comportement de la structure (la fondamentale de la mécanique de solide ou lois de Hooke).

III.2 Formulation générale

Bien que l'eau soit souvent modélisée comme étant un fluide incompressible, les modèles mis en œuvres pour des calculs hydrauliques transitoires, devront tenir compte de la faible compressibilité de l'eau, ainsi que la souplesse des conduites, en effet, ce sont des deux propriétés qui sont à l'origine de l'onde de choc dans les conduites, appelées coup de bélier.

III.2.1. Equation de continuité ou l'équation de la conservation de la masse

Le principe de la conservation de la masse est le suivant :

L'augmentation de la masse pendant un certain temps de fluide contenu dans un volume donné, doit être égal à la somme des masses de fluide qui y entrent diminuées de celles qui en sortent. D'où en raisonnant sur un volume de contrôle, on arrive à l'équation :

$$\frac{\partial \rho}{\partial x} + \operatorname{div} \rho \vec{V} = \sum \rho q_v$$

\vec{V} : est la vectrice vitesse.

ρ : La masse volumique.

q_v : Le débit par unité de volume fourni par les sources ou les puits.

$q_v > 0$ pour une source.

$q_v < 0$ pour un puit .

En général, il n'y a ni dissipation du fluide au cours du mouvement (le mouvement est dit conservatif).

Donc l'équation de continuité se réduit à :

$$\frac{\partial \rho}{\partial x} + \operatorname{div} \rho \vec{V} = 0$$

III.1

III.2.2 Equation de la conservation de la quantité du mouvement.

Son principe est mécanique, il permet de traduire une relation entre les caractéristiques du fluide, celles de son mouvement et les causes qui le produisent.

Ce principe s'annonce comme suit :

Le taux de variation de la quantité du mouvement par rapport au temps d'une particule de fluide est égal à la résultante de toutes les forces qui exercent une influence ou une action sur la particule du fluide.

En considérons un volume élémentaire dans le fluide occupé par une masse déterminée à un temps t et on appliquant le théorème de dérivée particulaire on arrive à l'équation :

$$\rho \cdot \frac{d\vec{V}}{dt} = \rho \cdot \vec{F} - \vec{grad} P + \vec{f} \quad (\text{III.2})$$

\vec{f} : Force de viscosité par unité de volume.

$\vec{grad} P$: Force de pression par unité de volume sur le fluide.

$\rho \cdot \vec{F}$: Force de volume par unité de volume.

$\rho \cdot \frac{d\vec{V}}{dt}$: Force d'inertie par unité de volume.

III.2.3 Equation de conservation de l'énergie

Pour un système quelconque effectuant une transformation entre deux états d'équilibre, l'équation d'énergie dans sa forme générale est écrite en étudiant le bilan d'énergie homogène dont la variation de l'énergie interne et l'énergie cinétique K soit égal au travail W et de la chaleur Q .

$$\frac{d(E + K)}{dt} = W + Q \quad (\text{III.3})$$

Q : Énergie apportée ou enlevée par unité de temps au système matériel.

W : Travail par unité de temps (puissance des forces extérieures sur le système matériel).

III.3 Lois du comportement du fluide

si on modifie localement les conditions d'écoulement d'un fluide dans une conduite (mis en arrêt, manœuvre d'une vanne... etc.), on introduit dans le fluide une discontinuité d'écoulement affectant directement les paramètres (P , V) et en raison de l'élasticité du milieu (fluide + conduite), cette discontinuité se propage avec une certaine vitesse, cette perturbation influe directement sur la conduite.

III.3.1. Lois de comportement mécanique du fluide

Les phénomènes mécaniques et thermodynamiques sont intimement liés ; on distingue habituellement les lois de comportement qui nous servent à définir les fluides et des lois de comportement thermodynamiques moins spécifiques à un type de milieu.

D'autre part, montre que dans un nombre de cas, il est possible de s'en tenir au seul aspect mécanique.

La loi de comportement mécanique est donnée par la relation suivante :

$$\left(\begin{array}{l} \underline{\underline{\sigma}} = \underline{\underline{f}}(\underline{\underline{\varepsilon}}) \\ \underline{\underline{\sigma}} = \underline{\underline{\tau}} - P\underline{\underline{I}} \\ \underline{\underline{\tau}} = \lambda(\operatorname{div}\underline{\underline{V}})\underline{\underline{I}} + 2\mu\underline{\underline{\varepsilon}} \end{array} \right) \quad \text{(III.4)}$$

Tel que :

$\underline{\underline{\sigma}}$: Le tenseur des contraintes.

$\underline{\underline{\varepsilon}}$: Le tenseur des taux de déformations.

λ et μ : sont les coefficients de viscosité.

$\underline{\underline{\tau}}$: Le tenseur des contraintes de viscosité.

$\underline{\underline{I}}$: Le tenseur unitaire (symbole de Kronecker).

On en déduit alors la loi de comportement :

$$\underline{\underline{\sigma}} = (\lambda \operatorname{div}\underline{\underline{V}} - P)\underline{\underline{I}} + 2\mu\underline{\underline{\varepsilon}} \quad \text{(III.5)}$$

III.3.2 Loi de comportement thermodynamique du fluide

Les transformations rapides liées au phénomène de propagation d'onde peuvent être considérées comme isotherme.

Dans ces conditions le fluide a un comportement pratiquement barotrope et la masse volumique dépend essentiellement de la pression.

$$\alpha = - \frac{1}{V} \frac{dV}{dP} \quad (\text{III.6})$$

α : Le coefficient de compressibilité.

V : Le volume occupé par unité de masse.

La relation liant la masse volumique (ρ) au volume (V), $m = \rho V$, nous permet d'écrire :

$$\alpha = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dP} \quad (\text{III.7})$$

Le module d'élasticité du fluide $\langle E_f \rangle$ est l'inverse du coefficient de compressibilité $\langle \alpha \rangle$ du fluide, donc on peut écrire :

$$\frac{d\rho}{\rho} = \frac{1}{E_f} dP \quad (\text{III.8})$$

Avec : E_f , le module d'élasticité du fluide et ρ sa masse volumique.

III.4. Equation de comportement de conduite

Pour un matériau élastique et isotrope, et en admettant qu'il n'y a pas de changement de température, les déformations que subit une conduite cylindrique soumise à des contraintes sont données par les expressions :

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_{rr} &= \frac{1}{E_c} [\sigma_{rr} - \nu (\sigma_{\theta\theta} + \sigma_{xx})] \\ \varepsilon_{xx} &= \frac{1}{E_c} [\sigma_{xx} - \nu (\sigma_{\theta\theta} + \sigma_{rr})] \\ \varepsilon_{\theta\theta} &= \frac{1}{E_c} [\sigma_{\theta\theta} - \nu (\sigma_{xx} + \sigma_{rr})] \end{aligned} \right\} \quad (\text{III.9})$$

Où E_c est le module d'élasticité de la conduite, et ν le coefficient de Poisson.

III.5. Equation simplifiées

III.5.1. Hypothèses

Les équations précédentes se simplifient compte tenu d'un certain nombre d'hypothèses :

- L'écoulement est supposé unidimensionnel.
- Le problème est un problème de petites déformations.
- Le fluide est légèrement compressible.
- La viscosité de l'eau est constante.
- On considère que le problème est axisymétrique.
- Pas d'échange avec le milieu extérieur (conduite isotherme).
- On suppose que la pression p du fluide ainsi que le diamètre D de la conduite varient suivant l'axe x de la conduite.
- La conduite est supposée cylindrique circulaire, rectiligne, et assimilée à une juxtaposition d'anneaux indépendants.

III.5.2. Equation de la conservation de la masse ou équation de continuité

Considérons un volume de fluide dans un tronçon de conduite (figure(III.1)).

