

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR - ANNABA
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار – عنابة

Faculté : Technologie
Département : Génie mécanique
Domaine : Science et techniques
Filière : Génie mécanique
Spécialité : énergétique

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème:

Etude de l'influence du coefficient de débit d'un orifice de fuite sur les paramètres de l'écoulement transitoire

Présenté par : Debabi Bassem

Encadrant : Djemili Abdelouaheb MCA Université de ANNABA

Jury de Soutenance :

Sari Mohamed Rafik	Prof	Université d'Annaba	Président
Djemili Abdelouaheb	MCA	Université d'Annaba	Encadrant
Boumaraf Latra	Prof	Université d'Annaba	Examineur
Adjabi Rachid	Prof	Université d'Annaba	Examineur

Année Universitaire : 2021/2022

Remerciements

Tout d'abord, louanges à ALLAH, qui m'a fournis de la patience au moment du besoin, de la force au moment de la faiblesse, de la volonté, et aussi je le remercie pour m'avoir mis dans de bonnes mains.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à mon encadreur Mr DJEMILI Abdelouaheb, enseignant (MCA) au département de Génie mécanique, Université Badji Mokhtar Annaba (UBMA) qui a bien voulu me soutenir, m'orienter, me guider et m'aider au cours de la préparation de ce travail et au temps précieux qu'il m'a consacré.

J'adresse mes remerciements aussi à mes enseignants du département de génie mécanique UBMA, Mr Sari Mohamed Rafik président de jury, professeur et Mme Boumaraf Latra professeur, Mr Adjabi Rachid professeur, pour avoir accepté d'examiner ce mémoire et de faire partie de ce jury.

Je remercie aussi tous les enseignants du département génie mécanique de l'UBMA, tous mes collègues et le personnel technique et administratif.

Enfin je tiens aussi à remercier mes parents pour m'avoir soutenu dans mon travail, ainsi que mes frères, pour leur aide sans faille.

Résumé :

Un système de distribution d'eau est un élément essentiel des infrastructures urbaines, et son intégrité et sa fiabilité jouent un rôle important pour assurer le développement rapide et stable de l'économie d'une ville et l'amélioration du niveau de vie des gens. Dans de nombreux pays, les fuites du réseau de canalisations se produisent fréquemment dans un système de distribution lorsque les canalisations connaissent une rupture de canalisation (sous forme d'orifice de fuite).

L'équation de l'orifice de fuite théorique (équation de Torricelli) représente la relation entre le débit de fuite et le coefficient de débit C_d (coefficient de décharge) et la pression dans la conduite, Des travaux de recherche montrent que C_d est une fonction de la pression locale et de la forme de l'orifice (la géométrie de l'orifice).

Dans cette étude, on donne une modélisation mathématique et numérique des équations de la dynamique des fluides et celle de l'écoulement à travers un orifice de fuite (équation de Torricelli) pour calculer le débit principal dans la conduite, la pression du fluide ainsi que le débit de fuite pour différentes valeurs du coefficient de débit qui représente les différentes formes de l'orifice de fuite.

Table des matières

Remerciements	(1)
Résumé	(2)
Table des matières	(3)
Liste des figures	(6)
Nomenclature	(8)
Introduction	(9)

Chapitre I Généralités sur les fuites

I. Identification du problème physique.....	(12)
I.1 La problématique.....	(12)
I.2 Généralités sur les fuites.....	(12)
a- Cause des fuites	(14)
b- Effets des fuites	(14)
c- Niveau de fuite	(14)
d- prévention contre les fuites.....	(14)
I.3 Détection des fuites.....	(15)
I.3.1 Méthodes et technique de détection des	(15)
I.3.1.1 Les appareils d'auscultation	(15)
I.3.1.2 Autres méthodes de localisations des fuites.....	(17)
I.3.2 Les facteurs qui influent sur l'efficacité des méthodes acoustiques.....	(18)
I.4 Bilan d'eau.....	(19)

Chapitre II Description détaillé du phénomène transitoire

II.1 Description	(22)
II.2 Les vannes	(23)
II.3 Types d'écoulements.....	(23)
II.4 Description du phénomène physique	(23)
II.4.1 État d'équilibre d'un système hydraulique.....	(23)
II.4.2 Onde élastique et oscillation en masse.....	(24)
II.4.3 Perturbation de l'équilibre, effet sur les pressions.....	(24)
II.4.4 Le système continu [eau – conduite].....	(24)
II.4.5 Coup de bélier ou écoulement transitoire	(25)
II.4.5.1 Définition	(25)
II.4.5.2 Causes du coup de bélier	(26)
II.4.5.3 Les risques dus au phénomène du coup de bélier.....	(26)
II.5 Les facteurs déterminant la sévérité de la propagation de l'onde de pression ou du coup de bélier	(28)
II.5.1 Visualisation physique	(28)

II.5.2	Modélisation du coup de bélier pour une conduite à section constante	(30)
II.5.3	Influence d'une fermeture non instantanée	(31)
II.6	Méthode de contrôle de la pression transitoire (Anti-bélier)	(32)
II.6.1	Classification des méthodes préventives.....	(32)

Chapitre III Formules de base pour le phénomène transitoire

I.1	Introduction	(35)
III.2	Formulation générale	(35)
III.2.1	Equation de conservation de la masse (ou de la continuité)	(35)
III.2.2	Equation de conservation de la quantité de mouvement.....	(36)
III.2.3	Equation de conservation de l'énergie.....	(37)
III.2.4	Loi de comportement mécanique.....	(37)
III.2.5	Loi de comportement thermodynamique	(37)
III.2.6	Equation de comportement de la conduite.....	(38)
III.3	Equations simplifiées	(39)
III.3.1	Hypothèses	(39)
III.3.2	Equation de conservation de la masse ou équation de continuité	(39)
III.3.3	Equation de conservation de la quantité de mouvement ou équation dynamique	(42)
III.3.4	Equation de conservation de l'énergie	(45)
III.4	forme réduite du système des équations de base.....	(45)
III.4.1	Système d'équations final	(45)
III.4.2	condition aux limites	(46)
III.4.3	Conditions aux extrémités	(46)
III.4.4	Modélisation mathématique au niveau de l'orifice de la fuite.....	(47)
III.4.4.1	Équation de l'orifice (Torricelli).....	(47)

Chapitre IV Méthode de résolution

I.1	Introduction	(51)
IV.2	Méthode des caractéristiques	(51)
IV.3	Modélisation mathématique de H et V le long de la conduite	(52)
IV.3.1	Recherche des lignes caractéristiques	(52)
IV.3.2	Recherche de relation de compatibilité	(55)
IV.4	Calcul de la hauteur de pression H et de la vitesse V aux points courants.....	(56)
IV.4.1	Critère de stabilité du schéma numérique	(57)
IV.4.2	Intégration des équations de compatibilité	(57)
IV.4.3	Calcul de H et V (intégration aux points courants).....	(57)
IV.5	Conditions aux limites	(59)
IV.6	Modélisation mathématique et numérique au niveau de la fuite	(61)
IV.7	Conditions initiales (régime permanent).....	(63)

Chapitre V Application du modèle de calcul

V.1	Introduction.....	(65)
V.2	Définition des paramètres de l'installation	(65)
	a) Configuration de l'installation hydraulique	(65)
	b) Le fluide utilisé	(65)
	c) les propriétés physiques de l'installation	(65)
V.3	Application et résultats de calcul	(66)
	V.3.1 Organigramme	(66)
	V.3.2 Résultats pour $C_d=0.62$, $C_d=0.65$ et $C_d=0.70$	(67)
	V3.2.1 calcul des paramètres physiques	(67)
	a) Hauteur de pression au niveau de la vanne	(69)
	b) Débit au milieu de la conduite	(69)
	c) Débit de fuite	(70)
	Conclusion.....	(71)
	Bibliographie.....	(72)

Liste des figures

Figure I.1 : Fuites dans une canalisation sur un réseau d'eau potable.

Figure I.2 : Appareil d'auscultation typiques se trouvent les tiges d'écoute à gauche et les microphones au sol à droite.

Figure I.3 : Corrélateur acoustique méthode de mesure numérique peuvent être visualisé sous forme d'image.

Figure I.4 : Caméra thermique permettre de visualiser et localiser la fuite.

Figure II.1 : Représentation d'écoulement permanent avant fermeture de la vanne (a) et l'écoulement transitoire après la fermeture de la vanne "coup de bélier" (b).

Figure II.2 : Exemple de conduites endommagées par des coups de bélier.

Figure II.3 : Rupture de tuyau en plastique suite à une brusque surpression.

Figure II.4 : élucide une photo d'une conduite aplatie suite à une forte dépression.

Figure II.5 : Phase 1 : Remontée d'une onde de surpression à partir de la vanne.

Figure II.6 : Phase 2 : Descente de l'onde après réflexion totale au réservoir (Le diamètre de la conduite reprend sa valeur initiale).

Figure II.7 : Phase 3 : Remontée de l'onde sous forme d'une onde de dépression.

Figure II.8 : Phase 4 : Redescente de l'onde de dépression.

Figure II.9 : Schéma simplifié d'une onde de pression remontant une conduite.

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

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

Figure III.3 : Bilan des forces exercées sur un tronçon de conduite (volume de contrôle).

Figure III.4 : différentes formes d'orifices et leurs coefficients de débit.

Figure III.5 : Schéma au niveau de l'orifice de la fuite.

Figure IV.1 : Courbes caractéristiques

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

Figure IV.3 : Schéma de discrétisation et droites caractéristiques.

Figure IV.4 : Schéma numérique du point courant P.

Figure IV.5 : Schéma de l'installation.

Figure IV.6 : Schéma numérique au niveau de l'extrémité amont.

Figure IV.7 : Schéma numérique au niveau de l'extrémité aval.

Figure IV.8 : Schéma numérique au niveau de l'orifice de fuite.

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

Figure V.2 : Organigramme de calcul

Figure V.3 : Hauteur de pression au niveau de la vanne.

Figure V.4 : débit au milieu de la conduite.

Figure V.5 : débit de la fuite.

Nomenclature

Symboles	Description
\vec{V}	Le vecteur de vitesse
ρ	La masse volumique
Q	Le débit d'écoulement dans la conduite
Q_f	Le débit d'écoulement au niveau de fuite
V	Le volume de contrôle
\vec{F}	La résultante des forces a distance
\vec{T}	La force par unité de surface
$\bar{\sigma}$	Le tenseur des contraintes
$\bar{\epsilon}$	Le tenseur des taux de déformation
λ	Coefficient de frottement
μ	Coefficient de viscosité
$\bar{\tau}$	Le tenseur de contrainte de viscosité
x	Coefficient de compressibilité
P	Pression de fluide en écoulement
K	Le module d'élasticité du fluide
E	Le module d'élasticité de la conduite
ν	Le coefficient de Poisson
τ_0	La contrainte tangentielle de viscosité partielle
α	Angle de la conduite
D	Diamètre de la conduite
A	Section de la conduite
H	La hauteur de pression
e	L'épaisseur de la conduite
σ	La contrainte normale
r	Rayon de la conduite
a	La vitesse de propagation de l'onde de perturbation
g	L'accélération de la pesanteur
L	La longueur le la conduite
t_f	Le temps de fermeture de la vanne
θ	L'angle de variation

Introduction

Une forte proportion d'eau se perd à cause des fuites durant le transport entre les usines de traitement et les différents points de consommation. D'après une enquête réalisée par l'AIDE [1] (Association Internationale des Distribution d'Eau), la quantité d'eau perdue transportée par ces réseaux, se situerait entre 20 et 30 % de la production totale. Ces grandes quantités d'eau perdues sont dues principalement aux fuites, dont les conséquences peuvent être graves. C'est la raison pour laquelle les exploitants ont été poussés à installer différents moyens permettant de détecter les fuites dans des meilleurs délais.

Selon une autre étude faite par IWA [1] (International Water association), les pertes d'eau peuvent atteindre de 20 jusqu'à 50% de l'eau produit. 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, ainsi que les vibrations et les charges excessives dues à la circulation. Il peut s'agir de fuites mais aussi de réservoirs qui débordent, de vannes de vidange mal fermées, détournement d'eau, défaut d'étanchéité du réseau ...etc.

Le régime transitoire (coup de bélier) dans les installations hydrauliques constitue un danger permanent, qui peut survenir à tout moment suite aux diverses manipulations des éléments du réseau. Le régime transitoire occasionne l'apparition de pressions très élevées ou très faibles, qui engendrent des conséquences désastreuses pour la survie de l'installation. Il est source de plusieurs dégâts (détérioration des conduites) qui occasionnent des coûts supplémentaires d'équipements et d'entretien habituellement non prévus.

Ce mémoire est divisé en cinq chapitres. Dans le premier chapitre, on donne des généralités sur les problèmes des fuites dans un système hydraulique et les méthodes de détections et réparation des fuites sur les réseaux d'eau potable.

Le deuxième chapitre est consacrer a la description du régime transitoire communément appelé 'phénomène de coup bélier' et ses conséquences sur l'installation et ses équipements ainsi que les systèmes anti-bélier pour la protection de réseaux de conduite.

