

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

BADJI MOKHTAR ANNABA-UNIVERSITY  
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA



جامعة باجي مختار عنابة

FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIORAT  
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

## MEMOIRE

PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER

### INTITULE

**Influence du terme de frottement Trikha en  
écoulement instationnaires dans une conduite à  
la présence d'une fuite**

FILIERE : GENIE MECANIQUE

SPECIALITE : ENERGETIQUE ET ENVIRONNEMENT

PRESENTE PAR : BOUMEDIRI OUSSAMA

ENCADREUR DU MEMOIRE : A. DJEMILI

DEVANT LE JURY

PRESIDENT : PR MZAD.H

EXAMINATEURS : Dr Mechighel.F

Dr Azzouz.S

Année : 2015/2016

## *Remerciements*

Je tiens tout d'abord à remercier en premier lieu mon encadreur, monsieur **A. DJEMILI** pour son soutien scientifique. Ses conseils promulgués durant mon mémoire m'ont permis d'élargir mes horizons, je n'oublie pas aussi sa chaleur humaine que m'a beaucoup touché.

J'adresse mes remerciements sincères à tous les membres de jury d'accepter de discuter ce mémoire, et pour le temps qui ont pris à l'examiner :

- ✚ Mzad.H, président de jury, professeur a l'université d'Annaba
- ✚ AZOUZ. S, maitre de conférences de l'université d'Annaba
- ✚ Mechighel. , maitre de conférences de l'université d'Annaba

Je remercie tous mes collègues de l'institut génie mécanique ainsi que tous les enseignants et les responsables.

Enfin je tiens à remercier mes parents pour m'avoir appris à toujours aller au bout de mes idées, ainsi que mes frères, pour leurs soutiens sans faille.

Je remercie également tous mes amis pour m'avoir soutenu.

## *Dédicace*

Tous les mots ne sauraient exprimer la gratitude, l'amour, le respect, la reconnaissance, c'est tous simplement que : Je dédie ce mémoire de master à :

A Ma tendre Mère : Tu représente pour moi la source de tendresse et l'exemple de dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager. Tu as fait plus qu'une mère puisse faire pour que ses enfants suivent le bon chemin dans leur vie et leurs études.

A Mon très cher Père Mohamed : Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours pour vous. Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et mon bien être. Ce travail et le fruit de tes sacrifices que tu as consentis pour mon éducation et ma formation le long de toute ma vie.

A mes chers frères et sœurs : Selma et Djalel

A mon encadreur : Monsieur DJEMILI. A

A mes très chères amis : Bendjemaa Mouad, Belkasmi Billel, Touchal Larbi .

A tous les membres de ma promotion.

A tous mes enseignants depuis mes premières années d'études.

A tous ceux qui me sont chers et que j'ai omis de citer.

**LISTE DE FIGURES :**

<b>FIGURE</b>	<b>INTITULLE</b>
<b>FIGURE I-1</b>	Les fuites d'eau sur les réseaux urbains
<b>FIGURE I-2</b>	les appareils d'auscultation typiques se trouvent les tiges d'écoutes et les microphones
<b>FIGURE I-3</b>	les signaux produits par les fuites sont transmis sans fil des capteurs au corrélateur
<b>FIGURE I-4</b>	Les fuites d'eau sur les réseaux urbains
<b>FIGURE II-1</b>	Les 4 phases du coup de bélier dans une conduite hydraulique
<b>FIGURE II-2</b>	Schéma simplifié d'une onde de pression remontant une conduite.
<b>FIGURE III-1</b>	Bilan de masse dans un tronçon de conduite.
<b>FIGURE III-2</b>	Contrainte latérale dans une conduite a paroi mince.
<b>FIGURE III-3</b>	Bilan des forces exercées sur un tronçon de conduite.
<b>FIGURE IV-1</b>	Courbes caractéristiques.
<b>FIGURE IV-2</b>	Droites caractéristiques dans le plan(x,t).
<b>FIGURE IV-3</b>	Points de discrétisation sur lesquels on effectue les calculs.
<b>FIGURE IV-4</b>	Schéma de discrétisation et droites caractéristiques.
<b>FIGURE IV-5</b>	Schéma numérique au point courant.
<b>FIGURE IV-6</b>	Schéma numérique au niveau de l'extrémité amont.
<b>FIGURE IV-7</b>	Schéma numérique au niveau de l'extrémité avale.
<b>FIGURE IV-8</b>	Schéma de la fuite.
<b>FIGURE IV-9</b>	Schéma numérique de la fuite.
<b>FIGURE V-1</b>	Schéma de l'installation hydraulique (réservoir-conduite-vanne) en présence d'une fuite.
<b>FIGURE V-2</b>	Organigramme de calcul.
<b>FIGURE V-3</b>	Hauteur de pression au niveau de la vanne (cuivre).
<b>FIGURE V-4</b>	Débit au milieu de la conduite (cuivre).
<b>FIGURE V-5</b>	Débit de fuite (cuivre).

## NOMENCLATURE

Symboles	description
$\vec{V}$	Le vecteur de vitesse
$\rho$	La masse volumique
$Q$	Le débit d'écoulement de fluide
$V$	La vitesse moyenne
$V$	Le volume de contrôle
$\vec{T}$	Force par unité de volume
$\vec{\sigma}$	Le tenseur de contrainte
$\vec{\epsilon}$	Le tenseur des taux de déformation
$\lambda$	Coefficient de frottement
$\mu$	Coefficient de viscosité
$\vec{\tau}$	Le tenseur de contrainte de viscosité
$V$	Le volume occupé par unité de volume
$\chi$	Le coefficient de compressibilité
$\tau_0$	La contrainte tangentielle de viscosité partielle
$d$	Le diamètre de la conduite
$\sigma$	La contrainte normale
$r$	Le rayon de la conduite
$e$	L'épaisseur de la conduite
$\theta$	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 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
$K$	Module d'élasticité de l'eau
$A$	Section de la conduite
$\nabla$	Section de la conduite

**Résumé :**

La détection des fuites fait l'objet des recherche scientifique depuis longtemps, plusieurs méthodes ont été mis en raison de pouvoir détecter l'endroit de la fuite au cours des conduite.

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

L'évolution de la science de la mécanique des fluides nous a permis de pouvoir localiser les endroits des fuites, et également suite aux conditions dans lesquelles existent nos installations hydrauliques, on peut choisir leurs caractéristiques en se basant sur une méthode analytique numérique.

Les phénomènes transitoires de propagation d'onde représentent un problème capital dans le domaine de l'hydraulique surtout dans les grandes installations hydrauliques comme les centrales hydroélectriques et les stations de pompages où les dimensions des conduites sont très importantes et où le phénomène du coup de bélier peut causer des dégâts énormes.

Dans notre étude on s'est focalisé sur l'une des causes de la propagation des ondes, cas de la fermeture brusque des vannes dans des conduites et en présence d'une fuite , en passant par deux étapes ; la modélisation mathématique en utilisant la méthode des caractéristique avec la méthode des différences finie et la deuxième étape c'est la modélisation numérique des équations de problème posé au niveau de la conduite et au niveaux de la fuite .4

On a utilisé le langage fortran pour pouvoir simuler numériquement ce phénomène en tenant compte de l'influence de module de Young de la conduite sur la propagation de l'onde acoustique suite au coup de biler et en présence d'une fuite.

**Mots clés :**

Module de Young, Fuite, Coup de bélier, Propagation, Onde, Phénomène transitoire, Simulation numérique, Fortran.

# Chapitre I : Généralités

## I-1 Introduction :

Le principe d'un modèle est de remplacer un système complexe en un objet ou un opérateur simple reproduisant les aspects ou comportements principaux de l'original (ex : modèle réduit, maquette, modèle mathématique ou numérique, modèle de pensée ou raisonnement).

Comme dans les ouvrages hydrauliques, ou dans les installations hydrauliques, appelés globalement des systèmes hydrauliques, les phénomènes physiques (la turbulence des fluides...) les plus intéressants qui se créent sont aussi les plus complexes à étudier.

Ils sont souvent régis par un grand nombre de paramètres non linéaires interagissant entre eux.

L'une des solutions est de recourir à une série d'expériences pour analyser les paramètres et grandeurs physiques d'un système.

Mais les essais peuvent s'avérer très coûteux (essais avec matériaux rares, instrumentations très chères...) et ils peuvent être très dangereux (essais nucléaires, environnement spatial...).

Enfin il peut être difficile de mesurer tous les paramètres : échelles du problème trop petites (chimie du vivant, couche limite en fluide...) ou trop grandes (astrophysique, météorologie, géophysique...).

On peut aussi construire un modèle mathématique permettant la représentation du phénomène physique.

Ces modèles utilisent très souvent des systèmes d'équations aux dérivées partielles (EDP) non linéaires dont on ne connaît pas de solutions analytiques en général. Il faut alors résoudre le problème numériquement en transformant les équations continues de la physique en un problème discret sur un certain domaine de calcul appelé le maillage.

Dans certains cas, les simulations numériques sont menées en parallèle avec des expérimentations. [E. Goncalves. 2005].

En fait, la mécanique des fluides, de même que bien d'autres parties de la physique, comme la mécanique des structures et l'électromagnétisme reposent sur l'hypothèse de continuité, selon laquelle toutes les variables physiques peuvent s'exprimer comme des fonctions continues des coordonnées spatiales et du temps. L'application des principes de base de la physique permet d'établir les équations aux dérivées partielles qui lient ces fonctions.

Malheureusement, en raison de la complexité tant des équations non linéaires couplées que de la géométrie des domaines dans lesquelles elles doivent être résolues, il n'existe de solution analytique que dans de très rares cas.

Pour résoudre les problèmes d'écoulements fluides, d'autres voies doivent dès lors être empruntées.

Une première approche, abondamment employée, consiste à chercher des solutions analytiques pour des problèmes simplifiés (équations et/ou géométries simplifiées), c'est l'approche théorique simplifiée. Une deuxième approche, consiste à recourir à l'expérimentation en laboratoire, c'est l'approche expérimentale.

Enfin, au cours des 40 dernières années, s'est développée une troisième approche, à savoir la simulation numérique, qui consiste à chercher une solution numérique approchée des équations du problème. C'est cette dernière approche qui sera abordée dans notre travail. Sachant que :



Pour l'approche théorique, les informations générales se présentent sous forme d'expressions mathématiques mais, elle est restreinte à des géométries et des types d'équations simples (équations linéaires).

- Pour l'approche expérimentale, elle est capable d'être la plus réaliste quoique on est confrontée à des inconvénients comme les équipements requis, les problèmes d'échelles, les distorsions, les corrections dues aux interférences, les difficultés de mesures et le coût des opérations.
- Pour l'approche numérique, on n'est pas restreint à des problèmes linéaires, au contraire on peut traiter des équations et des géométries complexes et on peut trouver des solutions pour les problèmes in stationnaires, mais cette approche n'échappe pas à la règle car, elle a aussi des inconvénients (erreurs de troncatures, problèmes liés aux conditions aux limites, coûts de calculs) qu'on va traiter justement dans notre travail.

On constate que, loin d'être concurrentes, les trois approches sont complémentaires.

En particulier, la simulation numérique peut très bien utilisée en conjonction avec l'analyse théorique simplifiée, à savoir que l'on peut chercher une solution numérique d'un problème simplifié. C'est d'ailleurs presque toujours ce qui est fait en mécanique des fluides, en raison de la complexité des équations générales rencontrées (non linéaires). On sait aussi que les essais expérimentaux jouent un rôle primordial car ils permettent d'évaluer la validité des modèles élaborés et utilisés dans les simulations numériques.

## **I-2- Identification du problème physique :**

### **I-2-1- La problématique :**

Lorsque, dans un réseau de canalisations véhiculant un fluide, on modifie localement les conditions d'écoulements (mise en route ou arrêt d'une pompe, manœuvre d'une vanne, etc.), on introduit dans le fluide une discontinuité portant sur les paramètres (pression, vitesse, débit, ...) ou sur leur dérivée.

En raison de l'élasticité du milieu (fluide-conduite) cette discontinuité se propage de proche en proche avec une célérité souvent élevée, affectant ainsi rapidement une zone étendue de l'écoulement considérée.

Cette perturbation, dont l'amplitude peut être importante et qui se propage, est communément appelé onde. Dans le domaine de l'hydraulique, elle est connue sous le nom de coup de bélier, cette désignation ayant pour origine les variations de pressions extrêmement brutales qui sont souvent observées.

De par leur nature, et hormis les cas particuliers de résonances, les phénomènes liés à l'élasticité du milieu s'amortissent (quelques aller et retour d'onde), conduisant à un nouveau régime permanent, [E. Rieutord. 85].

Dès lors, l'étude des régimes transitoires (régime subissant des perturbations ou des variations) peut être traitée avec la prise en compte de l'élasticité du milieu, ce qui conduit à une évaluation précises des paramètres (pression, débit, etc...) en chaque point du fluide et quelque soit le temps considéré, c'est la théorie du coup de bélier d'onde, appelé aussi onde de choc ou choc hydraulique. Nous avons aussi tenu compte de l'influence d'une fuite à travers un orifice situé au milieu de la conduite.

## **I-2-2- la Démarche :**

Dans ce travail, nous avons fixé l'objectif de traiter le régime transitoire (coup de bélier) dans les systèmes hydrauliques en charge, en passant par l'aspect théorique équations de bases (équation de conservation de la masse ou équation de continuité et équation de la conservation de la quantité de mouvement) et les hypothèses de base ainsi que les équations de comportement mécanique et thermodynamique.