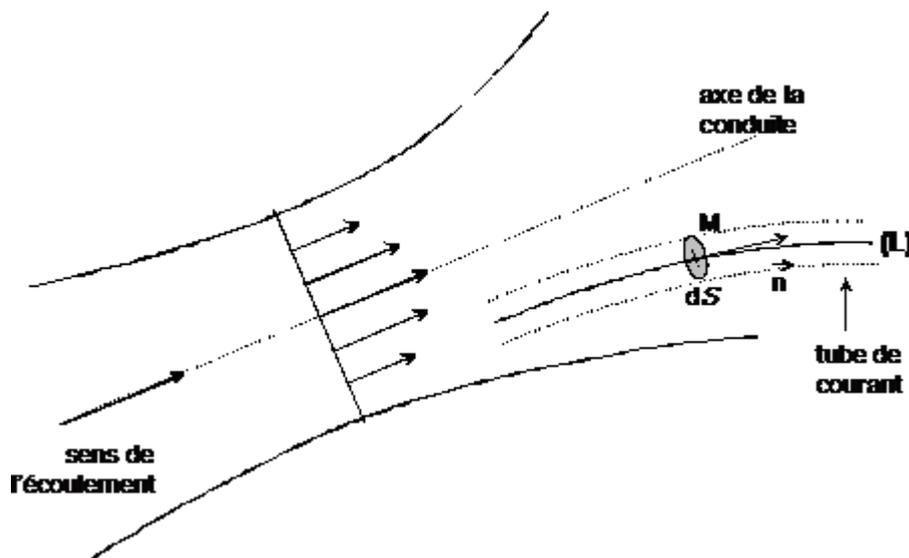


Figure III.1 : Conservation de masse

D'après les hypothèses l'écoulement est unidimensionnel, alors l'équation de la conservation de la masse se réduit à :

$$\frac{\partial(\rho A dx)}{\partial t} = \rho AV - \left(\rho AV + \frac{\partial(\rho AV)}{\partial x} dx \right) \quad (\text{III.10})$$

Supposant que l'élément de la conduite ne subit pas de variation de longueur par rapport au temps, donc l'équation (III.10) peut être réduite à :

$$\frac{\partial(\rho A)}{\partial t} = - \left(\frac{\partial(\rho AV)}{\partial x} dx \right) \quad (\text{III.11})$$

En explicitant les dérivées partielles spatiales et temporelles, ainsi qu'en regroupant les termes, on obtient :

$$\frac{1}{\rho V} \left(V \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\partial \rho}{\partial t} \right) + \frac{1}{AV} \left(V \frac{\partial A}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} \right) + \frac{1}{V} \frac{\partial V}{\partial x} \quad (\text{III.12})$$

Comme :

$$\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dt} = \frac{1}{\rho} \left(V \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\partial \rho}{\partial t} \right) \quad (\text{III.13})$$

$$\frac{1}{A} \frac{dA}{dt} = \frac{1}{A} \left(V \frac{\partial A}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} \right) \quad (\text{III.14})$$

L'expression (III.12) prend la forme :

$$\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dt} + \frac{1}{A} \frac{dA}{dt} + \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (\text{III.15})$$

Exprimons ce qui se passe du point de vue de l'analyse des contraintes et des déformations.

Le terme prend $\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dt}$ en compte la compressibilité du fluide et $\frac{1}{A} \frac{dA}{dt}$ traduit l'élasticité transversale de la conduite.

D'après la loi du comportement thermodynamique du fluide nous avons :

$$dP = E_e \frac{d\rho}{\rho} \quad (\text{III.16})$$

D'après, la résistance des matériaux, pour une conduite hydraulique circulaire considérée élastique et qui se déforme comme si elle était constituée d'anneaux indépendants, et dont l'épaisseur est relativement faible pour admettre l'uniformité de la contrainte comme le montre la figure (III.2), la contrainte latérale est donnée par l'expression :

$$\sigma = \frac{PD}{2e} \quad \text{(III.17)}$$

Cette équation est utilisée pour exprimer la contrainte σ pour une différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur.

En utilisant la définition du déformation du matériau, à savoir :

$$\varepsilon = \frac{D - D_0}{D} \quad \text{(III.18)}$$

D : étant le diamètre de la conduite.

D'autre part, nous avons :

$$\sigma = E_c \varepsilon \quad \text{(III.19)}$$

On en déduit immédiatement d'après les équations (III.17) , (III.18) , (III.19)

$$\frac{D - D_0}{D} = \frac{PD}{2eE_c}$$

$$\frac{dD}{D} = \frac{DdP}{2eE_c}$$

D'où en introduisant la section : $A = \frac{\pi D^2}{4}$

On arrive à :

$$\frac{dA}{A} = \frac{DdP}{eE_c} \quad \text{(III.20)}$$

$$\frac{dA}{dt} = \frac{D}{eE_c} \frac{dP}{dt} \quad \text{(III.21)}$$

Ainsi, en combinant les équations (III.15), (III.16), (III.21), l'équation de continuité prend la forme :

$$\rho\alpha^2 \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{dP}{dt} = 0 \quad \text{(III.22)}$$

Avec :

$$\alpha = \sqrt{\frac{1}{\rho \left(\frac{1}{E_e} + \frac{D}{eE_c} \right)}}$$

α : est la vitesse de propagation de l'onde de pression, définie par **Lorenzo Allievi**.

Et comme la pression est fonction uniquement de x et de t, on trouve :

$$\rho\alpha^2 \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial P}{\partial t} = 0 \quad \text{(III.23)}$$

La vitesse du fluide est trop petite par rapport à la vitesse de propagation de l'onde.

Donc on peut négliger le terme convectif.

Alors on aura :

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \rho\alpha^2 \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad \text{(III.24)}$$

III.5.3. Equation de conservation de la quantité de mouvement

On appliquant le principe de conservation de la quantité de mouvement au volume de contrôle

$$\frac{d(mV)}{dt} = \sum_x F_x$$

$$\rho A dx \left(\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} \right) = PA - \left(PA + A \frac{\partial P}{\partial x} dx \right) + \rho A \cdot g \cdot \sin \alpha \cdot dx - \tau_0 \cdot \pi \cdot D \cdot dx$$

On trouve donc :

$$\rho \frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{4\tau_0}{D} - \rho g \sin \alpha = 0$$

τ_0 : La contrainte de viscosité.

La vitesse du fluide est trop petite par rapport à la vitesse de propagation de l'onde, donc on néglige le terme convectif.

D'autre part, notre conduite est horizontale donc le terme $\rho g \sin \alpha$ se réduit à zéro.

Alors, l'équation de conservation de la quantité de mouvement se réduit à :

$$\rho \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{4\tau_0}{D}$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{4\tau_0}{\rho D} = 0 \quad \text{(III.25)}$$

III.5.4. Equation de conservation de l'énergie

Les seules pertes de charges du au frottement du fluide avec la paroi de la conduite, créent un échauffement.

Cette quantité de chaleur produite reste toute fois négligeable devant la variation rapide du débit, l'évolution est considérée comme isotherme.

$$dT = 0 \quad (\text{III.26})$$

III.6. forme réduite du système des équations de base

L'arrangement des équations de base nous conduit au système d'équation à résoudre :

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{4\tau_0}{\rho D} = 0 \quad (\text{III.27})$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \rho \alpha^2 \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (\text{III.28})$$

En utilisant $P = \rho g H$, notre système d'équations final se réduit à :

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\alpha^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (\text{III.29})$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + g \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{4\tau_0}{\rho D} = 0$$

Ou, H est la hauteur de pression et g l'accélération de la pesanteur.

Le système d'équation obtenu (III.29) est un système d'équation différentielle aux dérivées partielles

du type hyperbolique.

III.7. Conditions aux limites

Notre installation est assimilée à une conduite qui fuit, reliée à un réservoir au niveau de son extrémité amont, et à une vanne à fermeture rapide à son extrémité aval.

On a deux conditions aux extrémités (amont et aval) et une condition au niveau de l'orifice de fuite.

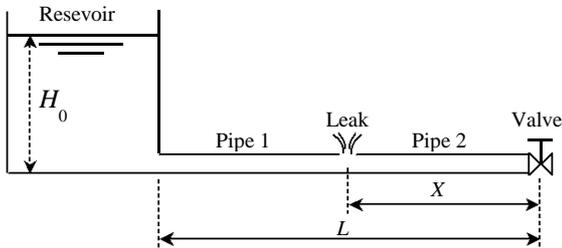


Figure III.2 : Système réservoir conduite vanne avec une fuite

III.7. 1. Conditions aux extrémités

Au niveau des extrémités de la conduite, la valeur de pression du fluide en amont et la valeur de la vitesse en aval de la conduite sont imposées.

Réservoir :

Au niveau de ces extrémités, la pression est constante.

$$P = P_{\text{réservoir}} \quad \text{(III. 30)}$$

Vanne :

la loi de fermeture de la vanne est exprimée par :

$$v = v_0 \left(1 - \frac{t}{t_f} \right) \quad \text{(III. 31)}$$

v_0 : est la vitesse initiale du fluide.

t_f : est le temps de fermeture de la vanne.

III.7. 2. Conditions au niveau de l'orifice de la fuite

Au niveau de l'orifice de fuite, un débit de fuite est imposé : Q_f .

CHAPITRE VI :

**Méthode
De
Résolution**

IV.1 Introduction

Les lois de la nature sont souvent gouvernées par des EDP, il est donc important de comprendre le comportement physique des modèles ainsi que le caractère mathématique des équations.