Dans la troisième partie, on établit un système d'équations à partir des équations de conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie, ainsi que les équations de comportement de la conduite et de fluide.

On introduit aussi l'équation qui prend en compte la relation entre le débit de fuite, la pression et la forme de l'orifice.

Pour le quatrième chapitre, nous donnons la méthode de résolution du système d'équations différentielles aux dérivées partielles. Nous utilisons la méthode des caractéristiques liées à celle des différences finies. Une modélisation spécifique au niveau de l'orifice de fuite a été réalisée.

Enfin, dans le cinquième chapitre, on a donné une application du modèle mathématique et numérique obtenu sur une installation qui se compose d'un réservoir en amont, une conduite avec un orifice de fuite et une vanne à fermeture rapide en aval. Des résultats sont obtenus suite à une simulation numérique sur un code de calcul écrit en FORTRAN.

Chapitre I

Généralités sur les fuites

I. Identification du problème physique :

I.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.

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 quel que 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. Généralités sur les fuites :

Dans les réseaux d'eau potable, les pertes en eau atteignent un niveau alarmant. Les pertes apparentes et les pertes réelles. Les pertes apparentes correspondent à des erreurs de comptage ou à des consommations non autorisées et les pertes réelles comprennent les fuites sur le système de transport ainsi que les fuites et débordements au niveau des réservoirs.

Nous intéressons aux seules pertes sur le réseau de distribution d'eau potable depuis l'usine de traitement jusqu'au compteur de l'abonné. Ces pertes résultent de casses franches généralement réparées rapidement et de fuites non détectées qui proviennent pour la plupart d'une mauvaise étanchéité des canalisations et des organes hydrauliques.

Les fuites non détectées n'entraînent pas d'interruption de service et le système de distribution continue de fonctionner correctement dans la plupart des cas. Cependant, ces fuites sont responsables de pertes pouvant atteindre 30% du volume d'eau introduit dans le réseau. Dans un contexte de ressources rares, les fuites diminuent d'autant les potentialités d'alimentation.

Les fuites sont des pertes physiques de quelques quantités d'eau, mais qui n'empêchent pas le fonctionnement normal du réseau sont généralement localisées dans les joints, les vannes, les raccordements, les points de jonction entre deux éléments ou dans le corps même de la conduite.

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 I.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 et d'appareils modernes qui les aident à limiter les pertes d'eau.



Figure I.1 : Fuites dans une canalisation sur un réseau d'eau potable.

a- Cause des fuites :

- Rupture ou mauvaise étanchéité des conduites.
- Joints détériorés ou mal exécutés.
- La corrosion interne dans le cas où le fluide est agressif, la corrosion externe selon le taux d'humidité du sol.
- Un défaut d'installation des équipements : Une mauvaise pose ou une malfaçon au niveau de l'installation des canalisations.
- Glissements de terrains.
- Choc hydraulique causé par la fermeture brusque d'une vanne.
- Les surpressions ou coups de bélier.

b- Effets des fuites :

- Risque de dégradation de la qualité de l'eau suite à l'introduction d'eau polluée.
- Perturbation de la circulation suite aux inondations.
- Risque de retour d'eau.

c- Niveau de fuite :

Le niveau de fuite dépend de paramètres liés :

- aux caractéristiques des conduites (matériau et âge).
- à leur condition de pose (nature du terrain).
- au nombre de branchements.
- à la capacité de l'exploitant à chercher les fuites et à sa réactivité pour les réparer,
- aux conditions de la gestion technique (pression excessive, coup de bélier, air dans les conduites,...).

d- prévention contre les fuites :

Ces paramètres induisent différentes actions destinées à réduire les fuites :

- Le renouvellement des conduites ; c'est une action coûteuse dont les effets sont à long terme.
- La détection des fuites et leur réparation.
- La réduction de pression.

I.3. 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, 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.3.1. Méthodes et technique de détection des fuites :

I.3.1.1. Les appareils d'auscultation :

Il s'agit des tiges d'écoute, des aqua-phones et des géophones, ou microphones au sol (**Figure 1.2**), 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.

Le mode d'emploi des appareils d'auscultation est généralement simple mais leur efficacité dépend de l'expérience de l'opérateur.

- L'amplificateur électronique ou microphone au sol :

Dans un amplificateur électronique, le son particulier de chuintement de la fuite d'eau est capté par un microphone et amplifié par un circuit électronique. Les appareils les plus modernes sont même munis d'amplificateurs de signaux et de filtres antiparasites pour mettre en relief le signal produit par la fuite. La technique consiste à placer le microphone sur le sol à différents intervalles le long de la conduite et à repérer les changements d'amplitude à mesure que le microphone s'approche de la fuite.



Figure I.2 : Appareil d'auscultation typiques se trouvent les tiges d'écoute à gauche et les microphones au sol à droite.

- Le corrélateur acoustique :

Plutôt que de localiser une fuite en se basant sur le niveau du son, le corrélateur acoustique utilise la vitesse des sons produits par la fuite lorsqu'ils se déplacent le long de la conduite vers deux capteurs ou microphones placés sur des raccords de chaque côté de la fuite. La méthode utilise comme principe de fonctionnement la ressemblance entre les deux signaux résultant du bruit de la fuite et détermine la différence des temps de propagation de ce bruit vers deux capteurs placés aux extrémités de la partie de la canalisation contrôlée. L'efficacité de cette méthode dépend de l'ampleur du son émis par la fuite et de la conductivité sonore de la conduite.



Figure I.3 : Corrélateur acoustique méthode de mesure numérique peuvent être visualisé sous forme d'image.

I.3.1.2. Autres méthodes de localisations des fuites :

Il existe d'autres méthodes plus sophistiquées pour des campagnes à grande échelle de recherche de fuites, mais elles nécessitent des moyens techniques importants :

- La technique du gaz traceur :

Le gaz traceur est un mélange d'azote et d'hydrogène, la méthode est efficace pour la détection de fuite d'eau sur canalisation enterrées en métal. Le gaz traceur permet de localiser même les micro-fuites. La technique est généralement utilisée sur les canalisations des réseaux d'eau potable. Le gaz est injecté dans les canalisations pour identifier la présence d'une fuite et la localiser avec précision. S'il y a une fuite, le gaz s'échappe et remonte à la surface à l'endroit exact où elle se trouve. La méthode est complètement inoffensive car le gaz utilisé est de qualité alimentaire.

- La thermographie :

En cas de fuites dans les canalisations, la caméra thermique est très utile pour les repérer. En effet, ces dernières provoquent un changement de température dans l'isolation et la caméra thermique le détecte. L'analyse par thermographie permet donc de déceler les zones endommagées. La caméra thermique permet de rendre ces fuites visibles pour l'homme. Le plombier peut alors intervenir et procéder à leur réparation.

- Le géo radar :

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 devraient l'être à cause de l'augmentation de la valeur de la constante diélectrique du sol gorgé d'eau, aux alentours de la fuite.

- Par caméra vidéo :

Cette technique permet d'examiner, à l'aide d'une caméra, les parois intérieures des canalisations. Après le repérage des fissures, constat des ruptures et raccords défectueux, la caméra indique grâce au compteur, à quelle distance se trouve la fuite d'eau à partir du point d'entrée de la caméra. Cette opération peut être complétée par un traçage des canalisations, tel que nous l'avons expliqué plus haut. L'inspection par caméra vidéo dispose également d'un

système infrarouge qui permet de localiser les zones de perte de chaleur, ce qui permet d'obtenir rapidement une image claire de l'état de l'ensemble du réseau.



Figure I.4 : Caméra thermique permettre de visualiser et localiser la fuite.

I.3.2. 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 asphalté 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.4. Bilan 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. 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.

En conclusion, 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 géo-radar. 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 acoustique.

Chapitre II

Description détaillée du phénomène transitoire

II.1. Description :

Le régime transitoire, dans les installations hydrauliques constitue un danger permanent, qui peut survenir à tout moment suite aux diverses manipulations des éléments du réseau. Régime transitoire occasionne l'apparition de pressions très élevées ou très faibles, qui engendrent des conséquences désastreuses pour la survie de l'installation, il est source de plusieurs dégâts (détérioration des conduites) qui occasionnent des coûts d'équipements et d'entretien habituellement non prévus.

Son étude et sa maîtrise présentent des intérêts remarquables, lors de la conception et l'implantation des réseaux, en ce sens qu'elle permet, lors du dimensionnement d'en tenir compte pour le choix des diamètres des conduites ou pour l'installation d'éléments pouvant atténuer les effets indésirables.

La prévention du transitoire exige l'utilisation de gros diamètre et d'épaisseurs élevées, ce qui revient toujours cher mais néanmoins garantit une certaine sécurité vis-à-vis des conséquences qu'il peut entraîner.

Le transitoire est un phénomène complexe, qui prend naissance à la suite d'une variation de l'écoulement. Ce dernier possédant une certaine vitesse, qui fonction de sa masse lui communique une énergie cinétique qui peut s'annuler à la suite d'une manipulation sur le réseau.

En vertu de la loi de conservation de l'énergie, l'énergie initiale ne peut disparaître instantanément, en fait elle se transforme en énergie potentielle sous forme d'ondes de surpression et de vitesse, qui se propagent le long de la conduite avec une célérité fonction de l'élasticité du matériau et de la compressibilité du fluide.

Dans les réseaux hydrauliques, figurent divers éléments qui peuvent engendrer la variation de l'écoulement, donc création d'un régime transitoire, parmi ces éléments :

- Les vannes qui occasionnent un phénomène transitoire dont la sévérité dépend des conditions de manipulation (ouverture – fermeture, brusque, continue, ou lente) et de la constitution du réseau.
- Les pompes et turbines qui provoquent le transitoires par leurs démarrages, arrêt, ou pertes de puissance.
- La géométrie des canalisations qui provoque le transitoire par leur variation de section le long d'une conduite.

Donc l'étude du phénomène des écoulements transitoires en charge vise à déterminer si la pression dans l'ensemble d'un système est à l'intérieur des limites prescrites, suite à une perturbation de l'écoulement.

II.2. Les vannes :

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

- Les vannes d'isolement, on distingue deux types :
 - a) les robinets à papillon : Les robinets à papillon Appareils de réglage de débit et de sectionnement utilisés pour les gros diamètres (>300 mm).
 - b) Les robinets-vannes : Les robinets - vannes appareils de sectionnement pour isoler un tronçon de Conduite de petit diamètre.
 - Les vannes de réduction de pression.
 - Les vannes à clapets de non-retour.

II.3. Types d'écoulements :

1. Écoulement permanent.
2. Écoulement non permanent.
3. L'écoulement uniforme.
4. L'écoulement non uniforme.
5. Écoulement transitoire.

II.4. Description du phénomène physique :

II.4.1. 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.

II.4.2. 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.4.3. 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.

II.4.4. 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 à 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 enchaînement de tranches infinitésimalement minces.

II.4.5. Coup de bélier ou écoulement transitoire :

Le coup de bélier étant un cas particulier du régime transitoire, est un phénomène oscillatoire qui se manifeste dans les conduites en charge à écoulement gravitaire ou par refoulement.

On entend aussi sous le terme « coup de bélier » un écoulement non permanent du liquide accompagné des variations pratiquement sensibles de la pression qui peuvent devenir dangereuses pour la tuyauterie.

Ces variations résultent d'une perturbation des conditions permanentes d'écoulement.

C'est le nom que l'on donne à une onde de choc hydraulique, lorsqu'un liquide non compressible comme l'eau, est stoppé net dans une canalisation. Autrement dit, c'est l'arrêt brutal de la circulation de l'eau lorsqu'une vanne (ou tout autre appareil) se ferme.

II.4.5.1. 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 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 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.

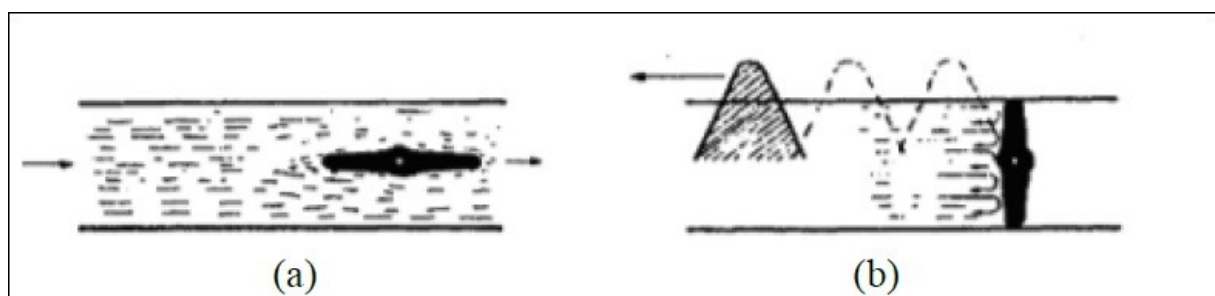


Figure II.1 : Représentation d'écoulement permanent avant fermeture de la vanne (a) et l'écoulement transitoire après la fermeture de la vanne "coup de bélier" (b).

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 comme illustré dans la **Figure II.1.b** 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 $4L/a$ ou a désigné, la célérité ou la vitesse de propagation de l'onde de pression dans la conduite de longueur L .