Pour la résolution du système d'équations, on a utilisé les méthodes mathématique et numérique, pour nous permettre de quantifier ce type de phénomène.

A l'heure actuelle, la disponibilité croissante de la puissance de calcul des ordinateurs dont le coût est décroissant, a permis de développer des outils numériques de simulation, dont la précision et la fiabilité sont déjà fort acceptables, d'autant que l'on respecte les conditions d'utilisations.

Des pertes de charge, ainsi que des conditions aux limites peuvent être prises en compte dans ces méthodes d'analyses.

Parmi les méthodes numériques les plus utilisées dans ce domaine, on cite:

- 1- La méthode des caractéristiques (la plus robuste des algorithmes d'analyses de phénomènes transitoires (Method Of Characteristic MOC).
- 2- La méthode des différences finies (FDM).

## **I-3-Les fuites :**

### **I-3-1-Introduction:**

Dans la plupart 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 (p. ex. pour la lutte contre les incendies ou le nettoyage des conduites), vol. La cause principale est généralement les fuites.

Les fuites se produisent dans différents éléments du réseau de distribution : conduites de transmission, conduites de distribution, branchements, raccords, vannes, bouches d'incendie. Les causes des fuites sont la corrosion, les défauts des matériaux, une mauvaise installation, une pression d'eau excessive, les coups de bélier, les mouvements 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 ressource naturelle précieuse, et elles représentent un danger pour la santé publique. La perte économique principale est

le coût de l'eau elle-même, de son traitement et de son transport. Il y a aussi l'endommagement du réseau (érosion de l'assise des conduites, rupture des canalisations) et des fondations des routes ou des bâtiments (figure 1). 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 des 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. Grâce à ces efforts, les exploitants de réseaux disposent maintenant de plusieurs techniques bien établies<sup>2</sup> et d'appareils modernes qui les aident à limiter les pertes d'eau.



**Figure I-1:** Les fuites d'eau sur les réseaux urbains .

Sur la fig. (I-1) Les fuites d'eau ont pour effet d'endommager le réseau de distribution d'eau (érosion de l'assise des conduites, rupture des canalisations) et les fondations des routes ou des bâtiments.

### **I-3-2-Bilans d'eau :**

Les bilans d'eau permettent de déterminer les quantités d'eau qui se perdent dans les réseaux de distribution. Ils peuvent être effectués sur l'ensemble du réseau ou par secteur. Sur l'ensemble du réseau, ils donnent une idée globale des pertes d'eau. Ils exigent une comptabilité détaillée des quantités d'eau entrant dans le réseau et en sortant, et ils sont généralement basés sur les relevés des compteurs et sur la vérification de leur précision. Par nature, ces bilans demandent des efforts importants, en particulier lorsqu'il s'agit de grands réseaux.

Dans le cas des bilans par secteur, le réseau de distribution est divisé en secteurs comportant environ 20 à 30 km de conduites.

Chacun de ces secteurs est isolé par fermeture des vannes appropriées; seules ne sont pas fermées les vannes situées aux points de contrôle, où des débitmètres portables sont mis en place pour mesurer la quantité d'eau qui s'écoule sur une période de 24 heures. Pour savoir s'il y a des fuites importantes, on détermine le rapport du débit nocturne minimum au débit diurne moyen et on le compare aux ratios considérés comme normaux ou à des ratios établis précédemment pour le secteur donné. Les débits d'eau liés à des usages commerciaux ou industriels continus devraient être soustraits des débits mesurés. Si tous les raccordements aux abonnés sont équipés de compteurs, on peut obtenir des données plus précises concernant les fuites en relevant les quantités d'eau écoulées et consommées dans tel ou tel secteur, et ce sur une longue période.

Les zones où se produisent des fuites importantes peuvent être déterminées par la méthode du test par étapes. Celle-ci consiste à subdiviser le secteur, puis à mesurer les débits après avoir coupé successivement l'alimentation de chacun des sous-secteurs par fermeture des vannes correspondantes.

Une diminution marquée du débit indique que des fuites importantes se produisent dans le sous-secteur dont l'alimentation vient d'être coupée.

Les bilans par secteur sont coûteux et exigent beaucoup de travail, car ils se font la nuit.

Depuis quelques années, on a tendance à installer de façon permanente des débitmètres raccordés au système SCADA par télémétrie. Les valeurs des débits ainsi transmises sont automatiquement analysées et permettent de déceler les augmentations inhabituelles de consommation d'eau. En connaissant le réseau, on peut savoir si une augmentation du débit est causée par de nouvelles fuites.

Les bilans par secteur et les tests par étapes permettent de déterminer les zones du réseau de distribution où il y a des fuites importantes, mais il reste ensuite aux équipes de réparation à repérer celles-ci.

### **I-3-4-Détection des fuites :**

Dans les zones où l'on sait que des fuites importantes se produisent, celles-ci sont généralement repérées au moyen d'appareils acoustiques. Ces derniers détectent les vibrations ou les bruits produits par l'eau qui s'échappe des canalisations sous pression.

Ces bruits se propagent le long de la conduite sur de grandes distances (selon le type et la taille de la conduite) et dans le sol environnant.

Dans un premier temps, les équipes de détection des fuites déterminent grossièrement l'emplacement des fuites dans le réseau de distribution en auscultant

tous les points accessibles du réseau (p. ex. les bouches d'incendie et les vannes). Elles repèrent ensuite 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.

### **I-3-5 Matériel et techniques de détection Les appareils d'auscultation :**

Il s'agit des tiges d'écoute, des aquaphones et des géophones, ou microphones au sol fig.(I- 2), ces appareils sont soit mécaniques, soit électroniques. Ils utilisent des mécanismes ou des matériaux sensibles (comme les éléments piézoélectriques) pour capter les vibrations ou les bruits émis par les fuites.

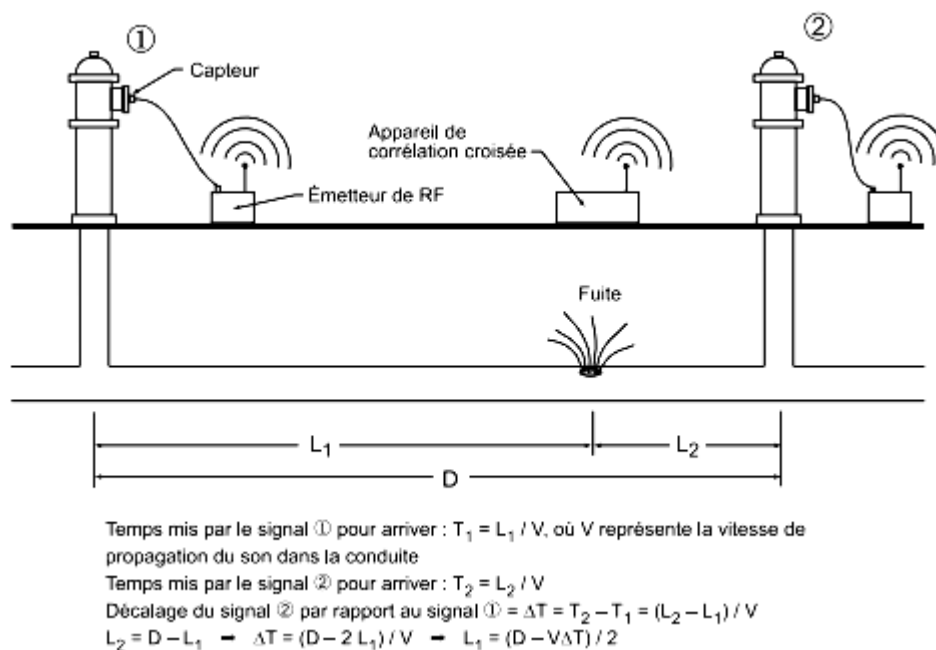
Les appareils électroniques modernes sont munis d'amplificateurs de signaux et de filtres antiparasites pour mettre en relief le signal produit par la fuite. Le mode d'emploi des appareils d'auscultation est généralement simple mais leur efficacité dépend de l'expérience de l'opérateur.



**Figure I- 2:** Parmi les appareils d'auscultation typiques se trouvent les tiges d'écoute (gauche) et les microphones au sol (droite).

## A- Les corrélateurs de bruits de fuites :

Ce sont des appareils portatifs à microprocesseurs qui repèrent précisément et automatiquement les fuites par la méthode de la corrélation croisée fig.(I-3). On mesure dans ce cas le signal acoustique émis par une fuite au moyen de capteurs de vibrations ou d'hydrophones disposés sur deux points de contact avec la conduite (généralement des bouches d'incendie ou des vannes), ce qui permet de déterminer l'emplacement de la fuite présumée.



**Figure I-3:** Les signaux produits par les fuites sont transmis, sans fil, des capteurs au corrélateur.

Dans la plupart des cas, la fuite ne se trouve pas à égale distance des points de mesure il existe donc un décalage dans la réception des signaux. Ce décalage temporel est calculé au moyen de la fonction de corrélation croisée des signaux produits par la fuite. La fonction de corrélation croisée donne alors une crête qui coïncide avec le décalage entre les signaux. L'emplacement de la fuite est déterminé au moyen d'une formule algébrique dans laquelle interviennent le décalage, la distance entre les capteurs et la vitesse de propagation des ondes sonores dans la conduite fig. (I- 4).

La distance entre les capteurs est mesurée directement sur place ou relevée sur les cartes du réseau de distribution. La vitesse de propagation le long des conduites de différentes catégories et dimensions est généralement indiquée par la plupart des appareils vendus dans le commerce; elle peut aussi être calculée facilement sur place.



**Figure I-4 :** Un corrélateur de bruits de fuites est un appareil portable à microprocesseurs qui repère précisément et automatiquement les fuites.

## **B) La 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 (p. ex. 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

## **C) La 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.

## **D) Le géoradar :**

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 du géoradar 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 réfléchie détermine la profondeur de l'objet qui réfléchit l'onde.

## **I-3-6 Les facteurs qui influent sur l'efficacité des méthodes acoustiques :**

L'efficacité des méthodes acoustiques de détection des fuites dépend de plusieurs facteurs, dont la taille, le type et la profondeur de la conduite, le type de sol, le niveau de la nappe d'eau, le type et l'importance de la fuite, la pression dans le réseau, les interférences acoustiques, la sensibilité et la plage de fréquence des appareils.

Le matériau et le diamètre de la conduite jouent un rôle important dans l'atténuation des signaux émis par les fuites. Par exemple, ceux-ci sont moins atténués dans le cas des conduites en métal que dans celui des tubes en plastique. Plus le diamètre de la conduite est grand, plus l'atténuation est importante et plus il est difficile de détecter les fuites.

Le diamètre et le matériau de la conduite influent sur les fréquences dominantes des signaux émis par les fuites – les fréquences dominantes sont d'autant plus basses que le diamètre de la conduite est grand ou que son matériau est peu rigide. À cause de ce phénomène, les signaux émis par les fuites peuvent être brouillés par des vibrations de basse fréquence (p. ex. celles produites par des pompes ou par la circulation routière).

Les signaux émis par les fuites ont, à la surface du sol, une intensité qui dépend beaucoup du type de sol et du niveau de la nappe d'eau. L'expérience montre que les bruits causés par les fuites sont plus audibles sur un terrain sablonneux que sur un sol argileux, et plus audibles sur une surface en asphalte ou en béton que sur le gazon. Si la conduite se trouve sous la surface de la nappe d'eau, ces bruits sont étouffés.



Les caractéristiques des bruits causés par les fuites varient en fonction du type et de l'importance de celles-ci. Les fissures et les piqûres de corrosion que comportent les parois des conduites produisent des signaux plus intenses et de fréquence plus élevée que s'il s'agit de fuites au niveau des raccords ou des vannes. De façon générale, le signal émis par une fuite est d'autant plus intense que celle-ci est importante, mais cela n'est pas forcément vrai dans le cas de fuites très sérieuses. Plus la pression est élevée dans la conduite, plus les signaux émis par les fuites sont intenses.

### **I-3-7-Les différents appareils de détection :**

Il est difficile de détecter les fuites dans des conduites où la pression est inférieure à 1,05 kgf/cm<sup>2</sup>. de fonctionnement automatique, les acoustiques des fuites présentent de grandes variations aux points de vue sensibilité, plage de fréquence, conditionnement et traitement du signal. Plus les capteurs de fuites sont sensibles, plus le rapport signal bruit des appareils est élevé et plus les fuites détectables sont petites.

Les appareils acoustiques modernes sont équipés de dispositifs de traitement des signaux (p. ex. filtres et amplificateurs) qui rendent ceux-ci distincts. Les filtres éliminent les bruits dont la fréquence se situe hors de la plage de fréquences dominantes des signaux produits par les fuites. Les amplificateurs augmentent le rapport signal-bruit et rendent audibles les signaux faibles.

### **I-3-8-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 es 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. Une étude récente<sup>3</sup> menée par l'IRC et financée par **l'American Water Works Association Research Foundation** a montré que les fuites dans les tubes en plastique peuvent être repérées au moyen des techniques acoustiques, mais que celles-ci présentent plusieurs difficultés. En mode corrélateurs de bruits de fuites ont rarement permis de repérer celles-ci, car la plage de fréquence choisie par les appareils était généralement trop élevée. Les opérateurs utilisant de tels appareils en mode manuel avaient aussi tendance à choisir une plage de fréquence trop élevée; c'est pourquoi ils n'ont pas détecté certaines fuites. Il a été aussi démontré que

l'accéléromètre (type de capteur de vibrations) n'était efficace que dans le cas des fuites sérieuses. Pour les fuites moins importantes, il faut utiliser des hydrophones.