On distingue EDP linéaires et EDP non linéaire.

Les EDP linéaires ne contiennent aucun produit de variable avec elle-même ou une de ses dérivées alors que les EDP non linéaire peuvent en posséder.

La classification des EDP linéaires se fait sur la base d'une équation d'ordre 2 standard.

$$a\varphi_{xx} + b\varphi_{xy} + c\varphi_{yy} + d\varphi_x + e\varphi_y + f\varphi_{yx} = g(x,y)$$

C'est une équation linéaire, où a, b, c, d, e et f sont des fonctions de (x, y).

Le type de l'EDP dépend de son discriminant :

$$\Delta = b^2 - 4ac$$

$\Delta > 0$ Alors l'EDP est hyperbolique

$\Delta = 0$ L'EDP est parabolique

$\Delta < 0$ L'EDP est elliptique

Dans notre modélisation du phénomène de propagation de l'onde, nous avons abouti un système d'équations aux dérivées partielles du type hyperbolique.

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\alpha^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x} = 0$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + g \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{4\tau_0}{\rho D} = 0$$

Pour la résolution de notre système d'équations différentielles aux dérivées partielles, nous avons choisis la méthode des caractéristiques couplée avec la méthode des différences finies.

IV.2 Méthode des caractéristiques

En mathématique, la méthode des caractéristiques est une technique permettant de résoudre les équations aux dérivées partielles.

Particulièrement adapté au problème de transport, elle est utilisée dans de nombreux domaines tels que la mécanique des fluides ou le transport des particules.

Dans certains cas particuliers, la méthode des caractéristiques peut permettre la résolution purement analytique de l'EDP.

Dans les cas les plus complexes (rencontrés par exemple en modélisation des systèmes hydrauliques), la méthode des caractéristiques peut être utilisée comme une méthode de résolution numérique du problème.

Pour une équation aux dérivées partielles (EDP) du premier ordre, la méthode des caractéristiques consiste à rechercher des courbes (appelés < ligne caractéristique > ou plus simplement < caractéristiques >) le long desquelles l'EDP se réduit à une simple équation différentielle ordinaire (EDO) la résolution de l'EDO le long d'une caractéristique permet de trouver la solution du problème original.

IV.2.1 Recherche des lignes caractéristiques

Notre système d'équations aux dérivées partielles traduit la variation des variables dépendantes H (hauteur de pression) et V (vitesse du fluide), qui sont des fonctions des variables indépendantes $x = L$ (longueur de la conduite) et t (le temps).

Dans un premier temps, en utilisant la méthode des caractéristiques, on doit transformer notre système d'équation aux dérivées partielles en un système d'équations différentielles ordinaires.

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\alpha^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x} = 0$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + g \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{4\tau_0}{\rho D} = 0$$

On pose :

$$M_1 = g \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{4\tau_0}{\rho D} = 0 \quad (\text{IV.1})$$

$$M_2 = \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\alpha^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (\text{IV.2})$$

En combinant linéairement ces deux équations en utilisant un coefficient multiplicateur inconnu γ .

$$M = M_1 + \gamma M_2$$

$$M = \left(g \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{4\tau_0}{\rho D} \right) + \gamma \left(\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\alpha^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x} \right) = 0$$

$$M = \gamma \left(\frac{g}{\gamma} \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial t} \right) + \left(\gamma \frac{\alpha^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial t} \right) + \frac{4\tau_0}{\rho D} = 0 \quad (\text{IV.3})$$

$$\frac{dH}{dt} = \frac{\partial H}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial H}{\partial t}$$

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\partial V}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial V}{\partial t} \quad (\text{IV.4})$$

En examinant les équations (IV.3) et (IV.4), on peut noter que si :

$$\frac{dx}{dt} = \frac{g}{\gamma} = \gamma \frac{\alpha^2}{g} \quad (\text{IV.5})$$

L'équation (IV.3) devient une équation différentielle ordinaire..

$$\gamma \frac{dH}{dt} + \frac{dV}{dt} + \frac{4\tau_0}{\rho D} = 0 \quad (\text{IV.6})$$

En résolvant l'équation (IV.5), on aboutit à deux valeurs particulières de γ .

$$\gamma = \pm \frac{g}{a} \quad (\text{IV.7})$$

En substituant ces deux valeurs de γ dans l'équation (IV.5), on arrive à :

$$\frac{dx}{dt} = \pm a \quad (\text{IV.8})$$

La substitution des valeurs de γ dans l'équation (IV.6), nous permet d'avoir deux paires d'équations de compatibilité suivant les lignes c+ et c-.

Suivant c+ :

$$\frac{g}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{dV}{dt} + \frac{4\tau_0}{\rho D} = 0 \quad (\text{IV.9})$$

$$\frac{dx}{dt} = + a \quad (\text{IV.10})$$

Suivant c- :

$$-\frac{g}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{dV}{dt} + \frac{4\tau_0}{\rho D} = 0 \quad (\text{IV.11})$$

$$\frac{dx}{dt} = -a \quad (\text{IV.12})$$

IV.3.Méthode des différences finies

IV.3.1.Calcul de la hauteur de pression H et de la vitesse V aux points courants

Notre but est de calculer, la hauteur de pression H (ou la pression $p = \rho gh$) et la vitesse d'écoulement V (ou le débit $Q = V.S$). on est donc conduit à résoudre numériquement les relations (IV.9) et (IV.11), pour chaque partie de conduite.

La figure (IV.3), nous montre que le calcul de la hauteur de pression au point I à l'instant $(t + \Delta t)$ se fait au fonction des points $(I - 1)$ et $(I + 1)$ à l'instant (t) précédent.

Dans notre cas, nousavons utilisé le maillage régulier dans le plan (x, t) d'une division de conduite en (N) tronçons (Δx) égaux, cela conduit à des intervalles de temps (Δt) .

Les points de discrétisation seront supposés suffisamment pour permettre écrire :

$$\int_{R,S}^p dV \pm \frac{g}{a} \int_{R,S}^p dH + \int_{R,S}^p \frac{4\tau_0}{\rho D} = 0 \quad (\text{IV.13})$$

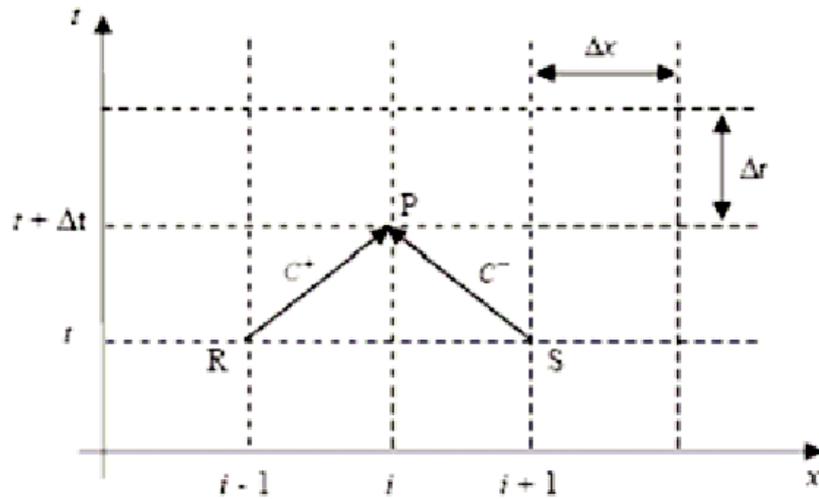


Figure IV.1 : Schéma de discrétisation des droites caractéristique

IV.3.2. Critère de stabilité d'un schéma numérique

Le critère de courant Friedrich (C-F), nous donne la condition de stabilité du schéma numérique et il est exprimé par :

$$\Delta t \leq \frac{\Delta x}{|\pm a|} \quad (\text{IV.14})$$

Ceci signifie que les points R et S doivent être compris entre (I + 1) et (I - 1). Pour un maillage régulier, on adopte le cas suivant :

$$\Delta x = |\pm a| \Delta t \Rightarrow \Delta t = \frac{\Delta x}{|\pm a|}$$

IV.3.3. Intégration des équations de compatibilité

L'intégration des relations de compatibilité le long des droites caractéristiques donne :

a) Le long de la ligne des caractéristiques $c+$:

$$\int_R^P dV + \frac{g}{a} \int_R^P dH + \int_R^P \frac{4\tau_0}{\rho D} dt = 0 \quad (\text{IV.15})$$

b) Le long de la ligne caractéristique c- :

$$\int_S^P dV - \frac{g}{a} \int_S^P dH + \int_S^P \frac{4\tau_0}{\rho D} dt = 0 \quad (\text{IV.16})$$