II.4.5.2. Causes du coup de bélier :

Les causes les plus fréquentes de création de coup de bélier 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.

II.4.5.3. Les risques dus au phénomène du coup de bélier :

Les conséquences du coup de bélier peuvent être néfastes elles deviennent de plus en plus dangereuses à mesure que les paramètres modificateurs deviennent importants (variation de pressions et de débits dans le temps). Ces phénomènes se produisant dans une conduite en charge peuvent provoquer des risques à la suite d'une dépression ou surpression engendrée par des manœuvres brusques ou instantanées, par exemple : vibrations, la rupture, des fuites, et des déplacements de la structure, La **Figure II.2** montre des exemples de conduites endommagées par des coups de bélier.



Figure II.2 : Exemple de conduites endommagées par des coups de bélier.

- Cas de surpression :

La surpression est une conséquence du coup de bélier engendrée par une pression importante se produisant à la suite d'une fermeture instantanée ou rapide d'une vanne de sectionnement ou bien à la suite d'une dépression causée par l'arrêt brusque d'une pompe. Si la pression totale c'est-à-dire la pression en régime permanent majorée de la valeur de surpression due au coup de bélier qui dépasse la pression maximale admissible des tuyaux, ce qui engendre des risques de rupture de ces derniers et des déboîtements des joints (les anneaux d'étanchéité seront délogés) La **Figure II.3** illustre une photo représentant la rupture de tuyau en plastique suite à une brusque surpression causée par un coup de bélier.

En plus de ces risques, l'onde de surpression peut porter des préjudices aux autres équipements.

- Rupture des réservoirs ou flexible
- Usure des joints, des soudures de raccordement et des appareils sanitaires.
- Détérioration des dispositifs de coupure, clapet anti retour et de régulation.
- De forts bruits et vibrations dans les conduites et les structures avoisinantes.



Figure II.3 : Rupture de tuyau en plastique suite à une brusque surpression.

- Cas de dépression :

La dépression est également une conséquence du coup de bélier engendrée par l'apparition d'une pression relative négative, à la suite d'un arrêt brusque d'une pompe ou d'une ouverture instantanée d'une vanne de sectionnement. Si le profil en long de la canalisation est déformable la canalisation peut être aplatie par implosion et les joints peuvent être aspirés.



Figure II.4 : élucide une photo d'une conduite aplatie suite à une forte dépression.

- Fatigue de la canalisation :

En régime transitoire les alternances de surpression et de dépression qui sont une conséquence inévitable du phénomène provoquant la fatigue pour le matériau de la canalisation même si leur amplitude est faible.

II.5. 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).
- 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.5.1. Visualisation physique :

En hydraulique générale des écoulements instationnaires, le phénomène le mieux décrit est celui du coup de bélier. On considère dans une conduite horizontale un fluide incompressible qui s'écoule en régime permanent avec une vitesse moyenne. Si une perturbation vient modifier ce régime (par exemple l'introduction rapide d'un liquide, ou la fermeture brutale de la conduite par une vanne), alors la perturbation engendrée se propagera avec la célérité c .

Cette célérité est équivalente à la vitesse de propagation de l'onde de pouls. Cette perturbation présente une pression maximum (h_{max}) et une pression minimum (h_{min}).

On appelle coup de bélier hydraulique Δh la différence entre la pression maximale et la pression minimale $\Delta h = h_{max} - h_{min}$.

- 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. Le rapport $t_{ca} = L / a$ est défini comme étant le temps caractéristique du tronçon de conduite. Il existe 4 phases du coup de bélier dans une conduite hydraulique :

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

$C = a$ (vitesse de l'onde de pression)

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.5**).

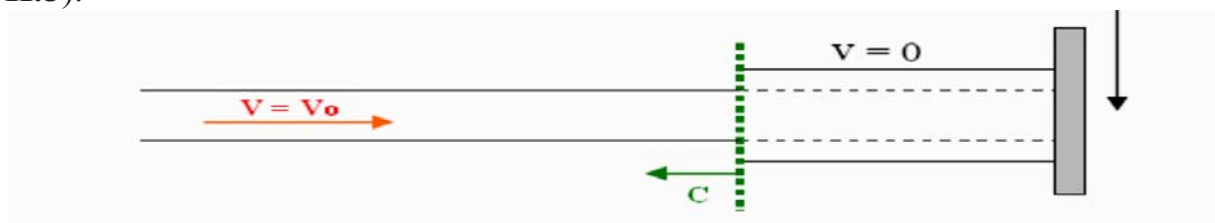


Figure II.5 : Phase 1 : Remontée d'une onde de surpression à partir de la vanne.

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 à la vitesse. De proche en proche ce phénomène se produit et crée ainsi une onde de choc se déplaçant cette fois-ci vers la vanne (**Figure II.6**).



Figure II.6 : Phase 2 : Descente de l'onde après réflexion totale au réservoir (Le diamètre de la conduite reprend sa valeur initiale).

Phase 3 : $2tca < t < 3tca$:

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 (**Figure II.7**).

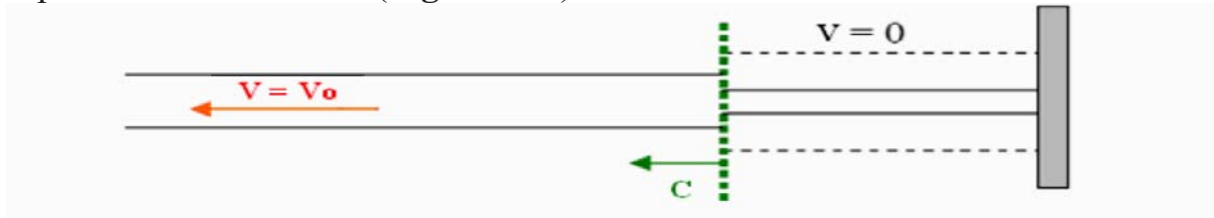


Figure II.7 : Phase 3 : Remontée de l'onde sous forme d'une onde de dépression.

Phase 4 : $3tca < t < 4tca$:

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 (**Figure II.8**).



Figure II.8 : Phase 4 : Redescente de l'onde de dépression.

II.5.2. Modélisation d'un 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 ρ , ainsi que la vitesse de l'écoulement ($\Delta V = -V$ pour une fermeture complète) comme le montre la Figure II.8.

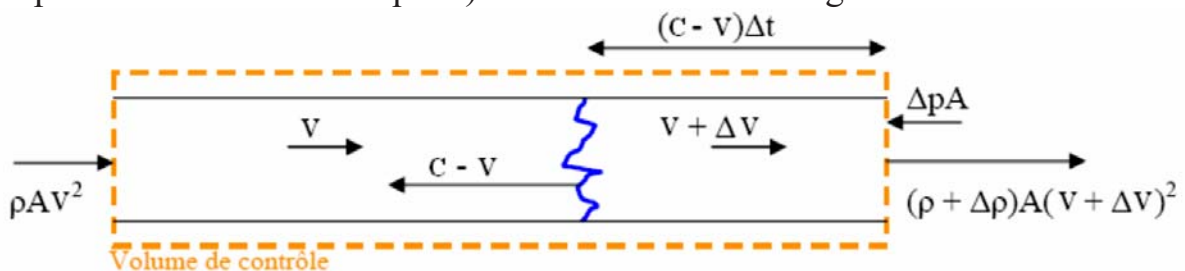


Figure II.9 : Schéma simplifié d'une onde de pression remontant une conduite.

D'après la **Figure II.8**, l'équation de continuité peut s'écrire :

$$\rho AV - (\rho + \Delta\rho)(V + \Delta V) = A(C - V)\Delta t[(\rho + \Delta\rho) - \rho]/\Delta t \quad (\text{II.1})$$

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 dont il faut tenir compte s'il se produit de rapides variations de pressions (même très petites). Car ce sont les phénomènes de compressibilité qui permettent d'expliquer la propagation des ondes élastiques dans les milieux matériels.

$$-\Delta PA = A(C - V)[(\rho + \Delta\rho)(V + \Delta V) - \rho C] + A(\rho + \Delta\rho)(V + \Delta V)^2 - A\rho \quad (\text{II.2})$$

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

$$\Delta P = a\rho\Delta V \quad (\text{II.3})$$

$C=a$ (vitesse de propagation de l'onde de pression).

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 ; Δp serait donc infiniment grand pour un écoulement parfaitement incompressible et des conduites rigides.

II.5.3. 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 ΔH 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 ΔH max par rapport à celle d'une fermeture instantanée, le temps de fermeture t_{ferm} doit être plus long que le temps critique t_{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.

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 changée de signe de la chambre d'eau (réservoir).

II.6. Méthode de contrôle de la pression transitoire (Anti-bélier) :

II.6.1. 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:

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

Formules de base pour le phénomène transitoire

III.1. Introduction :

Ce troisième chapitre aborde l'aspect théorique des problèmes posés par les mouvements transitoires.

Les équations qui permettent d'étudier les phénomènes transitoires en écoulement monophasique sous pression reposeront sur :

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

Bien que l'eau soit souvent modélisée comme étant un fluide incompressible, les modèles mis en œuvre 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.

III.2. Formulation générale :

III.2.1. Equation de conservation de la masse (ou 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 :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{V}) = 0 \quad (\text{III.1})$$

Où :

\vec{V} : Le vecteur vitesse.

ρ : La masse volumique.

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

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

On considère une masse déterminée de fluide occupant au temps t un volume V .
La variation de la quantité de mouvement par unité de temps contenant cette masse est :

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_0^V \rho \vec{V} dV = \Sigma \vec{F} \quad (\text{III.2})$$

Où :

V : est le volume de contrôle.

$\Sigma \vec{F}$: représentent les forces extérieures qui sont :

les forces de volume : $\int_D^D \vec{F} dV$

les forces de surface : $\int_D^D \vec{T}$

ou \vec{F} : est la résultante des forces à distance qui s'exerce sur l'élément de volume dV .

\vec{T} : représente la force par unité de surface.

Sous une autre forme, on peut écrire :

$$\rho \frac{d\vec{V}}{dt} = \rho \vec{F} - \overrightarrow{grad}P + \vec{f}_v \quad (\text{III.3})$$

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

$\rho \vec{F}$: représente les forces de volume.

$\overrightarrow{grad}P$: représente les forces de pression.

\vec{f}_v : représente les forces de viscosité.

III.2.3. Equation de conservation de l'énergie :

Pour un système matériel 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 \mathbf{E} et de l'énergie cinétique \mathbf{K} soit égale au travail \mathbf{W} et de la chaleur \mathbf{Q} .

$$\Delta(E + K) = \Delta W + \Delta Q \quad (\text{III.4})$$

III.2.4. 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 :

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{\sigma} = \overline{(\varepsilon)} \\ \bar{\sigma} = \bar{\tau} - P\bar{I} \\ \bar{\tau} = \lambda(\text{div}V)\bar{I} + 2\mu\bar{\varepsilon} \end{array} \right. \quad (\text{III.5})$$

$\bar{\sigma}$: Est le tenseur des contraintes.

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

λ et μ : Sont des coefficients de viscosité

$\bar{\tau}$: Est le tenseur des contraintes de viscosité.

L'équation (III.5) sera :

$$\bar{\sigma} = \lambda(\text{div}V)\bar{I} + 2\mu\bar{\varepsilon} - P\bar{I} \quad (\text{III.6})$$

III.2.4.2. 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.

$$x = -\frac{1}{V} \frac{dV}{dP} \quad (\text{III.7})$$

où : x : est le coefficient de compressibilité.
 V : est le volume occupé par unité de masse.

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

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

Le module d'élasticité du fluide « K » est l'inverse du coefficient de compressibilité isotherme « x » du fluide, dont on peut écrire :

$$\frac{d\rho}{\rho} = -\frac{1}{K} dP \quad (\text{III.9})$$

Et :

$$x = \frac{1}{K} \quad (\text{III.10})$$

où : K : est le module d'élasticité du fluide.

III.2.5. Equation de comportement de la conduite :

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

$$\begin{aligned} \epsilon_{xx} &= \frac{1}{E} [\sigma_{xx} - \nu (\sigma_{\theta\theta} + \sigma_{rr})] \\ \epsilon_{\theta\theta} &= \frac{1}{E} [\sigma_{\theta\theta} - \nu (\sigma_{xx} + \sigma_{rr})] \\ \epsilon_{rr} &= \frac{1}{E} [\sigma_{rr} - \nu (\sigma_{\theta\theta} + \sigma_{xx})] \end{aligned} \quad (\text{III.11})$$

où E est le module d'élasticité (module de Young) de la conduite.

ν est le coefficient de Poisson.