Par ailleurs, on s'est rendu compte que les spécialistes ne pouvaient pas entendre les bruits émis par les fuites dans les tubes en plastique à l'aide d'écouteurs reliés aux corrélateurs de bruits de fuites. Selon la sagesse populaire, s'il n'y a pas de bruit, il n'y a pas de fuite. Les spécialistes ont donc été surpris de constater que les corrélateurs repéraient des fuites qu'eux ne pouvaient entendre. Il a été montré que les signaux produits par les fuites dans les tubes en plastique sont constitués principalement de sons de fréquence inférieure à 50 Hz. Or l'oreille humaine ne peut entendre ces bruits. Pour la même raison, les tiges d'auscultation et les aquaphones n'étaient efficaces que s'ils étaient raccordés à des points d'accès très proches (environ 5 m) des fuites. En pratique, ces résultats indiquent que pour détecter les fuites dans les tubes en plastique, il est possible qu'il faille ne compter que sur les corrélateurs.

On peut ausculter le sol à intervalles de, disons, 1 m ou moins à l'aide de microphones au sol, mais cette opération demande beaucoup de temps et est donc peu pratique.

L'étude de l'IRC a montré que certaines modifications pouvaient permettre aux corrélateurs de bruits de fuites de mieux repérer celles qui se produisent dans les tubes en plastique: révision des algorithmes en mode automatique, capteur à sensibilité plus élevée (en particulier accéléromètre), capacité de percevoir les basses fréquences, réglage fin des filtres passe-haut et passe-bas. Plusieurs modifications apportées aux techniques mises en œuvre peuvent aussi améliorer l'efficacité du matériel : utilisation des composantes basse fréquence des signaux produits par les fuites, mesure de la vitesse de propagation du son dans les tubes, vérification du bon fonctionnement des capteurs de fuite (particulièrement les hydrophones), et installation d'hydrophones ou d'accéléromètres sensibles à la vibration sur les bouches d'incendie sous pression.

**I -4 objectifs :** La simulation numérique est utilisée afin :

- ✓ D'examiner les concepts de base de la modélisation et la simulation numérique de la des ondes élastiques dans l'hydraulique transitoire.
- ✓ De définir les conditions d'utilisation d'un tel modèle.
- ✓ De bien comprendre le phénomène de propagation afin de mieux l'interpréter.
- ✓ Savoir le comportement du fluide en changeant le module de **Young** et en présence d'une fuite.
- ✓ D'obtenir de résultats bien précis sur l'évolution du phénomène transitoire en présence d'une fuite.
- ✓ D'en considérer l'exploitation surtout en matière de protection contre les effets néfastes des variations de pressions, surtout dans les systèmes hydrauliques (réseau de canalisations...).
- ✓ D'obtenir des conditions bien précises en ce qui concerne le dimensionnement des organes de protections (chambre d'équilibre, réservoir d'air, soupape de décharge, ...)
- ✓ De bien connaître les caractéristique du matériau a fin de mieux dimensionner les conduites forcées (leur épaisseur) qui constituent un organe important et coûteux dans les installations hydraulique.

### **I-5-Résumé :**

Les fuites sont habituellement la cause principale des pertes qui se produisent dans les réseaux de distribution d'eau. Pour réduire les pertes économiques et les risques pour la santé publique ainsi que pour économiser l'eau, les exploitants de réseaux de distribution d'eau vérifient régulièrement ceux-ci et procèdent à la détection des fuites. 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.

On détermine l'emplacement exact des fuites au moyen de matériel d'auscultation et d'appareils modernes de corrélation des bruits de fuites. Le matériel acoustique est efficace dans le cas des conduites métalliques, mais il peut être problématique dans le cas des tubes en plastique. Dans l'étude de l'IRC sur la détection des fuites, on a recommandé d'apporter des modifications en vue d'accroître l'efficacité des corrélateurs de bruits de fuites ainsi que d'améliorer le mode opératoire in situ, lorsqu'il s'agit de tubes en plastique. Les fuites dans les conduites en métal et dans les tubes en plastique peuvent aussi être repérées à l'aide de techniques non acoustiques comme celles du gaz traceur, de l'imagerie infrarouge et du géoradar. Cependant, l'utilisation de ces techniques est encore très limitée et leur efficacité n'est pas aussi bien établie que dans le cas des méthodes acoustiques

### **I-6- Conclusion :**

La simulation numérique consiste à reproduire par le calcul le fonctionnement d'un système préalablement décrit par un ensemble de modèles. Elle s'appuie sur des méthodes mathématiques et informatiques spécifiques.

Les principales étapes de la réalisation d'une étude par simulation numérique sont communes à de nombreux secteurs de la recherche et de l'industrie.

Comme pour notre cas la simulation numérique de la propagation des ondes élastiques nous permet de bien comprendre le phénomène dans ces moindres détails (son ampleur, son comportement vis-à-vis des conduites en charge, son influence sur les systèmes hydrauliques, etc.) et aussi de bien manipuler le phénomène en vérifiant plusieurs cas possibles rencontrés dans la pratique.

Grâce à ces simulations numériques, ainsi que les résultats obtenus nous donnerons une approximation réaliste de l'allure et de l'amplitude de ce phénomène très complexe qui cause un problème majeur dans le domaine de l'hydraulique transitoire et qui est de plus en plus d'actualité.

## **Chapitre II : Description Détaillée du Phénomène Transitoire**

## **II-1- Description des phénomènes physiques en jeu :**

### **II-1-1- État 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 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 frottements qui sont les responsables majeurs des pertes de charges, selon le régime d'écoulement [J.L.Robert. 2004].

### **II-1-2- Onde élastique 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 de la pression; 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'équilibres, de l'oscillation en masse.

### **II-1-3- 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 les énergies potentielles et cinétiques 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 nous 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-2- Description détaillée du phénomène transitoire :

### II-2-1- 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 aux forces de frottements. 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 trains d'ondes de pression (et de dépression) d'amplitudes importantes sont les suivantes :

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

Hormis les deux derniers cas, les autres opérations sont des actions délibérées qui peuvent être accomplies sans risque. Par contre, les pannes d'énergies ou opérations incontrôlées représentent des cas extrêmes qui doivent être pris en compte par des dispositifs supplémentaires adéquats.

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 pressions et des dépressions suivant leur sens de propagation et suivant les différents points considérés de la conduite

Les variations de pression qui s'ajoutent algébriquement à la pression normale qui règne peuvent en résulter des surpressions qui peuvent devenir dangereuses conduisant à la formation d'occlusions 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 frottements) et il se reproduit avec une période qui est égal à  $4L/C$  ou  $C$  désigne la célérité ou la vitesse de propagation de l'onde de pression dans la conduite de longueur  $L$ .

## II-2-2- Les sept 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 ( $k$ ).
- ✚ 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 ( $L$ ).

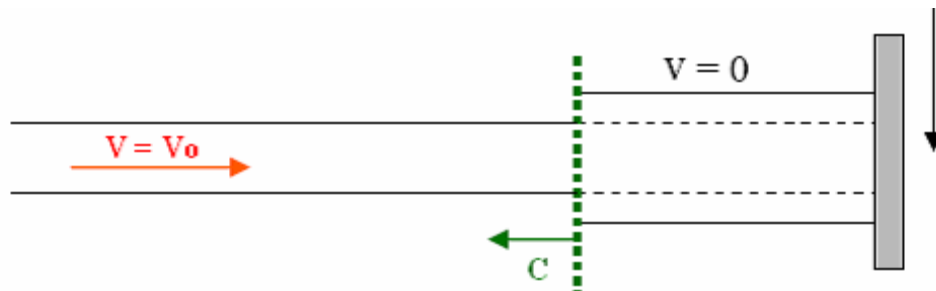
## II-2-3- Visualisation physique :

Analysons le cas général d'une fermeture instantanée d'une vanne aval à l'instant  $t_0 = 0$ . La propagation du coup de bélier ainsi générée se subdivise en quatre phases [B. Greiveldinger, 2004] fig. (2-1) :

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

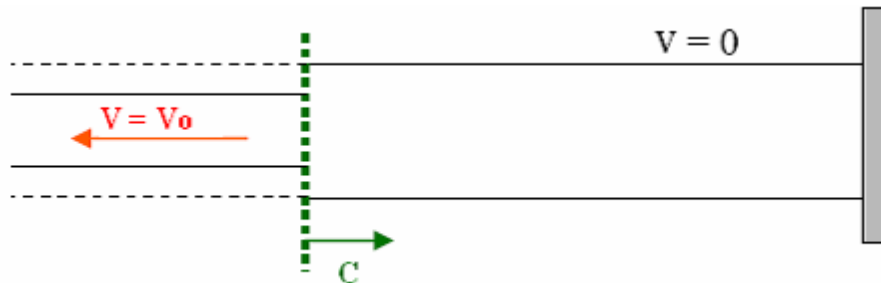
### Phase 1 : $0 < t < t_{ca}$ :

Remontée d'une onde de surpression à partir de la vanne.



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

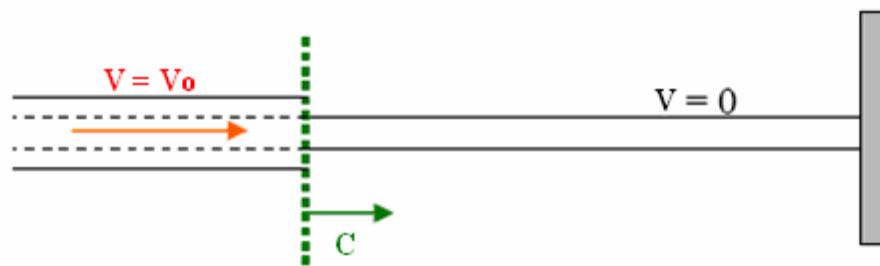
Descente de l'onde après réflexion totale au réservoir, qui joue le rôle d'un nœud de pression ; le diamètre de la conduite reprend sa valeur initiale.

**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 aval, qui représente un nœud de débit. La conduite se contracte.

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

Redescente de l'onde de dépression. La conduite reprend sa forme initiale.

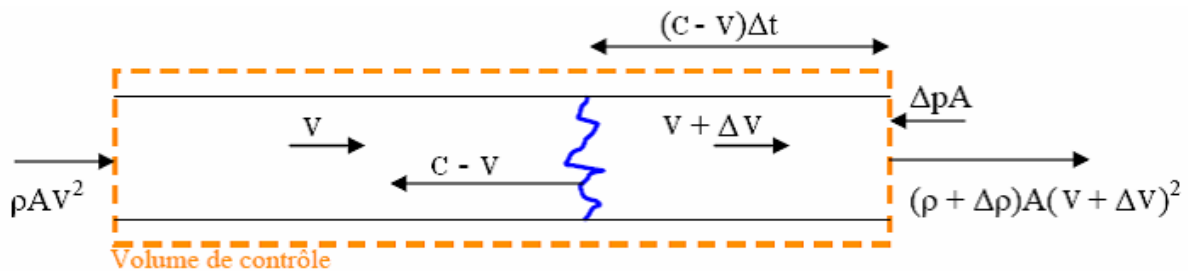


**Figure II-1 :** Les 4 phases du coup de bélier dans une conduite hydraulique.



### II-2-4- Modélisation du coup de bélier pour une conduite à section constante :

Considérons un tronçon de conduite comme volume de contrôle. Pour simplifier, la variation de la section de conduite est négligée. En remontant la conduite suite à une fermeture complète et instantanée de la vanne aval, l'onde de choc modifie la densité de l'eau  $\rho$ , ainsi que la vitesse de l'écoulement ( $\Delta V = -V$  pour une fermeture complète).



**Figure II-2 :** Schéma simplifié d'une onde de pression remontant une conduite.

a) D'après la **fig. (II-2)**, l'équation de continuité peut s'écrire :

$$\rho AV - (\rho + \Delta\rho)(V + \Delta V) = A(C - V)\Delta t[(\rho + \Delta\rho) - \rho]/\Delta t \quad (2-1)$$

Le second membre exprime le gain en masse résultant du changement de la densité, donc de la compression de l'eau.

#### Remarque :

Théoriquement on peut considérer les liquides comme incompressibles quand les variations de pression mise en jeu sont faibles devant les pressions absolues. Toute fois les milieux réels présentent une certaine compressibilité d'ont il faut tenir compte s'il se produit de rapides variations de pressions (même très petites). Car se sont les phénomènes de compressibilité qui permettent d'expliquer la propagation des ondes élastiques dans les milieux matériels.

$$-\Delta p A = A(C - V)[(\rho + \Delta\rho)(V + \Delta V) - \rho C] + A(\rho + \Delta\rho)(V + \Delta V)^2 - A\rho V^2 \quad (2-2)$$

b) L'équation de la conservation de la quantité de mouvement s'exprime par :

$$\Delta P = C\rho\Delta V \quad (2-3)$$

Ceci montre que, pour une fermeture complète, l'amplitude du coup de bélier est directement proportionnelle à la vitesse initiale de l'écoulement dans la conduite. Cette vitesse dépend principalement du débit et de la section de la conduite, donc des conditions d'exploitations, ainsi que des dimensions de l'installation.

De plus, l'équation montre que la surpression est d'autant plus importante que la vitesse de l'onde est élevée ;  $\Delta p$  serait donc infiniment grand pour un écoulement parfaitement incompressible et des conduites rigides.