La contrainte de viscosité (frottement) est déterminée par la relation :

$$\tau_0 = -\frac{\lambda}{8} \rho V^2 \quad (\text{IV.17})$$

IV.3.4. Calcul de H et V (intégration au point courants)

Au niveau du point courant :

a) Le long de la ligne des caractéristiques c+ :

$$\int_R^P dV + \frac{g}{a} \int_R^P dH + \int_R^P \frac{4\tau_{0R}}{\rho D} dt = 0 \quad (\text{IV.18})$$

b) Le long de la ligne caractéristique c- :

$$\int_S^P dV - \frac{g}{a} \int_S^P dH + \int_S^P \frac{4\tau_{0S}}{\rho D} dt = 0 \quad (\text{IV.19})$$

$$c-: \tau_{0R} = \tau_0 (I-1, J-1) = \frac{\lambda}{8} V_R |V_R|$$

$$c-: \tau_{0S} = \tau_0 (I-1, J-1) = \frac{\lambda}{8} V_S |V_S|$$

En calculant ces intégrales on obtient :

$$c+: (V_P - V_R) + \frac{1}{\rho\alpha} (P_P - P_R) + \frac{\lambda}{2D} V_R |V_R| \Delta t = 0 \quad (\text{IV.20})$$

$$c-: (V_P - V_S) - \frac{1}{\rho\alpha} (P_P - P_R) + \frac{\lambda}{2D} V_S |V_S| \Delta t = 0 \quad (\text{IV.21})$$

$$c+: (V_P - V_R) \rho\alpha + (P_P - P_R) + \frac{\lambda}{2D} \rho\alpha V_R |V_R| \Delta t = 0$$

$$c-: (V_P - V_S) \rho\alpha - (P_P - P_R) + \frac{\lambda}{2D} \rho\alpha V_S |V_S| \Delta t = 0$$

$$c+: \rho\alpha V_P + P_p = \rho\alpha V_R + P_R - \rho\alpha \frac{\lambda \Delta t}{2D} V_R |V_R| = CP$$

$$c-: \rho\alpha V_P - P_p = \rho\alpha V_S - P_S - \rho\alpha \frac{\lambda \Delta t}{2D} V_S |V_S| = CM$$

On pose : $\rho\alpha = B$ et $\alpha\Delta t = dx$

$$c+: BV_P + P_p = BV_R + P_R - \rho \frac{\lambda}{2D} dx V_R |V_R| = CP \quad (\text{IV.22})$$

$$c-: BV_P - P_p = BV_S - P_S - \rho \frac{\lambda}{2D} dx V_S |V_S| = CM \quad (\text{IV.23})$$

En faisant la différence, (IV.22) - (IV.23), on obtient :

$$2P_p = CP - CM \quad d'ou \quad P_p = \frac{CP - CM}{2} \quad (\text{IV.24})$$

De même, la somme (IV.22) - (IV.23),

$$2BP_p = CP + CM \quad d'ou \quad V_p = \frac{CP + CM}{2B} \quad (\text{IV.25})$$

IV.4. Conditions aux limites

Pour la simulation numérique et les différentes applications, on a deux conditions aux extrémités (amont et aval) et une condition au niveau de l'orifice de fuite.

1. Extrémité amont (réservoir)

En ce point, nous avons une équation de compatibilité le long de la caractéristique c- et une autre équation qui la condition imposée (la hauteur de pression au niveau du réservoir est supposé constante).

$$H_P = H_{\text{Réservoir}}$$

$$c-: (V_P - V_S) - \frac{g}{a} (H_P - H_S) + \frac{4}{\rho D} \tau_{0S} \Delta t = 0 \quad (\text{IV.26})$$

2. Extrémité amont (vanne)

Ici, on a une équation le long de la caractéristique c+ et une autre équation imposée qui est la loi de fermeture de vanne.

$$V_p = V_0 \left(1 - \frac{t}{t_f}\right)$$

$$t \leq t_f$$

$$V_P = 0$$

$$c-: (V_P - V_R) + \frac{g}{a} (H_P - H_R) + \frac{4}{\rho D} \tau_{0R} \Delta t = 0 \quad (\text{IV.27})$$

Avec : t_f , le temps de fermeture de vanne et V_{PS} , la vitesse à l'extrémité avale.

IV.5. Modélisation mathématique et numérique au niveau de la fuite

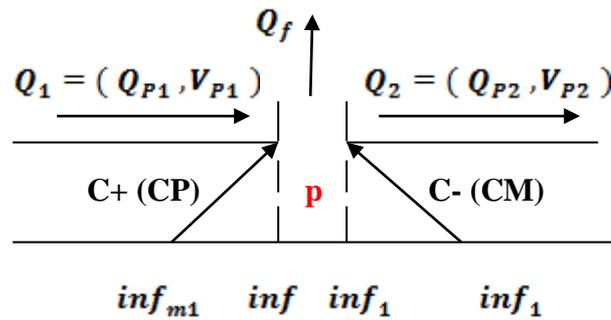


Figure IV.2 : Schéma de numérisation de la fuite

Au niveau de l'orifice de fuite, nous avons quatre inconnues, à savoir les pressions, P_{P1}, P_{P2} et les débits Q_{P1}, Q_{P2} (de part et d'autre de l'orifice) *fig (IV.2)*

$$P_{P2} = P_{P1} = P_p$$

$$Q_{P1} = Q_{P2} = Q_f$$

$$c-: \quad V_p + \frac{g}{a} H_p = CM \quad (IV.28)$$

$$c+: \quad V_p - \frac{g}{a} H_p = CP \quad (IV.29)$$

En utilisant l'équation de **Torricelli** pour un écoulement de fluide à travers un orifice, le débit est donné par la relation suivante :

$$Q_f = C_d A_f \sqrt{2gH_f} \quad (IV.30)$$

C_d : coefficient de débit propre de l'écoulement à travers l'orifice.

H_f : est la hauteur de pression de part et d'autre de l'orifice de fuite, elle est supposée identique.

$$P_{P2} = P_{P1} = P_P$$

$$H_{P1} = H_{P2} = H_P$$

$$Q_{P2} = Q_{P1} - C_d A_f \sqrt{2gH_P}$$

$$c-: \quad V_p + \frac{g}{a} H_p = CM$$

$$c+: \quad V_p - \frac{g}{a} H_p = CP$$

$$BV_{P1} + P_P = CP \tag{IV.31}$$

$$BV_{P2} - P_P = CM \tag{IV.32}$$

$$V_{P2} A = V_{P1} A - C_d A_f \sqrt{\frac{2}{\rho}} \sqrt{P_P} \tag{IV.33}$$

De l'équation (IV.31)

$$V_{P1} = \frac{CP - P_P}{B} \tag{IV.34}$$

De l'équation (IV.32)

$$V_{P2} = \frac{CM + P_P}{B} \tag{IV.35}$$

en substituant les équations (IV.34) et (IV.35) dans (IV.33), on arrive à :

$$\frac{A}{B} (CM + P_P) = \frac{A}{B} (CP - P_P) - C_d A_f \sqrt{\frac{2}{P}} \sqrt{P_P}$$

On pose :

$$A_1 = \frac{A}{B}$$

$$A_2 = C_d A_f \sqrt{\frac{2}{P}} \sqrt{P_P}$$

$$A_3 = 8 * A_1 * A_1$$

$$A_4 = A_2 * A_2$$

Donc il vient :

$$A_1 (CM - CP) + 2A_1 P_P + A_2 \sqrt{P_P} = 0 \quad \text{(IV.36)}$$

On pose :

$$X = \sqrt{P_P} \quad \Rightarrow \quad X^2 = P_P$$

Donc :

$$2A_1 X^2 + A_2 X + A_1 (CM - CP) = 0$$

$$\Delta = A_2^2 - 4(2A_1)(A_1(CM - CP)) = 0$$

$$\Delta = A_4 - A_3(CM - CP) = 0$$

$$X_{1,2} = \frac{-A_2 \pm \sqrt{\Delta}}{2(2A_1)} = \frac{1}{4A_1} (-A_2 \pm \sqrt{\Delta})$$

$$P_P = \left[\frac{1}{4A_1} (-A_2 \pm \sqrt{\Delta}) \right]^2$$

On trouve finalement :

$$V_{P1} = (CP - P_P) / B$$

$$V_{P2} = (CM + P_P) / B$$

$$Q_{P1} = V_{P1} * A$$

$$Q_{P2} = V_{P2} * A$$

$$Q_f = A_2 \sqrt{P_P}$$

(IV.37)

IV.6. Conditions initiales

Les conditions initiales sont les conditions du régime permanent avant la fermeture de la vanne située à l'extrémité avale de la conduite.

a) Aux points courants

$$V_{(x,0)} = V_{(0,0)} \tag{IV.38}$$

$$P_{(x,0)} = P_{(0,0)} - \frac{\lambda \rho V^2}{2D} X \tag{IV.39}$$

b) Au niveau de la fuite

$$P_{1(L-x,0)} = Q_{2(0,0)} - Q_{f0} \tag{IV.40}$$

CHAPITRE V :

**APPLICATION DU
MODELE DE
CALCUL SUR
L'INSTALLATION**

V.1.Application du modèle de calcul sur l'installation

1) Configuration de l'installation de distribution hydraulique

L'installation hydraulique sur laquelle se portera l'application de notre étude est composée comme suit

- Un réservoir en amont.
- Une conduite qui supporte une seule fuite au milieu.
- Une vanne en aval.