III.3. Equations simplifiées :

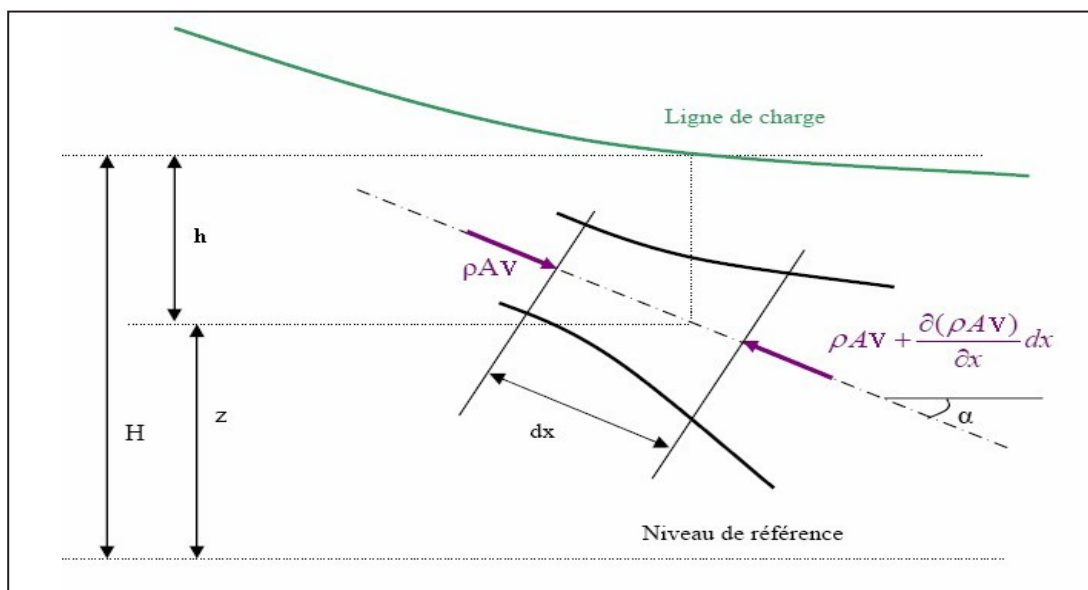
III.3.1. Hypothèses :

Dans le cas particulier des écoulements en conduite, les équations précédentes se simplifient en tenant compte d'un certain nombre d'hypothèses suivantes :

- L'écoulement est considéré unidimensionnel.
- Le problème est un problème de petites déformations.
- La viscosité de l'eau est constante.
- On considère que l'écoulement est axisymétrique.
- Le fluide est légèrement compressible.
- La conduite est supposée cylindrique circulaire, rectiligne et assimilée à une juxtaposition d'anneaux indépendants.

III.3.2. Equation de conservation de la masse ou équation de continuité :

Considérant un volume de fluide renfermé dans un tronçon de conduite (**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

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

$$\frac{\partial(\rho A dx)}{\partial t} = \rho AV - (\rho A + \frac{\partial(\rho AV)}{\partial x} dx) \quad (\text{III.12})$$

Dans le cas des petites déformations, la relation (III.12) peut s'écrire :

$$\frac{\partial(\rho A)}{\partial t} = -(\frac{\partial(\rho AV)}{\partial x}) \quad (\text{III.13})$$

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

$$\frac{1}{V\rho} \left(V \frac{\partial y}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial x} \right) + \frac{1}{AV} \left(V \frac{\partial y}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial x} \right) + \frac{1}{V} \frac{\partial y}{\partial x} = 0 \quad (\text{III.14})$$

Et comme :

$$\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dt} = \frac{1}{\rho} \left(V \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\partial \rho}{\partial t} \right) \quad (\text{III.15})$$

Et :

$$\frac{1}{A} \frac{dA}{dx} = \frac{1}{A} \left(V \frac{\partial A}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} \right) \quad (\text{III.16})$$

L'expression (III.14) prend la forme :

$$\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dt} + \frac{1}{A} \frac{dA}{dt} + \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (\text{III.17})$$

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

La définition suivante de son module d'élasticité K est comme suit :

$$dP = K \frac{d\rho}{\rho} \quad (\text{III.18})$$

Selon la théorie de la résistance des matériaux, la contrainte circonférentielle (latérale) pour une conduite hydraulique circulaire (élastique, constituée d'anneaux indépendants, et son épaisseur est relativement faible) (**Figure III.2**)

L'équation de comportement mécanique se réduit à :

$$\sigma = \frac{PD}{2e} \quad (\text{III.19})$$

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

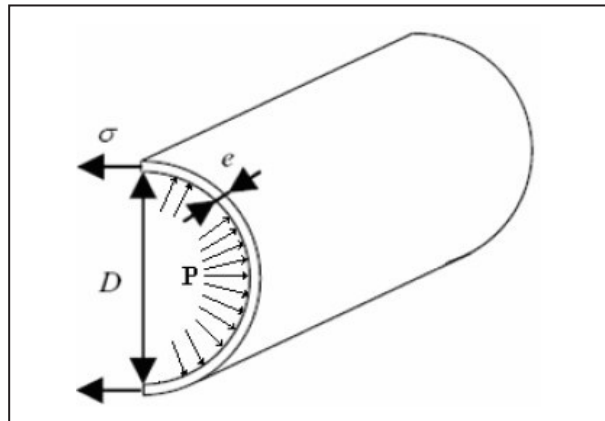


Figure III.2 : Contrainte latérale dans une conduite à paroi mince.

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

$$d\varepsilon = \frac{dR}{R} \quad (\text{III.20})$$

R étant le rayon de la conduite.

Et en introduisant le module d'élasticité E du matériau, défini par :

$$\sigma = E \varepsilon \quad (\text{III.21})$$

Cette contrainte mécanique latérale s'exprime comme suit :

$$d\sigma = E \frac{dR}{R} \quad (\text{III.22})$$

En combinant les expressions (III.19) et (III.22), 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 :

$$\frac{1}{A} \frac{dA}{dx} = \frac{D}{eE} \frac{dP}{dx} \quad (\text{III.23})$$

Ainsi, en combinant les équations (III.17), (III.18) et (III.23), on obtient l'expression suivante de l'équation de continuité :

$$\rho a^2 \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{dP}{dt} = 0 \quad (\text{III.24})$$

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

$$\rho a^2 \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial P}{\partial t} + V \frac{\partial P}{\partial x} = 0 \quad (\text{III.25})$$

a est la vitesse de propagation de l'onde de pression, définie par la relation suivante :

$$a = \sqrt{\frac{1}{\rho \left(\frac{1}{K} + \frac{D}{eE} \right)}} \quad (\text{III.26})$$

III.3.3. Equation de conservation de la quantité de mouvement ou équation de la dynamique :

En appliquant le principe de conservation de la quantité de mouvement sur un volume de contrôle (Fig. (III-3)) on peut écrire :

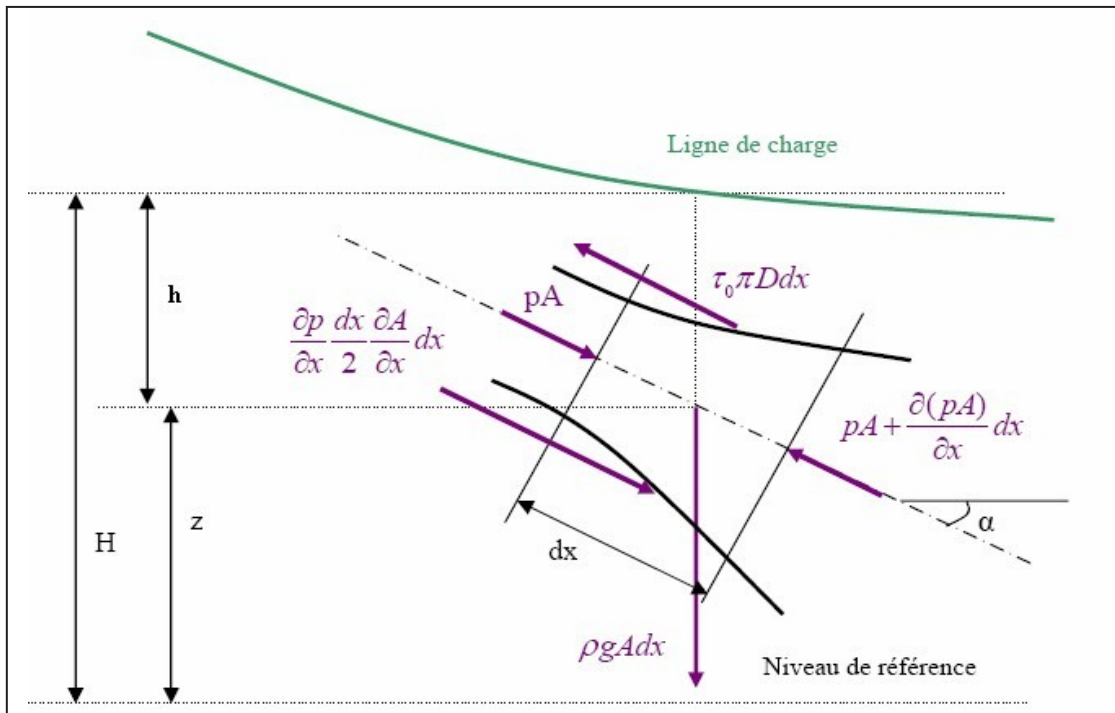


Figure III.3 : Bilan des forces exercées sur un tronçon de conduite (volume de contrôle).

$$\frac{d(mV)}{dt} = \sum_x F_x \quad (\text{III.27})$$

$$\rho A dx \frac{dV}{dt} = PA - \left(PA + \frac{\partial(PA)}{\partial x} dx \right) + \left(P + \frac{\partial P}{\partial x} \frac{dx}{2} \right) \frac{\partial A}{\partial x} dx - \tau_0 \pi D dx - g \rho A dx \sin \alpha \quad (\text{III.28})$$

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

- Les forces d'inertie.
- Les forces de pression.
- Les forces de frottements visqueuses (Fr).
- Les forces de pesanteur.

$PA - PA + \frac{\partial(PA)}{\partial x} dx + \left(P + \frac{\partial P}{\partial x} \frac{dx}{2} \right) \frac{\partial A}{\partial x} dx$: représente des forces de pression normales et latérales.

$\tau_0 \pi D dx$ représente les force de frottement.

$g \rho A dx \sin \alpha$ représente les forces de pesanteur.

τ_0 : contrainte de viscosité [N/m²].

α : angle d'inclinaison de la conduite.

D : diamètre de la conduite [m].

A : aire de section [m²]

ρ : masse volumique du fluide [kg/m³].

V : Vitesse du fluide [m/s].

La contrainte de viscosité (ou de cisaillement) peut être déterminé par l'expression suivante :

$$\tau_0 = \frac{\lambda}{8} \rho V^2 \quad (\text{III.29})$$

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

$$\frac{\partial P}{\partial x} A + \tau_0 \pi D + \rho g A \sin(\alpha) + \rho A \frac{dV}{dt} = 0 \quad (\text{III.30})$$

D'autre part, notre conduite est horizontale, donc le terme $\rho g \sin \alpha$ se réduit à zéro ($\rho g A \sin(\alpha) = 0$).

Notre équation prend la forme :

$$\rho \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial x} + 4 \frac{\tau_0}{D} = 0 \quad (\text{III.31})$$

- Les variables P, V, ρ dépendent uniquement des paramètres indépendants x et t.
- Exprimons les différentielles exactes des deux dernières équations sous la formesuivante :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \rho}{\partial x} = \frac{\rho}{K} \frac{\partial P}{\partial x} \\ \frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{\rho}{K} \frac{\partial P}{\partial t} \end{array} \right. \quad (\text{III.32})$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial A}{\partial t} = \frac{AD}{E.e} \frac{\partial P}{\partial t} \\ \frac{\partial A}{\partial x} = \frac{AD}{E.e} \frac{\partial P}{\partial x} \end{array} \right. \quad (\text{III.33})$$

L'équation de la masse (III.28) développée comme suit :

$$\rho \frac{\partial A}{\partial t} + A \frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho V \frac{\partial A}{\partial x} + \rho A \frac{\partial V}{\partial x} + AV \frac{\partial \rho}{\partial x} = 0 \quad (\text{III.34})$$

En substituant (III.22), (III.23), (III.24) on aura :

$$\rho \left(\frac{AD}{E.e} \frac{\partial \rho}{\partial t} \right) + A \left(\frac{\rho}{K} \frac{\partial \rho}{\partial t} \right) + \rho V \left(\frac{AD}{E.e} \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \rho A \frac{\partial V}{\partial x} + AV \left(\frac{\rho}{K} \frac{\partial P}{\partial x} \right) = 0 \quad (\text{III.35})$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} \left(\rho \frac{AD}{E.e} + \frac{A\rho}{K} \right) + \frac{\partial P}{\partial x} V \left(\rho \frac{AD}{E.e} + \frac{A\rho}{K} \right) + \rho A \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (\text{III.36})$$

$$\rho \left(\frac{1}{K} + \frac{D}{E.e} \right) \frac{\partial P}{\partial x} + \rho V \frac{\partial P}{\partial x} \left(\frac{1}{K} + \frac{D}{E.e} \right) + \rho \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (\text{III.37})$$

$$\rho \left(\frac{1}{K} + \frac{D}{E.e} \right) \left(\frac{\partial P}{\partial t} + V \frac{\partial P}{\partial t} \right) + \rho \frac{\partial P}{\partial x} = 0 \quad (\text{III.38})$$

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

$$\frac{\partial P}{\partial t} + V \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\rho}{\rho \left(\frac{1}{K} + \frac{D}{E.e} \right)} \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (\text{III.39})$$

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

$$a = \sqrt{\frac{1}{\rho \left(\frac{1}{K} + \frac{D}{E.e} \right)}} \quad (\text{III.40})$$

Où :

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

ρ : masse volumique.