#### II-2-5- Influence d'une fermeture non instantanée :

Afin de réduire la surpression maximale à la vanne, le temps de fermeture de celle-ci doit être judicieusement ajusté. Pour une fermeture instantanée, les 4 phases décrites au paragraphe précédent se résument à l'évolution de la hauteur piézométrique

Il ressort qu'on peut faire place à une évolution linéaire, la valeur maximum de  $\Delta H$  est inchangée par rapport à une fermeture instantanée. La sollicitation mécanique maximale de la conduite n'a donc pas pu être diminuée. Afin de baisser la valeur de  $\Delta H_{\max}$  par rapport à celle d'une fermeture instantanée, le temps de fermeture  $t_{\text{ferm}}$  doit être plus long que le temps critique  $t_{\text{cr}}$ , défini par :

Si les figures montrées dans ce paragraphe ne représentent que des allures qualitatives, elles permettent toutefois de comprendre l'influence des lois de fermetures et de se rendre attentif aux temps de fermetures importants qui peuvent résulter des contraintes mécaniques sévères [B. Greiveldinger. 2004].

#### Remarque :

D'après la théorie de **Joukowski-Allievi** une surpression instantanée produite au voisinage du distributeur (vanne) se propage sans affaiblissement jusqu'à la chambre d'eau (réservoir) avec une vitesse  $C$  ; elle s'y réfléchit et revient changé de signe au distributeur (vanne).

Les coups de béliers produits par des fermetures instantanées se propagent donc intégralement tout le long de la conduite. Mais les fermetures ne sont jamais instantanées ; elles ont en réalité toujours une certaine durée. Dès lors le coup de bélier en un point de la conduite résulte de la composition de l'onde qui vient du distributeur (vanne) et de l'onde qui revient changé de signe de la chambre d'eau (réservoir).

## II-2-6- Les vannes :

Une vanne est un dispositif qui sert avant tout à arrêter le débit. Pour contrôler le débit d'un fluide on utilise surtout un robinet à soupape. Le robinet à vanne est une barrière à l'écoulement d'un solide pulvérulent s'écoulant comme un fluide, dans une conduite fermée ou dans un ouvrage ou appareil à écoulement libre, tels qu'un canal d'irrigation ou silo.

### Différentes sortes de vannes :

On peut ranger les vannes dans différentes catégories :

- par la taille : depuis le simple robinet jusqu'à la vanne de régulation du débit d'arrivé de l'eau dans une centrale hydroélectrique.
- par la fonction : vanne régulatrice de débit, vanne de purge, vanne d'arrêt...
- par le principe employé : vanne papillon, vanne a opercule, vanne à boisseau, vanne Trois voies...
- par le système de commande : manuelle, électrovanne, hydraulique...

## II-2-7- 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 à travers le système avec une vitesse finie due à la compressibilité du fluide et de l'élasticité des conduites.

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

## II-2-8- Classification des écoulements in stationnaires ou des phénomènes transitoires :

### A- Oscillation en masse ou montée subite :

Ce terme se réfère à des situations d'écoulements in-stationnaires où le changement initial du mouvement du fluide est lisse et où le temps pour que les conditions importantes imposées changent est lent comparé avec le temps mis par une onde de pression pour passer a travers la colonne de fluide.

Dans les stations de pompages cette situation peut être provoquée par exemple par l'installation des chambres à air (pour protéger la ligne de charge) ou des réservoirs de montée subite (pour protéger la conduite d'aspiration). Dans ces systèmes les effets élastiques sont petits comparés aux effets d'inertie de la colonne liquide. Un changement du mouvement régulier du fluide causera des oscillations de masse avec un long temps d'oscillation. Le comportement de la colonne liquide dans un système de montée subite

peut être évalué en utilisant la théorie de la colonne rigide (théorie d'écoulement incompressible).

La théorie de la colonne rigide considère que toute la colonne du fluide en s'accélération ou en ralentissant à la même valeur dans toute sa longueur et se comporte comme un solide incompressible et considère le système de conduites comme non élastique.

## **B- Coup de bélier ou écoulement transitoire :**

Ce terme se réfère à des situations d'écoulements transitoires où le changement du mouvement du fluide est comparativement rapide et le temps pour que les conditions imposées changent est court comparé avec le temps mis par une onde de pression pour passer à travers la colonne de fluide. Le comportement de la pression transitoire est régi par l'inertie du mouvement de l'eau et l'élasticité combinée de l'eau et du système de conduites. En général ces deux paramètres qui sont l'inertie et l'élasticité sont pris en compte, c'est la théorie de l'écoulement compressible.

### **II-2-9- Méthode de contrôle de la pression transitoire : Classification des méthodes préventives :**

Les changements soudains de l'écoulement dans un système de conduites mèneront toujours aux variations transitoires de la pression. Pour les restituer dans des limites tolérables plusieurs méthodes de contrôle des phénomènes transitoires sont disponibles. D'un point de vue analytique les méthodes suivantes peuvent être distinguées [J. Schubert. 2002] :

#### **A- Méthode de réduction de la vitesse de l'onde :**

Par exemple en purgeant l'air dans le fluide. Cette méthode n'est pas employée dans des systèmes d'approvisionnement en eau comme mesure de protection contre la pression transitoire. Seulement une forme diverse est connue qui est de purger l'air pour réduire la sévérité de la cavitation dans des pompes.

#### **B- Réduction du taux de changement d'écoulement :**

Par exemple par une fermeture plus lente de la vanne (taux de fermeture) augmentation de l'inertie de la pompe.

#### **C- Méthode de limitation de la pression :**

Par exemple par des réservoirs de montée subite (des anti-béliers), des chambres d'air (réservoir d'air).

#### **D- D'autres méthodes :**

Par exemple valves d'admission d'air, soupapes de décharge, by-pass.

Le choix final des dispositifs de contrôle de pression se fait normalement après une considération de la fiabilité, des inconvénients, de la quantité d'entretien exigée et du coût.

## **Chapitre III : Les Equations De Base De La Propagation Des Ondes Dans Les Conduites**

### III-1 Développements des équations hydrauliques fondamentales :

#### III-1-1 Définition :

Il est bien connu que les équations de **Navier-Stokes** permettent la description cinématique et dynamique des fluides monophasiques visqueux, donc aussi de l'eau engagée dans des éléments d'installations hydrauliques. Cependant, au lieu d'utiliser les formes classiques localisées des équations de Navier-Stokes on établira les équations de base de **Saint-Venant** en faisant les bilans de la masse et des forces exercées sur un élément de fluide engagé dans un tronçon de conduite de section variable. Tout comme les équations de **Navier-Stokes** ces équations hydrauliques reposeront sur :

- La théorie de la conservation de la masse.
- Le principe de la conservation de la quantité de mouvement.
- Précisons que, 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 de la souplesse des conduites ; en effet, ce sont ces deux propriétés qui sont à l'origine des ondes de chocs dans les conduites, appelées coups de bélier [**B. Greiveldinger. 2004**].
- Le principe de la conservation de la quantité de mouvement.

#### III-1-2 Formulation générale :

Les équations du mouvement d'un fluide dans une conduite sont déduites à partir des équations de conservation :

- ✚ De la Masse
- ✚ De la quantité de mouvement
- ✚ De l'énergie.
- ✚ Et celle du comportement mécanique et thermodynamique du fluide et du matériau de la paroi de la conduite.

#### A) Equation de conservation de la masse (ou équation de continuité) :

L'équation de continuité doit traduire le principe de conservation de la masse.

L'augmentation de masse pendant un certain temps du fluide contenu dans un volume donné doit être égale à la somme des masses de fluide qui y entrent, diminuée de celle qui en sortent.

La forme différentielle de l'équation de continuité est la suivante :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{V}) = 0$$

Tel que :

$\vec{V}$  : est le vecteur de vitesse.

$\rho$  : la masse volumique .

### B) Equation de conservation de la quantité de mouvement :

On considère une masse déterminée de fluide occupant au temps  $\ll t \gg$  un volume  $\ll V \gg$ .

La variation de la quantité de mouvement par unité de temps contenant cette masse est :

$$\frac{d(\rho \vec{V})}{dt} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{V} \cdot \vec{V}) = -\vec{\nabla} p + \vec{\nabla} \cdot \vec{\tau} + \rho \vec{F} \quad (\text{III-1})$$

Tel que :

$\vec{V}$  : est vitesse moyenne. (III-1)

$V$  : est le volume de contrôle.

Ou :

$\vec{F}$  : Est la résultante des forces a distance qui s'exerce sur l'élément de volume  $dv$ .

$\vec{\tau}$  : Représente la force par unité de surface.

Sous une autre forme, on peut écrire :

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

Tel que :

$\rho \frac{d\vec{V}}{dt}$  : Représente la force d'inertie de volume.

$\rho \vec{F}$  : Représente la force de pression.

$\overrightarrow{\text{grad}P}$  : Représente la force de pression.

$\vec{f}_v$  : Représente la force de viscosité.

### c) Equation de conservation de l'énergie :

Pour un système matériel quelconque une transformation entre états d'équilibre, la variation de la somme de l'énergie interne  $E$  et de l'énergie cinétique  $K$  est égale au travail  $\Delta W$  et de la chaleur  $\Delta Q$ .

$$\Delta(E + K) = \Delta W + \Delta Q. \quad (\text{III-3})$$

**D) Loi de comportement mécanique :**

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

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

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

$$\begin{cases} \bar{\sigma} = (\bar{\varepsilon}) \\ \bar{\sigma} = \bar{\tau} - P\bar{I} \\ \bar{\tau} = \lambda(\text{div}V)\bar{I} + 2\mu\bar{\varepsilon} \end{cases} \quad (\text{III-4})$$

Tel que :

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

$\bar{\varepsilon}$  : Le tenseur des taux de déformation.

$\lambda$  et  $\mu$  : Sont les coefficients de viscosité

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

L'équation (III-) sera :

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

**E) Loi de comportement thermodynamique :**

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

Dans ces conditions le fluide a un comportement pratiquement barotrope, c'est-à-dire la masse volumique dépend essentiellement de la pression.

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

Te que :

$\chi$  : Le coefficient de compressibilité.

$V$  : Le volume occupé par unité de masse.

En vertu de la relation qui lie  $\langle\langle\rho\rangle\rangle$  et  $\langle\langle V\rangle\rangle$  on peut déduire :

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



Le module d'élasticité du fluide  $K$  est l'inverse du coefficient de compressibilité  $\chi$  du fluide, dont on peut écrire :

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

$\chi = \frac{1}{K}$  : Coefficient de compressibilité isotherme.

Tel que :

$K$  : Le module d'élasticité du fluide.

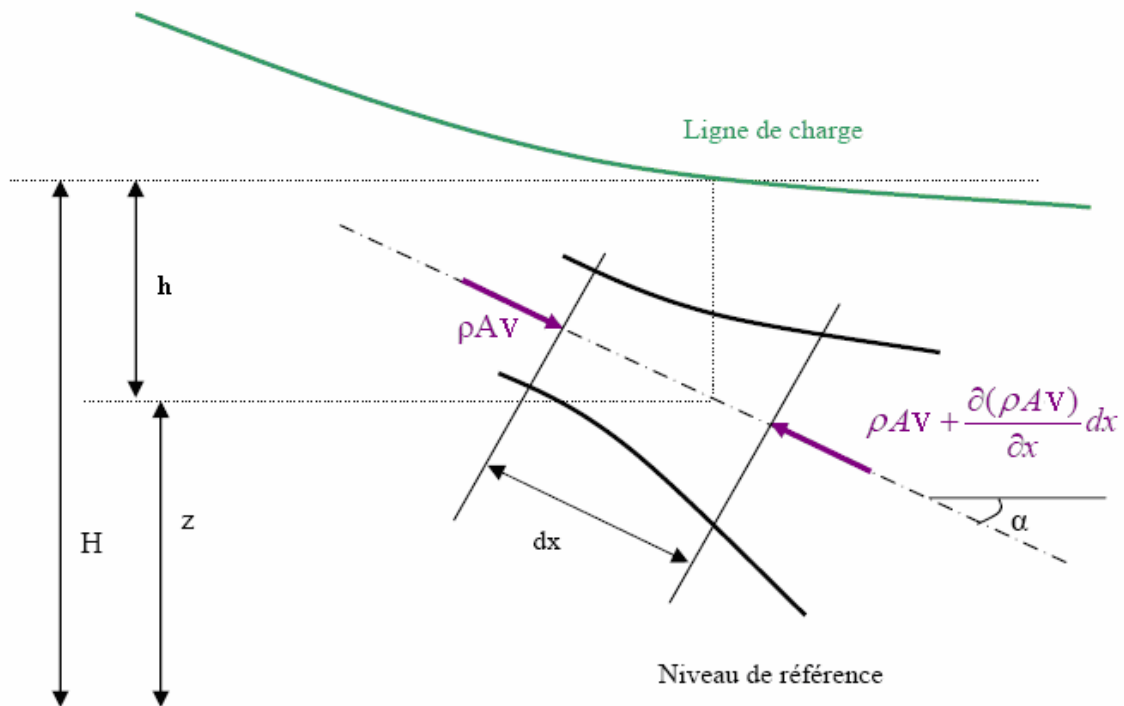
### **Hypothèses :**

Dans le cas particulier des écoulements en conduite, les équations précédentes se simplifient en tenant compte de certaines hypothèses :

- La conduite étudiée est considérée monodimensionnelle (écoulement unidimensionnel), ce qui est justifiée si les grandeurs qui caractérisent l'écoulement sont constantes dans une section donnée.
- La viscosité de l'eau est constante.
- On considère également que l'écoulement est parallèle à l'axe de la conduite (l'axisymétrie du problème).
- On suppose que la pression  $p$  du fluide ainsi que le diamètre  $D$  de la conduite augmentent selon l'axe  $x$ . [Y. Vaillant. 2005].
- Le fluide est légèrement compressible.
- L'échange de chaleur avec le milieu extérieur est nul (conduite isotherme).
- La conduite est supposée cylindrique circulaire, rectiligne et assimilée à une juxtaposition d'anneaux indépendants.