2) Le fluide utilisé

Le fluide qu'on a utilisé est de l'eau qui possède les caractéristiques physiques suivantes :

- Un module d'élasticité $E_f = 2.1 \text{ GPa}$
- Une masse volumique $\rho = 10^3 \text{ kg/m}^3$
- Une viscosité cinématique $\nu = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

3) les propriétés physiques de l'installation :

Les propriétés physiques de l'installation sont les suivantes :

La conduite est en cuivre :

- Le module d'élasticité (module de Young) $E = 117 \text{ GPa}$.
- La longueur de la conduite $L = 1600 \text{ m}$.
- Le diamètre de la conduite $D = 30.48 \text{ cm}$.
- L'épaisseur de la conduite $e = 6 \text{ mm}$.
- Le diamètre des deux fuites est considéré égal $D_f = 1.15 \text{ cm}$.
- La hauteur de pression au réservoir $H_0 = 50 \text{ m}$.

- Le débit initial $Q_0 = 0.020 \text{ m}^3/\text{s}$.
- Le débit final $Q_2 = 0.018 \text{ m}^3/\text{s}$.
- Le débit au niveau des deux fuites est considéré égal $Q_{f1} = Q_{f2} = 0.002 \text{ m}^3/\text{s}$.
- La vitesse initiale (du régime permanent) $v_0 = 0.2742397 \text{ m/s}$.
- La vitesse finale $v_2 = 0.2468158 \text{ m/s}$.
- Coefficient de débit de l'orifice $C_d = 0.62$.
- Le coefficient de frottement $\lambda = 0.316 Re^{-0.25}$
- Le coefficient de perte de charge linéaire $\lambda = 1.8584495 * 10^{-2}$
- Le nombre de Reynolds $Re = 83588.27$
- La vitesse de l'onde $a = 1078.211 \text{ m/s}$.
- $dt = 9.2746234 * 10^{-3}$
- $T_{onde} = 2.967879 \text{ s } (2 L / a)$
- $T_{periode} = 5.935759 \text{ s } (2T_{onde} = 4 L / a)$
- $T_{max} = 3T_{onde} = 15 \text{ s}$
- $j_{max} = 1617 (t_{max}/dt)$
- Pour $n = 160$ $dx = 10$ $inf = 80$ $(x = 800 \text{ m})$

Conditions initiales $I=1, N_{max} \quad j=1 \quad V_i=V_0$

$$H_i = H_{rés} - \lambda \frac{\Delta x v^2}{d \ 2g}$$

V.2.Application et résultats de calcul :

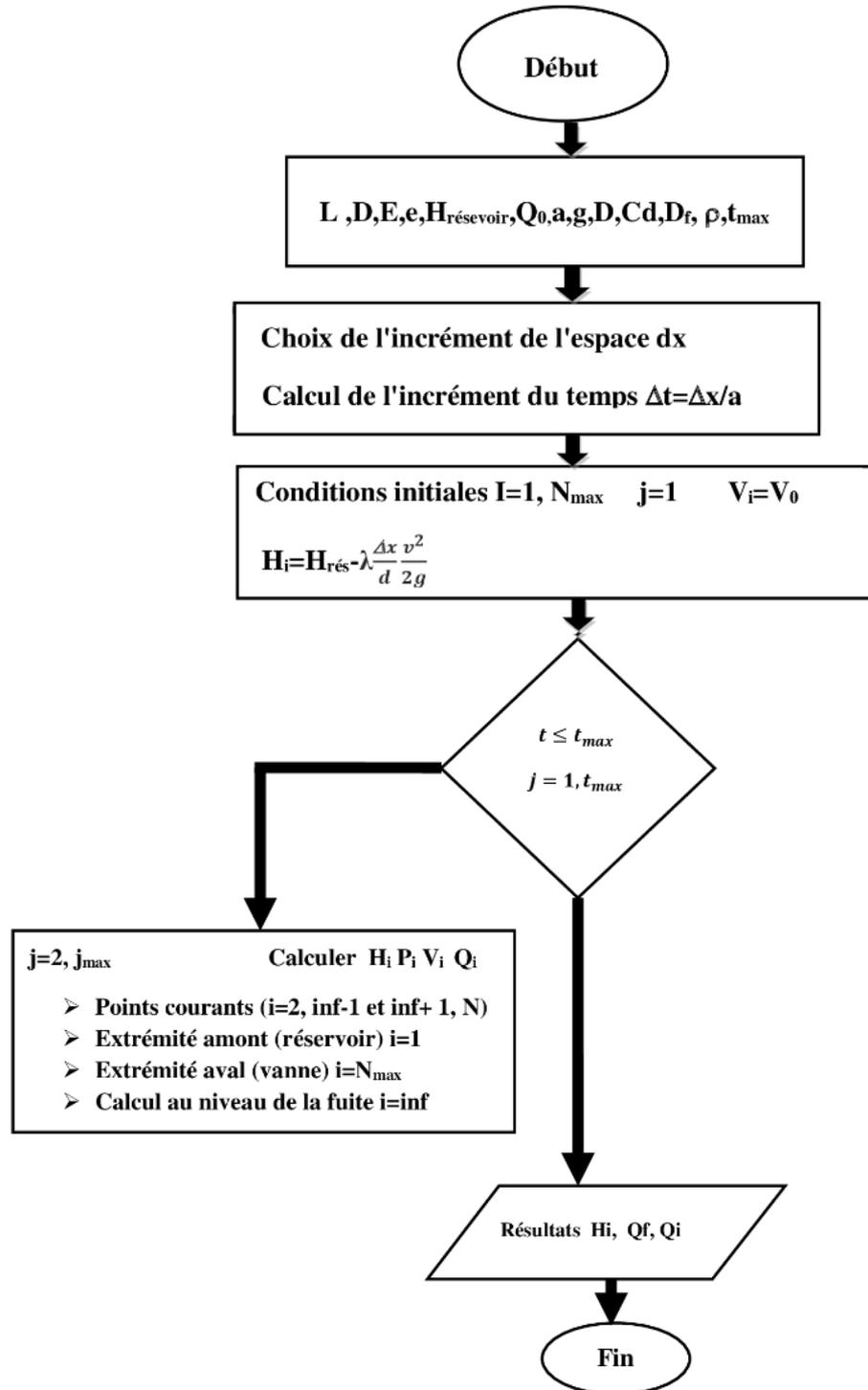


Figure V.1 Organigramme de calcul

V.3. Interprétation des résultats

A partir des données caractéristiques de l'installation hydraulique et du fluide de travail, les résultats calculés par un program informatique basé sur le langage Fortran sont représenté par les figures de graphes suivants,

Pour un régime transitoire, la hauteur de pression au niveau de la vanne est présentée en fonction du temps sur la **Figure.7** La fuite est au milieu de la conduite $x = L/2$, on constate une augmentations de la hauteur de pression de 50 m jusqu'à 76.78 m après une fermeture de la vanne d'un temps de 2 ms, alors qu'on observe une petite diminution de pression sur le premier palier de surpression au temps $t = 1.51$ s qui correspond à l'arrivée de l'onde de propagation de la pression réfléchié au niveau de la fuite. Puis la hauteur de pression chute jusqu'à 24,16 m au temps correspond a un aller-retour d'onde $t = 2.97$ s ($T = 2L/a$), puis on peut observer une petite augmentation de pression d'environ 1.61m au temps $t = 4,4797$ s (c.à.d. $h = 24.9336$ m), cette augmentation explique la réflexion de la propagation de l'onde de pression au niveau de la fuite. Ensuite la pression augmente encore au temps $t = 5,945$ s ($T = 4L/a$), à partir de là, la période se répète de la même manière ce qui explique le phénomène du coup de bélier. Mais tout en observation qu'il y aura des amortissements du signal de pression. Par la même analogie, les courbes du débit (**Figure.3.4.5**) s'interprète de la même manière que celle de la pression, et due a la présence de la fuite, on constate aussi un amortissement du signal du débit principal qui oscille entre la valeur maximale de 20 litre/s à une valeur minimale de -15.29 litre/s. Tandis que le débit de fuite oscille également entre la valeur maximale de 2.4962 l/s à une valeur minimale de 1.4126 litre/s (au temps $t = 3.7284$ s).