K : module d'élasticité du liquide.

D : diamètre intérieur de la conduite (m).

e : épaisseur de la paroi (m).

E : module d'élasticité du matériau de la conduite (MPa).

Dans cette dernière expression, on remarque l'introduction des propriétés du fluide ρ , K et du matériau de la conduite D , e , E dans le calcul de la vitesse de propagation de l'onde de pression.

En générale, la vitesse du fluide est très petite par rapport à la vitesse de la propagation de l'onde et en négligeant le terme convectif, on peut écrire :

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \rho a^2 \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (\text{III.41})$$

III.3.4. Equation de conservation de l'énergie :

Les seules pertes de charges dues au frottement du fluide avec la paroi de la conduite, créent un échauffement. Cette quantité de chaleur produite reste toutefois négligeable devant la variation rapide du débit, l'évolution est considérée comme isotherme.

$$dT = 0 \quad (\text{III.42})$$

III.4. Forme réduite du système des équations de base :

III.4.1 Système d'équation final :

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

$$\begin{cases} \rho \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial x} + 4 \frac{\tau_0}{D} = 0 \\ \frac{\partial y}{\partial x} + \rho a^2 \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \end{cases} \quad (\text{III.43})$$

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

$$\begin{cases} \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial V}{\partial t} + g \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{4\tau_0}{\rho D} = 0 \end{cases} \quad (\text{III.44})$$

Ou :

H : La hauteur de pression.

g : L'accélération de la pesanteur.

Le système d'équation (III.44) est un système d'équation différentielle aux dérivées partielles du type hyperbolique.

III.4.2 Condition aux limites :

L'installation hydraulique est assimilée à une conduite avec un orifice de fuite au milieu de celle-ci, reliée à un réservoir par son extrémité amont, et à une vanne à fermeture rapide par son extrémité aval.

III.4.3. 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 cette extrémités, la pression est constante.

$$P = P_{\text{réservoir}} \quad (\text{III.45})$$

Vanne :

La loi de fermeture de la vanne est exprimée par :

$$V = V_0 \left(1 - \frac{t}{t_f}\right) \quad (\text{III.46})$$

V_0 : est la vitesse initiale du fluide.

t_f : est le temps de fermeture de vanne.

III.4.4 Modélisation mathématique au niveau de l'orifice de la fuite:

III.4.4.1 Équation de l'orifice (Torricelli):

Une fuite dans une canalisation d'un réseau de distribution peut être considérée comme un orifice. L'équation de l'orifice qui découle de l'équation de l'énergie (Bernoulli) décrit la relation du débit de fuite Q_f en fonction de la hauteur de pression H , de la section de l'orifice A et d'un coefficient de débit C_d qui représente la forme géométrique de l'orifice peut être écrite comme suit :

$$Q_f = C_d A \sqrt{2gH} \quad (\text{III.47})$$

Avec :

C_d : coefficient de débit ou de décharge.

g : l'accélération de la pesanteur.

Actuellement, les travaux de recherche sur les fuites d'eau dans les canalisations utilisent la forme générale de l'équation pour décrire la relation entre la pression et le débit de fuites :

$$Q_f = C h^{N_1} \quad (\text{III.48})$$

Avec :

C : constante de fuite.

N_1 : exposant de pression.

Cassa et Van Zyl [15] [16] ont montré que N_1 tend vers 0.5 lorsque l'écoulement est turbulent et la pression reste faible, avec une section d'orifice fixe, alors que N_1 tend vers 1.5 lorsque la pression en réseau est très grande.

D'autres travaux de recherche expérimentales ont montrés que la valeur du coefficient de débit de fuite C_d , influencé par le rapport de pression et la forme d'orifice, varie entre 0.5 et 0.8 mais seulement 10% des fuites avec C_d supérieure à 0.7

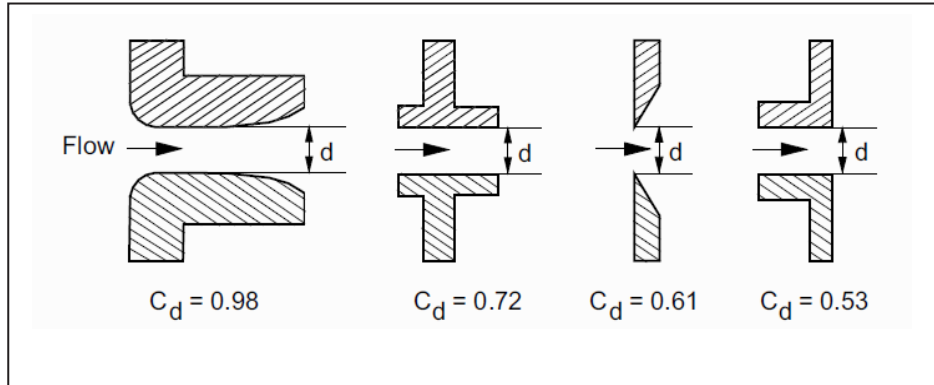


Figure III.4 : Différentes formes d'orifices et leurs coefficients de débit.

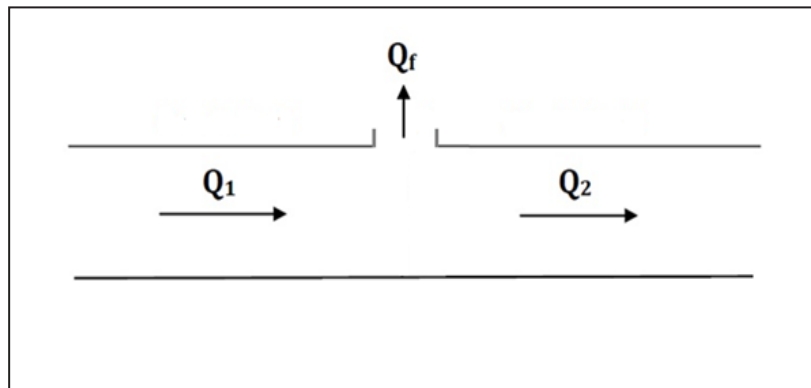


Figure III.5 : Schéma au niveau de l'orifice de la fuite.

Par application des principes physiques, on peut écrire les équations suivantes au niveau de l'orifice :

- Equation de la continuité :

$$Q_1 - Q_f - Q_2 = 0 \quad (\text{III.49})$$

- A partir de l'équation de l'énergie (Bernoulli), on aboutit à l'équation de l'orifice (Torricelli) :

$$Q_f = C_d A \sqrt{2gH}$$

Alors :

$$Q_2 = Q_1 - Q_f$$

$$Q_2 = Q_1 - C_d A \sqrt{2gH} \quad (\text{III.50})$$

Utilisant : $Q = V.S$ et $P = \rho gH$

On aboutit à :

$$V_2 S = V_1 S - C_d A \sqrt{\frac{2}{\rho} P} \quad (\text{III.51})$$

Chapitre IV

Méthode de résolution

IV.1. Introduction:

Le calcul des écoulements transitoire en charge (coup de bélier) par les méthodes numériques a beaucoup évolué dans les dernières années. Aujourd'hui, l'ingénieur concepteur n'effectue habituellement plus lui-même ce type d'analyse. En effet, la complexité des problèmes que l'on traite maintenant exige souvent l'utilisation de programmes sophistiqués de simulation. Donc, l'apparition des ordinateurs a favorisé le développement rapide de la modélisation mathématique et en conséquence la résolution des équations fondamentales des écoulements des fluides en régime transitoires par des méthodes numériques telles que :

- La méthode des caractéristiques (MC)
- La méthode des différences finies (MDF)

La MC est certainement la plus populaire et actuellement la plus utilisée. Les avantages de la MC sont une simulation correcte d'onde à front raide, une illustration simple de sa propagation, une programmation présentant peu de difficultés et une efficacité en termes de calcul.

Pour la résolution de notre système d'équations différentielles aux dérivées partielles de type hyperbolique **(III.44)**, nous avons choisis la méthode des caractéristiques couplée avec la méthode des différences finies.

IV.2. Méthode des caractéristiques [3] :

En mathématiques, la méthode des caractéristiques est une technique qui permet de résoudre les équations aux dérivées partielles hyperboliques. Particulièrement adaptée aux problèmes de transport, elle est utilisée dans de nombreux domaines tels que l'hydraulique, la mécanique des fluides ou le transport des particules en suspension.

Dans certains cas particuliers, la méthode des caractéristiques peut permettre la résolution purement analytique des 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 de propagation des ondes dans les conduites en charge.

Pour une équation aux dérivées partielles (EDP) du premier ordre, la méthode des caractéristiques consiste à rechercher des courbes (appelées « lignes caractéristiques », 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 retrouver la solution du problème original.

IV.3. Modélisation mathématique de H et V le long de la conduite :

IV.3.1. Recherche des lignes caractéristiques (racines du système d'équations) :

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.

Le système d'équations (III.44) est un system d'équations différentielles aux dérivées partielle du type hyperbolique dont les directions caractéristiques peuvent être obtenues en considérant des fonctions \mathbf{H} et \mathbf{V} le long des courbes du plan \mathbf{x}, \mathbf{t} ou ces dérivés sont indéterminés.

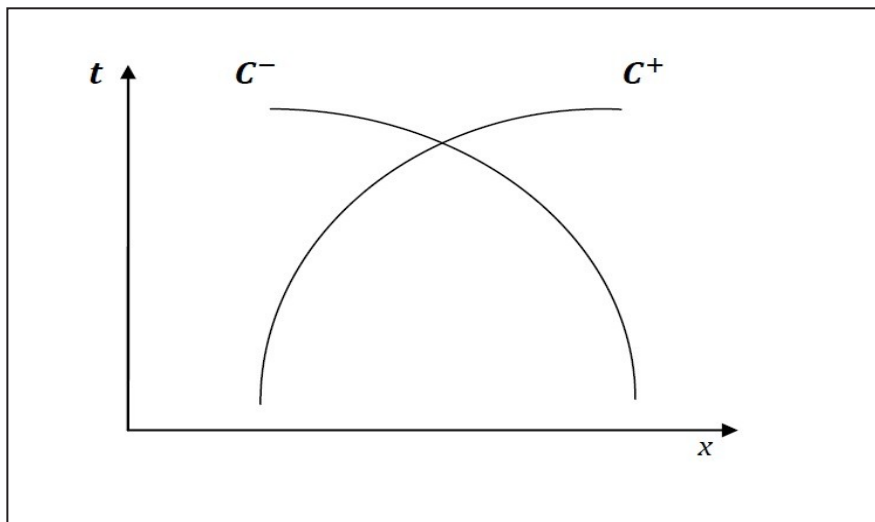


Figure IV.1 : Courbes caractéristiques

Le système d'équations différentielles aux dérivées partielles du type hyperbolique (III.44) peut s'écrire :

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

Avec : $A = -\frac{4\tau_0}{\rho D}$ est le terme de frottement.

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 suivante :

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

En écrivant le système (IV.4) sous la forme matricielle (M.X=B) on aura :

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

Calcul du déterminant, Δ , de la matrice M :

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

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

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

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

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

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

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

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

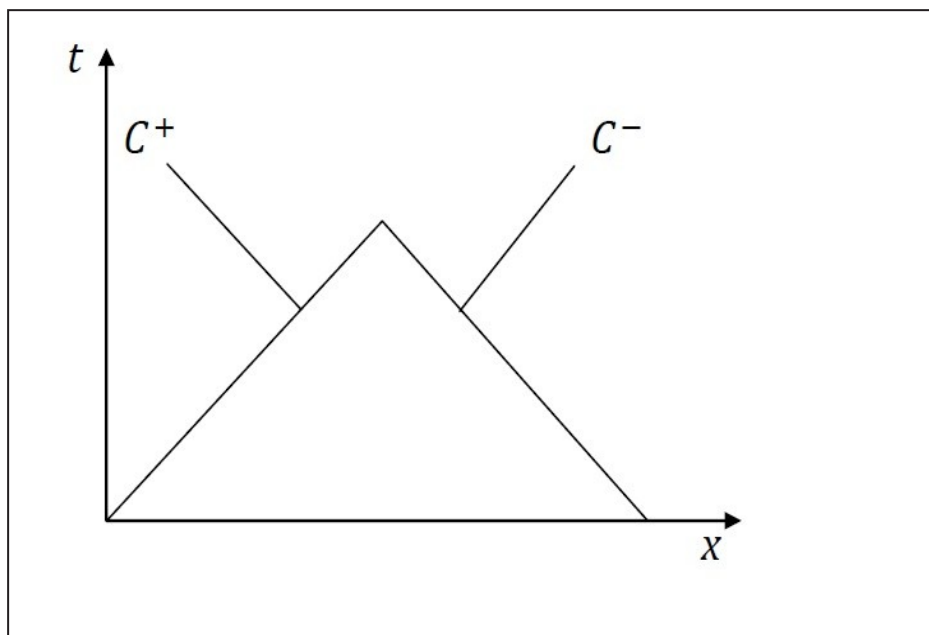


Figure IV.2 : Droites caractéristiques dans le plan (x,t).