### **III-1-2- Equation de conservation de la masse ou équation de continuité :**

En considérant un volume de fluide et en se référant à la **figure (III-1)**, on peut dire que la continuité s'exprime par l'égalité de la différence des masses entrantes et sortantes, et de la variation dans le volume de contrôle :



**Figure III-1** : Bilan de masse dans un tronçon de conduite.

$$\frac{\partial(\rho A dx)}{\partial t} = \rho AV - \left( \rho AV + \frac{\partial(\rho AV)}{\partial x} dx \right) \quad (\text{III-9})$$

Supposant que l'élément de la conduite ne subisse pas de variation de longueur ( $dx/dt = 0$ ), (III.9) peut s'écrire :

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

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

$$\frac{1}{V\rho} \left( V \frac{\partial\rho}{\partial x} + \frac{\partial\rho}{\partial t} \right) + \frac{1}{AV} \left( V \frac{\partial A}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{1}{V} \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (\text{III-11})$$

Et comme :

$$\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dt} = \frac{1}{\rho} \left( V \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\partial \rho}{\partial t} \right) \text{ et } \frac{1}{A} \frac{dA}{dt} = \frac{1}{A} \left( V \frac{\partial A}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} \right) \quad (\text{III-12})$$

L'expression (III.11) se simplifie pour donner :

$$\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dt} + \frac{1}{A} \frac{dA}{dt} + \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (\text{III-13})$$

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

Le terme  $\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dt}$  prend en compte la compressibilité du fluide.

Et  $\frac{1}{A} \frac{dA}{dt}$  l'élasticité transversale de la conduite.

On suppose que la conduite est construite avec des joints de dilatations ce qui permet une déformation longitudinale libre. Mathématiquement cette contrainte longitudinale s'écrit :  $\rho = 0$  Si on suppose que les déformations sont petites et proportionnelles aux contraintes, on peut écrire selon la **loi de Hooke** :

-On a :  $\rho = f(A, P)$  mais comme on suppose que les phénomènes thermiques liés à la dissipation mécanique ou aux échanges avec l'extérieur ( $A = \text{Cte}$ ) sont négligeables et que l'eau étant un fluide barotrope, on considère

La définition suivante de son module d'élasticité :  $E_{eau}$

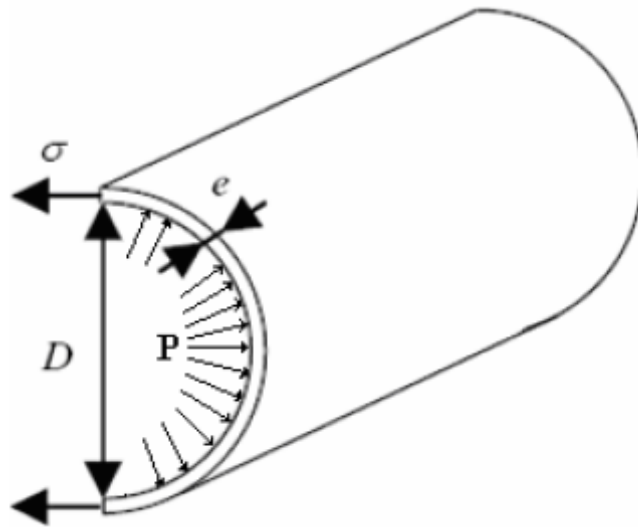
$$dP = E_{eau} \frac{d\rho}{\rho} \quad (\text{III-14})$$

Selon la théorie de résistance des matériaux, la contrainte latérale pour une conduite hydraulique circulaire (considéré élastique et qui se déforme comme si elle était constituée d'anneaux indépendants, et que son épaisseur est relativement faible pour admettre que la

contrainte est uniforme sur l'épaisseur comme le montre la **figure (III-2)** est l'équation de comportement suivante :

$$\sigma = \frac{PD}{2e} \quad (\text{III-15})$$

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



**Figure III-2** : Contrainte latérale dans une conduite a paroi mince.

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

$$d\varepsilon = \frac{dR}{R} \quad (\text{III-16})$$

$R$  étant le rayon hydraulique de la conduite.

Et en introduisant le module d'élasticité constant  $E_c$  du matériau, défini par :

$$\sigma = E_c \varepsilon \quad (\text{III-17})$$

Cette contrainte mécanique latérale s'explique comme :

$$d\sigma = E_c \frac{dR}{R} \quad (\text{III-18})$$

En combinant les expressions (III-15) et (III-18), sachant que  $dA = 2\pi R dR$  et faisant l'hypothèse que l'épaisseur ( $e$ ) de la paroi est constante pendant le processus de déformation de la conduite, on aboutit à :

$$\frac{1}{A} \frac{dA}{dt} = \frac{D}{eE_c} \frac{dP}{dt} \quad (\text{III-19})$$

Ainsi, en combinant les équations (III-13), (III-14) et (III-19), on obtient l'expression suivante de l'équation de continuité :

$$\rho c^2 \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{dP}{dt} = 0 \quad (\text{III-20})$$

Et comme la pression est fonction uniquement de  $\mathbf{x}$  de  $\mathbf{t}$ , on trouve :

$$\rho c^2 \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial P}{\partial t} = 0 \quad (\text{III-21})$$

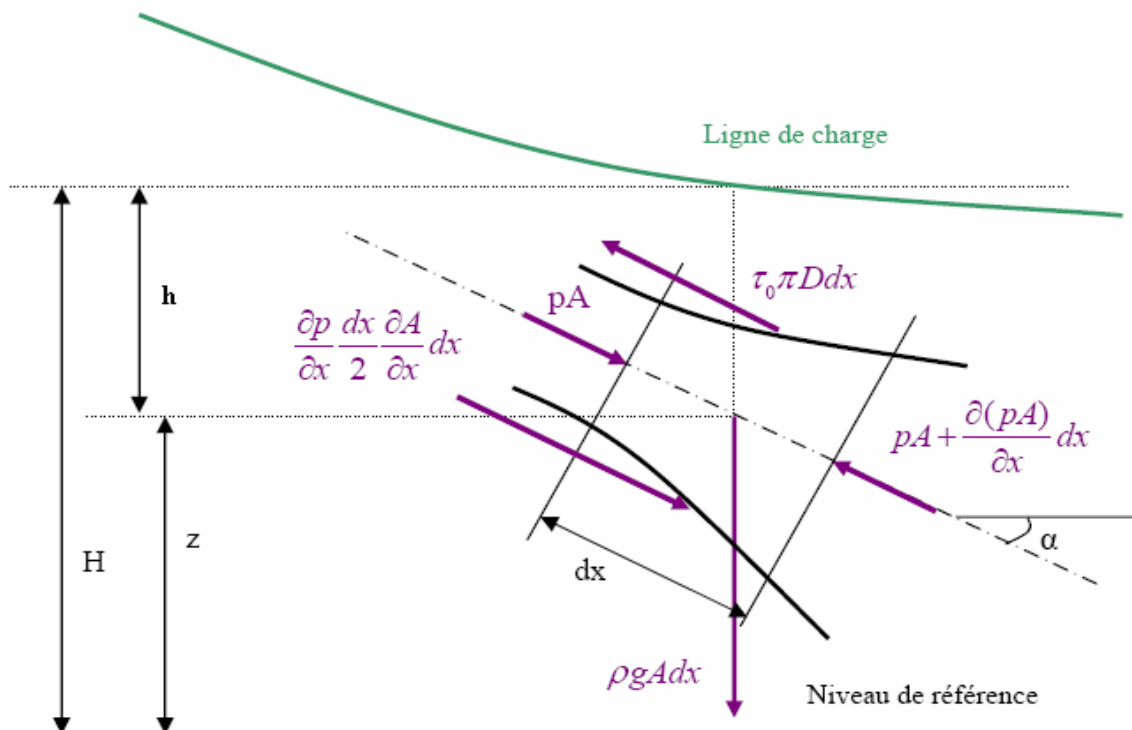
C est la vitesse de propagation de l'onde de pression, définie par **Lorenzo Allievi** comme étant égal a :

$$c = \sqrt{\frac{1}{\rho \left( \frac{1}{E_{eau}} + \frac{D}{eE_c} \right)}} \quad (III-22)$$

### II-1-3- Equation de quantité de mouvement ou équation dynamique :

#### Hypothèse :

Les hypothèses admises dans ce cas sont les mêmes qu'au point précédent à l'exception de la 3eme hypothèse, Fig. (III-3) :



**Figure III-3** : Bilan des forces exercées sur un tronçon de conduite.

Les forces prises en compte dans le bilan de quantité de mouvement sont :

- Les forces d'inertie.
- Les forces de pressions.
- Les forces de frottements visqueuses (Fr).
- La force de pesanteur

L'équation fondamentale de la dynamique s'écrit alors :

$$\underbrace{\rho A - PA + \frac{\partial(PA)}{\partial x} dx + \left( \rho + \frac{\partial P}{\partial x} \frac{dx}{2} \right) \frac{\partial A}{\partial x} dx}_{\text{Forces de pression normales et latérales}} - \underbrace{\tau_0 \pi D dx}_{\text{Force de frottement}} - \underbrace{g \rho A dx \sin \alpha}_{\text{force de gravité}} = \rho A dx dV dt \quad (\text{III-23})$$

Avec:

$\tau_0$  : Contrainte visqueuse [ $\text{N/m}^2$ ].

$\alpha$  : angle de la conduite.

$D$  : Diamètre de la conduite [m].

$A$  : Aire de section [ $\text{m}^2$ ]

$\rho$  : Masse volumique du fluide [ $\text{kg/m}^3$ ].

$V$  : Vitesse du fluide [m/s].

En négligeant les termes de second ordre, on obtient immédiatement :

$$\frac{\partial P}{\partial x} A + \tau_0 \pi D + \rho g A \sin(\alpha) + \rho A \frac{dV}{dt} = 0 \quad (\text{III.24})$$

Dans notre cas la conduite est horizontale on peut écrire :

$$\rho g A \sin(\alpha) = 0$$

Donc on aura :

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

- Les variables  $P, V, \rho$  dépendent uniquement des paramètres indépendants  $x$  et  $t$ .
- Exprimons les différentielles exactes des deux dernières équations sous la forme suivante :

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial x} = \frac{\rho}{K} \frac{\partial P}{\partial x} \\ \frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{\rho}{K} \frac{\partial P}{\partial t} \end{cases} \quad (\text{III-26})$$

$$\begin{cases} \frac{\partial A}{\partial t} = \frac{AD}{E.e} \frac{\partial P}{\partial t} \\ \frac{\partial A}{\partial x} = \frac{AD}{E.e} \frac{\partial P}{\partial x} \end{cases} \quad (\text{III-27})$$

L'équation de la masse (III-23) développée comme suit :

$$\rho \frac{\partial A}{\partial t} + A \frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho V \frac{\partial A}{\partial x} + \rho A \frac{\partial V}{\partial x} + AV \frac{\partial \rho}{\partial x} = 0 \quad (\text{III-28})$$

En substituant l'équation (3-18) et (3-19) dans (3-20) on aura :

$$\rho \left( \frac{AD}{E.e} \frac{\partial \rho}{\partial t} \right) + A \left( \frac{\rho}{K} \frac{\partial P}{\partial t} \right) + \rho V \left( \frac{AD}{E.e} \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \rho A \frac{\partial V}{\partial x} + AV \left( \frac{\rho}{K} \frac{\partial P}{\partial x} \right) = 0$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} \left( \rho \frac{AD}{E.e} + \frac{A\rho}{K} \right) + \frac{\partial P}{\partial x} V \left( \rho \frac{AD}{E.e} + \frac{A\rho}{K} \right) + \rho A \frac{\partial V}{\partial x} = 0$$



$$\rho \left( \frac{1}{K} + \frac{D}{Ee} \right) \frac{\partial P}{\partial x} + \rho V \frac{\partial P}{\partial x} \left( \frac{1}{K} + \frac{D}{Ee} \right) + \rho \frac{\partial V}{\partial x} = 0$$

$$\rho \left( \frac{1}{K} + \frac{D}{Ee} \right) \left( \frac{\partial P}{\partial t} + V \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \rho \frac{\partial V}{\partial x} = 0$$

En divisant par  $\rho \left( \frac{1}{K} + \frac{D}{Ee} \right)$  on obtient :

$$\frac{\partial P}{\partial t} + V \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\rho}{\rho \left( \frac{1}{K} + \frac{D}{Ee} \right)} \frac{\partial V}{\partial x} = 0$$

$$\text{Avec : } a^2 = \frac{1}{\rho \left( \frac{1}{K} + \frac{D}{Ee} \right)}$$

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

Avec :

$a$  : Célérité de l'onde de pression (ou onde élastique en m/s).

$\rho$  : La masse volumique de l'eau (1000 Kg/m<sup>3</sup>).

$E_{eau}$  : Module d'élasticité du liquide ou compressibilité de l'eau (2070 MPa).