Fig.5. 2 contrainte (circonférentielle) au niveau de la vanne

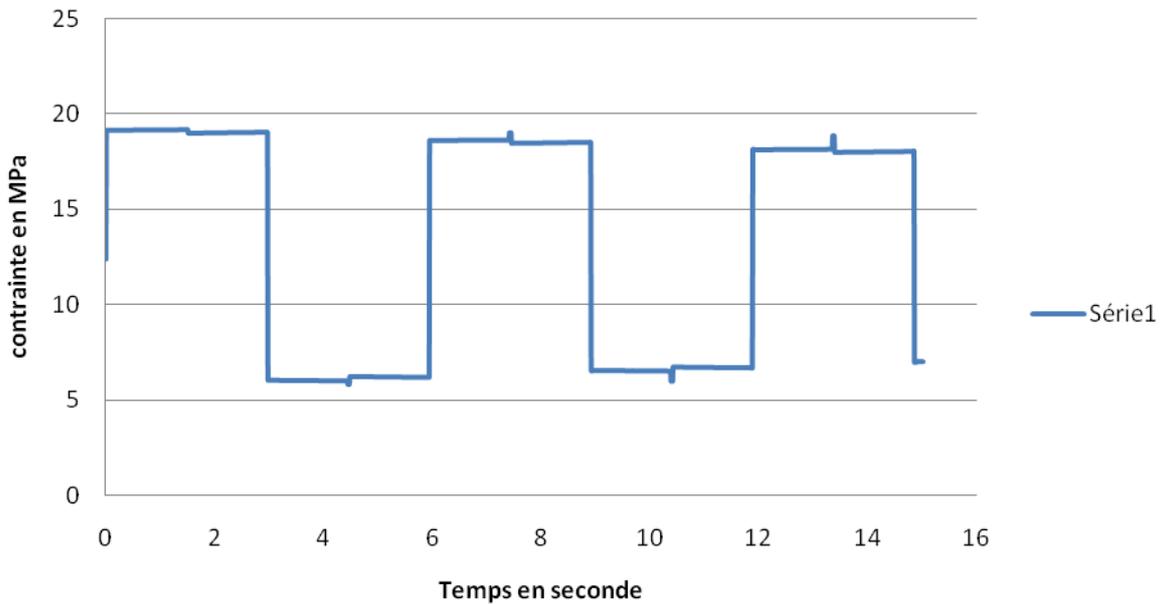
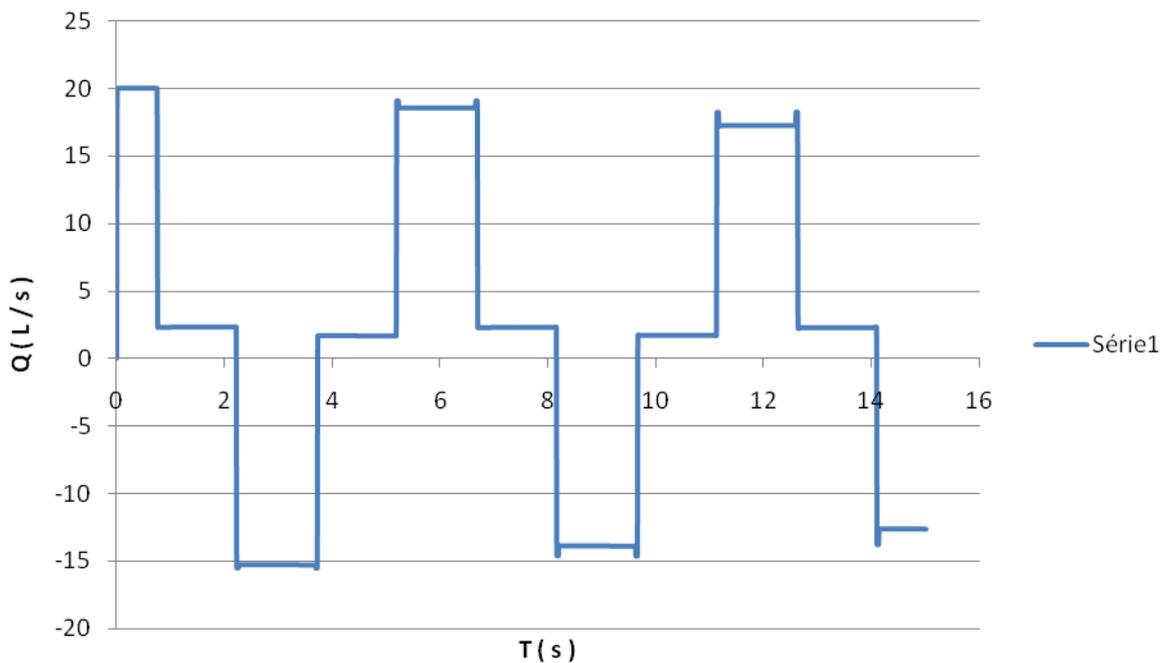
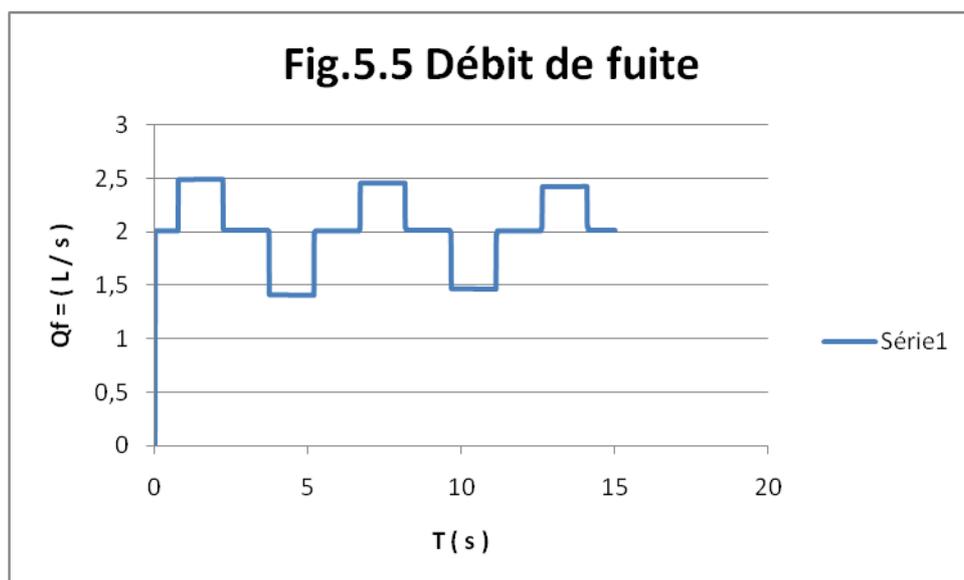