IV.3.2. Recherche de relation de compatibilité (solutions du système d'équations):

De façon analogue, les conditions $(\Delta Hx; \Delta Ht; \Delta Vx; \Delta Vt) = 0$ nécessaires pour obtenir une solution éventuellement finie sont appelées « condition de compatibilité ».

Le long des deux droites caractéristiques, les conditions de compatibilité sont $(\Delta Hx; \Delta Ht; \Delta Vx; \Delta Vt) = 0$.

Il nous faut calculer les déterminants $(\Delta Hx; \Delta Ht; \Delta Vx; \Delta Vt)$ pour qu'on trouve les relations de compatibilité.

Il est parfois suffisant de calculer un seul déterminant par le calcul du déterminant ΔHt .

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

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

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

$$\Delta H_t = \frac{-a^2}{g} [A dx dt - g dH dt - dx dV]$$

$$\Delta H_t = 0$$

$$\Leftrightarrow A dx dt - g dH dt - dx dV = 0$$

$$A dx - g dH - \frac{dx}{dt} dV = 0 \quad (\text{IV.9})$$

Et comme :

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

L'équation (IV.9) devient donc comme suit :

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

$$\text{Avec : } A = -\frac{4\tau_0}{\rho D} \quad (\text{IV.11})$$

IV.4. Calcul de la hauteur de pression H et de la vitesse V aux points courants :

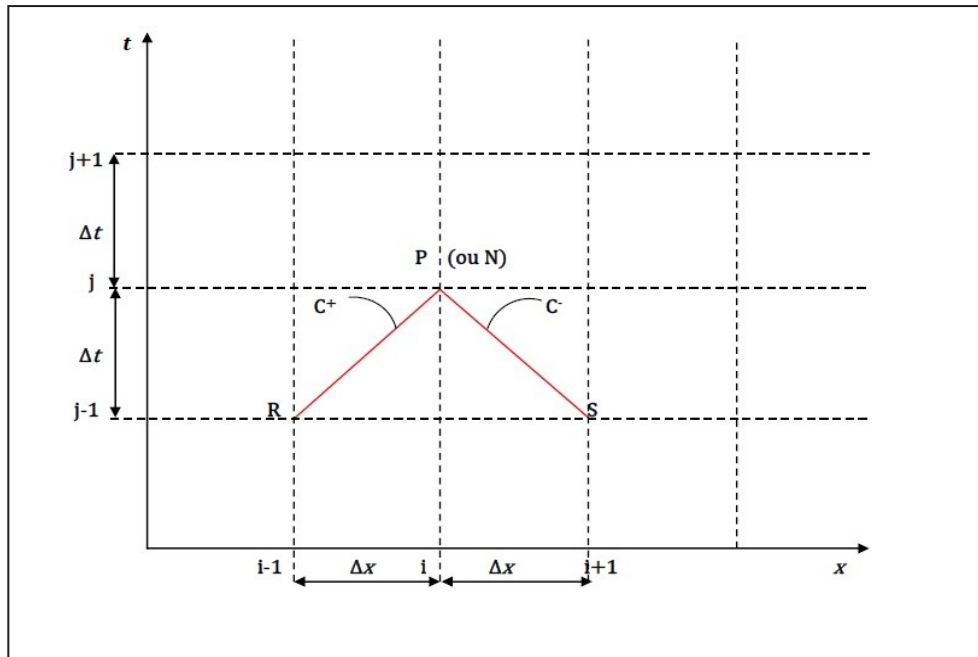


Figure IV.3 : Schéma de discrétisation et droites caractéristiques.

Le but étant de connaître à chaque instant :

- La hauteur de pression H (ou la pression) . $P = \rho gH$.
- La vitesse de l'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 actuel (t) se fait en fonction des points ($I-1$) et ($I+1$) à l'instant précédent ($t-\Delta t$).

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

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

$$\int_{R,S}^P dV \pm \frac{g}{a} \int_{R,S}^P dH + \int_{R,S}^P \frac{4\tau_0}{\rho D} dt = 0 \quad (\text{IV.12})$$

IV.4.1 Critère de stabilité du schéma numérique :

La condition de stabilité du schéma numérique est déterminée selon le critère de Courant- Friedrich, comme dans le cas des différences finies classique :

$$\Delta t \leq \frac{\Delta x}{|\pm a|} \quad (\text{IV.13})$$

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.4.2 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^+ :

$$\int_R^P dV + \frac{g}{A} \int_R^P dH + \int_R^P \frac{4\tau_0}{\rho D} dt = 0 \quad (\text{IV.14})$$

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

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

IV.4.3 Calcul de H et V (intégration aux points courants) :

Au niveau du point courant :

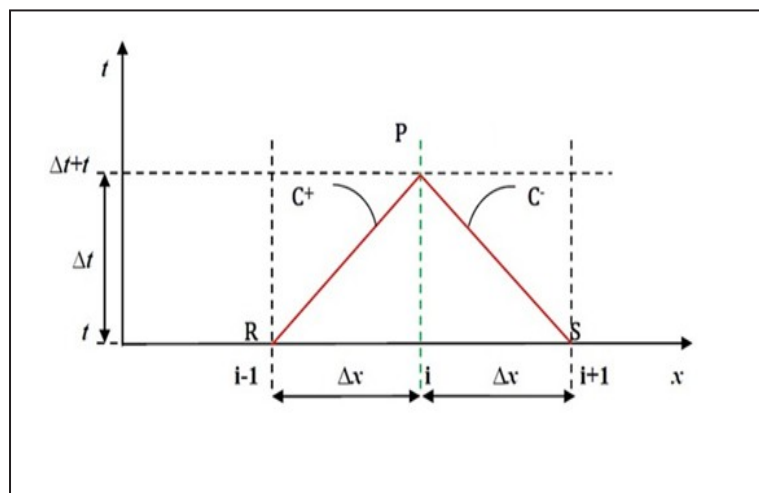


Figure IV.4 : Schéma numérique du point courant P.

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

$$\tau_0 = \frac{\lambda}{8} \rho V^2$$

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

$$C^- : (V_P - V_S) + \frac{1}{\rho a} (P_P - P_S) + \frac{\lambda}{2D} V_S |V_S| \Delta t = 0 \quad (\text{IV.17})$$

On multiplie deux équations fois (ρa) on obtient :

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

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

Arrangement :

$$C^+ : \rho a V_P + P_P = \rho a V_R + P_R - \rho a \frac{\lambda \Delta t}{2D} V_R |V_R| = CP$$

$$C^- : \rho a V_P - P_P = \rho a V_S + P_S - \rho a \frac{\lambda \Delta t}{2D} V_S |V_S| = CM$$

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

On aura :

$$C^+ : B V_P + P_P = B V_R + P_R - \rho \frac{\lambda}{2D} dx V_R |V_R| = CP \quad (\text{IV.18})$$

$$C^- : B V_P - P_P = B V_S + P_S - \rho \frac{\lambda}{2D} dx V_S |V_S| = CM \quad (\text{IV.19})$$

$$\Rightarrow 2P_P = CP - CM$$

$$P_P = \frac{CP - CM}{2} \quad (\text{IV.20})$$

$$(\text{IV.17}) + (\text{IV.18}) \Rightarrow 2B V_P = CP + CM$$

$$\Rightarrow V_P = \frac{CP + CM}{2B} \quad (\text{IV.21})$$

IV.5. Conditions aux limites :

Pour la simulation numérique et les différentes applications, nous avons utilisé l'installation hydraulique schématisée sur la **Figure IV.4**. On a deux conditions aux extrémités (amont et aval) et une condition au niveau de l'orifice de fuite.

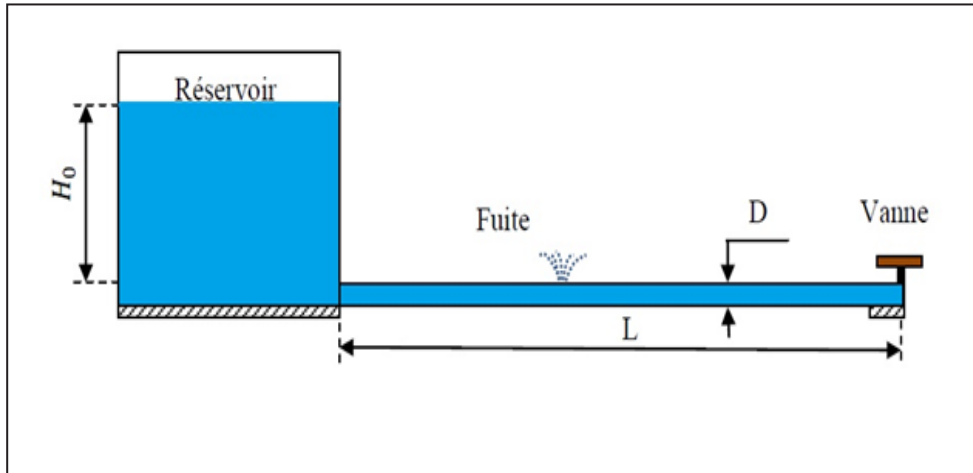


Figure IV.5 : Schéma de l'installation.

1-Extrémité amont (réservoir) :

En ce point, nous avons une seule équation qui est l'équation de compatibilité le long de la caractéristique C^- ; il nous faut une autre équation c'est la condition imposée (la hauteur de pression au niveau du réservoir est supposée constante, comme le montre la **Figure IV.5**).

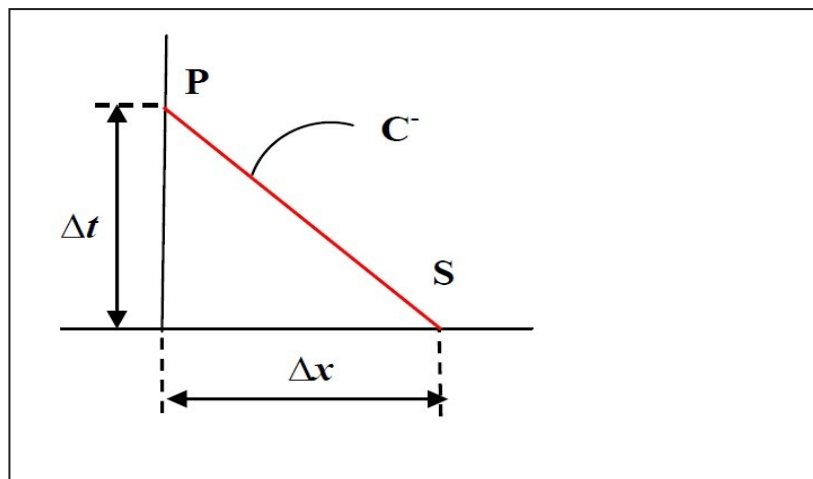


Figure IV.6 : Schéma numérique au niveau de l'extrémité amont.

$$H_p = H_{Reservoir}$$

$$C^-: (V_P - V_S) - \frac{g}{a} (H_P - H_S) + \frac{4}{\rho D} \tau_{0S} \Delta t = 0 \quad (\text{IV.22})$$

2- Extrémité avale (vanne) :

Ici, on a une équation le long de la caractéristique C^+ , et une autre équation imposée c'est la loi de fermeture de la vanne comme le montre la **Figure IV.6**.

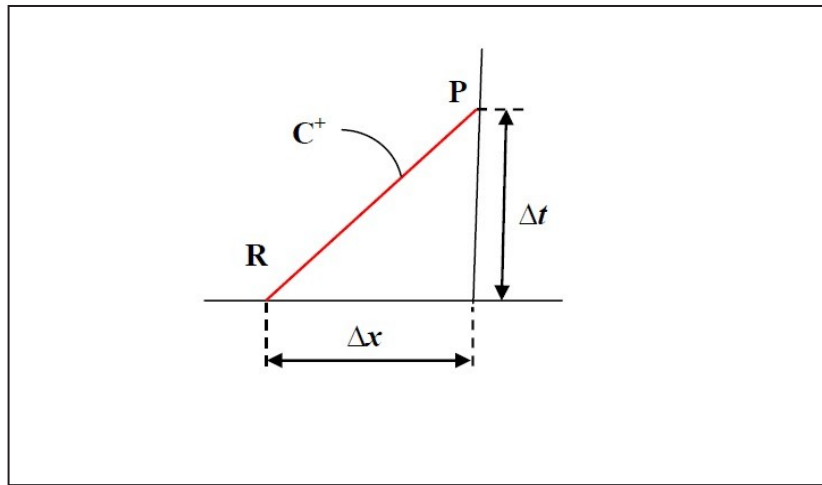


Figure IV.7 : Schéma numérique au niveau de l'extrémité avale.

$$V_{PS} = V_0 \left(1 - \frac{t}{t_f} \right) \quad t < t_f$$

$$V_{PS} = 0 \quad t > t_f$$

$$(V_P - V_R) - \frac{g}{a} (H_P - H_R) + \frac{4}{\rho D} \tau_{0R} \Delta t = 0 \quad (\text{IV.23})$$

Ou :

t_f : est le temps de la fermeture de la vanne.

V_{PS} : est la vitesse à l'extrémité aval.