$D$  : Diamètre intérieur de la conduite (m).

$e$  : Epaisseur de la paroi (m).

$E_c$  : Module d'élasticité du matériau constituant la conduite (MPa).

**Remarque :**

Les deux facteurs essentiels qui interviennent dans la vitesse de propagation de l'onde de pression sont surtout la compressibilité de l'eau  $K_{eau}$  et l'élasticité du matériau constituant la conduite  $E_c$ .

Dans notre cas la vitesse du fluide est petite par rapport à la vitesse de propagation de l'onde donc on peut négliger le terme convectif.

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \rho a^2 \frac{\partial V}{\partial X} = 0 \quad (\text{III-29})$$

### III-3-4 forme réduite du système des équations de base :

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

$$\begin{cases} \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a^2}{g} \frac{\partial V}{\partial X} = 0 \\ \frac{\partial V}{\partial t} + g \frac{\partial H}{\partial X} + \frac{4\tau_0}{\rho D} = 0 \end{cases} \quad (\text{III-30})$$

Avec :

H : la hauteur de pression.

G : l'accélération de la pesanteur.

Le système d'équation (III-30) est un système d'équation différentielle aux dérivées partielles du type hyperbolique.

#### Condition aux limites :

Dans notre installation, nous avons un réservoir relié à une conduite droite, à l'extrémité de cette conduite nous avons une vanne à fermeture rapide.

#### Conditions aux extrémités :

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

#### ✚ Condition au niveau de l'orifice d e la fuite :

Au niveau de ce point de la conduite (orifice de fuite), un débit de fuite est imposé  $Q_f$ .

#### IV-4-1 Modélisation du terme de frottement :

Le flux instationnaire dans les tuyaux de liquide est souvent représenté par deux hyperbolique 1D équations aux dérivées partielles. La dynamique et la continuité équations sont :

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{2}{R} \tau = 0 \quad (\text{III-31})$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \rho c^2 \frac{\partial v}{\partial x} = 0 \quad (\text{III-32})$$

Dans le flux instationnaire instable dans un tuyau, la contrainte pariétale instantanée? Mai être considérée comme la somme de deux composantes :

$$\tau = \frac{\rho \cdot v \cdot |v|}{8} \lambda + \frac{2\mu}{R} \int_0^t \omega(t-u) \frac{\partial v}{\partial t}(u) du \quad (\text{III-33})$$

Pour la première fois **Zielke** a donné un développement mathématique de la fonction poids  $W(t)$

$$\omega(\hat{t}) = \sum_{i=1}^6 m_i \hat{t}^{(i-2)/2} \text{ for } \hat{t} \leq 0.02 \quad (\text{III-34})$$

$$\omega(\hat{t}) = \sum_{i=1}^5 e^{-n_i \cdot \hat{t}} \text{ for } \hat{t} > 0.02 \quad (\text{III-35})$$

Après une recherche a été fait par **Trikha** pour éviter le stockage de toutes les valeurs antérieures de la vitesse : gain sur le temps de calcul et l'autre sur l'espace mémoire .

$$\tau_u \approx \frac{2\mu}{R} \sum_{i=1}^n y_i(t + \Delta t) \quad (\text{III-36})$$

## CHAPITRE IV : Méthode De Résolution

## IV-INTRODUCTION :

Parmi les différentes méthodes de résolution du système d'équation différentielles aux dérivées partielles de type hyperbolique, nous avons utilisé la méthode des caractéristiques avec les différences finies.

### IV-2 Modélisation mathématique de H et V le long de la conduite :

#### A-Recherche des caractéristiques :

Le système d'équations (III-22) est un system d'équation différentielles aux dérivées partielle du type **hyperbolique** dont les directions caractéristiques peuvent êtres obtenues en considérant des fonctions **H** et **V** le long des courbes du plan **x, t** ou ces dérivés sont indéterminées

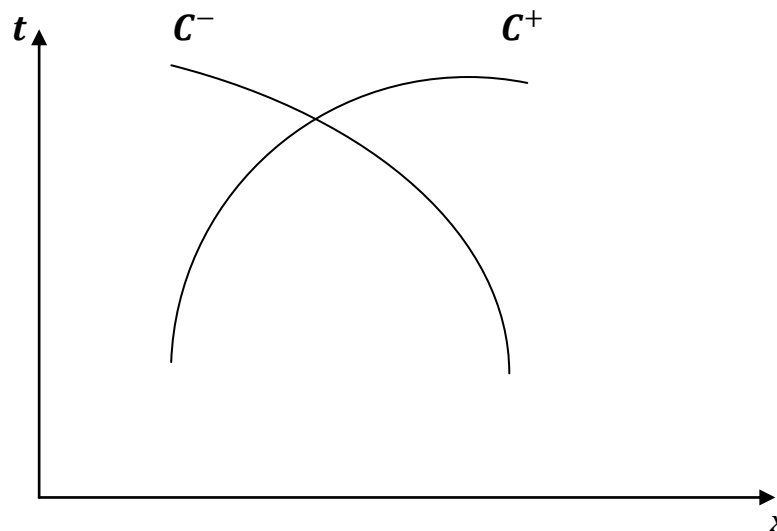


Figure IV-1 : Courbes caractéristiques

Le système d'équations différentielles aux dérivées partielles du type hyperbolique :

(III-22) peut s'écrire :

$$\begin{cases} \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial V}{\partial t} + g \frac{\partial H}{\partial x} = A \end{cases} \quad (\text{IV-1})$$

Ici le terme de frottement  $A = - \frac{4\tau_0}{\rho D}$

On rajoute les différences totales de H et V :

$$\begin{cases} dH = \frac{\partial H}{\partial x} dx + \frac{\partial H}{\partial t} dt \\ dV = \frac{\partial V}{\partial x} dx + \frac{\partial V}{\partial t} dt \end{cases} \quad (\text{IV-2})$$

Le système d'équations devient :

$$\begin{cases} \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial V}{\partial t} + g \frac{\partial H}{\partial x} = A \\ \frac{\partial H}{\partial t} dt + \frac{\partial H}{\partial x} dx = dH \\ \frac{\partial V}{\partial t} dt + \frac{\partial V}{\partial x} dx = dV \end{cases} \quad (\text{IV-3})$$

On peut aussi arranger ce système sous la forme :

$$\begin{cases} 1. \frac{\partial H}{\partial t} + 0. \frac{\partial H}{\partial x} + 0. \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{a^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \\ 0. \frac{\partial H}{\partial t} + g \frac{\partial H}{\partial x} + 1. \frac{\partial V}{\partial t} + 0. \frac{\partial V}{\partial x} = A \\ \frac{\partial H}{\partial t} dt + \frac{\partial H}{\partial x} dx + 0. \frac{\partial V}{\partial t} dt + 0. \frac{\partial V}{\partial x} dx = dH \\ 0. \frac{\partial H}{\partial t} + 0. \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial t} dt + \frac{\partial V}{\partial x} dx = dV \end{cases} \quad (\text{IV-4})$$

En écrivant le système (IV-4) sous la forme matricielle  $(M \cdot X = B)$  on aura :

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \frac{a^2}{g} \\ 0 & g & 1 & 0 \\ dt & dx & 0 & 0 \\ 0 & 0 & dt & dx \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dH/dt \\ dH/dx \\ dV/dt \\ dV/dx \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ A \\ dH \\ dV \end{bmatrix} \quad (\text{IV-5})$$

On a  $\Delta$  ;  $\Delta P_t$  ;  $\Delta P_x$  ;  $\Delta V_t$  ;  $\Delta V_x$

Calcul du déterminant,  $\Delta$ , de la matrice  $M$ :

$$\Delta = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \frac{a^2}{g} \\ 0 & g & 1 & 0 \\ dt & dx & 0 & 0 \\ 0 & 0 & dt & dx \end{bmatrix} \quad (\text{VI-6})$$

$$\Delta = 1 \begin{bmatrix} g & 1 & 0 \\ dx & 0 & 0 \\ 0 & dt & dx \end{bmatrix} - 0 + 0 - \frac{a^2}{g} \begin{bmatrix} 0 & g & 1 \\ dt & dx & 0 \\ 0 & 0 & dt \end{bmatrix}$$

$$\Delta = -(dx^2 - 0) + a^2(dt^2 - 0)$$

$$\Delta = a^2 dt^2 - dx^2$$

$$\Delta = 0 \Leftrightarrow a^2 dt^2 - dx^2 = 0 \Rightarrow a^2 = \frac{dx^2}{dt^2}$$

$$\Rightarrow dx = \pm a dt$$

$$\begin{cases} dx = +a dt & \dots \dots \dots C^+ \\ dx = -a dt & \dots \dots \dots C^- \end{cases} \quad (\text{IV-7})$$

$C^+$  et  $C^-$  Représentent les droites caractéristiques du système d'équations.

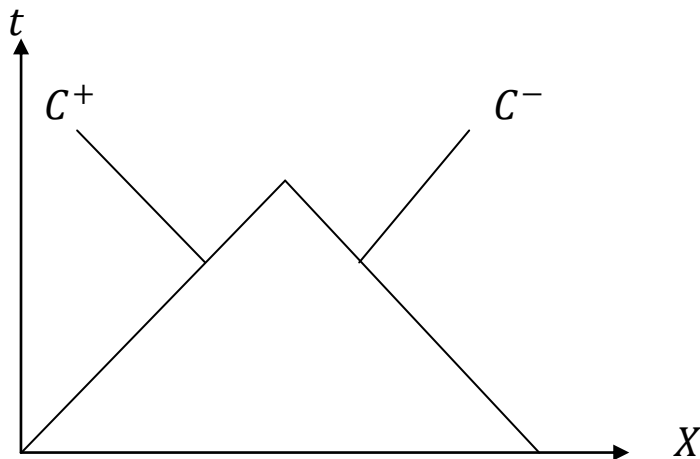


Figure IV-2 : Droites caractéristiques dans le plan(x,t).

### B- Recherche de la relation de compatibilité :

$$\Delta H_t = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \frac{a^2}{g} \\ A & g & 1 & 0 \\ dH & dx & 0 & 0 \\ dV & 0 & dt & dx \end{bmatrix} \quad (\text{IV-8})$$

$$\Delta H_t = 0 \begin{bmatrix} g & 1 & 0 \\ dx & 0 & 0 \\ 0 & 0 & dx \end{bmatrix} + 0 + 0 - \frac{a^2}{g} \begin{bmatrix} A & g & 1 \\ dH & dx & 0 \\ dV & 0 & dt \end{bmatrix}$$

$$\Delta H_t = \frac{-a^2}{g} [A(dxdt - 0) - g(dHdt) + gdV \cdot 0 + dH \cdot 0 - dxdV]$$

$$\Delta H_t = \frac{-a^2}{g} [Adxdt - gdHdt - dxdV]$$

$$\Delta H_t = 0$$



$$\Leftrightarrow Adxdt - gdHdt - dx dV = 0$$

$$Adx - gdH - \frac{dx}{dt} dV = 0 \quad (\text{IV-9})$$

Avec :  $\begin{cases} dx = +adt \dots\dots\dots C^+ \\ dx = -adt \dots\dots\dots C^- \end{cases}$

Donc l'équation (IV-9) devient :

$$\begin{cases} Adt - \frac{g}{a} dH - dV = 0 \dots\dots\dots C^+ \\ Adt + \frac{g}{a} dH - dV = 0 \dots\dots\dots C^- \end{cases} \quad (\text{IV-10})$$

### IV-3 Calcul de la hauteur de pression $H$ et de la vitesse $V$ aux points courants :

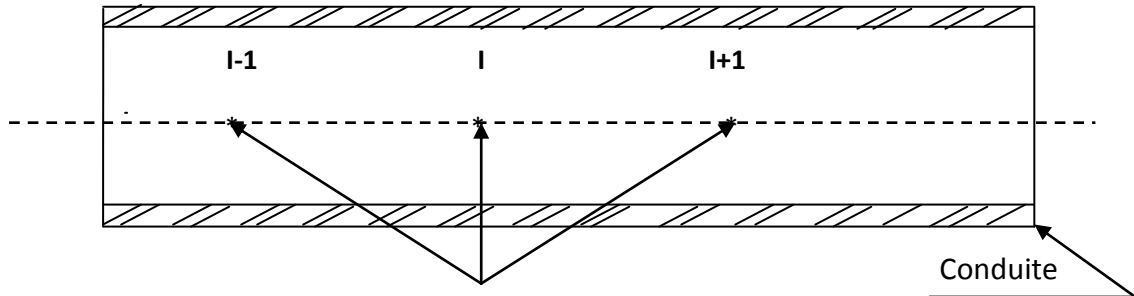


Figure IV-3 : Points de discrétisation sur lesquels on effectue les calculs.