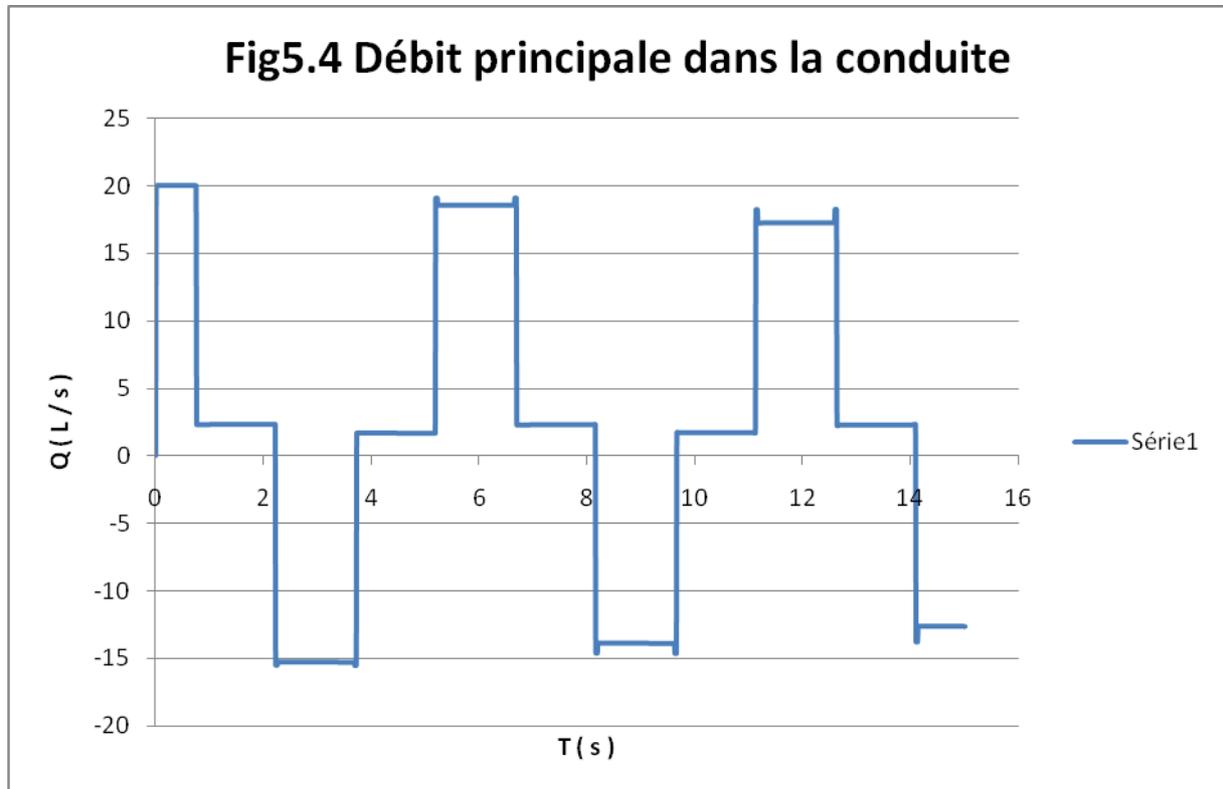
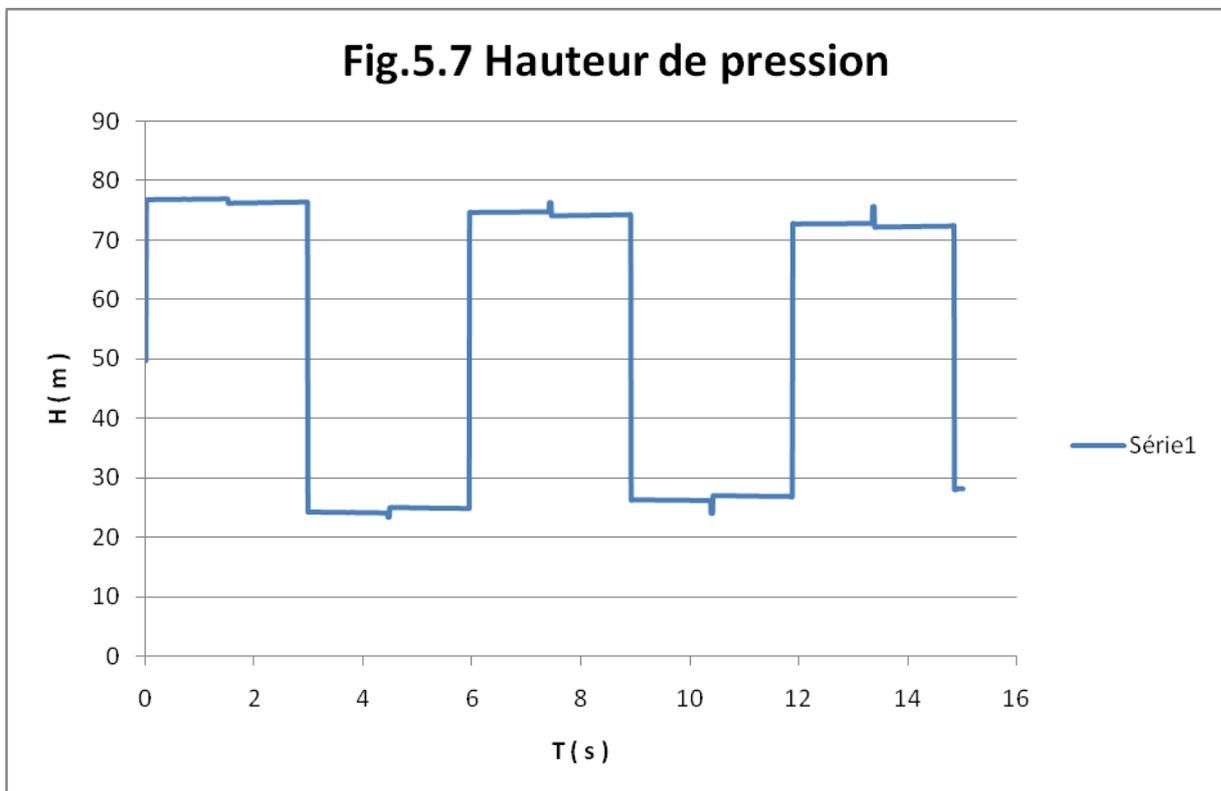
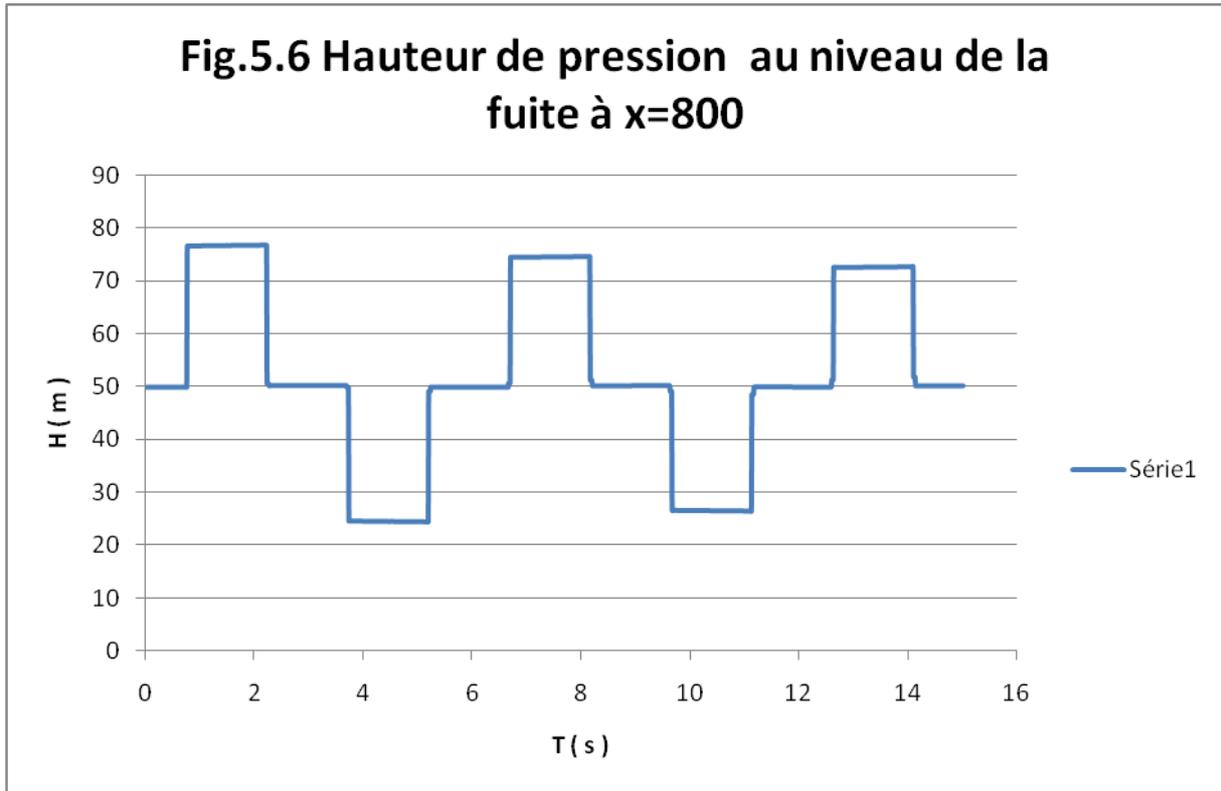
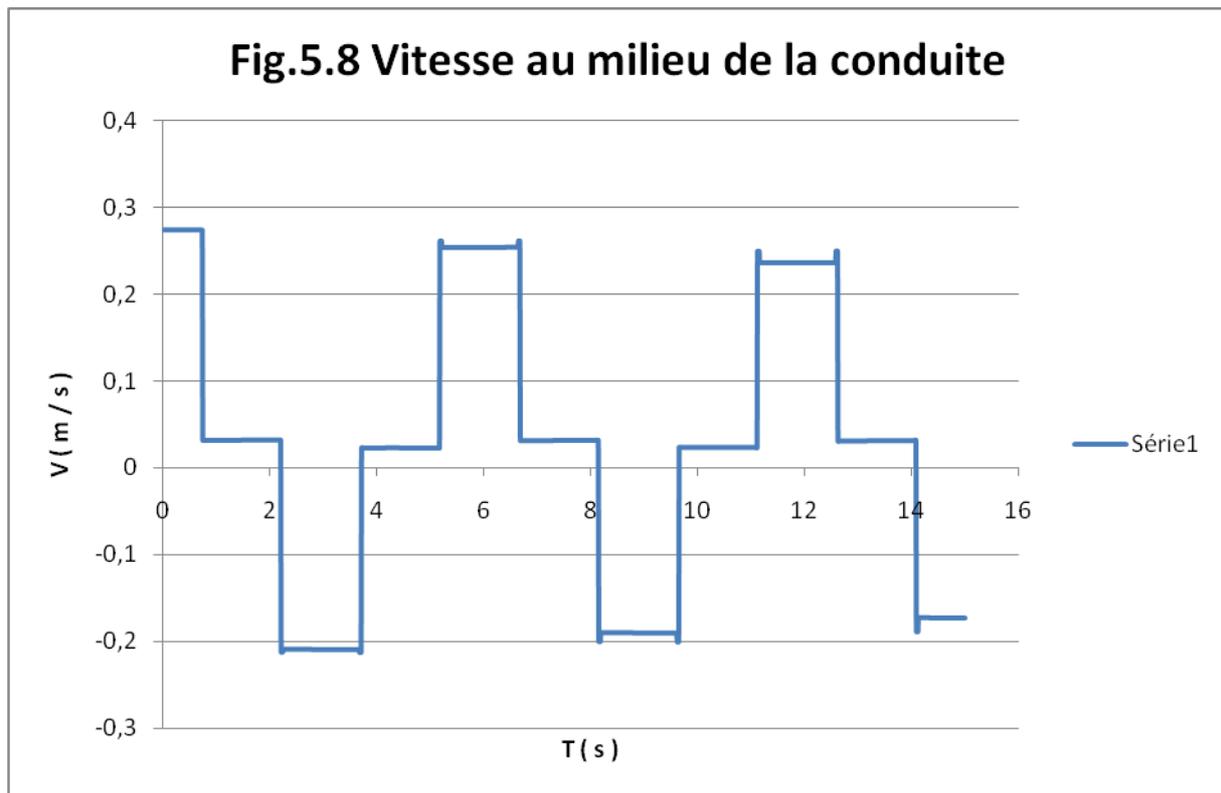