IV.6. Modélisation numérique au niveau de l'orifice de fuite :

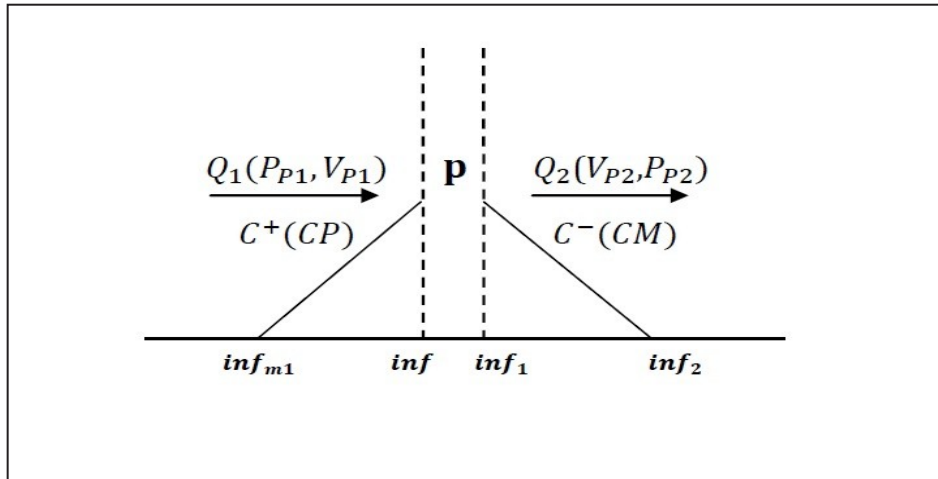


Figure IV.8 : Schéma numérique au niveau de l'orifice de fuite.

Au niveau de l'orifice de fuite nous avons quatre inconnues, à savoir la pression P_{P1} P_{P2} et les débits Q_{P1} , Q_{P2} (de part et d'autre de l'orifice), comme le montre la **Figure IV.8** .

$$H_{P1} = H_{P2} = H_P \quad (P_{P2} = P_{P1} = P_P)$$

$$Q_{P1} = Q_{P2} + Q_f \Rightarrow Q_{P2} = Q_{P1} - Q_f$$

$$C^-: V_P + \frac{g}{a} H_P = CM \quad (IV.24)$$

$$C^+: V_P + \frac{g}{a} H_P = CP \quad (IV.25)$$

$$Q_2 = Q_1 - Q_f$$

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

$$C^-: V_P + \frac{g}{a} H_P = CM$$

$$C^+: V_P + \frac{g}{a} H_P = CP$$

$$BV_{P1} + P_P = CP \quad (IV.26)$$

$$BV_{P2} + P_P = CM \quad (IV.27)$$

Comme : $Q = V.S$ et $P = \rho gH$

$$\text{Donc : } V_{P2}S = V_{P1}S - C_d A_f \sqrt{\frac{2}{\rho}} \sqrt{P_P} \quad (\text{IV.28})$$

$$\text{De l'équation (IV.26)} \Rightarrow V_{P1} = \frac{CP - P_P}{B}$$

$$\text{De l'équation (IV.27)} \Rightarrow V_{P2} = \frac{CM - P_P}{B}$$

En substituant (IV.31) et (IV.32) dans l'équation (IV.30) on aura :

$$\frac{S}{B}(CM + P_P) = \frac{S}{B}(CP + P_P) - A_2 \sqrt{P_P}$$

Avec :

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

$$A_2 = C_d A_f \sqrt{\frac{2}{\rho}}$$

$$A_3 = 8 * A_1 * A_1$$

$$A_4 = A_2 * A_2$$

Donc il vient :

$$A_1(CM + P_P) - A_1(CP - P_P) + A_2 \sqrt{P_P} = 0 \quad (\text{IV.29})$$

$$\text{On pose : } X = \sqrt{P_P} \Rightarrow X^2 = P_P$$

Donc :

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

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

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

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

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

$$\begin{cases} V_{P1} = (CP - P_P)/B \\ V_{P2} = (CM + P_P)/B \\ Q_{P1} = V_{P1} * S \\ Q_{P2} = V_{P2} * S \\ Q_f = A_2 \sqrt{P_P} \end{cases} \quad (\text{IV.30})$$

IV.7. Conditions initiales (régime permanent) :

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

a) Au point courant :

$$V_{j(0,x)} = V_{j(0,0)} \quad (\text{IV.31})$$

$$P_{j(0,x)} = P_{j(0,0)} - \frac{\lambda V_j^2}{2D} x \quad (\text{IV.32})$$

b) Au niveau de la fuite :

$$Q_{1(0,L-x)} = Q_{2(0,0)} + Q_{f0} \quad (\text{IV.33})$$

Chapitre V

Application du modèle de calcul et résultats

V.1. Introduction :

Pour montrer l'influence du coefficient de débit C_d de l'orifice de fuite sur les différents paramètres de l'écoulement du fluide en conduite, une mise au point d'un code de calcul écrit en langage FORTRAN, puis une simulation numérique ont été réalisées.

V.2. Définition des paramètres de l'installation :

a) Configuration de l'installation hydraulique :

La figure (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 en amont.
- Une conduite.
- Une vanne en aval.
- Un orifice (de fuite) situé au milieu de la conduite ($x=L/2$).

b) Le fluide utilisé :

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

- Un module d'élasticité $K=2.1$ GPa
- La masse volumique $\rho = 1000$ kg/m³
- La viscosité cinématique $\nu = 10^{-6}$ m²/s

c) les propriétés physiques de l'installation :

Les propriétés physiques de l'installation sont les suivantes :

- La hauteur de pression au réservoir $H_0 = 50$ m
- Le débit initial de $Q_0 = 20$ l/s
- Le débit de fuite (à travers l'orifice de fuite) $Q_f = 2$ l/s
- Le coefficient de frottement de Darcy $\lambda = 0.018$
- La vitesse initiale de l'écoulement du fluide $V_0 = 0.274$ m/s
- La longueur de la conduite $L = 1600$ m
- Le diamètre de la conduite $d = 30.48$ cm
- L'épaisseur de la conduite $e = 6$ mm
- Diamètre de l'orifice de fuite $d_f = 1.15$ cm

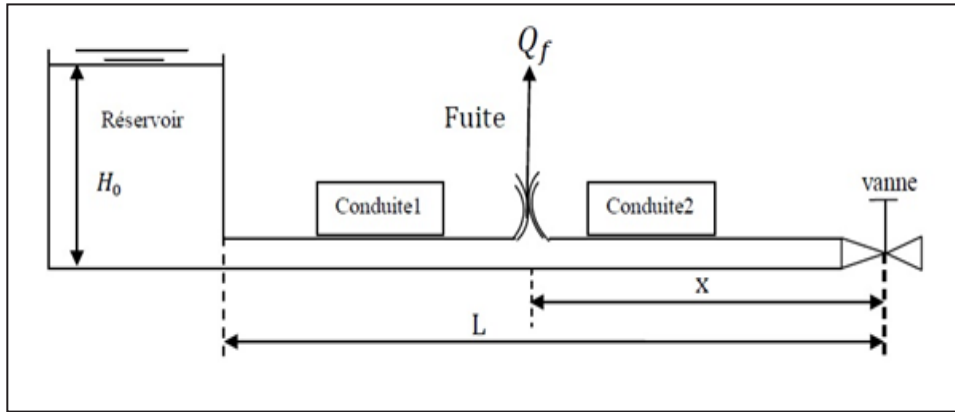


Figure V.1 : Schéma de l'installation hydraulique (réservoir–conduite–vanne) en présence d'une fuite.

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

$$H_i = H_{res} - \lambda \frac{\Delta x}{d} \frac{v^2}{2g} \quad (V.1)$$

V.3. Application et résultats de calcul :

V.3.1. Organigramme :

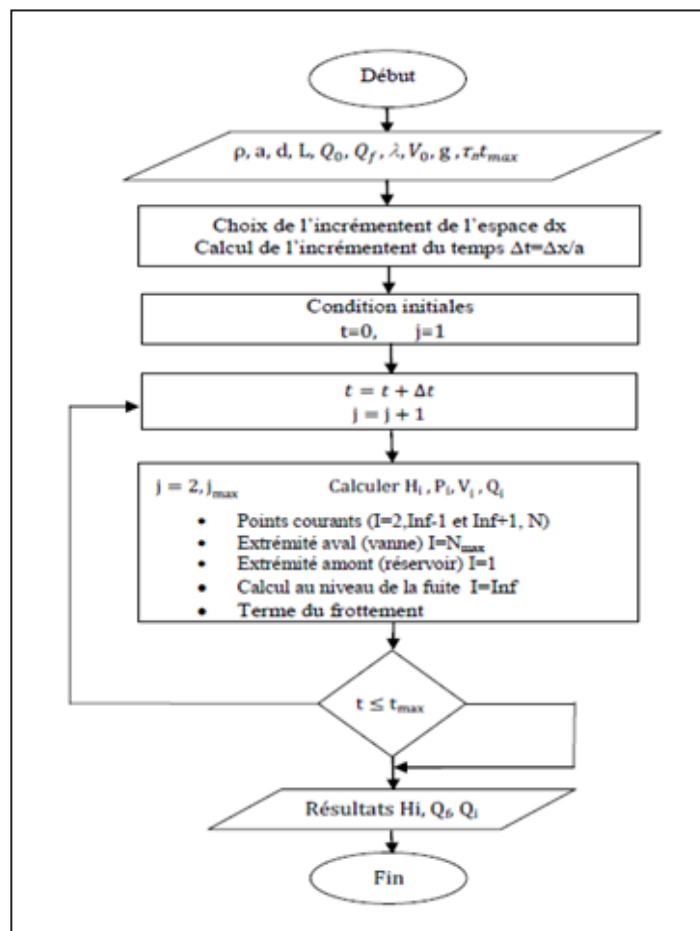


Figure V.2 : Organigramme de calcul

V.3.2 Résultats pour $C_d=0.62$, $C_d=0.65$ et $C_d=0.70$:

V3.2.1 calcul des paramètres physiques :

Dans cette partie, sur la fig. (V-3, 4 et 5), on donne, pour les trois valeurs du coefficient de débit C_d (0.62 ; 0.65 et 0.70), la hauteur de pression au niveau de la vanne, le débit principal au milieu de la conduite et le débit de fuite au niveau de l'orifice ($x=800$ m). Pour la valeur du module d'élasticité d'une conduite en acier $E=200$ GPa, on a déterminé la vitesse de l'onde de pression (onde acoustique) $a=1170.25$ m/s .Pour un pas d'espace $\Delta x = 10m$ correspondant à un nombre de discrétisation $n=160$, le pas de temps est $\Delta t = 8.5451 \cdot 10^{-3}s$. Le nombre de Reynolds = 83588.27 , ce qui correspond a un régime turbulent.

```

0.62
ak= 2.10000000E+09 E= 1.99999996E+11 AF1= 5.60519386E-45 AF= 1.0381
6252E-04
inf= 80 v2= 0.246815786 v1= 0.274239749
a= 1170.25879 Re= 83588.2734 alambda= 1.85844954E-02 q2=
1.80000011E-02 q1= 2.00000014E-02 qf= 2.00000009E-03
dx= 10.0000000 dt= 8.54511838E-03 v0 0.274239749 Tmax= 16.406
6277 jmax= 1920
Tonde= 2.73443794 Tp= 5.46887589 Cd= 0.620000005

```

Sur la fig. (V-3) on donne la hauteur de pression au niveau de la vanne. Après une fermeture de vanne d'un temps égale à $T_f = 2$ ms, la hauteur de pression augmente jusqu'à $H = 79.1m$ ($P= 7.76$ bar).

Sur le premier palier de surpression, on observe une petite diminution de pression au temps $t = 1.38s$ correspondant à l'arrivée de l'onde de pression réfléchi au niveau de l'orifice ($t=2x/a$), x est la distance séparant la position de l'orifice de fuite par rapport à la vanne.

La pression diminue encore jusqu'à 21.96 m au temps correspondant à un aller-retour d'onde $t = 2,74$ s ($t=2L/a$). Dans le premier palier de basse pression, on observe aussi une petite augmentation de pression au temps $t = 4.12$ s ($H=22.91$ m) correspondant à la réflexion de l'onde au niveau de l'orifice de fuite. En suite la pression augmente au temps $t=5,46$ s jusqu'a $H = 76.69$ m pour retrouver quasiment les mêmes valeurs qu'au début et le phénomène se répète avec une période $T= 4L/a = 5,46$ s. Dans ces conditions de fonctionnement de l'installation, on observe qu'une petite différence des trois courbes en amplitude. Par contre sur la figure V.5, on observe un décalage en amplitude sur les différentes courbes du débit de fuite a travers l'orifice correspondent aux différentes valeurs du coefficient de débit. Mais ces courbes reste en phase dans le temps de périodicité $T= 4L/a = 5,46$ s.

Pour un coefficient de débit $C_d=0.62$ le débit de fuite oscille entre une valeur minimale 1.34 litre/s et maximale 2.53 litre/s, tandis que le débit principal dans la conduite (au point milieu de la conduite) oscille entre une valeur minimale -15.38 l/s et maximale 20.05 litre/s,. Pour $C_d=0.65$ le débit de fuite oscille entre 1.41 litre/s et 2.65 litre/s, alors que le débit au milieu de la conduite oscille entre -15.38 litre/s et 20.05 litre/s. Pour $C_d=0.70$ le débit de fuite oscille entre 1.53 litre/s et 2.85 litre/s alors que le débit dans la conduite oscille entre -14.83 litre/s et 20.13 litre/s.