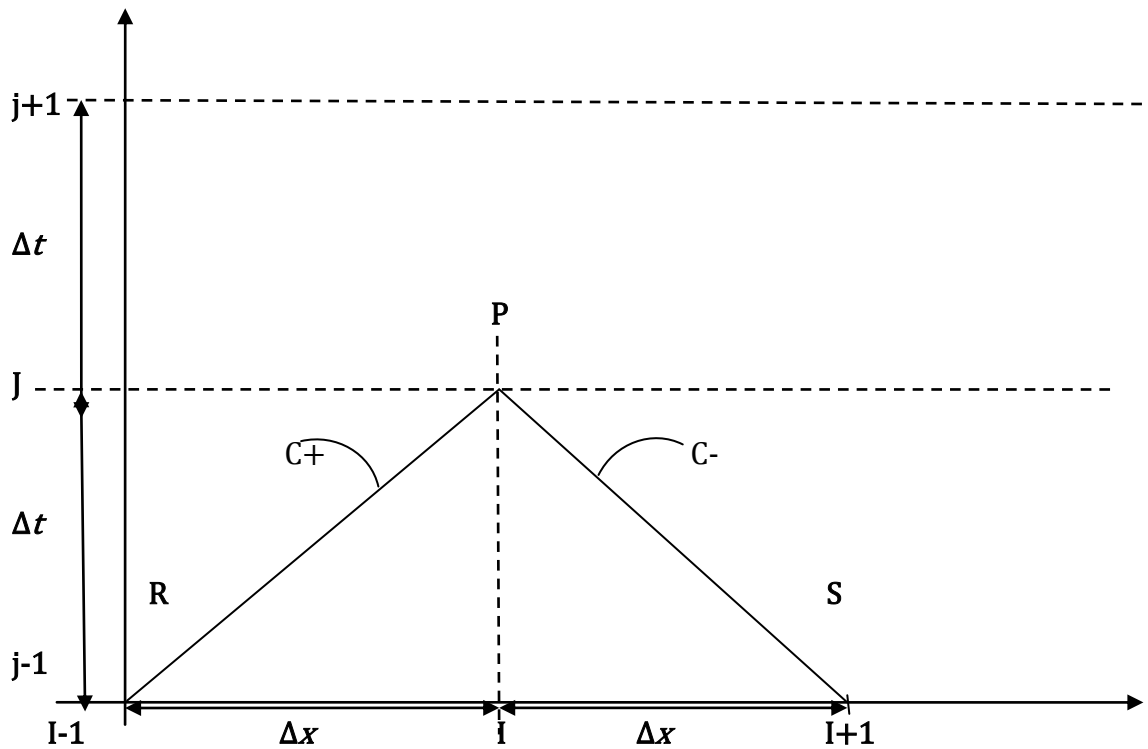


Figure IV-4 : Schéma de discrétisation et droites caractéristiques.

Le but est de calculer :

- La hauteur de pression  $H$  (ou la pression)  $P = \rho gH$ .

➤ La vitesse d'écoulement  $V$  (ou le débit)  $Q = VS$ .

Pour cela, on est conduit à résoudre numériquement et simultanément les relations (IV-10) pour chaque partie de la conduite.

Le schéma représenté sur 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 en fonction des points (I-1) et (I+1) et à l'instant  $(t)$  précédent.

Dans notre cas, nous avons utilisé le maillage régulier dans le plan  $(x, t)$  d'une division de la conduite en  $(N)$  tronçons  $(\Delta x)$  égaux, cela conduit à des intervalle de temps  $(\Delta t)$ .

Les points de discrétisation seront supposés suffisamment proches pour permettre d'écrire :

$$\int_{R,S}^N dV \pm \frac{g}{a} dH + \int_{R,S}^N \frac{4\tau_0}{\rho D} dt = 0 \quad (\text{IV-11})$$

### IV-3-1 Critère de stabilité du schéma numérique :

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

$$\Delta t \leq \frac{\Delta x}{|\pm a|} \quad (\text{IV-12})$$

Ceci signifie que les point  $R, S$  soient 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-3-2 Intégration des équations de compatibilité :

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

a) le long de la droite caractéristique  $C^+$  :

$$\int_R^N dV + \frac{g}{A} \int_R^N dH + \int_R^N \frac{4\tau_0}{\rho D} dt = 0 \quad (\text{IV-13})$$

b) le long de la droite caractéristique  $C^-$

$$\int_S^N dV - \frac{g}{a} \int_R^N dH + \int_S^R \frac{4\tau_0}{\rho D} dt = 0 \quad (\text{IV-14})$$

### IV-3-3 Calcul de H et V (intégration aux points courants) :

-Au niveau du point courant :

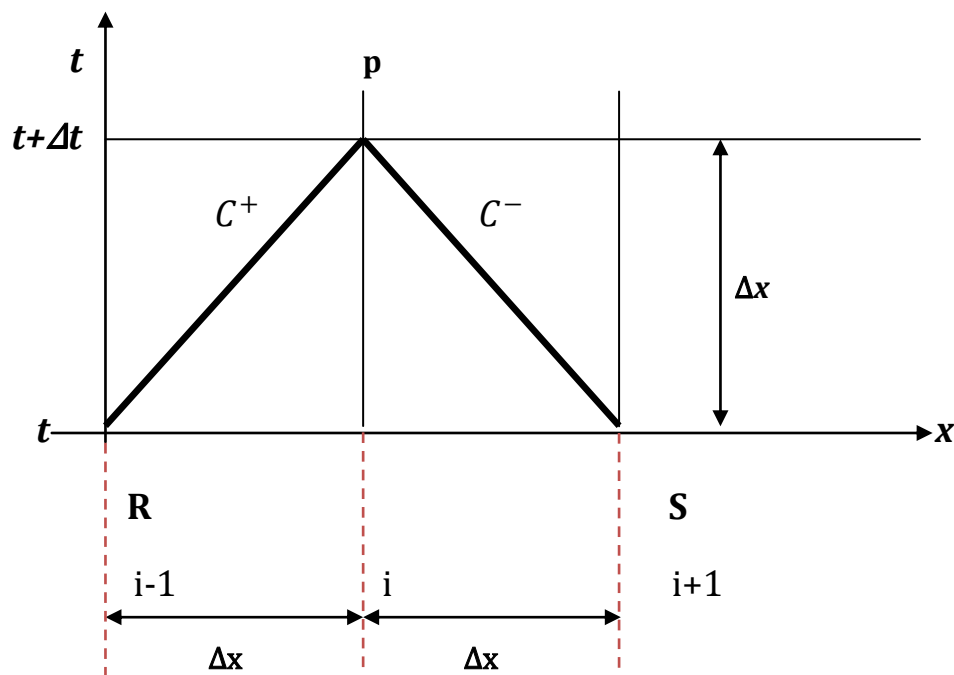


Figure IV-5 : Schéma numérique du point courant P.

$$C^+: (V_P - V_R) + \frac{1}{\rho a} (P_P - P_R) + \frac{\lambda}{2D} V_R |V_R| \Delta t = 0 \quad (\text{IV-15})$$

$$C^-: (V_P - V_S) - \frac{1}{\rho a} (P_P - P_S) + \frac{\lambda}{2D} V_S |V_S| \Delta t = 0 \quad (\text{IV-16})$$

## **CHAPITRE IV : Application Et Résultats De Calcul**

## V-1 Définition des paramètres de l'installation :

### A-Configuration de l'installation hydraulique :

La fig. (V-1) donne le schéma de l'installation hydraulique sur laquelle a été appliqué notre modèle de calcul et qui se compose de :

- ✚ Un réservoir.
- ✚ Une conduite.
- ✚ Une vanne.
- ✚ Un orifice (de fuite) situé au milieu de la conduite.

### B- Le fluide utilisé :

Le fluide utilisé dans cette installation est de l'eau avec les caractéristiques physiques suivantes :

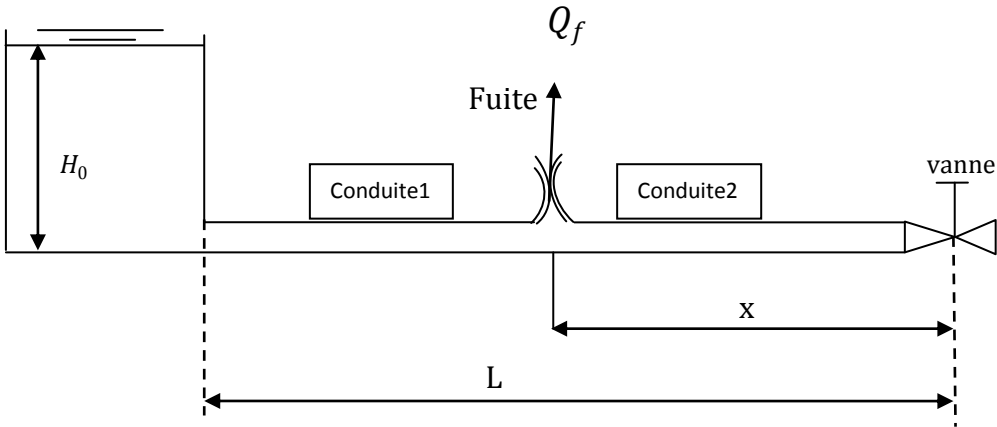
- un module d'élasticité  $K = 2.1 \text{ GPa}$  .
- la masse volumique  $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$  .
- la viscosité cinématique  $\nu = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  .

### C- les propriétés physiques de l'installation :

Les propriétés physiques de l'installation sont les suivantes :

- ✚ La hauteur de pression au réservoir  $H_0 = 50 \text{ m}$ .
- ✚ Le débit initial de  $0.020 \text{ m}^3/\text{s}$  .
- ✚ Le débit de fuite (à travers l'orifice de fuite)  $Q_f = 0.002 \text{ m}^3/\text{s}$  .
- ✚ Le coefficient de frottement de Darcy  $\lambda = 0$
- ✚ La vitesse initiale de l'écoulement du fluide  $V = 0.274 \text{ m/s}$  .
- ✚ La longueur de la conduite  $L = 1600 \text{ m}$ .
- ✚ Le diamètre de la conduite  $d = 0.3048 \text{ m}$ .
- ✚ L'épaisseur de la conduite  $e = 0.006 \text{ m}$ .
- ✚ Diamètre de l'orifice de fuite  $d_f = 0.0115 \text{ m}$ .
- ✚ Coefficient de débit de l'orifice  $C_d = 0.62$ .