Fig.5.3 Debit principale au milieu de la conduite









Conclusion

Dans ce travail, on a développé un système d'équation régissant le phénomène de l'écoulement transitoire de fluide dans une conduite.

La résolution de ce système d'équations différentielles aux dérivées partielles de type hyperbolique a été réalisée en utilisant la méthode des caractéristiques couplée à celle de différence finie.

Par application du modèle proposé sur installation hydraulique, nous avons abouti à des résultats montrant l'influence du matériau (son module d'élasticité) sur les paramètres (pression débits) de l'écoulement dans une conduite en céramique à la présence d'une fuite.

Sur le plan pratique, il est nécessaire d'enregistrer l'historique de la pression dans le temps en une seule section de la conduite (par exemple l'extrémité avale), on peut réduire le cout de l'enquête de dépistage de fuites et d'investigation sonore ou optique.

Ce qui constitue une économie sur le cout de la détection et la localisation de fuites dans un système de conduite.

NOMENCLATURE

symboles	description
\vec{V}	Le vecteur vitesse
ρ	La masse volumique
Q	Le débit
\bar{V}	La vitesse moyenne
V	Le volume de controle
\vec{T}	Force par unité de volume
$\underline{\underline{\sigma}}$	Le tenseur de contrainte
$\underline{\underline{\varepsilon}}$	Le tenseur des taux de déformation
λ	Coefficient de frottement
μ	Coefficient de viscosité
$\underline{\underline{\tau}}$	Le tenseur de contrainte de viscosité
X	Le Coefficient de compressibilité
τ_0	La contrainte tangentielle de viscosité
D	Le diamètre de la conduite
σ	La contrainte normale
r	Le rayon de la conduite
e	L'épaisseur de la conduite
θ	L'angle de variation
a	La vitesse de propagation de l'onde de perturbation
g	L'accélération de la pesanteur
T_f	Le temps de la fermeture de la vanne
L	La longueur de la conduite
E	Le module d'élasticité de la conduite
V_{NS}	La vitesse à l'extrémité aval
H	Hauteur de pression
Q_f	Débit de fuite
P	Pression du fluide en écoulement
E_e	Module d'élasticité de l'eau
A	Section de la conduite

Références Bibliographiques

- [1] BLINDU I. (2004). *Outil d'aide au diagnostic du réseau d'eau potable pour la ville de Chisinau par analyse spatiale et temporelle des dysfonctionnements hydrauliques.*
- [2] BONNIN J. (1982). *Aide mémoire d'hydraulique urbaine. édition Eyrolles. France.*
- [3] EISENBEIS P. (2004). *Modélisation statistique de la prévision des défaillances sur les conduites d'eau potable. Thèse de doctorat de l'université Louis Pasteur. France.*
- [4] MERZOUK N. (2005). *Méthodologie de détection et de localisation des fuites dans un réseau d'eau potable dans les petites et les moyennes collectivités. Thèse de Doctorat de l'université d'Artois en collaboration avec l'école des mines de Douai. France .*
- [5] D. Covas, I. Stoianov, H. Ramos, N. Graham, C. Maksimovic: *The dissipation of pressure surges in water pipeline systems.* First Joint Conf. IAHR-IWA on pump, Electromechanical Devices and Systems (PEDS 2003), Valencia, Spain, 2003.
- [6] A. N. Tafuri: *Locating Leaks with acoustic technology.* American Water Works Association Journal, 92 (2000) 57-66.
- [7] O. Hunaidi, P. Giamou: *Ground-Penetrating*
- [8] *Radar for Detection of Leaks in Buried Plasticdes réseaux d'eau [Mr Tarfaya Chafai -2012-]*
Université Hadj Lakhdar –BATNASITES
- [9] B. Brunone: *Transient Test-Based Techniques for Leak Detection in Outfall Pipes.* Journal of Water Resources Planning and Management, 125 (1999) 302-306.
- [10] D. Misiunas, J. Vitkovsky, G. Olsson, A. Simpson, M. Lambert: *Pipeline Break Detection Using Pressure Transient Monitoring.* Journal of Water Resources Planning and Management, 131 (2005) 316-325.
- [10] S. G. Buchberger, G. Nadimpalli: *Leak Estimation in Water Distribution Systems by Statistical Analysis of Flow Readings.* Journal of Water Resources Planning And Management, 130 (2004) 321-329.
- [11] B. Brunone, M. Ferrante: *Detecting leaks in pressurized pipes by means of transients.* Journal of Hydraulic Research, 39 (2001) 539-547.
- [12] W. Mpesha, S. L. Gassman, M. H. Chaudhry: *Leak Detection in Pipes by Frequency Response Method.* Journal of Hydraulic Engineering, 127 (2001) 134-147.
- [13] M. Ferrante, B. Brunone. *Pipe system diagnosis and leak detection by unsteady-stata tests. 1 harmonic analysis.* Advances in Water Resources 26 (2003) 95-105.
- [14] M. Taghvaei, S. B. M. Beck, W. J. Staszewski, 2006: *Leak detection in pipelines using cepstrum analysis.* Measurement Science and Technologie, IOP Publishing Ltd, UK. 17 (2006) 367-372.
- [15] E. Hadj Taïeb: *Leak detection by using water hammer and impedance methods.* Water Mangement Challenges in Global Change, Ulanicki et al. (eds), Taylor & Francis Group, London, UK, 2007, pp. 345-352.
- [16] A. K. Soares, D. I. C. Covas, L. F. R. Reis: *Inverse transient analysis for leak detection in PVC pipe network.* Water Mangement Challenges in Global Change, Ulanicki et al. (eds), Taylor & Francis Group, London, UK, 2007, pp. 337-344.
- [17] E. B. Wylie, V. L. Streeter, L. Suo: *Fluid transients in systems.* Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, USA, 1993.
- [18] R. Courant, K.O. Friederichs: *Supersonic flow and shock waves.* Interscience publishers Inc., New York, 1948