Dans les conditions de fonctionnement de cette installation et sur un temps égale a la période du phénomène $T=5.47$ s, les quantités d'eau perdue sont :

C_d	0.62	0.65	0.70
Q (litres)	10.85	11.37	12.25

Ce qui montre que les quantités d'eau perdue augmentent avec l'augmentation de coefficient de débit.

Globalement, on remarque un amortissement des signaux de pression ainsi que des débits (figures V.3, V.4 et V.5), ceci est du aux effets des frottements dans la conduite. L'allure générale des courbes des débits est semblable à celle de la hauteur de pression.

a) Hauteur de pression au niveau de la vanne :

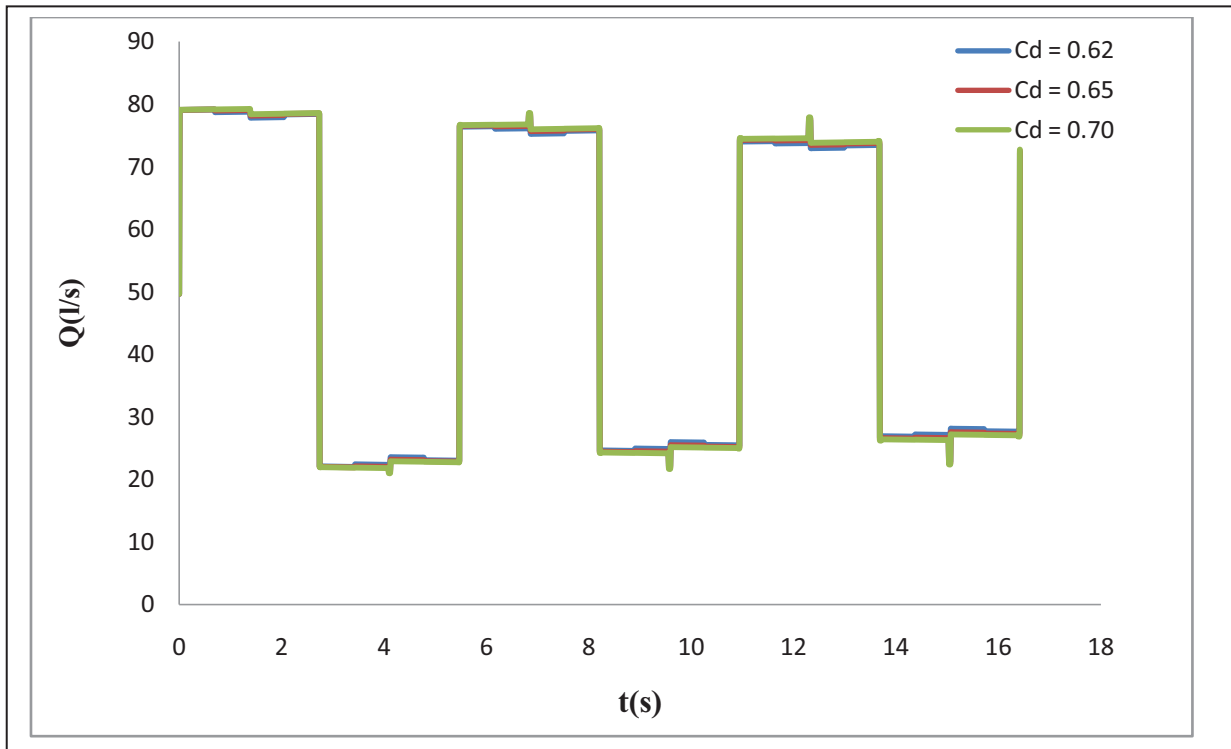


Figure V.3 : Hauteur de pression au niveau de la vanne.

b) Débit au milieu de la conduite :

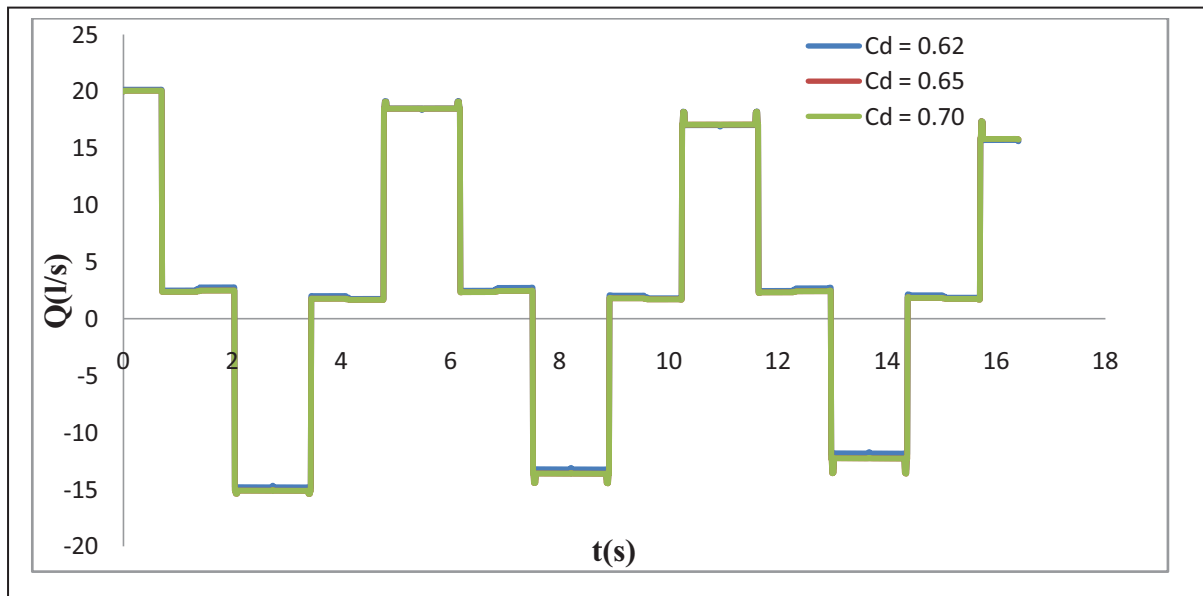


Figure V.4 : débit au milieu de la conduite.

c) Débit de fuite :

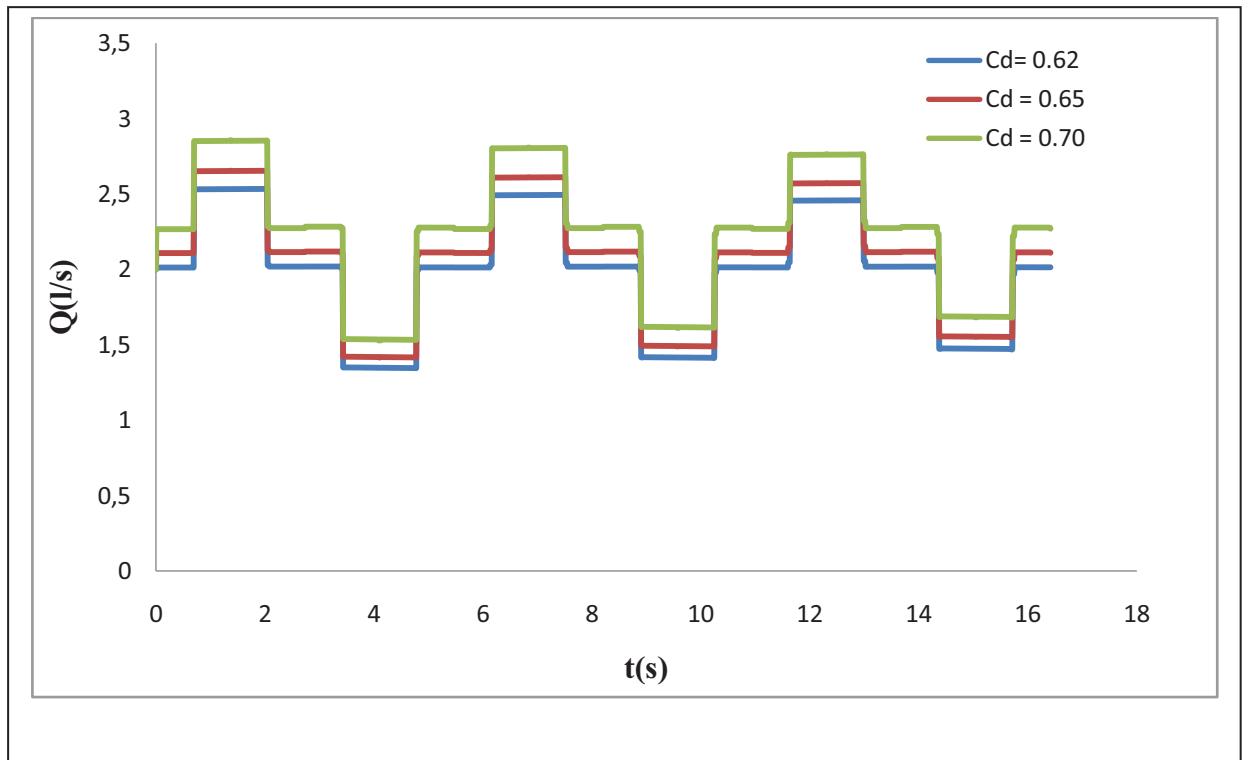


Figure V.5 : débit de la fuite.

Conclusion :

Dans les réseaux de distribution d'eau, une grande quantité d'eau se perd pendant le transport entre les stations de pompage et les points de consommation. Le volume perdu est généralement de 20 à 30 % de la quantité produite. Les causes des fuites peuvent être la corrosion, les défauts des matériaux, une mauvaise installation, une pression d'eau excessive, les coups de bélier, les mouvements de terrain, ainsi que les vibrations et les charges excessives dues à la circulation.

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

La résolution de ce système d'équations différentielles aux dérivées partielles de type hyperbolique a été faite en utilisant la méthode des caractéristiques couplée à celle de différence finie. Une modélisation mathématique et numérique spécifique au niveau de l'orifice de fuite a été réalisée. Cette modélisation montre la relation entre le débit de fuite, la pression et le coefficient de débit en rapport avec la forme géométrique de l'orifice

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

Dans les conditions de fonctionnement de cette installation et sur un temps égale à la période du phénomène $T=5.47$ s, les quantités d'eau perdue augmentent avec l'augmentation de coefficient de débit.

Bibliographie :

- [1] P. Klingel, A. Knobloch « Guide pour la réduction des pertes en eau », Institute for Water and River Basin Management (IWG).
- [2] E. HADJ Taïeb, transient analysis for leak detection in pipe with fluid-structure interaction.
- [3] E. Benjamin Wylie et Vector L. Streeter, "Fluid Transients", FEB Press, Michigan, 1990.
- [4] Ebacher, G., Besner, M.C., Allard, D. and Prévost, M. (2010a) Public health risks induced from low pressure events in water networks: Estimates based on transient recordings and model outputs, Savannah, GA.
- [5] L. Jonsson, "Leak detection in pipelines using hydraulic transients", université de Lund Suède.
- [6] Tingchao Yu, Xiangqiu Zhang, Iran E. Lima Neto, Tuqiao Zhang, Yu Shao and Miaomiao Ye, "Impact of Orifice-to-Pipe Diameter Ratio on Leakage Flow".
- [7] DONALD C. RENNELS et HOBART M. HUDSON, « PIPE FLOW A Practical and Comprehensive Guide ».
- [8] GUO Xin-lei, YANG Kai-lin, LI Fu-tian, WANG Tao, FU hui, "Analysis of first transient pressure oscillation for leak detection in a single pipeline".
- [9] Dídia Covas et Helena Ramos, "Case Studies of Leak Detection and Location in Water Pipe Systems by Inverse Transient Analysis".
- [10] A Haghighi, D Covas, H Ramos, "Modified inverse transient analysis for leak detection of pressurized pipes".
- [11] Pr. Dr.-Ing. Peter Beater, "Pneumatic Drives, System Design, Modeling and Control 2006".
- [12] ZIANI Salim, DJEMILI Abdelouaheb, « Influence du matériau de la conduite et du terme de frottement sur les écoulements transitoires en présence d'une fuite », PFE département génie mécanique UBM Annaba, juin 2016.

[13] GHERIS Hanene, DJEMILI Abdelouaheb, « Etude de l'influence de la vitesse initiale sur le débit de fuite en écoulement transitoire », PFE département génie mécanique UBM Annaba, 2021.

[14] A. K. TRIKHA, “An Efficient Method for Simulating Frequency-Dependent Friction in Transient Liquid Flow”.

[15] A. M. Cassa, J. E. van Zyl, « Predicting the leakage exponents of elastically deforming cracks in pipes.” *Procedia Engineering* 70 (2014) 302 – 310

[16] Cassa AM, Van Zyl JE, 2013. Predicting the head-leakage slope of cracks in pipes subject to elastic deformations. *Journal of Water Supply Research and Technology – AQUA* 62(4), 214–223.