Réservoir



**Figure V-1** : Schéma de l'installation hydraulique (réservoir-conduite-vanne) en présence d'une fuite

## V-2. Application et résultats de calcul

### A- Organigramme :

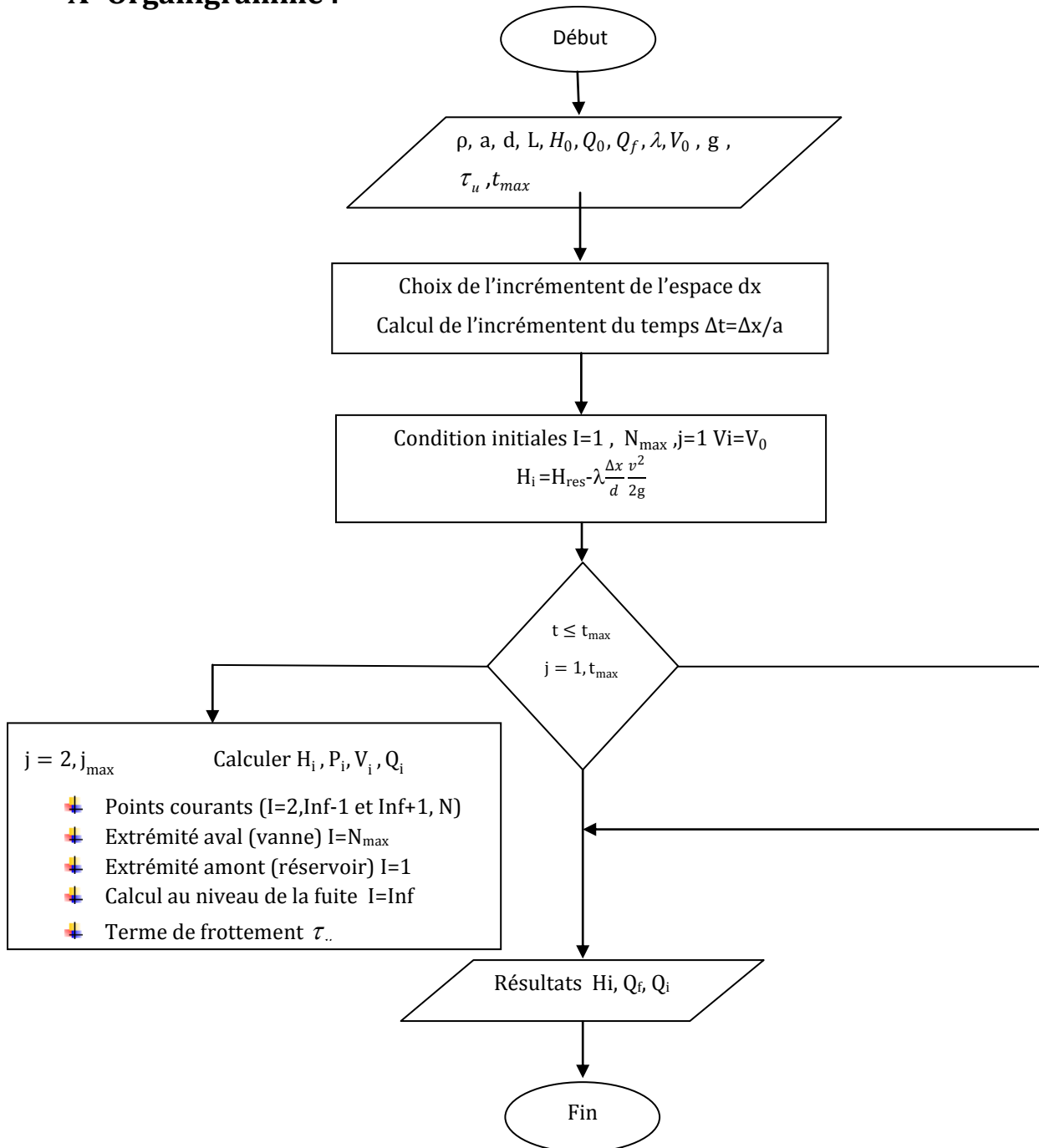


Figure V-2: Organigramme de calcul



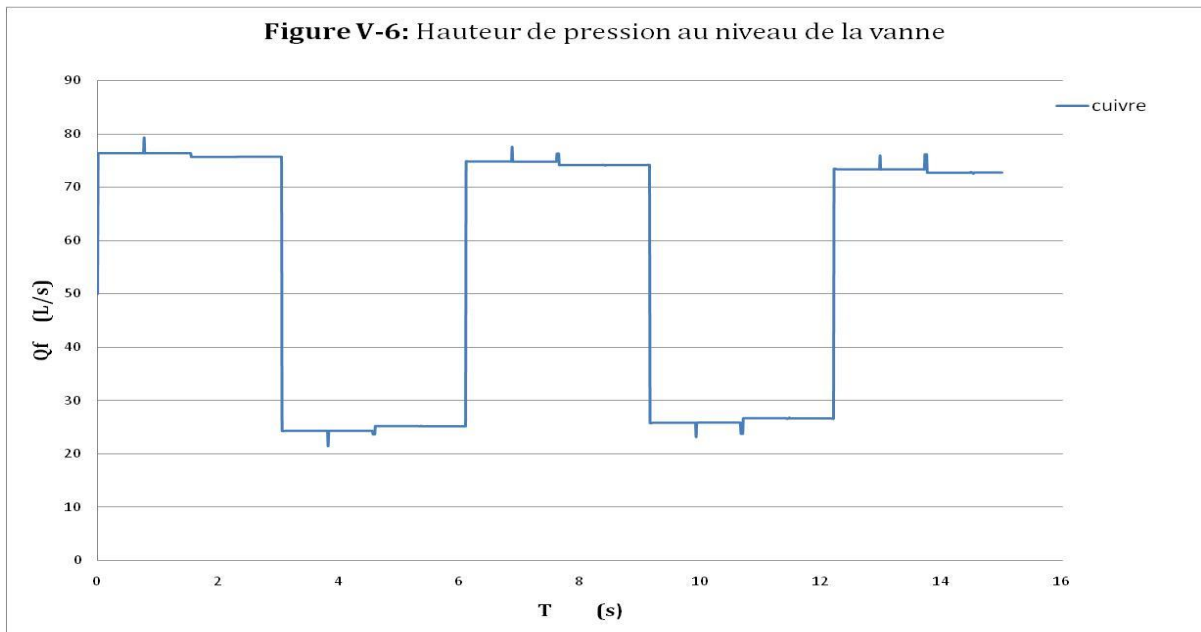
**C- Cas de la conduite en cuivre :**

$$E = 117 \text{ GPa}$$

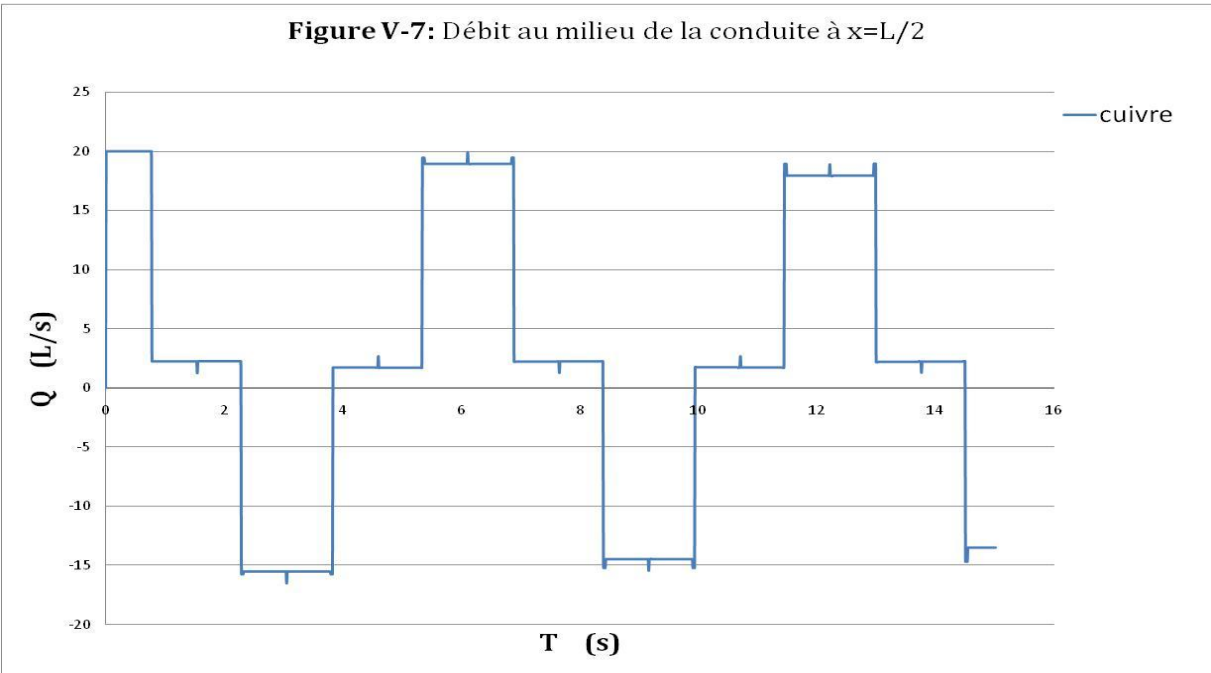
$$a = 1048,067 \text{ m/s}$$

$$\Delta x = 10 \text{ m}$$

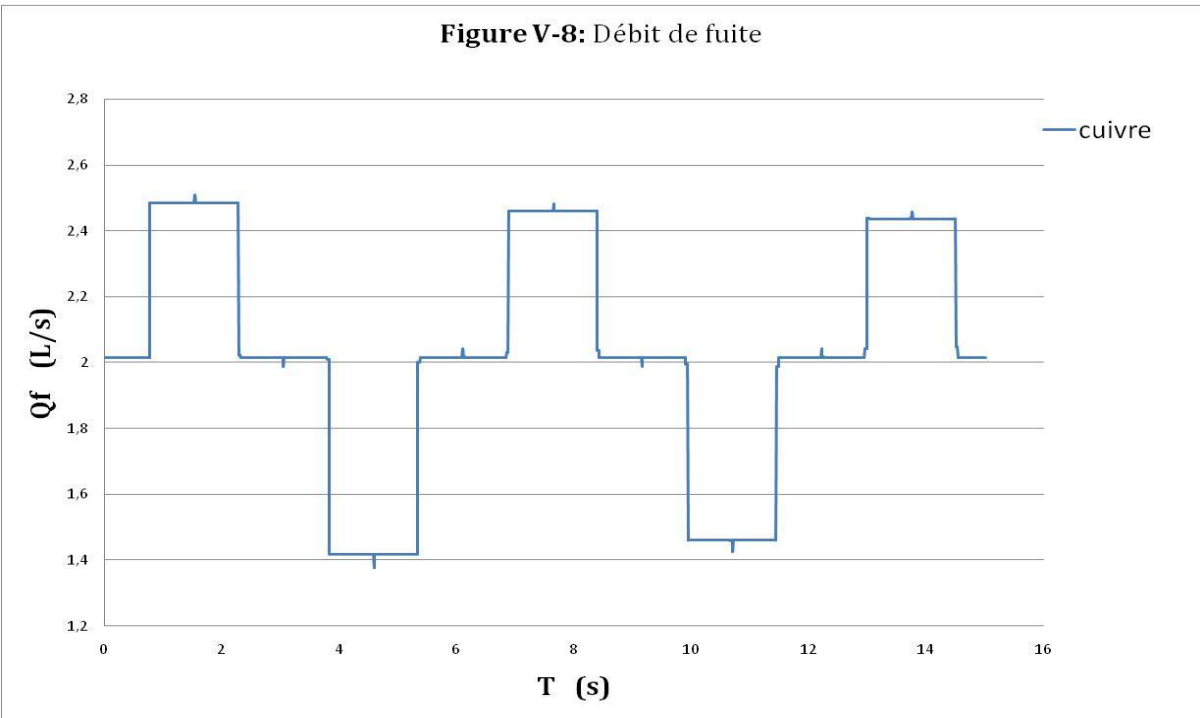
$$\Delta t = 9,54 \cdot 10^{-3} \text{ s}$$

**1-Hauteur de pression au niveau de la vanne:**

**2-Débit au milieu de la conduite:**



**3-Débit de fuite :**



## Conclusion

Dans ce travail, on a développé un système d'équations régissant le phénomène de l'écoulement transitoire de fluide (eau) dans une conduite en matériau (cuivre) en présence de fuite.

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

Par application du modèle proposé sur une installation hydraulique (disponible sur la littérature), nous avons abouti à des résultats montrant l'influence du matériau (son module d'élasticité) sur les paramètres (pression, débit) de l'écoulement en conduite en présence d'une fuite (orifice de fuite). Le débit de fuite a été calculé et quantifié donnant ainsi la proportion des quantités d'eau perdues.

Cette méthode est basée sur l'analyse de l'onde de pression dans le système de conduite pour localiser la fuite. Ce procédé utilise la technique de localisation de l'onde réfléchie pour détecter la position de la fuite et sans ampleur.

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), puis par utilisation de cette technique d'analyse des ondes de pression, on peut réduire le cout de l'enquête de dépistage des fuites et d'investigation sonore ou optique. Ce qui constitue une économie sur le cout de la détection et la localisation des fuites dans un système de conduites.

**Bibliographie :**

1- Ancien mémoire qui s'intitule sur : Simulation numérique de la propagation des ondes  
Elastiques dans les conduites en charge.pdf

2- Transient analysis for leak detection in pipe (E.Hadj Taieb).pdf

3-Improved method for simulating frictional losses in laminar transient liquid pipe  
flow.pdf

## TABLE DE MATIERE

INTITULE	PAGE
Remerciements	01
Dédicaces	02
Liste des figures	03
Nomenclature	04
Résumé	05
Mots clés	05
<b>CHAPITRE I : GENERALITES</b>	
I-1 Introduction	07
I-2 Identification du problème physique	08
I-2-1 la problématique	08
I-2-2 la démarche	09
I-3 Les fuites	09
I-3-1 Introduction	09
I-3-2 Bilan d'eau	10
I-3-3 détections des fuites	11
I-3-4 Matériel et technique de détection, l'appareil d'auscultation	12
I-3-5 les facteurs qui influent sur l'efficacité des méthodes acoustiques	15
I-3-6 les différents appareils de détection	16
I-3-7 Difficulté dans le cas des tubes en plastique	16
I-4 objectif	17
I-5 Résumé	18
I-6 Conclusion	18
<b>CHAPITRE II : DESCRIPTION DETAILLEE DU PHENOMENE TRANSITOIRE</b>	
II-1- Description des phénomènes physiques en jeu	20
II-1-1- État d'équilibre d'un système hydraulique	20
II-1-2- Onde élastique et oscillation en masse	20
II-1-3- Perturbation de l'équilibre, effet sur les pressions	20
II-2- Description détaillée du phénomène transitoire	21
II-2-1- Définition	21
II-2-2- Les sept facteurs déterminant la sévérité de la propagation de l'onde de pression ou du coup de bélier	22
II-2-3- Visualisation physique	22
II-2-4- Modélisation du coup de bélier pour une conduite à section constante	24

II-2-5- Influence d'une fermeture non instantanée	25
II-2-6- Les vannes	26
II-2-7- Le système continu [eau – conduite]	26
II-2-8- Classification des écoulements in stationnaires ou des phénomènes transitoires	26
II-2-9- Méthode de contrôle de la pression transitoire Classification des méthodes préventives	27
<b>CHAPITRE III : LES EQUATIONS DE BASE DE LA PROPAGATION DES ONDES DANS LES CONDUITES</b>	
III-1 Développements des équations hydrauliques fondamentales	29
III-1-1 Définition :	29
III-1-2 Formulation générale :	29
A) Equation de conservation de la masse (ou équation de continuité) :	29
B) Equation de conservation de la quantité de mouvement	30
c) Equation de conservation de l'énergie	30
D) Loi de comportement mécanique	31
E) Loi de comportement thermodynamique	31
Hypothèses :	32
III-1-2- Equation de conservation de la masse ou équation de continuité :	32
III-1-3- Equation de quantité de mouvement ou équation dynamique :	37
III-3-4 forme réduite du système des équations de base	41
IV-4-1 Modélisation du terme de frottement instationnaire	42
<b>CHAPITRE IV : METHODE DE RESOLUTION</b>	
IV-INTRODUCTION	44
IV-2 Modélisation mathématique de H et V le long de la conduite :	44
IV-3 Calcul de la hauteur de pression H et de la vitesse V aux points courants	49
IV-3-1 Critère de stabilité du schéma numérique	50
IV-3-2 Intégration des équations de compatibilité	50
IV-3-3 Calcul de H et V (intégration aux points courants)	51
<b>CHAPITRE IV : APPLICATION ET RESULTATS DE CALCUL</b>	
V-1 Définition des paramètres de l'installation	53
A- Configuration de l'installation hydraulique	53
B- Le fluide utilisé	53
C- les propriétés physiques de l'installation	53
V-2. Application et résultats de calcul	55
A- Organigramme	55

B- Cas de la conduite en cuivre	56
Conclusion	58
BIBLIOGRAPHIE	59